



**UNIVERSIDAD VERACRUZANA**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
CONSTRUCCIÓN Y EL HÁBITAT  
REGIÓN VERACRUZ  
P O S G R A D O  
PROYECTO DE INTERVENCIÓN PROFESIONAL  
MODALIDAD  
TESIS**

**“Análisis aerodinámico de una plataforma semi-sumergible de  
producción de hidrocarburos”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA APLICADA**

**PRESENTA:**

**Ing. Nick Alejandro Salazar Pascual**

**DIRECTOR DEL PROYECTO:**

**Mtro. José Hernández Hernández**

**CODIRECTORES DEL PROYECTO:**

**Dr. Joel Sánchez Mondragón**

**Dr. Aldo Roberto Cruces Girón**

**BOCA DEL RÍO, VERACRUZ.**

**DICIEMBRE 2018**

## **Agradecimientos**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de posgrado que me otorgó para realizar la Maestría en Ingeniería Aplicada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana.

## Resumen

El presente proyecto tuvo como objetivo efectuar el análisis aerodinámico del área expuesta al viento de una plataforma semi-sumergible de producción de hidrocarburos para operar en el Golfo de México, utilizando como herramienta la dinámica de fluidos computacionales (CFD por sus siglas en inglés *Computational Fluid Dynamics*). Para el análisis se consideraron condiciones extremas de viento, ya que este tipo de plataformas permanecen operando en el sitio y quedan expuestas a fuertes solicitaciones como huracanes y tormentas de invierno.

Se utilizó el software ANSYS Fluent para realizar las simulaciones obteniendo fuerzas y coeficientes de arrastre de la plataforma semi-sumergible. La geometría de la plataforma se modeló con ANSYS DesignModeler a partir de las dimensiones de la plataforma semi-sumergible de producción Na-Kika, la cual se encuentra operando en el Golfo de México a 225 km del suroeste de Nueva Orleans, en un tirante de agua de 1932 m aproximadamente. La geometría para el análisis aerodinámico se tomó a escala real, posteriormente se realizó el túnel de viento virtual tomando en cuenta las recomendaciones de ANSYS Fluent para un adecuado desarrollo del flujo del fluido.

Para la malla del dominio del fluido se utilizó ANSYS Meshing, se realizaron varios tipos de mallado con el fin de llevar a cabo un análisis de sensibilidad de malla. Todas las mallas realizadas se efectuaron manteniendo una buena calidad de acuerdo con las recomendaciones de ANSYS Fluent. Los elementos creados fueron de tipo tetraedro, produciendo mallas hasta de 20 millones de elementos para la malla óptima.

El análisis que se llevó a cabo fue en estado estacionario, teniendo como velocidad de entrada en el túnel de viento virtual de 70 m/s, la cual es la velocidad inicial de un huracán categoría 5. Se varió la incidencia del viento en tres direcciones:  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ . Se utilizó un modelo de turbulencia  $k - \omega SST$ , el cual se adapta a nuestro problema ya que se trabajó con un flujo turbulento teniendo un número de Reynolds de  $3.715 \times 10^8$ .

Una vez realizadas las simulaciones, se obtuvieron perfiles de presión y velocidad, así como líneas de flujo interactuando con la estructura, así mismo se obtuvieron las fuerzas de arrastre, sustentación y laterales para los diferentes tipos de mallado que se llevaron a cabo.

Las fuerzas mas criticas se presentaron en una incidencia de  $45^\circ$ , generándose una fuerza de arrastre de  $1.500E+07$  N y una fuerza de sustentación de  $8.56E+06$  N.

## Abstract

This project aims to perform the aerodynamic analysis of the area exposed to the wind of a semi-submersible hydrocarbon production platform to operate in the Gulf of Mexico, using as a tool the Computational fluid dynamics (CFD). For the analysis, extreme wind conditions were considered, since this type of platforms keep operating on the site and are exposed to strong demands such as hurricanes and winter storms.

ANSYS Fluent software was used to perform the simulations obtaining drag forces and drag coefficients of the semi-submersible platform, the geometry of the platform was modeled with ANSYS DesignModeler from the dimensions of the semi-submersible platform Na-Kika production, which is operating in the Gulf of Mexico 225 kilometers southwest of New Orleans, in a water depth of 1932 m approximately. The geometry for the aerodynamic analysis was taken on a real scale, then the virtual wind tunnel was built taking into account the ANSYS Fluent software recommendations for an adequate development of the fluid flow.

For the mesh of the fluid domain ANSYS Meshing was used, several types of meshing were carried out to perform a mesh sensitivity analysis, all meshes were able to maintain a good mesh quality in accordance with the ANSYS Fluent recommendations. Tetrahedral was the element used to build all meshes, obtaining meshes of up to 20 million of elements for the optimal mesh.

The analysis that carried out was in steady state, having a speed of entrance in the virtual wind tunnel of 70 m/s, which is the initial velocity of a category 5 hurricane, the incidence of the wind was varied in three directions: 0 °, 22.5 ° and 45 °. The turbulence model used was  $k - \omega SST$ , which adapts to our problem as we worked with a turbulent flow with a Reynolds number of  $3.715 \times 10^8$ .

Once the simulations were performed, pressure and velocity profiles were obtained, as well as flow lines interacting with the structure, likewise the drag forces, lift forces and lateral forces were obtained for the different types of mesh that were carried out.

The most critical forces were presented in an incidence of 45 °, generating a drag force of  $1,500E + 07$  N and a lift force of  $8.56E + 06$  N.

## CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	14
1.3 FACTIBILIDAD DEL PROYECTO .....	14
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN LITERARIA.....</b>	<b>15</b>
2.1 PLATAFORMAS SEMI-SUMERGIBLES.....	15
2.1.1 CLASIFICACIÓN.....	16
2.2 AERODINÁMICA EN ESTRUCTURAS COSTA AFUERA.....	19
2.2.1 TIPOS DE FLUJOS .....	25
2.2.2 PARÁMETROS ADIMENSIONALES .....	27
2.2.3 TÉCNICA DE MODELADO .....	29
2.3 ANÁLISIS AERODINÁMICO EN ESTRUCTURAS COSTA FUERA.....	30
2.4 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) .....	32
2.4.1 TURBULENCIA Y SU MODELADO.....	33
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>42</b>
3.1 HIPÓTESIS .....	42
3.2 ANÁLISIS AERODINÁMICO USANDO ANSYS FLUENT .....	42
3.3 CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA Y EL MODELADO DEL DOMINIO DEL CASO DE ESTUDIO.....	44
3.4 DISCRETIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA Y EL DOMINIO DENTRO DE FLUENT (MALLADO).....	51
3.5 DEFINICIÓN DE LA FÍSICA DEL MODELO (CONDICIONES DE FRONTERA Y RESTRICCIONES).....	56
3.6 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA CON ANSYS FLUENT.....	56
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....</b>	<b>58</b>
4.1 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS EN EL POST-PROCESADOR .....	58
4.1.1 PRESIONES Y VELOCIDADES CON INCIDENCIA DE VIENTO DE 0° .....	58
4.1.2 PRESIONES Y VELOCIDADES CON INCIDENCIA DE VIENTO DE 22.5° .....	67
4.1.3 PRESIONES Y VELOCIDADES CON INCIDENCIA DE VIENTO DE 45° .....	69
4.2 FUERZAS DE ARRASTRE, FUERZAS DE SUSTENTACIÓN Y FUERZAS LATERALES .....	72
4.3 RESIDUALES .....	77
4.4 COMPARACIÓN DE LA FUERZA DE ARRASTRE POR CFD Y EL CÁLCULO ANALÍTICO.....	78
4.5 COSTO COMPUTACIONAL.....	78

**CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS..... 80**

5.1 CONCLUSIONES..... 80

5.2 TRABAJOS FUTUROS..... 82

## *Lista de figuras*

FIGURA 2.1. COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE (PALLANICH, 2017). .....	15
FIGURA 2.2. NÚMERO DE SISTEMAS FLOTANTES DE PRODUCCIÓN (OFFSHORE MAGAZINE POSTER & MAPS, 2017). .....	16
FIGURA 2.3. PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE DE PONTONES GEMELOS (OFFSHORE ENERGY TODAY STAFF, 2018). .....	17
FIGURA 2.4. PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE DE PONTONES EN FORMA DE ANILLO (YAO-LEE ET AL., 2012). .....	18
FIGURA 2.5. NÚMERO DE PLATAFORMAS DAÑADAS Y DESTRUIDAS POR HURACANES DESDE EL 2004 AL 2008 (ZHANG ET AL., 2010). .....	22
FIGURA 2.6. FLUJO LAMINAR, DE TRANSICIÓN Y TURBULENTO (CENGEL & CIMBALA, 2012). .....	26
FIGURA 2.7. LAS TRES REGIONES DE CAPA LÍMITE (NEBENFUHR, 2010). .....	37
FIGURA 2.8. DIFERENTES ENFOQUES PARA MODELAR EL FLUJO CERCA DE LA PARED . .....	39
FIGURA 2.9. LAS FUNCIONES DE INTERCONECTIVIDAD DE LOS TRES ELEMENTOS PRINCIPALES DENTRO DE UN MARCO DE ANÁLISIS DE CFD (TU ET AL., 2018). .....	40
FIGURA 3.1. DOMINIO DE FLUIDO DIVIDIDO EN VOLÚMENES DE CONTROL MÁS PEQUEÑOS (ANSYS TRAINING 2013). .....	42
FIGURA 3.2. PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE NA-KIKA (BRITISH PETROLEUM, 2018). .....	45
FIGURA 3.3. VISTA DE PLANTA DEL CASCO DE LA PLATAFORMA. ....	45
FIGURA 3.4. VISTA DE PERFIL DEL CASCO DE LA PLATAFORMA. ....	46
FIGURA 3.5. VISTA DE PLANTA DE LA SUPERESTRUCTURA. ....	47
FIGURA 3.6. VISTA DE PERFIL DE LA SUPERESTRUCTURA. ....	47
FIGURA 3.7. VISTA ISOMÉTRICA DEL MODELO DE LA PLATAFORMA SIMPLIFICADA EN 3D. ....	48
FIGURA 3.8. ÁREA EXPUESTA AL VIENTO - OBRA MUERTA (SCHLUMBERGER, 2018) .....	48
FIGURA 3.9. VISTA ISOMÉTRICA DEL ÁREA EXPUESTA AL VIENTO DE LA PLATAFORMA EN 3D PARA EL ANÁLISIS AERODINÁMICO. ....	49
FIGURA 3.10. DIMENSIONES MÍNIMAS REQUERIDAS PARA EL TÚNEL DE VIENTO VIRTUAL RECOMENDADO POR ANSYS. ....	50
FIGURA 3.11. DIMENSIONES DEL TÚNEL VIRTUAL PARA EL CASO DE ESTUDIO (DOMINIO). .....	50
FIGURA 3.12. MALLA DE TODO EL DOMINIO Y LA GEOMETRÍA DE LA PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE. ....	53
FIGURA 3.13. MALLADO 5 (MALLA ÓPTIMA) SOBRE LA GEOMETRÍA DE LA PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE, INCIDENCIA DE 0° ...	53
FIGURA 3.14. ACERCAMIENTO DE LA MALLA ÓPTIMA EN LOS SUBDOMINIOS 1 Y 2 DE LA PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE. ....	54
FIGURA 3.15. ACERCAMIENTO DE LA MALLA EN LA CUBIERTA DE LA PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE, MOSTRANDO EL ESPESOR DE LA CAPA LÍMITE Y LAS CAPAS CREADAS, INCIDENCIA 0°. ....	54
FIGURA 3.16. MALLADO 9, CONFIGURACIÓN CILÍNDRICA DEL SUBDOMINIO PARA UNA INCIDENCIA DE 22.5°. ....	55
FIGURA 3.17. MALLADO 10, CONFIGURACIÓN CILÍNDRICA DEL SUBDOMINIO PARA UNA INCIDENCIA DE 45°. ....	55
FIGURA 4.1. PRESIÓN QUE EJERCE EL VIENTO SOBRE LA PLATAFORMA A 0° DE INCIDENCIA DEL VIENTO. ....	59
FIGURA 4.2. PERFIL DE VELOCIDAD A 10 M DE LÍNEA CENTRO (0° DE INCIDENCIA DEL VIENTO). .....	60
FIGURA 4.3 PERFIL DE VELOCIDAD EN DIRECCIÓN DEL QUEMADOR (0° DE INCIDENCIA DEL VIENTO). .....	61



FIGURA 4.4. LÍNEAS QUE MUESTRAN EL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD ALREDEDOR DE LA PLATAFORMA (0° DE INCIDENCIA DEL VIENTO).....	62
FIGURA 4.5. LÍNEAS QUE MUESTRAN EL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD ALREDEDOR DE LAS COLUMNAS (0° DE INCIDENCIA DEL VIENTO).....	63
FIGURA 4.6. PERFIL DE VELOCIDAD A 5 M DE LÍNEA CENTRO (0° DE INCIDENCIA DEL VIENTO).....	64
FIGURA 4.7. LÍNEAS QUE MUESTRAN EL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN LA PARTE FRONTAL (0° DE INCIDENCIA DEL VIENTO).....	65
FIGURA 4.8. PERFIL DE VELOCIDAD A 10 M DE LÍNEA CENTRO DE TODO EL DOMINIO (0° DE INCIDENCIA DEL VIENTO). ....	66
FIGURA 4.9. LÍNEAS QUE MUESTRAN EL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD EN LA PARTE LATERAL (0° DE INCIDENCIA DEL VIENTO). ....	67
FIGURA 4.10. PRESIÓN QUE EJERCE EL VIENTO SOBRE LA PLATAFORMA A 22.5 ° DE INCIDENCIA DEL VIENTO. ....	68
FIGURA 4.11. LÍNEAS QUE MUESTRAN EL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD EN LA PARTE FRONTAL Y LATERAL DE LA PLATAFORMA A UNA DE INCIDENCIA DE 22.5 ° VIENTO. ....	69
FIGURA 4.12. PRESIÓN QUE EJERCE EL VIENTO SOBRE LA PLATAFORMA A 45 ° DE INCIDENCIA DEL VIENTO. ....	70
FIGURA 4.13. LÍNEAS QUE MUESTRAN EL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD EN LA PARTE FRONTAL Y LATERAL DE LA PLATAFORMA A UNA DE INCIDENCIA DE 45 ° VIENTO. ....	71
FIGURA 4.14. PERFIL DE VELOCIDAD A 10 M DE LÍNEA CENTRO DE TODO EL DOMINIO (45° DE INCIDENCIA DEL VIENTO). ....	72
FIGURA 4.15. GRÁFICA DE BARRAS DE LA FUERZA LATERAL EN DIRECCIÓN DEL EJE X PARA CADA TIPO DE MALLADO CREADO. ....	75
FIGURA 4.16. GRÁFICA DE BARRAS DE LA FUERZA DE ARRASTRE EN DIRECCIÓN DEL EJE Y PARA CADA TIPO DE MALLADO CREADO. ....	76
FIGURA 4.17. GRÁFICA DE BARRAS DE LA FUERZA DE SUSTENTACIÓN SOBRE EL EJE Z PARA CADA TIPO DE MALLADO CREADO. ....	76
FIGURA 4.18. RESIDUALES DE LA SIMULACIÓN PARA EL MALLADO NÚMERO 5. ....	77
FIGURA 4.19. RESIDUALES DE LA SIMULACIÓN PARA EL MALLADO NÚMERO 1. ....	78

## ***Lista de tablas***

TABLA 1.1. COMPARACIÓN DE SOFTWARE COMERCIAL VS SOFTWARE DE CÓDIGO ABIERTO.....	13
TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE HURACANES (ROSENGAUS ET AL., 2014) .....	20
TABLA 2.2. COMPARATIVA DE $C_D$ Y $C_L$ DE DIFERENTES MÉTODOS DE CÁLCULO Y EXPERIMENTACIÓN, INCIDENCIA $0^\circ$ (ZHANG ET AL., 2010) .....	32
TABLA 3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE BASADOS EN LAS DIMENSIONES DE NA-KIKA. ....	44
TABLA 3.2. VALORES DE REFERENCIA PARA MEDIR LA CALIDAD DE LA MALLA, ORTHOGONAL. ....	51
TABLA 3.3. VALORES DE REFERENCIA PARA MEDIR LA CALIDAD DE LA MALLA, SKEWNESS. ....	51
TABLA 3.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS MALLADOS ESTUDIADOS. ....	52
TABLA 4.1. FUERZAS OBTENIDAS DE LAS SIMULACIONES PARA LOS DIFERENTES MALLADOS. ....	73

## Capítulo 1. Introducción

La disminución de las reservas de hidrocarburos ha ocasionado a la industria costa afuera a incursionar en el mar en aguas cada vez más profundas en la búsqueda de nuevos yacimientos, logrando récords de perforación de pozos y de producción en tirantes de agua próximos a los 3,000 m.

Las plataformas semi-sumergibles son sistemas flotantes utilizados en la industria del petróleo para proporcionar soporte a las actividades de producción en aguas profundas, y se caracterizan por estar compuestas de pontones y columnas con una o varias cubiertas. Este tipo de sistemas operan estando sometidos a movimientos debido a cargas ambientales tales como la acción del oleaje, corrientes marinas y vientos, lo que puede dañar los equipos de producción, *risers* y líneas de amarre.

Un sistema flotante debe ser diseñado para preservar su integridad durante su vida útil, conservar la mayor estabilidad en caso de avería o accidente y durante la ocurrencia de estados de mar extraordinarios, como las tormentas de invierno y huracanes. Por lo cual, el casco de flotación debe poseer la capacidad de restauración tendiente hacia una condición de equilibrio estable cuando es sometida a las acciones del viento, el oleaje o cualquier eventualidad.

Es de gran importancia el adecuado cálculo de las fuerzas causadas por el viento en condiciones de huracán, debido a que este tipo de plataformas semi-sumergibles de producción una vez instaladas en sitio, permanecen en el sitio durante su vida útil y están expuestas a condiciones ambientales severas.

Las cargas de viento a menudo se consideran secundarias con respecto a la carga general de las estructuras marinas, como lo es el oleaje y corriente marina. Esto puede considerarse aceptable siempre que la magnitud de las fuerzas y momentos medios del viento sean solo una fracción de la carga total. Para situaciones tales como fuertes ciclones (por ejemplo, el huracán Katrina en el año 2005), la magnitud de la carga de viento se considera crítica y debe tenerse en cuenta en el diseño (Hirdaris et al., 2014).

Los coeficientes de viento utilizados para el análisis de la carga por viento de las estructuras costa afuera frecuentemente se toman de la literatura o de las mediciones obtenidas en un túnel de viento. Los estudios de ingeniería suelen centrarse en la predicción del análisis del movimiento global y no en la definición de la carga del viento en sí. En consecuencia, los efectos del análisis de movimiento combinado de viento, oleaje y corriente marina se analizan mediante modelos numéricos y se validan mediante pruebas con modelos en tanque oceánicos (Hirdaris et al., 2014).

La aerodinámica es de gran importancia para estructuras costa afuera para un diseño seguro y confiable, por lo cual se deben de evaluar las cargas de viento; ya que es un parámetro fundamental para evaluar la estabilidad e inclusive la respuesta estructural de una plataforma semi-sumergible. Por consiguiente, es necesario determinar con precisión las cargas de viento en condición de huracán en apoyo de todas las etapas del diseño de este tipo de estructuras, de donde se procura obtener fuerzas de arrastres, coeficientes de arrastre a varios ángulos de incidencia de viento, y a su vez se puede obtener las zonas de peligro en las estructuras donde se presentan grandes vórtices, los cuales pueden presentar zonas de succión y provocar vibraciones en la estructura.

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés *Computational Fluid Dynamics*) consiste en el análisis del movimiento de los fluidos mediante simulaciones con ordenadores. Su objetivo es la búsqueda de una solución aproximada de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos, discretizando o dividiendo el dominio de cálculo en pequeños elementos y resolviendo allí dichas ecuaciones para cada uno de los elementos (Tajadura et al., 2003).

El uso de CFD está transformando los proyectos de ingeniería ya que el enfoque de la experimentación y construcción en la espiral de diseño se transforma en el diseño basado en simulaciones (SBD por sus siglas en inglés *Simulation Based Design*), que ofrece conceptos innovadores de estructuras costa afuera con mejoras en seguridad, energía y economía (Stern et al., 2015).

Dada la configuración de los sistemas flotantes hay una interacción fluido-estructura (FSI por sus siglas en inglés *Fluid-Structure Interaction*) dando lugar a fenómenos que se deben

considerar a la hora de diseñar este tipo de estructuras. El avance tecnológico en equipo de cómputo cada vez más potente permite el uso de CFD en una gran variedad de aplicaciones para el diseño y análisis de estructuras flotantes. Los problemas de la interacción fluido estructura han recibido una atención amplia y constante desde la década de 1960.

Aunque se infiera que los costos del uso de CFD son menores respecto a las técnicas experimentales, las simulaciones con CFD no son gratuitas, teniendo en cuenta que, son necesarias máquinas de gran capacidad de cálculo si se requiere realizar una simulación apropiada, y un software con precio todavía no accesible a la mayoría de los usuarios. Aunque existen algunas alternativas con licencia de código abierto, no obstante, los dos softwares tanto de código abierto como comerciales presentan sus pros y sus contras, en la Tabla 1.1 se hace una comparación general del software comercial contra el de código abierto.

**Tabla 1.1. Comparación de software comercial vs software de código abierto.**

<b>Software comercial - CFD</b>	<b>Software de código abierto - CFD</b>
Costo elevado	De libre uso - "Gratis"
Soporte técnico profesional	No cuenta con soporte técnico
Software completo (CAD, Mallado, Post-procesador integrado)	Software básico (CAD, Mallado, Post-procesador no incluido)
Fácil de usar (interfaz gráfica)	Sin interfaz gráfica
Software no modificable ("Caja negra")	Software modificable a las necesidades del usuario

## **1.1 Objetivos**

### **Objetivo general**

Realizar el análisis aerodinámico en condición de huracán de la parte expuesta de una plataforma de producción de hidrocarburos tipo semi-sumergible, para operar en aguas profundas del Golfo de México, aplicando los criterios y metodología por medio de la dinámica de fluidos computacional.

### **Objetivos particulares**

1. Elaborar la geometría básica del sistema flotante, la superestructura y el equipo sobre cubierta de una plataforma semi-sumergible existente.

2. Realizar el análisis aerodinámico del área expuesta al viento de la plataforma semi-sumergible mediante el uso de la dinámica de fluidos computacionales (CFD).
3. Obtener las fuerzas de arrastre que se presentan en la estructura debido a vientos huracanados.

### **1.2 Justificación**

La idea de este trabajo surge por el interés nacional en el desarrollo energético de México y la explotación de hidrocarburos con especial atención en aguas profundas del Golfo de México, así mismo dar una contribución hacia la industria costa afuera por la falta de desarrollo de este tipo de trabajos. Los cambios que se están generando por la reforma energética del Gobierno de México, crearán una demanda de técnicos altamente especializados; para el 2023 está previsto poner en marcha una terminal de apoyo para la industria costa afuera en el puerto de Alvarado (Foro: “Veracruz, el futuro de la producción offshore de hidrocarburos en México”, SEDECOP, 2017).

### **1.3 Factibilidad del proyecto**

La metodología desarrollada en este proyecto se enfoca en dar solución y soporte a los siguientes puntos:

1. Efectuar proyectos de análisis aerodinámicos para PEMEX en la industria costa fuera, cumpliendo con normas nacionales e internacionales y considerando condiciones propias de los sistemas flotantes.
2. Aportar nuevas metodologías para análisis aerodinámicos dentro de empresas públicas o privadas e instituciones educativas para colaborar con el desarrollo del país. Estas metodologías están enfocadas en la optimización de diseños, seguridad e identificación de zonas de riesgo, así como una eficiencia económica de los diseños.
3. Fomentar la calidad en los diseños de sistemas flotantes dedicados a la Exploración y Producción de hidrocarburos en base a un adecuado cálculo de fuerzas, a las cuales están sometidos este tipo de estructuras durante su vida útil utilizando software especializado.
4. El desarrollo de la Industria Naval Mexicana, mediante el desarrollo científico y tecnológico.

## Capítulo 2. Revisión literaria

### 2.1 Plataformas semi-sumergibles

Las plataformas semi-sumergibles son unidades flotantes, el segundo sistema más utilizado en el mundo, utilizadas en la industria del petróleo para proporcionar apoyo a las actividades de producción en aguas profundas. Están compuestas de manera general de una estructura con una o varias cubiertas, de pontones y columnas. En la Figura 2.1 se muestran los componentes principales incluyendo el equipo en cubierta.



**Figura 2.1. Componentes principales de una plataforma semi-sumergible (Pallanich, 2017).**

En la Figura 2.2 se muestra la gráfica con el número de sistemas flotantes de producción en servicio. Siendo las plataformas semi-sumergibles el segundo lugar de mayor uso en aguas profundas.

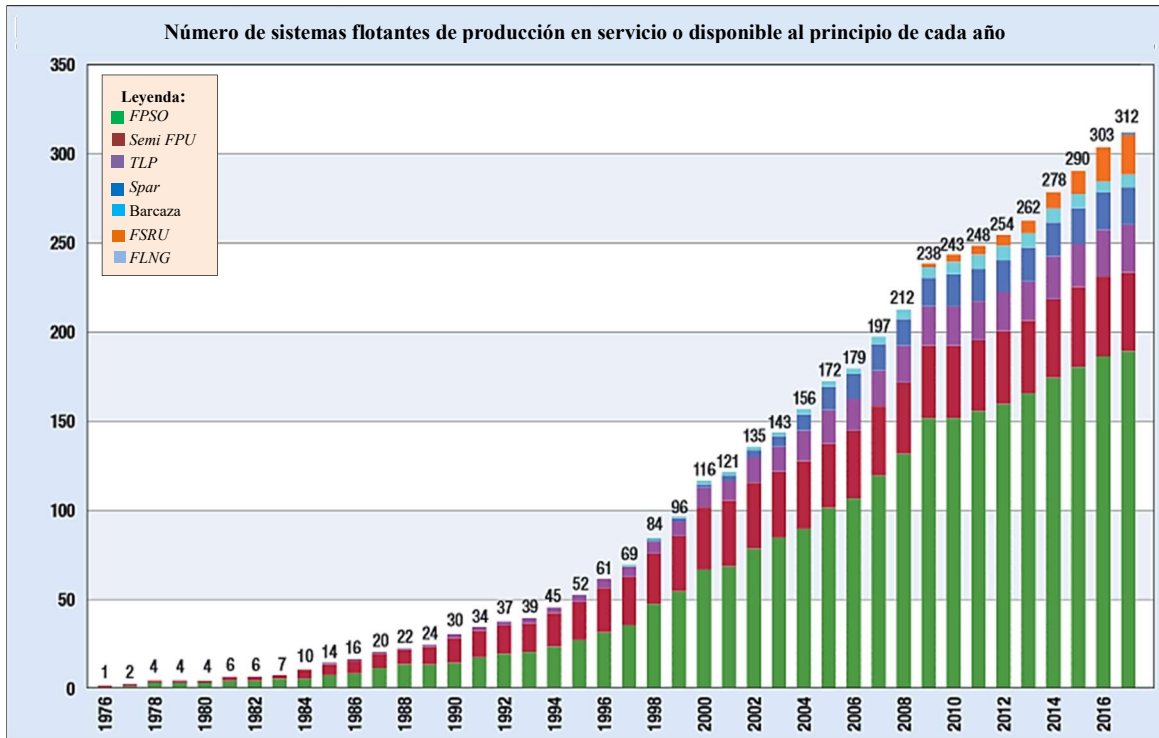


Figura 2.2. Número de sistemas flotantes de producción (Offshore Magazine Poster & Maps, 2017).

### 2.1.1 Clasificación

Las plataformas semi-sumergibles son utilizadas para diversos propósitos y en general suelen tener 3, 4 o 6 columnas, por su forma se pueden clasificar en dos tipos de plataformas semi-sumergibles:

1. Plataforma semi-sumergible de pontones gemelos.

Este tipo de sistema oceánico es excepcional en la estabilidad y comportamiento en el mar, altamente flexible y eficiente, se pueden mover de un campo de perforación a otro con su sistema de propulsión, es un sistema utilizado principalmente para proyectos de perforación, en la Figura 2.3 se muestra este tipo de semi-sumergible.





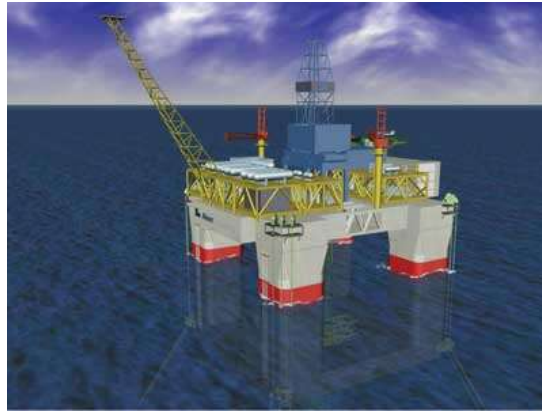
**Figura 2.3. Plataforma semi-sumergible de pontones gemelos (Offshore Energy Today Staff, 2018).**

2. Plataforma semi-sumergible de pontones de forma de anillo.

Este tipo de sistema oceánico es utilizado principalmente para realizar los trabajos de producción, aunque también tiene la particularidad de que puede servir como sistema flotante de perforación. Diseñados principalmente para permanecer en una misma ubicación durante su vida útil, que oscila de 20 a 30 años. Consiste en multicolumnas (generalmente 4) interconectadas debajo de la línea de flotación por miembros horizontales llamados pontones, que brindan flotabilidad al sistema oceánico, en la Figura 2.4 se muestra este tipo de plataforma.

Las principales ventajas de este tipo de plataformas es la alta capacidad de carga, presentan adecuadas características de estabilidad, permiten un gran número de *risers* (ductos ascendentes de producción), proporcionan una gran superficie en la cubierta, son poco susceptibles a los cambios del tirante de agua en el sitio de operación, por lo que pueden ser instaladas en otros sitios. Utilizan líneas de amarre compuestas por cables de acero o de poliéster, y en sus extremos segmentos de cadena. Los sistemas

base de cable de acero se colocan normalmente en configuración en catenaria y los de poliéster con las líneas tensadas (*taut leg*).



**Figura 2.4. Plataforma semi-sumergible de pontones en forma de anillo (Yao-lee et al., 2012).**

A continuación, se describen los componentes principales que conforman a una plataforma semi-sumergible tipo anillo en operación.

- Cubiertas: Usualmente tienen una o dos cubiertas. Las cubiertas tienen como principal función alojar a los equipos de producción de hidrocarburos, servicios auxiliares y de seguridad, así como las instalaciones para el personal, el área de trabajo, helipuerto, grúas, entre otros.
- Casco de flotación: está compuesto por columnas interconectadas a pontones en su parte inferior, cuyo conjunto tiene como función principal aportar flotación y estabilidad a la plataforma para su correcta operación. El casco debe de ser capaz de soportar las cargas ambientales, así como su propio peso, el de las cubiertas con los equipos, el peso de los risers, líneas de amarre y líquidos dentro de sus compartimientos. Es importante mencionar que el casco de una plataforma semi-sumergible está compuesto por compartimientos que pueden ser utilizados para almacenar líquidos, algunos equipos y tanques de lastre.
- Sistema de líneas de amarre: Está compuesto por líneas que suelen conformarse por cadenas de acero o una combinación en los extremos de cadenas de acero y en su parte media por cables de acero o poliéster. Estas plataformas suelen tener sistemas de amarre del tipo catenaria o *taut leg*, las cuales presentan fuerzas de restauración en el plano horizontal y su rigidez es casi despreciable en el plano vertical. Estas

características permiten que el sistema flotante tenga un desplazamiento horizontal controlado por las mismas líneas de amarre. Actualmente la forma más común que se utilizan las líneas de amarre es en *taut leg* para una plataforma en aguas profundas y ultra profundas. Una línea *taut leg* está tensada entre los puntos de conexión entre el casco y la cimentación en el lecho marino, sin tener un tramo apoyado sobre el suelo marino; mientras que una línea en catenaria forma su configuración por su peso propio y generalmente el tramo que se conecta con la cimentación descansa sobre el lecho marino. Asimismo, el sistema de líneas de amarre está compuesto por los guías de cabos, los cuales sirven como conexiones estructurales entre las líneas de amarre y el casco de la plataforma semi-sumergible.

- *Risers* de producción: El sistema de *risers* puede ser descrito como una serie de ductos ascendentes que funcionan como una extensión del pozo de producción hacia la plataforma y transportan los hidrocarburos. Actualmente las plataformas semi-sumergibles pueden operar con *risers* flexibles o *risers* rígidos en catenaria, mejor conocidos como SCR (por sus siglas en inglés *Steel Catenary Risers*).
- Sistema de cimentación: Está compuesto por anclas o pilotes, dependiendo del sistema de líneas de amarre, y tienen como objetivo mantener a las líneas de amarre conectadas al lecho marino. La cimentación más común utilizada es a base de pilotes de succión, . Este sistema logra transmitir las fuerzas generadas por las acciones de las condiciones ambientales al suelo marino, teniendo la capacidad de resistir cargas verticales y horizontales a diferencia del ancla tradicional que solo resiste cargas horizontales.

## **2.2 Aerodinámica en estructuras costa afuera**

Las cargas de viento a menudo se consideran secundarias con respecto a la carga general de las estructuras marinas. Esto puede considerarse aceptable siempre que la magnitud de las fuerzas y momentos medios del viento sean solo una fracción de la carga total(Hirdaris et al., 2014).

En los últimos años, los ciclones tropicales son más frecuentes y es de suma importancia considerar las cargas de este tipo de fenómenos meteorológicos para el diseño de estructuras costa afuera debido a que se presentan vientos de más de 119 kilómetros por hora y esto puede causar daños graves a la seguridad de las plataformas petrolíferas en alta mar. Mientras tanto, las plataformas costa afuera se están desarrollando cada vez más hacia aguas profundas y de gran escala, las estructuras elevadas y huecas (torre de perforación, grúa, etc.) en las plataformas costa afuera con gran flexibilidad y baja frecuencia natural, son más susceptible al viento.

Los ciclones tropicales se catalogan de acuerdo con la presión que existe en su centro o a la velocidad de sus vientos. Se les designa depresión tropical, tormenta tropical y huracán (Rosengaus et al., 2014). En la Tabla 2.1 se muestra la clasificación de huracanes, según Saffir-Simpson, y algunos de sus efectos.

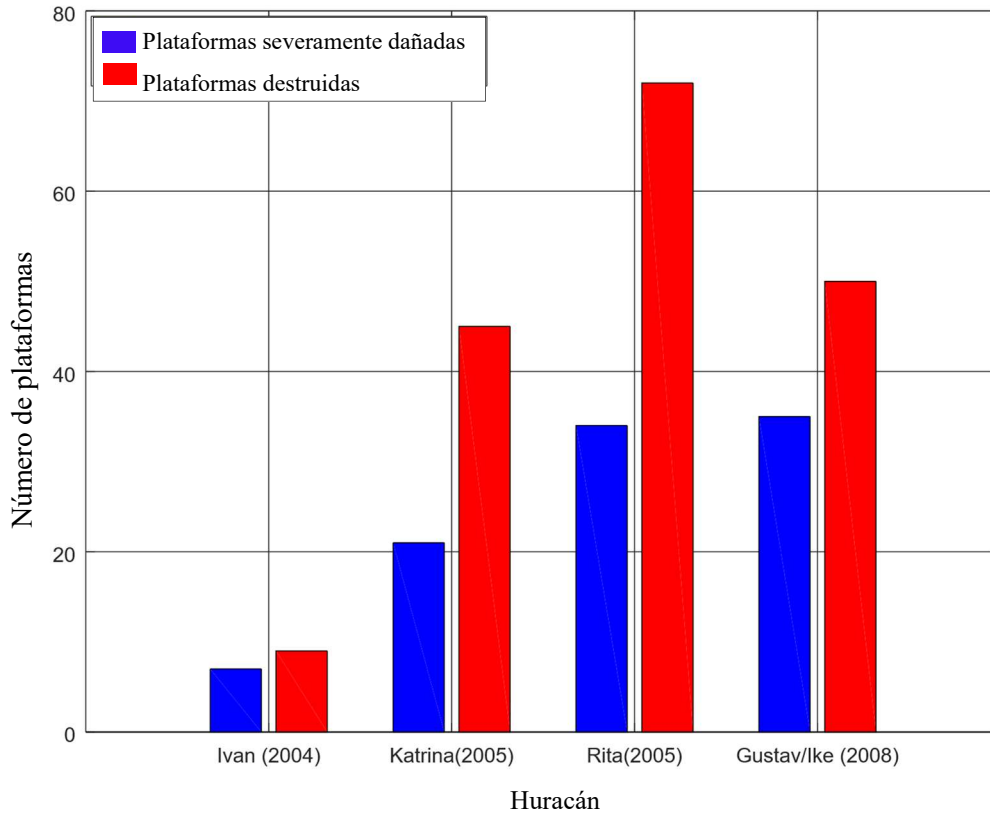
**Tabla 2.1. Clasificación de huracanes (Rosengaus et al., 2014)**

<b>Categoría</b>	<b>Presión central (mb)</b>	<b>Vientos (km/h)</b>	<b>Marea de tormenta (m)</b>
<b>Perturbación tropical</b>	1008.1 a 1010	-	-
<b>Depresión tropical</b>	1004.1 a 1008	< 62	-
<b>Tormenta tropical</b>	985.1 a 1004	62.1 a 118	1.1
<b>Huracán categoría 1</b>	980.1 a 985	118.1 a 154	1.5
<b>Huracán categoría 2</b>	965.1 a 980	154.1 a 178	2.0 a 2.5
<b>Huracán categoría 3</b>	945.1 a 965	178.1 a 210	2.5 a 4.0
<b>Huracán categoría 4</b>	920.1 a 945	210.1 a 250	4.0 a 5.5
<b>Huracán categoría 5</b>	< 920	> 250	> 5.5

De acuerdo con las estadísticas, desde 1947, se han destruido alrededor de 250 plataformas petrolíferas en el mar, más de 600 plataformas se han visto seriamente dañadas y miles de plataformas se han visto obligadas a dejar de producir en el Golfo de México debido a los huracanes, lo que ha provocado una enorme pérdida, tan solo del 2004 al 2008 más de 100 plataformas fueron destruidas, en la Figura 2.5 se muestra las plataformas que han sido afectadas por huracanes del 2004 al 2008. Por lo tanto, la evaluación precisa de la respuesta inducida por el viento en condición de huracán es de gran importancia para el diseño y la operación segura de las plataformas costa afuera (Zhang et al., 2010).

El método de carga de viento estático equivalente se usa generalmente para evaluar la vibración inducida por el viento en los códigos actuales de diseño y evaluación de plataformas petrolíferas en alta mar, y la carga equivalente es el producto de la carga de viento estática multiplicada por un factor de aumento dinámico (coeficiente de vibración del viento o factor de carga de ráfagas). Pero el método equivalente tiene dos deficiencias: primero, el factor de aumento dinámico es difícil de resolver con precisión debido a la compleja estructura de las plataformas grandes; en segundo lugar, los resultados pueden ser conservadores y de gran error ya que en este método se descuida la vibración a través del viento de la estructura elevada (Liu et al., 2016).

**Plataformas afectadas en la temporada de huracanes del 2004 al 2008**



**Figura 2.5. Número de plataformas dañadas y destruidas por huracanes desde el 2004 al 2008 (Zhang et al., 2010).**

Los coeficientes de viento utilizados en el análisis de carga de estructuras marinas a menudo se toman de la literatura o de las mediciones del túnel de viento. Los estudios de ingeniería generalmente se enfocan en la predicción del análisis de movimiento global y no en la definición de la carga de viento en sí. En consecuencia, los efectos del análisis de movimiento combinado de viento, oleaje y corriente se analizan mediante modelos numéricos y se validan mediante pruebas experimentales. El enfoque utilizado en las pruebas del modelo puede usarse para generar viento directamente por ventiladores o para simular cargas de viento usando un cabrestante dinámico. Las series de tiempo de carga de viento se derivan basándose en las pruebas de túnel de viento (Hirdaris et al., 2014).

El viento es un factor de diseño significativo. Las condiciones de viento utilizadas en un diseño deben determinarse apropiadamente a partir de datos de viento recolectados y deben

ser coherentes con otros parámetros ambientales asociados. De acuerdo con Bai y Jin (2016) se utilizan generalmente dos métodos para evaluar los efectos del viento en el diseño:

- Las fuerzas de viento son tratadas como constantes y calculadas basándose en la velocidad media de 1 min.
- Las fuerzas de viento fluctuantes se calculan basándose en un componente estable, la velocidad media de 1-h, más un componente de tiempo variable calculado a partir de un espectro empírico de ráfagas de viento.

La elección del método depende de los parámetros del sistema y de los objetivos del análisis. Cualquier aproximación puede dar una carga más severa que la otra, dependiendo del sistema de amarre y del espectro del viento utilizado. La velocidad del viento de diseño debe referirse a una elevación de 10 m por encima del nivel de agua fija. Los cambios rápidos de la dirección del viento y de las cargas dinámicas que resultan también se deben considerar en el diseño (Bai & Jin, 2016).

Cargas de viento y corriente en estructuras costa afuera son consideradas como fuerzas estables (medias). Las fuerzas y momentos de CFD y túnel de viento son utilizados para diseño y análisis de este tipo de estructuras, aunque hay algunos problemas que no son abordados hasta ahora, estos han sido pasados por alto durante años, Cho et al. (2018) describes estos problemas de la siguiente manera:

- Problema de escala

Para estimar las cargas de viento y corriente en pruebas con modelos, debe cumplirse la similitud de Reynolds, pero no es posible hacer un número real de Reynolds en un túnel de viento, el rango del número de Reynolds en la prueba del túnel de viento es de  $10^4$  a  $10^6$ . El número de Reynolds de una estructura costa afuera es uno de los más altos ( $10^7$  a  $10^9$ ), la diferencia entre el número de Reynolds del modelo y el número real de Reynolds hace el problema de escalado (Heller, 2011). Para superar este problema y crear turbulencias en el túnel de viento se aumenta la aspereza del modelo. Pero la turbulencia y la física del flujo son desconocidas tanto en el túnel de viento como en el mar real.

- Escala de modelos grandes

La mayoría de los túneles de viento utilizados para la prueba de estructuras costa afuera son originalmente para fines de ingeniería civil y aeronáutica. La escala posible del modelo para la prueba de estructuras costa afuera es aproximadamente 1/240, el tamaño del modelo es muy pequeño en comparación con el modelo para canales de pruebas. La incertidumbre y errores pueden ser grandes debido al tamaño pequeño del modelo, las fuerzas, las pequeñas diferencias del modelo y la condición del túnel de viento, esto es debido a que no es posible un modelo a escala de la estructura costa afuera adecuado, es necesario la colaboración de la prueba del túnel de viento y CFD para superar el problema de la escala de modelos grandes.

- Datos desconocidos de la prueba del túnel de viento

Las pautas para la prueba del túnel de viento por SNAME (1988) muestran procedimientos y técnicas muy generales. Pero hay algunos efectos no deseados; paredes y fondo del túnel de viento, sistema de montaje del modelo, la brecha entre el modelo y el fondo, la generación del perfil actual y del viento y la turbulencia de fondo, estos pueden afectar las cargas que actúan en el modelo y aún no se consideran seriamente en la prueba del túnel de viento.

- Validación y verificación de CFD

Investigaciones recientes sobre CFD muestran buenos resultados de cargas de viento y corriente, pero todavía hay discrepancias con la prueba del túnel de viento. Para mejorar el uso de CFD se necesita verificación, validación y un procedimiento razonable. Para aumentar la confianza de CFD es necesario comparar los resultados y la simulación de las condiciones del túnel de viento, como el perfil del fondo, la distancia del piso al modelo y el caudal. La gran diferencia proviene del número de Reynolds y la física del flujo, como se mencionó anteriormente, el flujo y la rugosidad de la superficie son desconocidos en la prueba del túnel de viento. Pero CFD usualmente para algunas aplicaciones asume que el modelado es completamente turbulento. Las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (RANS por sus siglas en inglés *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*) es un modelo de turbulencia comúnmente adoptado. Pero para capturar la turbulencia de altos números de



Reynolds, el modelo de turbulencia de Simulación de Grandes Remolinos (LES por sus siglas en inglés *Large Eddy Simulation*) es más adecuado, sin embargo, verificación y validación de CFD es crucial para su aplicación.

### **2.2.1 Tipos de flujos**

#### **Flujo interno y externo**

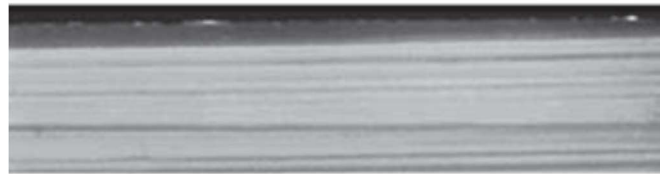
El flujo de un fluido se puede catalogar como interno o externo, dependiendo de si el fluido fluye en un canal confinado o sobre una superficie. El flujo de un fluido sobre una superficie, como una placa, es flujo externo, si el flujo es dentro de un tubo o ducto es flujo interno, por ejemplo, el flujo de algún líquido en una tubería es flujo interno y el flujo de aire sobre un edificio o alrededor de una estructura expuesta ante viento constante es flujo externo. Los flujos internos están sujetos a la influencia de la viscosidad en todo el campo de flujo. En los flujos externos, los efectos viscosos quedan condicionados a la capa límite cercana a la pared de la superficies y a las zonas de la estela después de haber pasado los cuerpos u objetos (Cengel & Cimbala, 2012).

#### **Flujo compresible e incompresible**

Un flujo también se puede catalogar como compresible o incompresible, dependiendo si la densidad del fluido varía o no durante el flujo. Un flujo incompresible mantiene casi en un 100% constante su densidad durante el flujo, aunque dependiendo de las condiciones del flujo puede variar un poco (aproximadamente un 1%), de tal forma que el volumen del fluido permanece intacto sobre la trayectoria cuando el flujo se modela como incompresible. Una peculiaridad de los líquidos es que su densidad es constante y, así, el flujo de ellos es propiamente incompresible, por consiguiente, se suele decir que los líquidos son sustancias incompresibles, en cambio los gases son extremadamente compresibles, la compresibilidad también se presenta cuando se varía la velocidad del fluido, también la temperatura, pero si solo se habla de efectos dinámicos la velocidad es más relevante. Por ejemplo, un cambio de presión de sólo 0.01 atm causa un cambio de 1 por ciento en la densidad del aire atmosférico (Cengel & Cimbala, 2012).

## Flujo laminar y turbulento

El movimiento fuertemente ordenado de un fluido, caracterizado por capas o laminas no alteradas de éste se conoce como flujo laminar. El flujo de los fluidos intensamente viscosos, como los aceites a bajas velocidades, por lo general es laminar. El movimiento fuertemente desordenado de un fluido, que es frecuente que se presente a velocidades altas y se identifica por variaciones en la velocidad, se le denomina flujo turbulento, en la Figura 2.6 se muestra un ejemplo de flujo laminar y turbulento, así mismo se muestra el flujo intermedio entre el flujo laminar y turbulento que se designa como flujo de transición. El flujo de fluidos de baja viscosidad, como el aire, a velocidades altas es comúnmente turbulento. Los experimentos llevados a cabo por Osborn Reynolds y publicados en 1883 dieron como resultado el número adimensional de Reynolds, el cual se utiliza para denominar si un flujo es laminar, en transición o turbulento (Cengel & Cimbala, 2012).



Flujo laminar



Flujo de transición



Flujo turbulento

**Figura 2.6. Flujo laminar, de transición y turbulento (Cengel & Cimbala, 2012).**

## Flujo estacionario y no estacionario

El término estacionario hace referencia a que no hay cambio en un punto con el tiempo. Lo contrario a estacionario es no estacionario. Frecuentemente se usan los términos no estacionario y transitorio como sinónimos, no obstante, no son equivalentes. En mecánica de fluidos, no estacionario es el término que se aplica a cualquier flujo que no sea estacionario, por ende, este tipo de flujos varían con el tiempo, el término para flujos transitorios frecuentemente se aplica para flujos en desarrollo. Dependiendo el tipo de problema se debe de determinar si, para solucionarlo, basta con estudiar sólo las características de flujo estacionario promediadas respecto al tiempo o si es necesario un estudio más detallado de las características no estacionarias. Por ejemplo, para el cálculo de fuerzas de arrastre, velocidades promediadas y campos de presión, una representación promediada respecto al tiempo de un flujo estacionario es suficiente. Sin embargo, si se requiere calcular las vibraciones inducidas por el flujo, las variaciones de presión, las ondas de choque debido a los remolinos turbulentos es necesario trabajar con un flujo no estacionario (Cengel & Cimbala, 2012).

### 2.2.2 Parámetros adimensionales

Los parámetros adimensionales agrupan variables implicadas en un fenómeno y expresan el problema en términos de la relación funcional de estos parámetros.

#### Número de Froude

El número de Froude es un valor adimensional, que en flujos de superficie libre relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre el fluido, este valor se obtiene de la Ecuación 1 (White, 2011).

$$F = \frac{\rho V^2 L^2}{\rho L^3 g} = \frac{V^2}{gL} = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

Donde  $F$  es el número de Froude,  $\rho$  es la densidad,  $V$  la velocidad del fluido,  $L$  es la longitud y  $g$  la fuerza de gravedad.

### **Número de Reynolds**

El número de Reynolds es un parámetro adimensional cuyo valor indica si el flujo sigue un flujo laminar o turbulento, asimismo es la relación que existe entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de un fluido. Depende de la velocidad del fluido, del diámetro de tubería, o diámetro equivalente hablamos de un flujo externo, y de la viscosidad cinemática o en su defecto densidad y viscosidad dinámica y está dado por la Ecuación 2 (Cengel & Cimbala, 2012).

$$R_e = \frac{\rho LV}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2)$$

Donde  $R_e$  es el número de Reynolds,  $\rho$  es la densidad,  $V$  la velocidad del fluido,  $L$  es el diámetro de la tubería si trabajamos con un flujo interno en una tubería o la longitud si es flujo externo,  $\mu$  la viscosidad dinámica y  $\nu$  la viscosidad cinemática, para flujos que contienen un fluido con una superficie libre, tanto el número de Reynolds como el número de Froude son parámetros adimensionales importantes (Cengel & Cimbala, 2012).

### **Número de Mach**

El número de Mach es un parámetro adimensional que mide la velocidad relativa que se define como la relación entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto como se muestra en la Ecuación 3:

$$M = \frac{v}{v_s} \quad (3)$$

Donde  $v_s$  es un valor que depende del medio físico en el que se transmite el sonido. El número de Mach permite expresar la velocidad de un objeto no de forma absoluta en km/h o m/s, sino tomando como referencia la velocidad del sonido (White, 2011).

Normalmente, las velocidades de vuelo se clasifican según su número de Mach en:

- Subsónico  $M < 0.7$
- Transónico  $0.7 < M < 1.2$
- Supersónico  $1.2 < M < 5$
- Hipersónico  $M > 5$

El número de Mach relaciona la compresibilidad de un gas; cuando este número es menor de 0.3 se considera fluido incompresible en el estudio de aerodinámica y modelos con aire o gases, simplificando notoriamente los cálculos realizados por ordenador, Por lo tanto, los efectos de la compresibilidad del aire se pueden despreciar a velocidad por debajo de alrededor de 100 m/s. Además, es útil para poder calcular el tamaño de los elementos de malla en la pared relacionada con el espesor de la subcapa laminar en torno a un cuerpo inmerso en un flujo en el modelo computacional.

### **2.2.3 Técnica de modelado**

Algunos de los componentes comunes de la estructura se modelan de la siguiente manera:

- Modelado del casco (flotador)

La geometría del casco (flotador) se dimensiona correctamente para el factor de escala. Todas las propiedades dinámicas (por ejemplo, desplazamiento, momento de inercia, GM, períodos naturales) se escalan adecuadamente usando la ley de Froude. Las propiedades estructurales (por ejemplo, elasticidad) no son necesarias a escala. Incluso a pequeña escala (por ejemplo,  $\lambda = 100 - 200$ ), esta escala puede proporcionar resultados razonables. Sin embargo, a menudo se omite muchos de los detalles, por ejemplo, apéndices y miembros pequeños (Chakrabarti, 1998).

- Modelado de líneas de amarre

Hay tres parámetros que son importantes para la respuesta de la estructura flotante en términos del comportamiento de las líneas de amarre, estos son:

- Líneas de amarre pre tensionada.
- Rigidez del amarre con respecto a la carga ambiental.
- La carga experimentada por la estructura en la guía de la línea de amarre bajo diversas cargas.

Si estas cantidades se modelan apropiadamente para un entorno dado entonces la simulación de respuesta de la estructura será correctamente escalada, aunque las líneas de amarre no sean físicamente modeladas. Se entiende que la interacción de las líneas de amarre en aguas profundas con las olas no puede ser modelada a pequeña escala.

- Modelado de *Risers*

Para un sistema de amarre tenso, la elasticidad de un cable o alambre (rigidez a la tracción) es una propiedad importante que se puede escalar con un material adecuado a pequeña escala.

Los tubos ascendentes pueden ser modelados por tubos de metal o plástico u otro material superficial liso con rigidez suficiente y del diámetro requerido. A veces, se simula un diámetro equivalente con la misma área de arrastre global que el conjunto de elevación total y la rigidez adecuada para un grupo de *risers*. Donde el efecto de interferencia entre las *risers* es un área importante de investigación, todos los *risers* individuales desde la cubierta hasta el fondo del océano son necesarios para modelar. El sistema de *risers* está sujeto a una tensión constante, que puede ser proporcionada por un resorte tensado (Chakrabarti, 1998).

### **2.3 Análisis aerodinámico en estructuras costa fuera**

Ma et al. (2017) realizó una investigación para analizar la respuesta estructural inducida por el viento de una estructura de plataforma costa afuera típica, desarrollando un método de simulación mezclada precisa y eficiente para simular la velocidad del viento fluctuante, que luego se introduce como la condición límite en pruebas numéricas de túnel de viento, utilizando Simulación de Grandes Remolinos (LES por sus siglas en inglés Large Eddy Simulation) para obtener la serie temporal de presiones de viento en las superficies estructurales y para determinar las peores condiciones de trabajo. Finalmente, las respuestas estructurales inducidas por el viento las calcularon mediante ANSYS *Parametric Design Language* (APDL). Las presiones de viento que obtuvieron de forma repetida son

consistentes con los datos experimentales existentes, lo que demuestra la viabilidad de los métodos propuestos.

Wnęk and Guedes Soares (2015) realizaron un análisis numérico de las fuerzas del viento que actúan sobre una plataforma de LNG y un buque gasero utilizando CFD y los resultados obtenidos los compararon con resultados experimentales obtenidos en un túnel de viento. Los resultados están representados en coeficientes de las componentes de fuerza debida al viento en las direcciones X&Y, y el momento de guiñada para varios ángulos de ataque del viento. El análisis numérico en CFD lo iniciaron con varias pruebas con diferente tipo y resolución del mallado. Concluyeron un acuerdo razonable de los resultados numéricos y experimentales.

Croonenborghs et al. (2013) evaluaron las cargas debido al viento y las cargas debido a la corriente en una plataforma semi-sumergible usando varios métodos. Los análisis por corriente y de viento los realizaron por separado. Los análisis de corriente se realizaron en un flujo uniforme y los análisis de viento se realizaron en un flujo de capa límite atmosférico. Consideraron los ángulos de flujo que van de 0 a 360 grados. Las pruebas de túnel de viento se llevaron a escala 1: 250 y a su vez realizaron en un estado estacionario simulaciones de CFD a escala real. Al final de su trabajo, comparan y discuten los resultados obtenidos con los diferentes métodos mostrando discrepancias significativas entre en los resultados obtenidos.

Zhang et al. (2010) realizaron un estudio numérico de las cargas de viento en una plataforma semi-sumergible, en su caso de estudio utilizaron diferente técnicas de CFD utilizando modelos de turbulencia derivadas de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) y por Simulación de Grandes Remolinos (LES), obteniendo coeficientes de arrastre ( $C_D$ ) y sustentación ( $C_L$ ), posteriormente compararon los resultados con pruebas experimentales de un túnel de viento, estos resultados se muestran en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2. Comparativa de  $C_D$  y  $C_L$  de diferentes métodos de cálculo y experimentación, incidencia  $0^\circ$  (Zhang et al., 2010)**

Número de caso	Modelo de turbulencia	$C_D$	$C_L$
1	Estándar k- $\epsilon$	--	--
2	Estándar k- $\epsilon$	0.229	-0.014
3	Realizable k- $\epsilon$	0.281	-0.106
4	RNG k- $\epsilon$	0.293	-0.009
5	LES con SGS	0.271	-0.017
Datos experimentales (Friede & Goldman, 2007)		0.265	0.005

\*Para todos los casos se utilizó un perfil de viento del Instituto Americano de Petróleo (API por sus siglas en inglés *American Petroleum Institute*)

#### 2.4 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) se basa fundamentalmente en las ecuaciones gobernantes de la dinámica de fluidos. Estas ecuaciones representan enunciados matemáticos de las leyes de conservación de la física. Donde las siguientes leyes físicas son tomadas en cuenta:

- La masa se conserva para el fluido.
- La segunda ley de Newton: la velocidad de cambio del momento es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre el fluido.
- Primera ley de la termodinámica: la tasa de cambio de energía es igual a la suma de la razón de adición de calor al fluido y la tasa de trabajo realizado en el fluido.

La dinámica de fluidos computacionales es una de las ramas de la mecánica de fluidos que sirve para simular el comportamiento de sistemas que involucran flujos de fluidos y transferencia de calor, utilizando métodos numéricos y algoritmos para solucionar y analizar problemas sobre el flujo de fluidos. Las ecuaciones que describen las propiedades de un fluido (densidad, viscosidad, temperatura, velocidad etc.) son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes, estas ecuaciones diferenciales parciales fueron derivadas a principios del



siglo XIX y no tienen solución analítica, es por esta razón que se usan métodos numéricos para su resolución.

Las expresiones matemáticas (ecuaciones de Navier-Stokes) de los fenómenos físicos deben formularse naturalmente antes de la solución numérica, para un flujo que es incompresible e isotérmico, como es el caso de estudio de este trabajo, las expresiones matemáticas que se derivan de las ecuaciones gobernantes mencionadas anteriormente, se convierten en (Versteeg & Malalasekera, 2007):

$$\text{div}(u) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(uU) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(vU) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wU) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (9)$$

La ecuación (6) se conoce como la ecuación de continuidad y describe la divergencia de la velocidad en cada punto. Las ecuaciones 7 a 9 son las ecuaciones de Navier-Stokes que representan la conservación del momento en la dirección  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente, más una fuente de momento en cada eje ( $S_M$ ). Juntas, estas ecuaciones describen el movimiento del flujo de fluido tridimensional e inestable de un fluido newtoniano incompresible, para nuestro caso de estudio la ecuación de la conservación de la energía no se toma en cuenta.

#### 2.4.1 Turbulencia y su modelado

El flujo alrededor de un objeto puede ser laminar o turbulento, como se mencionó anteriormente, el flujo laminar se caracteriza por un movimiento suave y constante del fluido, mientras que el flujo turbulento se caracteriza por la rápida variación de la presión y la velocidad del flujo en el espacio y el tiempo, otras características del flujo turbulento son la tridimensionalidad y el desprendimiento de vórtices inestables de diferentes tamaños, conocidos como remolinos.

De la interacción entre remolinos, la energía cinética se transfiere continuamente desde grandes remolinos a otros más pequeños, en un progreso denominado cascada de energía, y

dura hasta que la energía finalmente se disipa en los remolinos más pequeños, las llamadas escalas de Kolmogorov. Los remolinos más pequeños están influenciados por efectos viscosos, mientras que los remolinos más grandes son predominantemente impulsados por efectos de inercia. Sin embargo, ambos remolinos son importantes para los cálculos, simplemente porque todas las propiedades del flujo son relevantes. Esto es lo que hace que las simulaciones sean complejas y muy exigentes con los recursos de procesamiento, ya que incluso los remolinos más pequeños deben resolverse por completo y el tamaño de celda de una malla computacional debe ser del mismo orden de escala (Eriksson, 2017).

Algunos de los métodos que se utilizan en la dinámica de fluidos computacionales para modelar la turbulencia se describen a continuación:

### **Simulación Numérica Directa (DNS)**

Una simulación numérica directa (DNS por sus siglas en inglés *Direct Numerical Simulation*) resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes numéricamente sin usar ningún modelo de turbulencia. Esto significa que todo el espectro de las escalas espaciales y temporales de la turbulencia se resuelve por completo, realizando discretizaciones temporales y espaciales que sean aptas para simular el flujo, desde las escalas más pequeñas de Kolmogorov hasta la escala de longitud integral. Esto hace que el DNS sea muy extenso y, por lo tanto, el costo computacional es muy alto, incluso con bajos números de Reynolds. Por lo tanto, su principal aplicación es en el ámbito académico e investigación, ya que para problemas de ingeniería no sería muy práctico este tipo de simulación, mientras que las soluciones RANS o LES son las más utilizadas para las aplicaciones de ingeniería (Eriksson, 2017; Tajadura et al., 2003).

### **Simulación de Grandes Remolinos (LES)**

La Simulación de Grandes Remolinos (LES por sus siglas en inglés *Large Eddy Simulation*) es una técnica numérica donde la complejidad de las ecuaciones gobernantes disminuye considerando sólo parte de los efectos turbulentos del flujo, tratándose de un modelo intermedio entre la simulación numérica directa (DNS) y el promedio de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS).

En el método LES se estudia el intercambio energético entre las denominadas fluctuaciones de gran escala y se simula el efecto de las pequeñas escalas de la turbulencia, una de las dificultades para simular flujos turbulentos proviene del amplio rango de escalas de tiempo y longitud a tener en cuenta. En lugar de resolver todo el rango, como DNS, LES resuelve solo las grandes escalas de la solución del campo de flujo. Las escalas pequeñas se filtran y se modelan implícitamente utilizando un modelo de turbulencia de “escala sub-malla” (*subgrid-scale*), consecuentemente, todas las escalas de flujo mayores que el tamaño de filtro especificado se resolverán por completo, y solo se modelarán las escalas más pequeñas que las del tamaño del filtro (Eriksson, 2017).

El éxito de LES depende de la calidad del modelo de turbulencia a escala “sub-malla” y, en gran medida, la calidad del mallado restante. Aun siendo que LES es computacionalmente costoso, en comparación con DNS solo representa alrededor del 1 % del costo computacional. La alta resolución del mallado necesario para resolver las escalas, en combinación con los pequeños pasos de tiempo usualmente requeridos para simular el flujo inestable, conduce a largos tiempos de ejecución y grandes volúmenes de datos (Eriksson, 2017; Tajadura et al., 2003).

### **Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS)**

El estudio de la influencia de la turbulencia en el flujo medio es adecuado para muchas aplicaciones industriales y problemas prácticos, el flujo puede separarse en una parte media y una fluctuante. Este proceso se conoce como descomposición de Reynolds. El proceso de promediar las leyes que describen el movimiento de una partícula se introduce en las ecuaciones con la finalidad de obtener los comportamientos promedio y turbulentos (aleatorio) de las distintas variables (Eriksson, 2017; Tajadura et al., 2003) .

Las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds buscan modelar las escalas turbulentas, algunos modelos de turbulencia RANS se describen a continuación (Eriksson, 2017; Tajadura, 2004):

### **Modelo $k - \varepsilon$**

El modelo  $k - \varepsilon$  resuelve de forma aproximada las ecuaciones de Navier-Stokes, donde se desarrollan dos ecuaciones de transporte adicionales, donde se interrelacionan la energía cinética del fluido turbulento ( $k$ ) y otra para la tasa de disipación de energía cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ), permitiendo calcular flujos con recirculación o separación.

### **Modelo $k - \omega$**

El modelo  $k - \omega$  también incorpora dos ecuaciones de transporte adicionales, donde se interrelacionan la energía cinética del fluido turbulento ( $k$ ) y otra para la disipación específica de energía cinética turbulenta ( $\omega$ ), la cual también determina la escala de la turbulencia.

La forma inicial del modelo  $k - \omega$  fue propuesta por Kolmogorov en 1942. Una versión mejorada del modelo fue desarrollada en 1979 por el grupo *Imperial College* bajo el profesor B. Spalding, el desarrollo más importante fue realizado por Wilcox en el año 2006 (Argyropoulos & Markatos, 2015).

### **Modelo Realizable $k - \varepsilon$**

Una mejora sobre el modelo estándar  $k - \varepsilon$ , el modelo realizable  $k - \varepsilon$  difiere del modelo estándar de dos maneras: contiene una nueva formulación para la viscosidad turbulenta y una nueva ecuación de transporte para la tasa de disipación,  $\varepsilon$ . El modelo realizable  $k - \varepsilon$  es capaz de capturar el flujo medio de estructuras complejas.

### **Modelo $k - \omega SST$**

La formulación de transporte de esfuerzo cortante (SST por sus siglas en inglés *Shear Stress Transport*) es una mezcla de los modelos  $k - \omega$  y  $k - \varepsilon$ . En la región cerca de la pared, se utiliza la formulación  $k - \omega$  mientras que el método  $k - \varepsilon$  se aplica más lejos de la pared, en las regiones completamente turbulentas. El modelo es ampliamente utilizado y muestra buen comportamiento en gradientes de presión adversos y separación de flujo, para el caso de estudio aerodinámico del presente trabajo es el más apropiado.

## Capa límite

Una capa límite es una capa adyacente a la superficie de un objeto a través del cual fluye el fluido. Si se asume una condición antideslizante cuando el fluido está en contacto con la superficie del objeto, no puede haber movimiento relativo entre el fluido en contacto con la superficie y la superficie misma. Por lo tanto, si la superficie tiene velocidad cero, entonces el fluido en contacto con la superficie también tiene velocidad cero.

Las partículas de fluido que se adhieren a la pared también ralentizarán las partículas vecinas debido a la viscosidad y la fricción del fluido, creando una capa fina de líquido entre la superficie, donde la velocidad es cero y el fluido libre fluyendo un poco más lejos de la superficie (Eriksson, 2017). Esta capa se subdivide en tres partes diferentes, laminar, transición y la capa turbulenta, como se muestra en la Figura 2.7.

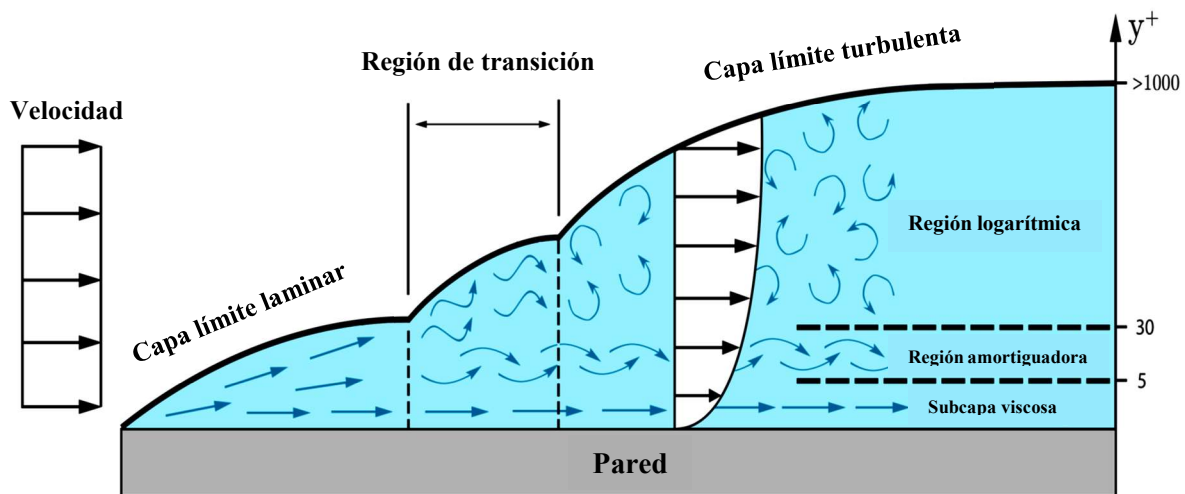


Figura 2.7. Las tres regiones de capa límite (Nebenfuhr, 2010).

La capa límite laminar se forma cuando el fluido de velocidad uniforme golpea el borde delantero de la superficie. En esta región, el flujo es muy suave y predecible. Después de cierta distancia corriente abajo, pequeñas oscilaciones caóticas comienzan a desarrollarse en el fluido, y el flujo comienza a pasar a la turbulencia, llegando a ser completamente turbulento.

El flujo turbulento cerca de la pared se puede dividir en tres zonas. Para una capa delgada justo encima de la pared, la velocidad de flujo es lineal con la distancia desde la pared, esta

capa se conoce como subcapa viscosa, debido a que la tensión de corte está dominada por tensiones de corte viscosas hacia afuera desde la subcapa viscosa, en la región de amortiguación, las tensiones de corte viscosas están siendo gradualmente reemplazadas por tensiones de corte turbulentas, hasta ser completamente reemplazadas en la región logarítmica. Se debe tener en cuenta que la región logarítmica es considerablemente más grande que las otras dos regiones combinadas, lo que se expresa mediante el eje  $y^+$  en la Figura 2.7, que no está en escala (Eriksson, 2017). La cantidad  $y^+$  es una distancia de pared adimensional, definida con la Ecuación 10.

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (10)$$

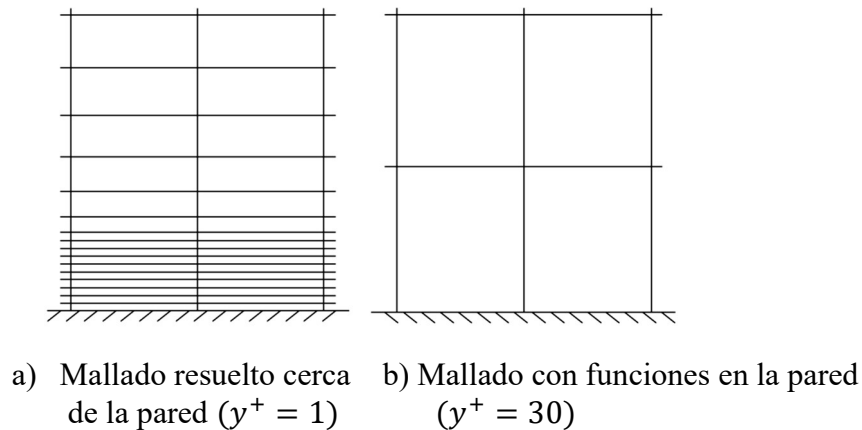
Donde  $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$  es la velocidad de corte,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $y$  es la distancia a la pared.

### **Funciones de pared**

Para modelar el flujo limitado por una pared, generalmente se usa una gran cantidad de celdas computacionales para resolver las capas límite más internas. No obstante, esto es demanda un procesamiento muy alto, ya que la cantidad de celdas computacionales aumenta con una resolución incrementada. La consideración de la pared de los modelos de turbulencia requiere que la primera celda computacional fuera de la pared se ubique a una distancia alrededor de  $y^+ = 1$ , que está dentro de la subcapa viscosa. Una alternativa a este enfoque es la implementación de funciones de pared.

Las funciones de pared usan formulaciones semi empíricas, que establecen que la velocidad promedio de un flujo turbulento en un cierto punto es proporcional al logaritmo de la distancia desde ese punto hasta la pared. Las funciones de pared generalmente se pueden usar para flujos con altos números de Reynolds sin una pérdida significativa en la precisión, sin embargo, podría tener dificultades para representar un flujo complejo, como la separación y la coalición. Además, las geometrías con una fuerte curvatura pueden ser problemáticas para las funciones de pared. A pesar de estas deficiencias, las funciones de pared se utilizan ampliamente hoy en día para simulaciones debido a la reducida potencia de procesamiento requerida, como resultado de la disminución del número de celdas computacionales, en la

Figura 2.8 se muestra diferentes enfoques para modelar el flujo cerca de la pared (Kalitzin et al., 2005).

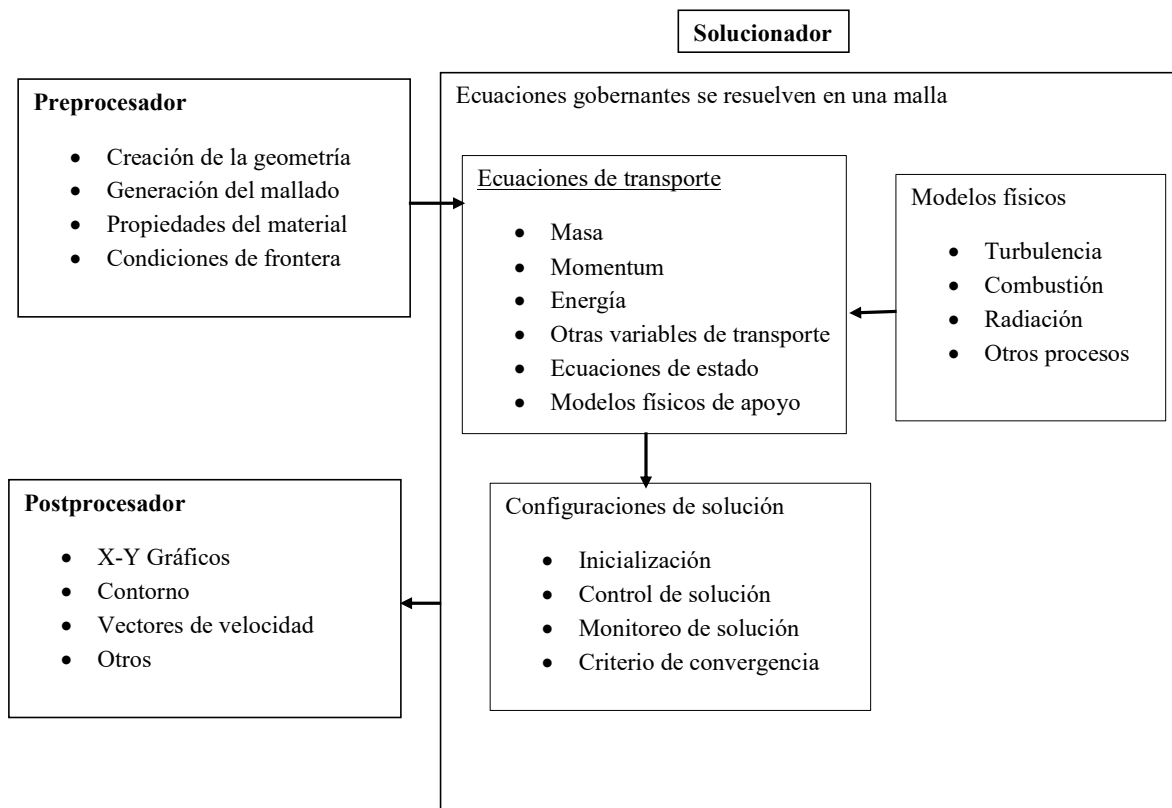


**Figura 2.8. Diferentes enfoques para modelar el flujo cerca de la pared .**

Como se ha descrito anteriormente, las cargas de viento en las estructuras se pueden calcular usando CFD, resolviendo ecuaciones Navier-Stokes para el movimiento del aire y teniendo en cuenta los efectos de compresibilidad y turbulencia. Se debe de tomar en cuenta lo siguiente al aplicar CFD para el cálculo de fuerzas inducidas por viento en estructuras costa afuera (Hirdaris et al., 2014, DNV-RP-C205, 2017):

- Los resultados pueden depender fuertemente del modelo de turbulencia utilizado;
- El campo de velocidad de entrada del viento debe estar correctamente modelado, incluidos los efectos de capa límite;
- El área expuesta de la o las estructuras debe ser una pequeña fracción del área de salida del dominio computacional;
- La resolución de la malla debe ser de al menos 10 celdas por pie cúbico de volumen de estructura y al menos 10 celdas por distancia entre estructuras;
- Se deben realizar estudios de convergencia en el mallado; y
- Los resultados deben validarse con los resultados de las pruebas del túnel de viento.

En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de flujo general que hay dentro de un análisis de CFD.



**Figura 2.9. Las funciones de interconectividad de los tres elementos principales dentro de un marco de análisis de CFD (Tu et al., 2018).**

### **Inicialización y solución de control**

En teoría, las condiciones iniciales pueden ser puramente arbitrarias. Sin embargo, en la práctica, existen ciertas ventajas para imponer las condiciones iniciales de manera inteligente. Buenas condiciones iniciales son cruciales para el procedimiento iterativo; dos razones por las cuales el usuario de CFD debe emprender la selección apropiada de las condiciones iniciales son las siguientes:

- 1) Si las condiciones iniciales se acercan a la solución de estado estacionario final, el procedimiento iterativo convergerá más rápido y dará como resultado un tiempo computacional más corto.
- 2) Si las condiciones iniciales están lejos de la realidad, los cálculos resultarán en esfuerzos computacionales más largos para alcanzar la convergencia deseada. Por lo



anterior, las condiciones iniciales inadecuadas pueden llevar al procedimiento iterativo a un comportamiento erróneo y posiblemente divergente (Tu et al., 2018).

### **Monitoreo de convergencia**

El solucionador de CFD incluye las operaciones de interconexión de tres procesos previos: solución de monitoreo, cálculo de CFD y comprobación de convergencia. Dos aspectos que caracterizan una solución computacional CFD exitosa son la convergencia del proceso iterativo y la independencia del mallado (*grid*).

Por lo general, la convergencia se puede evaluar mediante el seguimiento gradual de los residuales, que se acentúan por el avance de los cálculos numéricos de las ecuaciones algebraicas a través de cada paso de iteración. Estos residuales miden la conservación general de las propiedades del flujo (Tu et al., 2018).

Una solución convergente se logra cuando los residuales caen por debajo de algunos criterios de convergencia o tolerancia, que se preestablece dentro del procesamiento numérico que controla los parámetros de los cálculos iterativos. Esta convergencia señala claramente la eliminación continua en oposición a la posible acumulación de desequilibrios no deseados. También se pueden monitorear otras variables como las fuerzas de arrastre, fuerza de sustentación entre otras. (Tu et al., 2018).

## Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se describe la metodología utilizada para el análisis aerodinámico mediante CFD. Durante la descripción, la metodología se aplica al caso de estudio del presente trabajo, es decir, el análisis aerodinámico de una plataforma semi-sumergible de producción de hidrocarburos.

### 3.1 Hipótesis

Es posible elaborar el análisis aerodinámico de una plataforma semi-sumergible, considerando adecuadamente los efectos del área expuesta al viento en condición de huracán y las condiciones propias del sistema flotante en sitio, mediante software de simulación numérica, así mismo la obtención de resultados adecuados.

### 3.2 Análisis aerodinámico usando ANSYS Fluent

Hay diferentes métodos de solución que se utilizan en códigos CFD, el más común y en el cual se basa ANSYS Fluent, es la técnica de volúmenes finitos. En esta técnica la región de interés se divide en subregiones más pequeñas llamadas volúmenes de control, las ecuaciones se resuelven de manera iterativa para cada volumen de control como se muestra de manera ilustrativa en la Figura 3.1.

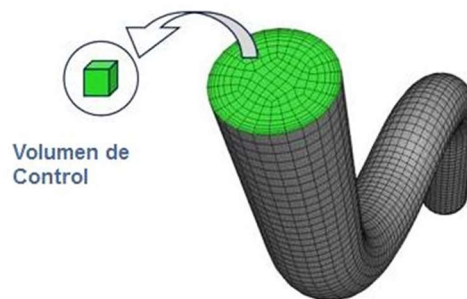


Figura 3.1. Dominio de fluido dividido en volúmenes de control más pequeños (ANSYS training 2013)

Como resultado del proceso iterativo se obtiene información en cada volumen de control y el resultado de total nos genera una imagen completa del comportamiento de flujo en estudio. De acuerdo con el manual de ANSYS 2013 algunas aplicaciones donde se usa CFD son:

- Procesos industriales: recipientes de mezclado, reactores químicos.
- Servicios de edificios: ventilación de edificios.
- Salud y seguridad: investigación de los efectos del fuego y el humo.
- Industria del motor: modelado de la combustión y aerodinámica de autos.
- Electrónica: transferencia de calor dentro y en los alrededores en placas de circuitos.
- Ambiental: dispersión de contaminantes en el aire o agua.
- Potencia y energía: optimización de procesos de combustión.
- Médico: flujo de sangre a través de los vasos sanguíneos.

La metodología para llevar a cabo la simulación se dividió en cinco partes:

1. Creación de la geometría.
2. Discretización de la geometría en pequeños volúmenes (Mallado).
3. Definición de la física del modelo (Condiciones de frontera y restricciones).
4. Resolución del problema con CFD.
5. Visualización de resultados en el Post-procesador de ANSYS.

Para la creación de la geometría que se va a estudiar, algo muy común es el uso de software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés). Ejemplos de software CAD más usados son: AutoCAD, SolidWorks, Rhinoceros, CATIA, entre otros. Cuando se tiene lista la geometría, se debe guardar en un formato que sea compatible con ANSYS. Los formatos con extensiones más comunes son: Sat, IGES, Parasolid.

Para el caso de estudio del presente trabajo se utilizó Design Modeler para crear la geometría, el cual es un componente de la paquetería de ANSYS.

### 3.3 Creación de la geometría y el modelado del dominio del caso de estudio.

El modelo de la plataforma semi-sumergible de producción se generó en ANSYS Design Modeler de acuerdo con las dimensiones que se muestran en la Tabla 3.1. El modelo está basado en la plataforma de producción Na-Kika (Ver Figura 3.2) la cual se encuentra operando en el Golfo de México a 226 kilómetros del suroeste de Nueva Orleans, en un tirante de agua de 1933 metros. Esta plataforma está diseñada para procesar hasta 130,000 barriles de crudo y 550 millones de pies cúbicos de gas natural por día, con una vida útil de 20 años.

**Tabla 3.1. Características de la plataforma semi-sumergible basados en las dimensiones de Na-kika.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Columnas:	4
Sección transversal	17.2 m x 17.2 m
Altura total	43.36 m
Distancia entre ejes	64.00 m
Pontones:	4
Sección transversal (base por altura)	12.4 m x 10.54 m
Calado:	27.43 m
Superestructura:	
Cubierta principal	81.2 m x 81.2 m x 20 m
Habitacionales	17 m x 17 m x 10 m
Módulos de proceso	34.5 m x 20 m x 22 m
Grúas:	2
Altura después de cubierta principal	14 m
Sección transversal	4 x 4 m
Distancia de la pluma base	40.6 m
Quemador (Forma triangular)	7.5 m x 7.5 m x 70 m



Figura 3.2. Plataforma semi-sumergible Na-Kika (British Petroleum, 2018).

El bosquejo del casco de la plataforma se muestra en la Figura 3.3 y la Figura 3.4, donde se muestra las características principales de las columnas y pontones. Cabe mencionar que las columnas y los pontones son simétricos. Para este caso de estudio donde se analizó sólo el área expuesta al viento los pontones no se toman en cuenta para el análisis aerodinámico.

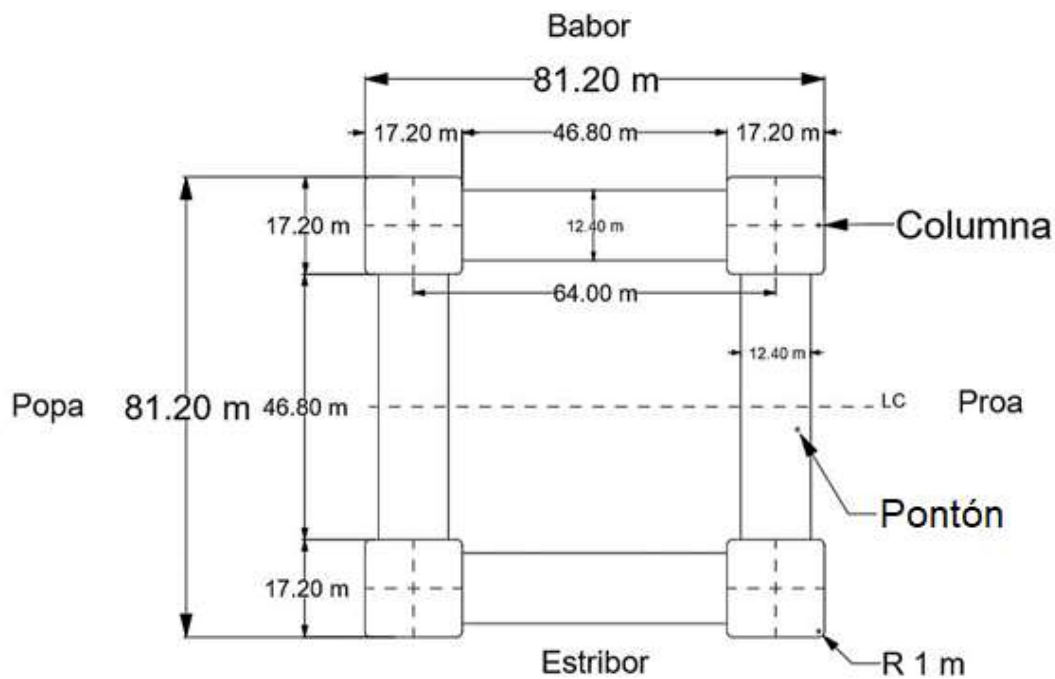
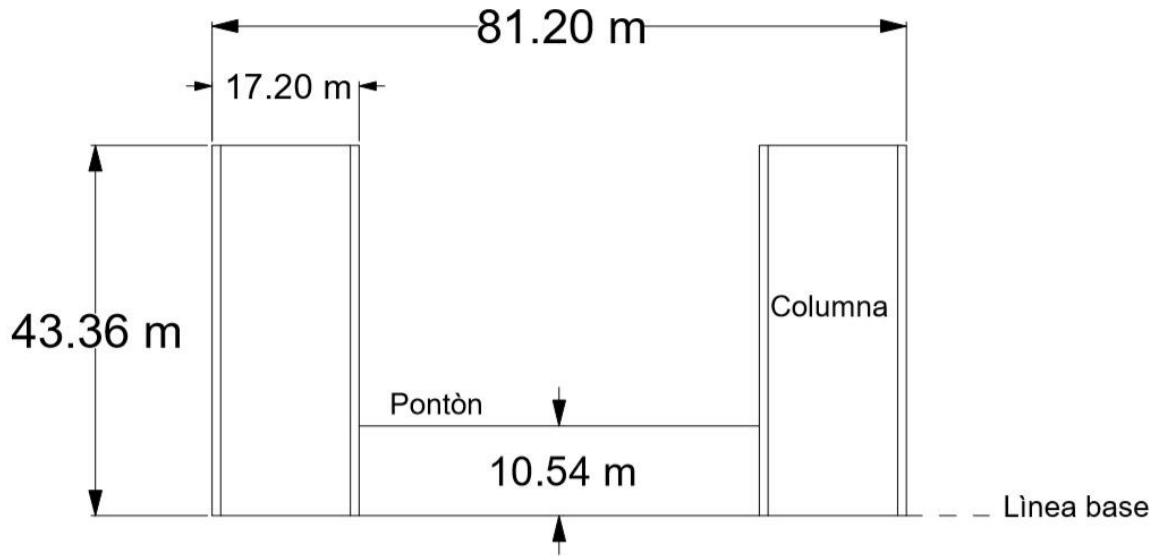


Figura 3.3. Vista de planta del casco de la plataforma.



**Figura 3.4. Vista de perfil del casco de la plataforma.**

Para este análisis, los elementos de la superestructura de la plataforma se simplificaron en formas simples (prismas rectangulares) como las grúas, equipo de proceso, habitacionales, quemador etc., (ver Figura 3.5 y Figura 3.6), esto con el objetivo de facilitar la etapa del mallado, debido a que si se modelara la superestructura a detalle (lo más cercano a la realidad) sería muy costoso la resolución del mallado y por lo tanto el análisis se llevaría demasiado tiempo, por ende no es factible realizar el modelo de la plataforma a detalle.

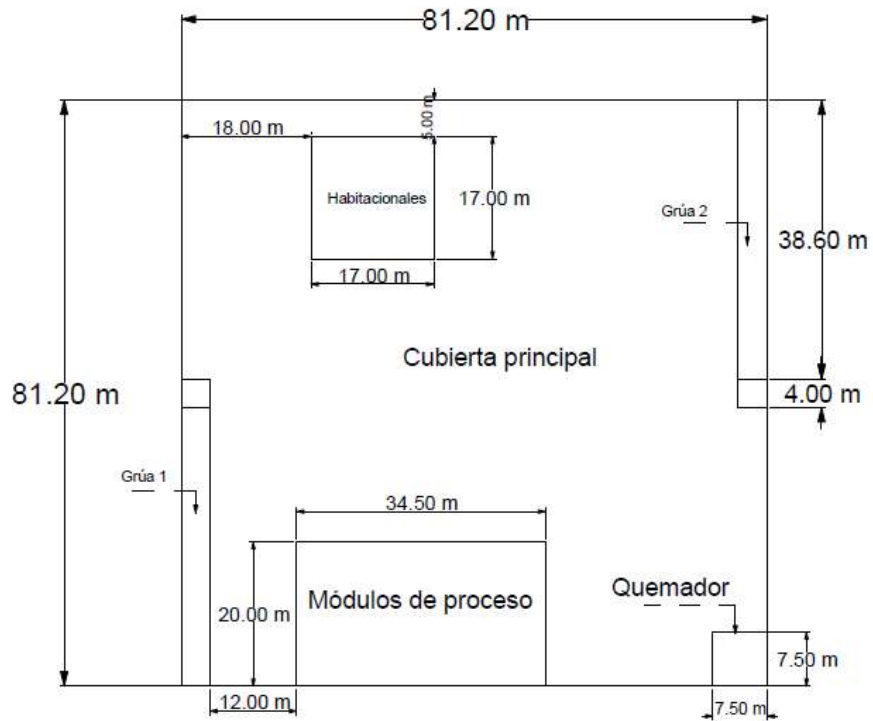


Figura 3.5. Vista de planta de la superestructura.

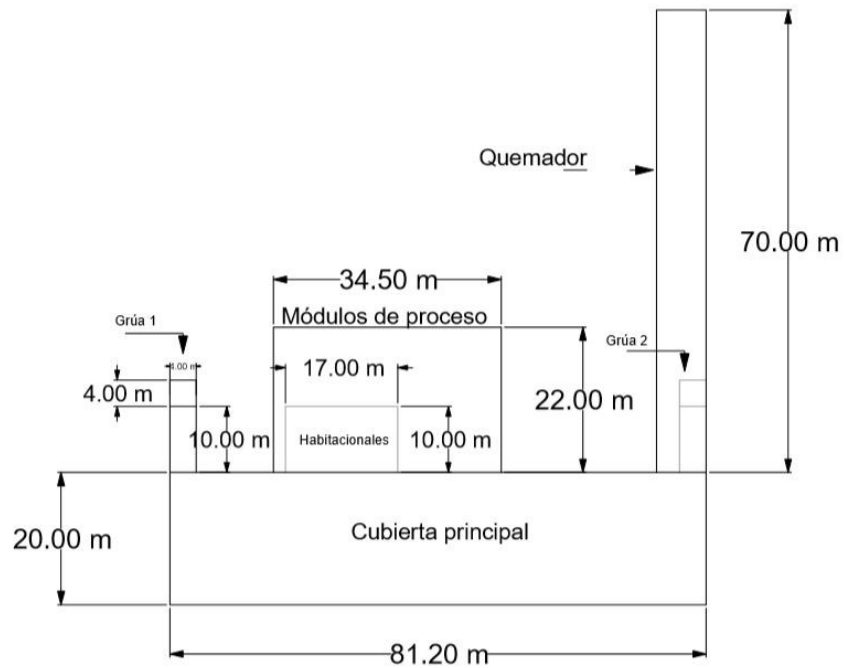
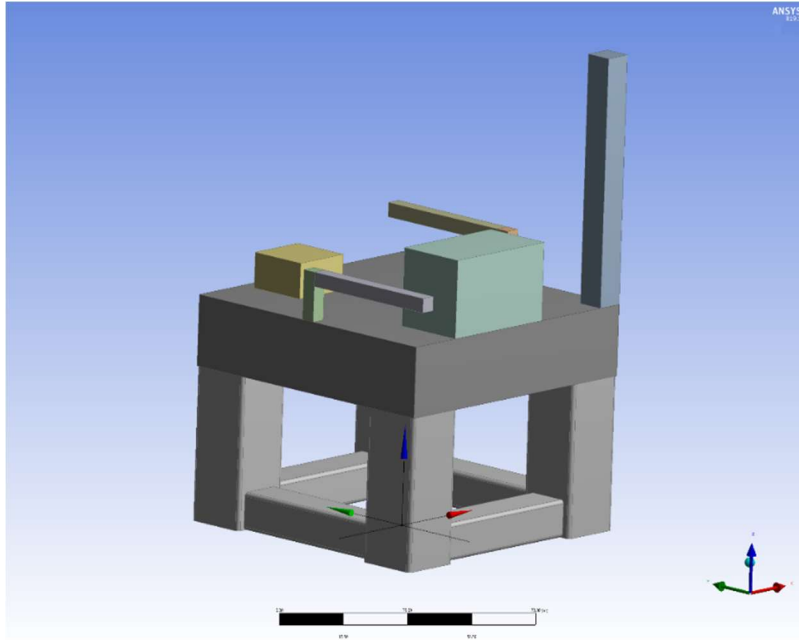


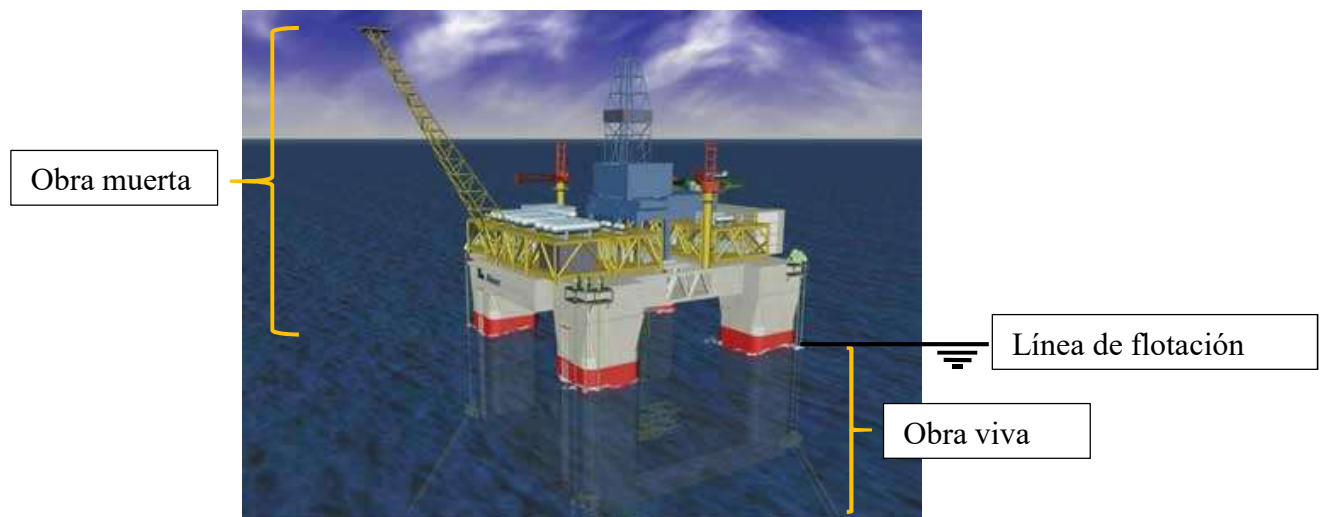
Figura 3.6. Vista de perfil de la superestructura.

De acuerdo con las medidas proporcionadas por las Figuras 3.3 a 3.6 se realizó el modelo en tres dimensiones en ANSYS DesignModeler, quedando la configuración de la plataforma como se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7. Vista isométrica del modelo de la plataforma simplificada en 3D.**

Debido a que el análisis a realizar implica la actuación de viento en la semi-sumergible, el estudio se enfoca en la parte expuesta. En términos navales esta área se denomina obra muerta, la cual es el área que está comprendida desde la línea de flotación hasta el extremo máximo de la estructura como se muestra en la Figura 3.8.

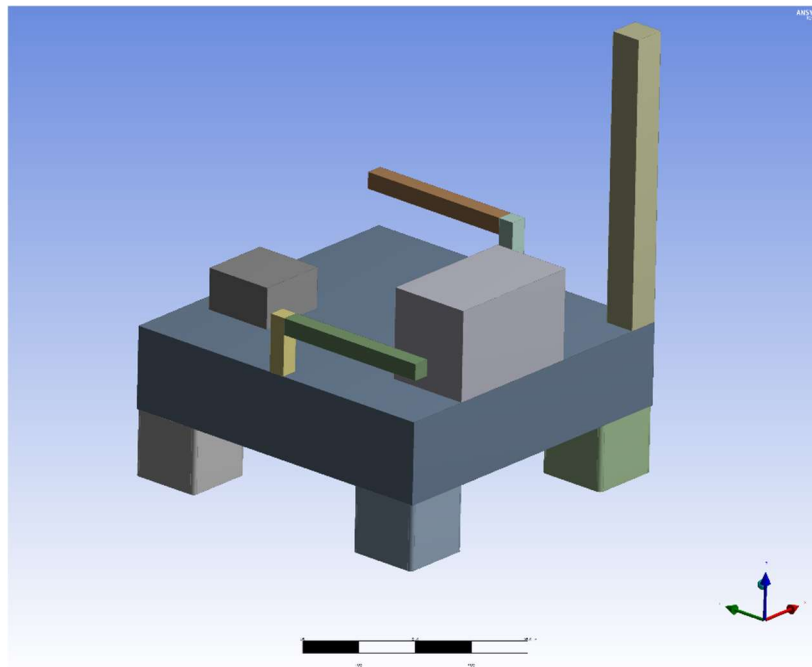


**Figura 3.8. Área expuesta al viento - obra muerta (Schlumberger, 2018)**



Para la plataforma que se analizó en este trabajo, el área expuesta al viento está comprendida desde la línea de flotación hasta el extremo del quemador, dando una altura total de 106 m, y la línea de flotación está a 27.5 m (calado al cual la plataforma opera a condiciones normales) desde la base de la estructura.

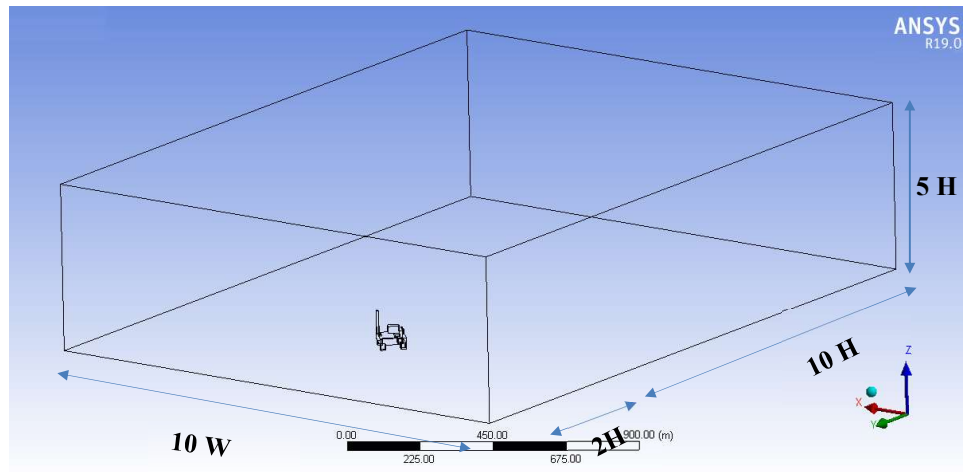
Las dimensiones de la geometría para el análisis sólo se ven modificadas en la altura total, sin modificar la cubierta y superestructura de la plataforma, como se mencionó anteriormente los pontones no se tomaron en cuenta, ya que estos no están expuestos al viento, para las columnas resultó una altura de 16 m hasta la cubierta, obteniendo una geometría como muestra en la Figura 3.9.



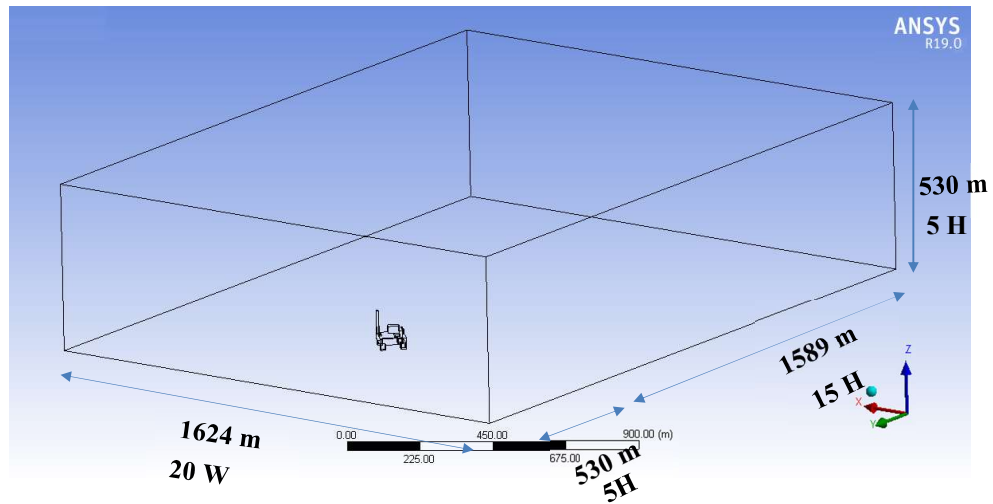
**Figura 3.9. Vista isométrica del área expuesta al viento de la plataforma en 3D para el análisis aerodinámico.**

A partir del modelo generado de la plataforma semi-sumergible (Figura 3.9) se creó un túnel virtual siguiendo las recomendaciones dadas por ANSYS (2016), en donde se indica que el ancho del túnel virtual debe de ser al menos 10 veces el ancho de la geometría a analizar, 2 veces la altura desde la entrada del fluido hasta la geometría y a partir de ahí 10 veces la altura para que haya un desarrollo adecuado del fluido, para la altura se debe de tener al

menos 5 veces la altura de la geometría como se muestra en la Figura 3.10 (ANSYS training, 2016). De acuerdo con estas recomendaciones, el túnel virtual se dimensionó como se muestra en la Figura 3.11 tomando dimensiones extras para el desarrollo adecuado del flujo.



**Figura 3.10. Dimensiones mínimas requeridas para el túnel de viento virtual recomendado por ANSYS.**



**Figura 3.11. Dimensiones del túnel de viento virtual para el caso de estudio (dominio).**

### 3.4 Discretización de la geometría y el dominio dentro de Fluent (Mallado)

La calidad del mallado es un factor clave para la representación adecuada de la interacción estructura fluido. Algunas recomendaciones para la calidad de la malla recomendadas por ANSYS para Fluent se muestran en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3.

**Tabla 3.2. Valores de referencia para medir la calidad de la malla, Orthogonal.**

Orthogonal	Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable
	1.00 a 0.95	0.95 a 0.70	0.69 a 0.20	0.20 a 0.15

**Tabla 3.3. Valores de referencia para medir la calidad de la malla, Skewness.**

Skewness	Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable
	0 a 0.25	0.25 a 0.50	0.50 a 0.80	0.80 a 0.94

Como se mencionó, hay diferentes métodos de solución que se utilizan en códigos de CFD, el más común y en el cual se basa ANSYS Fluent es la técnica de volúmenes finitos, en esta técnica la región de interés se divide en subregiones más pequeñas llamadas volúmenes de control, las ecuaciones se solucionan de manera repetitiva para cada volumen de control. Como resultado del proceso iterativo se obtiene información en cada volumen de control y el resultado total nos genera una imagen completa del comportamiento de flujo en estudio.

Este volumen de control se generó con un mallado tridimensional tetraédrico para la geometría y el dominio del flujo para todos los casos que se analizaron en este trabajo. Para este proyecto se realizaron varios mallados con fin de llevar a cabo un análisis de sensibilidad de malla y observar un adecuado desarrollo del flujo.

El mallado se realizó con el módulo ANSYS Meshing. Como primer paso se realizó una malla por defecto con los valores que tiene ANSYS Meshing predeterminados, posteriormente se realizó un mallado semi fino, y después un mallado fino. Estos dos últimos mallados se realizaron considerando una capa límite con un espesor de pared de 3 cm, una distancia al primer nodo de la capa límite de 4 mm y 15 capas. Posteriormente se realizaron dos mallados con las mejores características (más finas) reduciendo y aumentando un 10% el tamaño del dominio con la finalidad de ver si el flujo se desarrolla adecuadamente, todo esto manteniendo la geometría sin rotar (es decir, a 0°), consecutivamente a estos mallados

se desarrollaron las mallas rotando la geometría 22.5° y 45 °, en la Tabla 3.4 se muestra un resumen de las características de todos estos mallados.

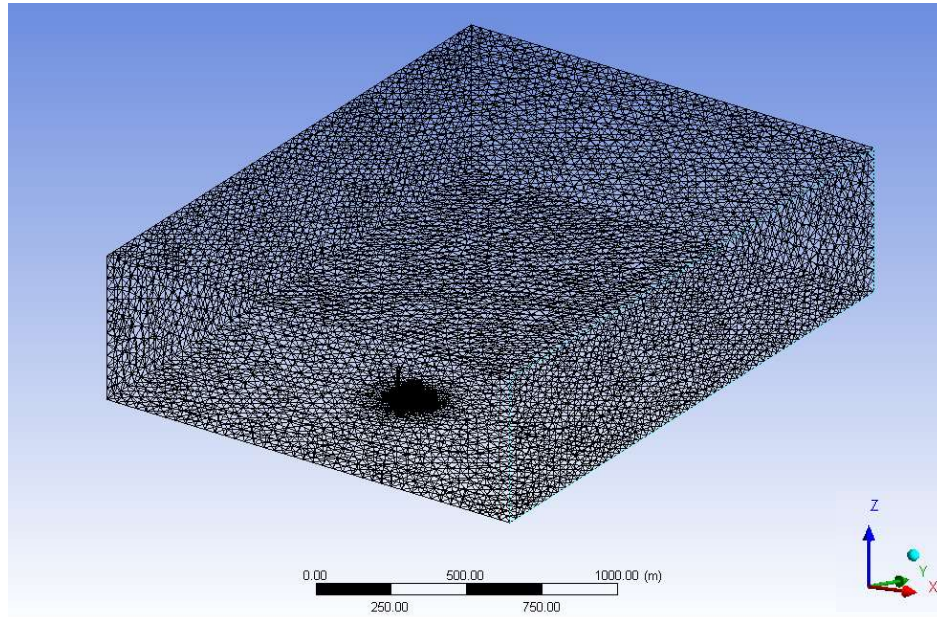
**Tabla 3.4. Características de los mallados estudiados.**

Tipo de mallado	Número de elementos	Número de nodos	Calidad Orthogonal (promedio)	Calidad Skewness (promedio)	Tamaño promedio mínimo del elemento cercano a la pared de la plataforma (m)	Tamaño promedio máximo del elemento en el dominio del fluido lejos de la pared (m)	Espesor de capa límite (m)	Número de capas
Mallado 1 - incidencia 0°	523,283	99,547	0.85084	0.24785	6	32	0	0
Mallado 2 - incidencia 0°	923,787	169,418	0.85841	0.23116	2	32	0.3	15
Mallado 3 - incidencia 0°	10,544,529	3,017,125	0.87159	0.21214	0.5	32	0.3	15
Mallado 4 - incidencia 0°	11,242,943	3,824,455	0.88431	0.20613	0.4	32	0.3	15
Mallado 5 - incidencia 0°	20,010,300	6,816,342	0.89112	0.20347	0.3	19.2	0.3	15
Mallado 6 - incidencia 0° **	19,961,317	6,785,887	0.89181	0.20207	0.3	19.2	0.3	15
Mallado 7 - incidencia 0° (reducción del dominio 10%)	19,358,049	6,716,692	0.89192	0.2033	0.3	19.2	0.3	15
Mallado 8 - incidencia 0° (aumento del dominio 10%)	20,963,704	6,993,852	0.89124	0.20467	0.3	19.2	0.3	15
Mallado 9 - incidencia 22.5°	19,397,815	6,552,663	0.89062	0.20387	0.3	19.2	0.3	15
Mallado 10 - incidencia 45°	17,208,121	5,380,285	0.88299	0.21331	0.3	19.2	0.3	15

De acuerdo con la Tabla 3.4 los valores de la calidad de la malla Skewness y Orthogonal desde el mallado 1 al mallado 10 se mantienen casi constante los valores, mejorando gradualmente a partir del mallado 4, cabe mencionar que todos los valores de los parámetros de calidad de las mallas son cantidades que reflejan una buena correlación entre los nodos y los elementos de la malla en el dominio del fluido y cerca de la estructura, así como una buena transición del tamaño de la malla desde la pared de la estructura hacia el dominio del fluido.

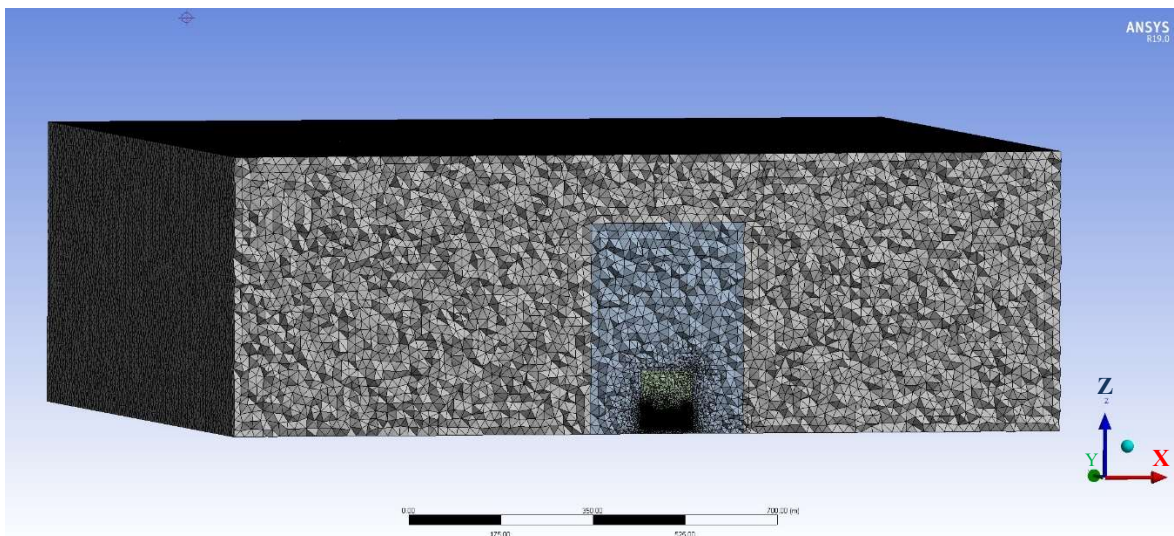
Como una estrategia para reducir el costo computacional, el dominio del modelo fue dividido en subdominios utilizando diferentes tamaños de malla, para los mallados 1 hasta el mallado 8, se utilizó una configuración de dos subdominios con el fin de poder tener un mejor control sobre la transición de tamaños de la malla y obtener una calidad de malla dentro de un rango aceptable, para los mallados 8 y 10 solo se utilizó un subdominio cilíndrico para poder rotar sin ninguna interferencia la estructura y por lo tanto obtener parámetros de calidad de malla aceptables.

En la Figura 3.12 se muestra el mallado de todo el dominio y la geometría del mallado óptimo.

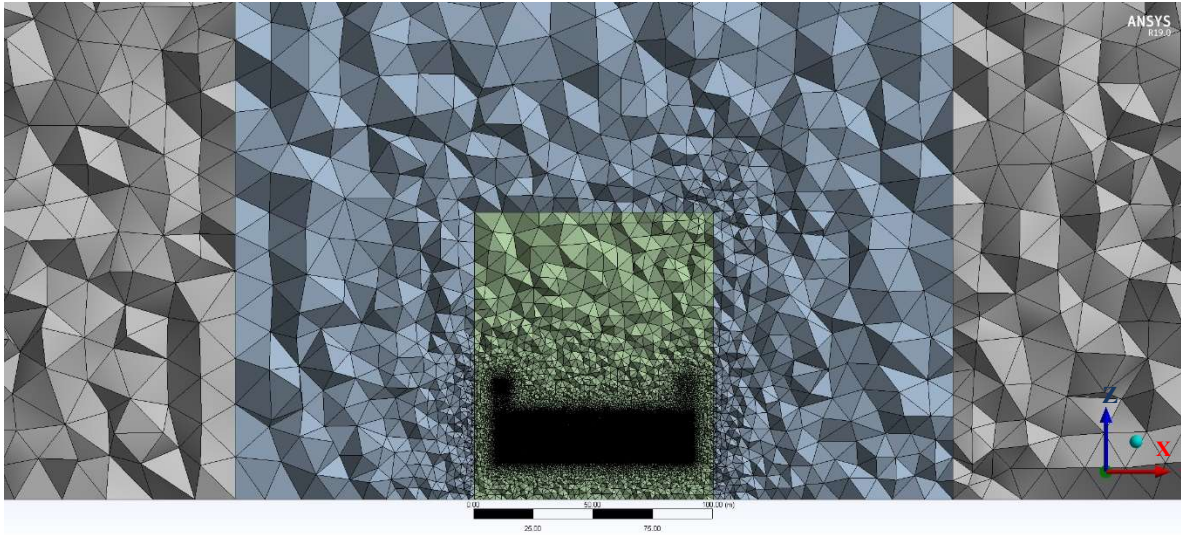


**Figura 3.12. Malla de todo el dominio y la geometría de la plataforma semi-sumergible.**

En la Figura 3.13 y Figura 3.14 se muestra el mallado sobre la geometría de todo el dominio mostrando los subdominios 1 y 2 creados para un control adecuado de la malla y así obtener una calidad buena de la malla de acuerdo con los parámetros recomendados por ANSYS Fluent, además el mallado más fino se coloca en el dominio más cercano a la superficie, debido a que es el lugar donde es de interés obtener todos los efectos viscosos.

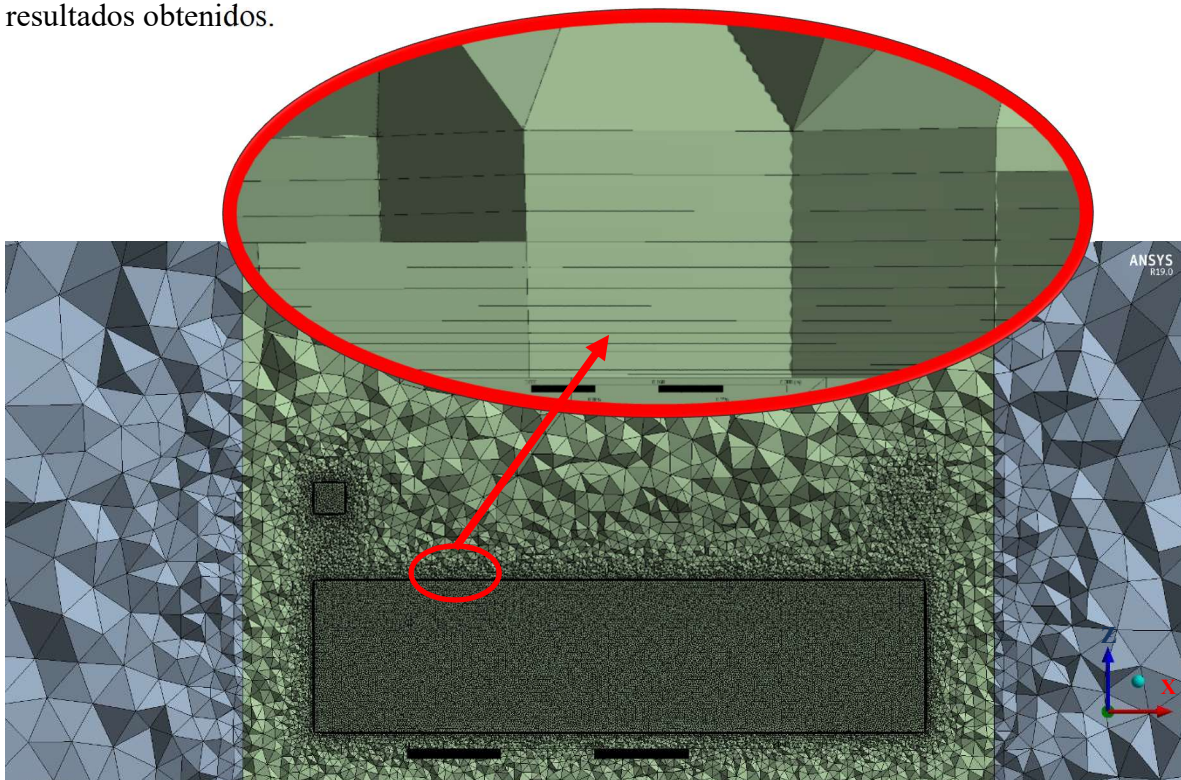


**Figura 3.13. Mallado 5 (malla óptima) sobre la geometría de la plataforma semi-sumergible, incidencia de 0°.**



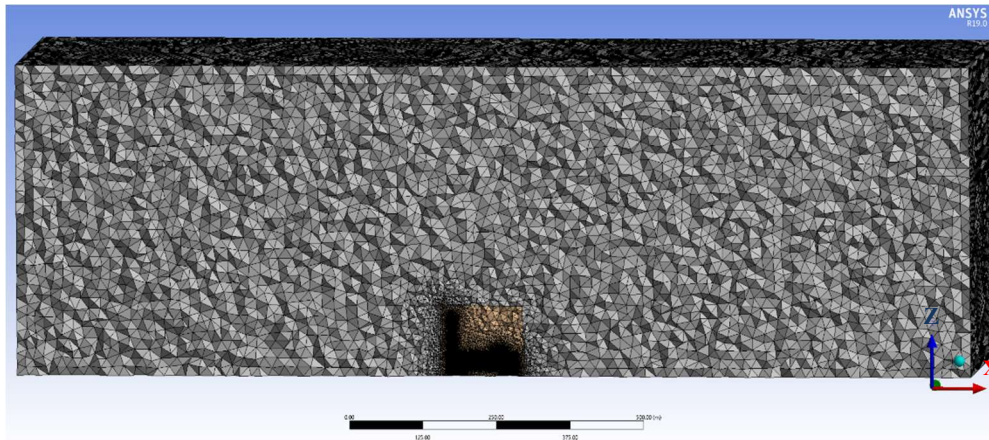
**Figura 3.14. Acercamiento de la malla óptima en los subdominios 1 y 2 de la plataforma semi-sumergible.**

En la Figura 3.15 se aprecia la malla en la geometría haciendo un acercamiento a la capa límite y mostrando el tamaño de 0.3 m, el cual resultó ser el óptimo de acuerdo con los resultados obtenidos.

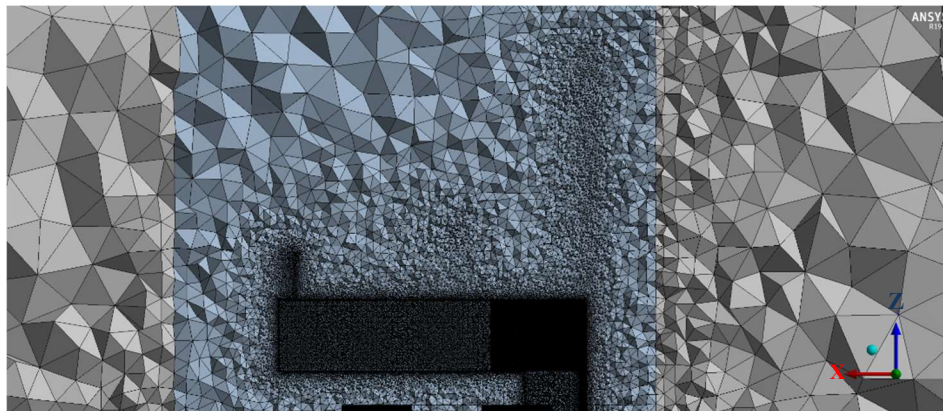


**Figura 3.15. Acercamiento de la malla en la cubierta de la plataforma semi-sumergible, mostrando el espesor de la capa límite y las capas creadas, incidencia  $0^\circ$ .**

Para el mallado de 9 y 10 la incidencia cambia a  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$  respectivamente, por lo tanto, se optó por crear otra configuración de subdominio diferente al de la incidencia de  $0^\circ$ , con el fin de poder rotar la geometría de la semi-sumergible, creando solo un subdominio cilíndrico como se muestra en la Figura 3.16 y Figura 3.17, aun así se conservó las características del mallado 5 el cual resultó ser el óptimo.



**Figura 3.16. Mallado 9, configuración cilíndrica del subdominio para una incidencia de  $22.5^\circ$ .**



**Figura 3.17. Mallado 10, configuración cilíndrica del subdominio para una incidencia de  $45^\circ$ .**

### **3.5 Definición de la física del modelo (Condiciones de frontera y restricciones)**

Después de que se generó el mallado, las condiciones de frontera que se aplicaron sobre la geometría fueron las siguientes:

- Se consideró la temperatura del aire a 25 °C y con presión atmosférica de 1 atmósfera.
- Se usó una velocidad de 70 m/s (250 km/h) normal a la entrada del volumen de control, la cual corresponde a la velocidad de un huracán categoría 5.
- En la frontera de salida se consideró una presión relativa de cero.
- Las paredes, el techo y el piso de la geometría del túnel virtual de viento se tomó como condición de frontera tipo simetría.
- La geometría de la plataforma semi-sumergible se tomó como tipo pared.
- Las paredes creadas de los subdominios se tomaron como interiores.
- Se tomó el valor de error  $1 \times 10^{-6}$  como criterio de convergencia para tener una precisión mayor en los resultados, ya que por defecto ANSYS toma como  $1 \times 10^{-3}$  el valor de error.
- El análisis se realizó en estado estacionario.

### **3.6 Solución del problema con ANSYS Fluent**

A partir de la definición del modelo y del dominio, se utilizó un modelo de turbulencia SST para la solución del problema. Este modelo tiene la característica de representar adecuadamente el flujo para altos números de Reynolds. El modelo SST se basa en el modelo  $(k - \omega)$  y tiene el mismo tratamiento automático de pared, es el responsable del transporte de la tensión de estrés cortante turbulenta y proporciona predicciones altamente precisas del inicio y la cantidad de separación de flujo.



Se realizó una inicialización híbrida que es recomendada por el solucionador de Fluent de acuerdo con ANSYS training (2016), la cual es automatizada, así mismo para los cálculos en estado estacionario, se utilizó un solucionador acoplado basado en la presión y datos de segundo orden, además se utilizó la opción de resolver el flujo de una forma pseudo-transitoria.

El método pseudo transitorio de baja relajación es una forma de relajación subyacente implícita, la falta de relajación se controla a través del tamaño del paso de pseudo tiempo. El tamaño del paso de pseudo tiempo puede ser el mismo o diferente para diferentes ecuaciones resueltas, se utilizó un valor pseudo transitorio de 0.004.

Para todos los análisis se llevaron a cabo 20000 iteraciones.

## **Capítulo 4. Resultados**

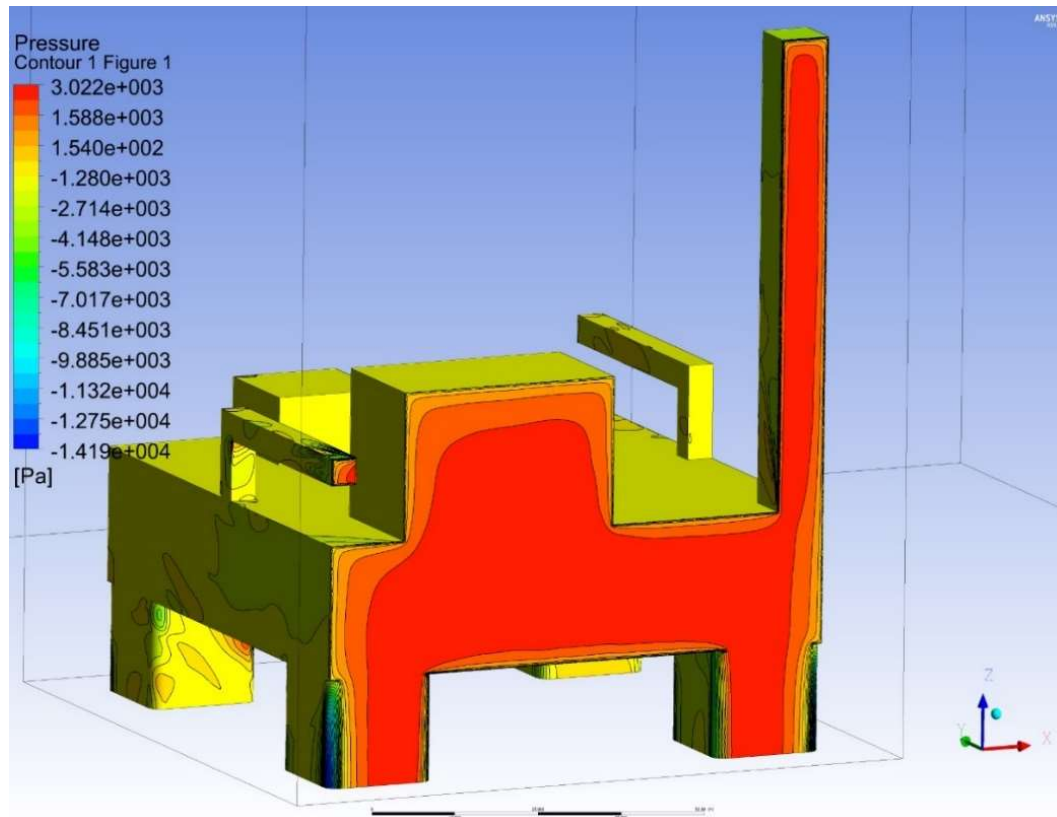
Después de haber realizado pruebas en diferentes mallas y utilizar diferentes subdominios, se llevó a cabo el estudio aerodinámico de la plataforma semi-sumergible. Los resultados obtenidos son analizados tanto por su magnitud como visualmente. En este capítulo se describe inicialmente las velocidades de viento obtenidas en su paso por la plataforma, así como las direcciones de flujo. Posteriormente se describen las fuerzas obtenidas en los ejes X, Y y Z, dando importancia a las fuerzas de arrastre calculadas. Como parte final, se muestra el costo computacional requerido para cada análisis, lo cual es un dato de suma importancia para este tipo de estudio.

### **4.1 Visualización de resultados en el Post-procesador**

La obtención de imágenes en tres dimensiones acerca de las presiones y velocidades se obtuvieron mediante CFD-Post, el cual es un software integrado a Fluent para el procesamiento de los resultados de las simulaciones numéricas.

#### **4.1.1 Presiones y velocidades con incidencia de viento de 0°**

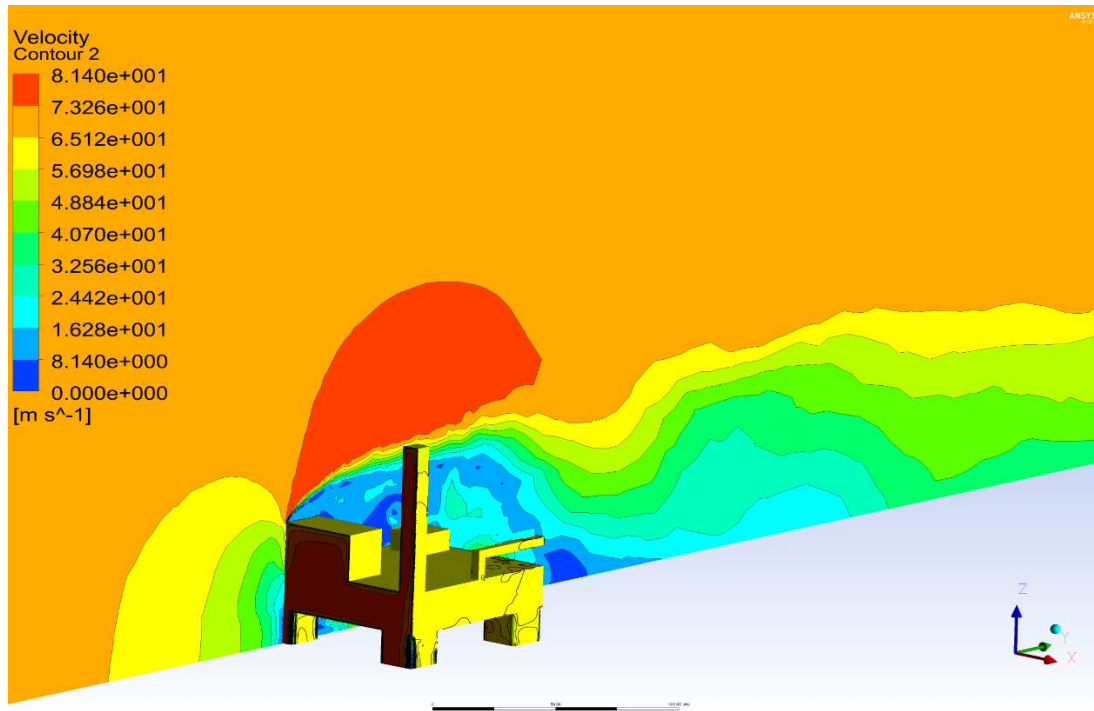
En la Figura 4.1 se observa (mediante una escala de colores) la variación de las presiones ejercidas por el viento sobre la plataforma con incidencia a 0°. Como puede observarse, la presión máxima es de 3022 Pa y, como es de esperarse, se presenta de manera predominante en el área frontal perpendicular a la dirección de flujo.



**Figura 4.1. Presión que ejerce el viento sobre la plataforma a 0° de incidencia del viento.**

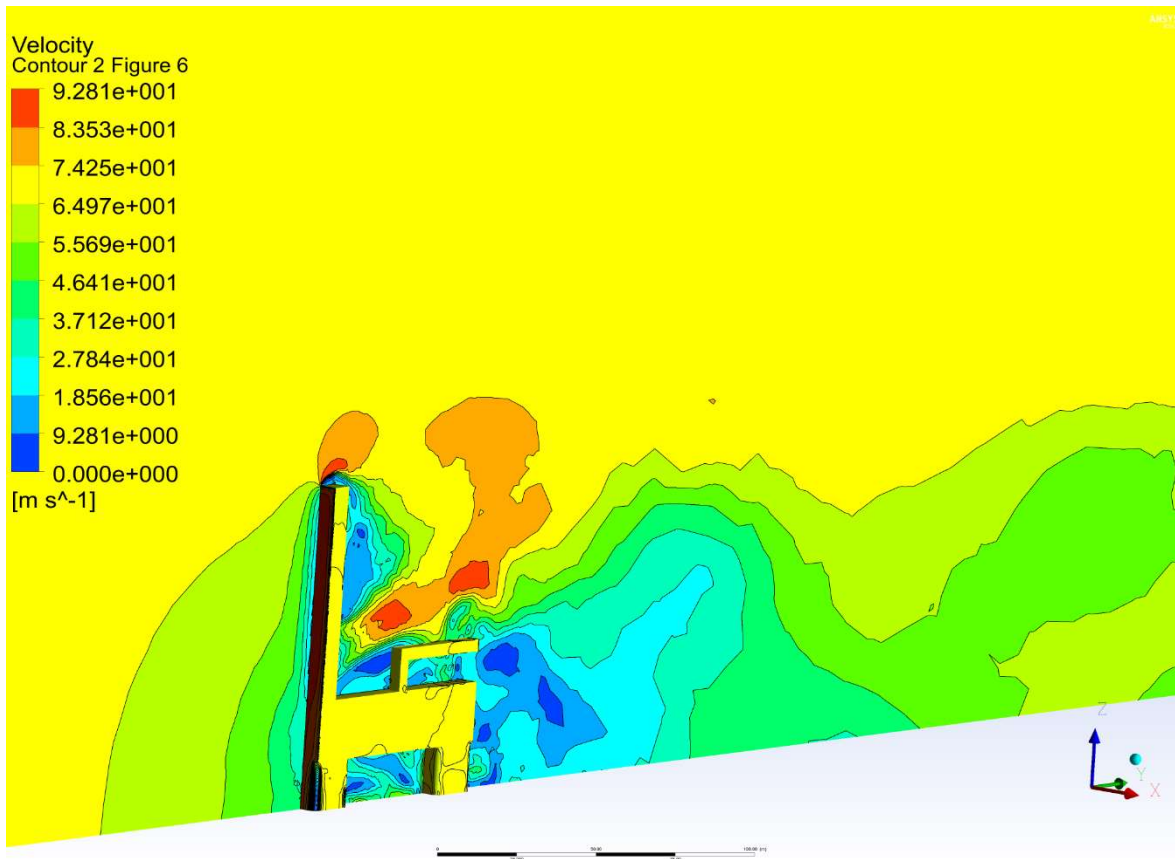
A continuación, se muestran algunos planos longitudinales que conforman el perfil de velocidad del viento a diferentes distancias transversales, para apreciar cómo varía en su impacto con los equipos de cubierta.

En la Figura 4.2 se muestra un perfil de velocidad a 10 m de la línea centro de la plataforma, en el cual se aprecia la variación de la velocidad una vez que impacta con el módulo de proceso (el cual se simplificó como un prisma rectangular). La velocidad máxima, representada en color rojo, es de 81.4 m/s para este perfil en la ubicación mencionada anteriormente.



**Figura 4.2. Perfil de velocidad a 10 m de línea centro (0° de incidencia del viento).**

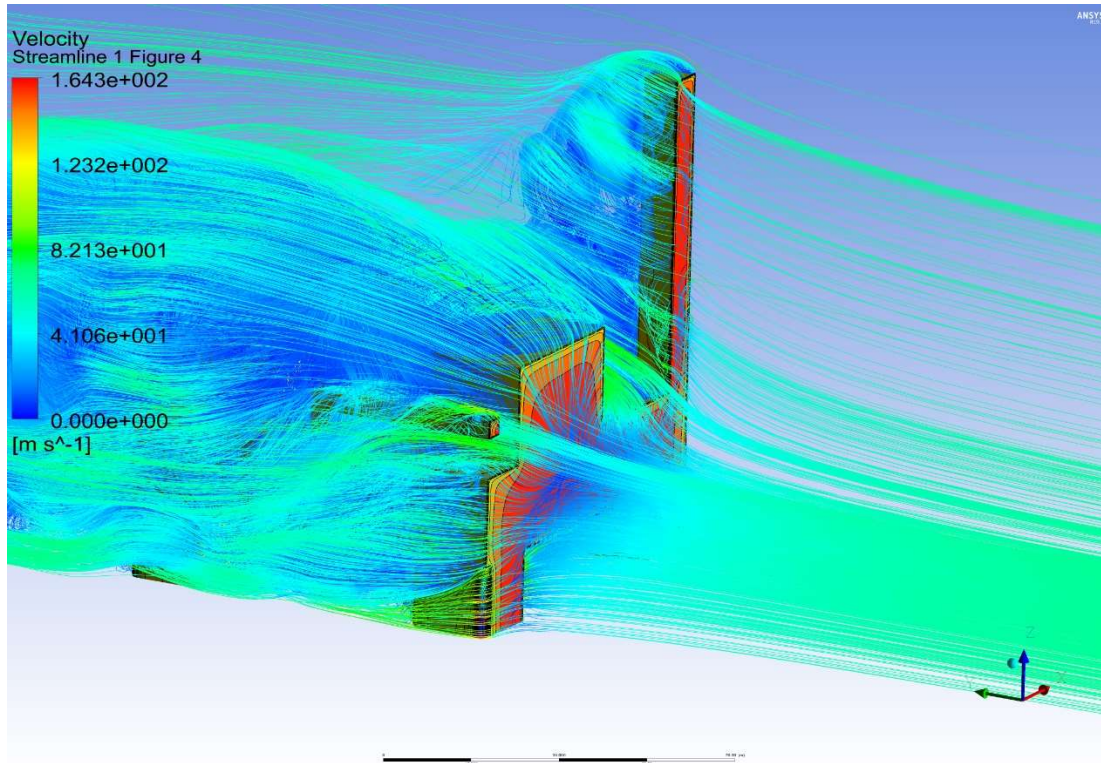
En la Figura 4.3 se observa un perfil de viento detrás del quemador en el cual se puede apreciar la variación de la velocidad debido a la generación de vórtices, los cuales son de interés, debido a que para miembros esbeltos la generación de vórtices puede generar vibraciones severas en la estructura, incluso puede llegar a entrar en resonancia la estructura.



**Figura 4.3 Perfil de velocidad en dirección del quemador (0° de incidencia del viento).**

En la Figura 4.4 se muestra la línea de corriente (*streamlines*) que muestran el comportamiento del flujo y la velocidad alrededor de la plataforma, mostrando lugares donde se ve la presencia de vórtices, los cuales pueden ser graves para la estructura. Como puede observarse, los vórtices se presentan principalmente detrás del quemador y de los módulos de proceso que se encuentra sobre cubierta de la plataforma semi-sumergible.

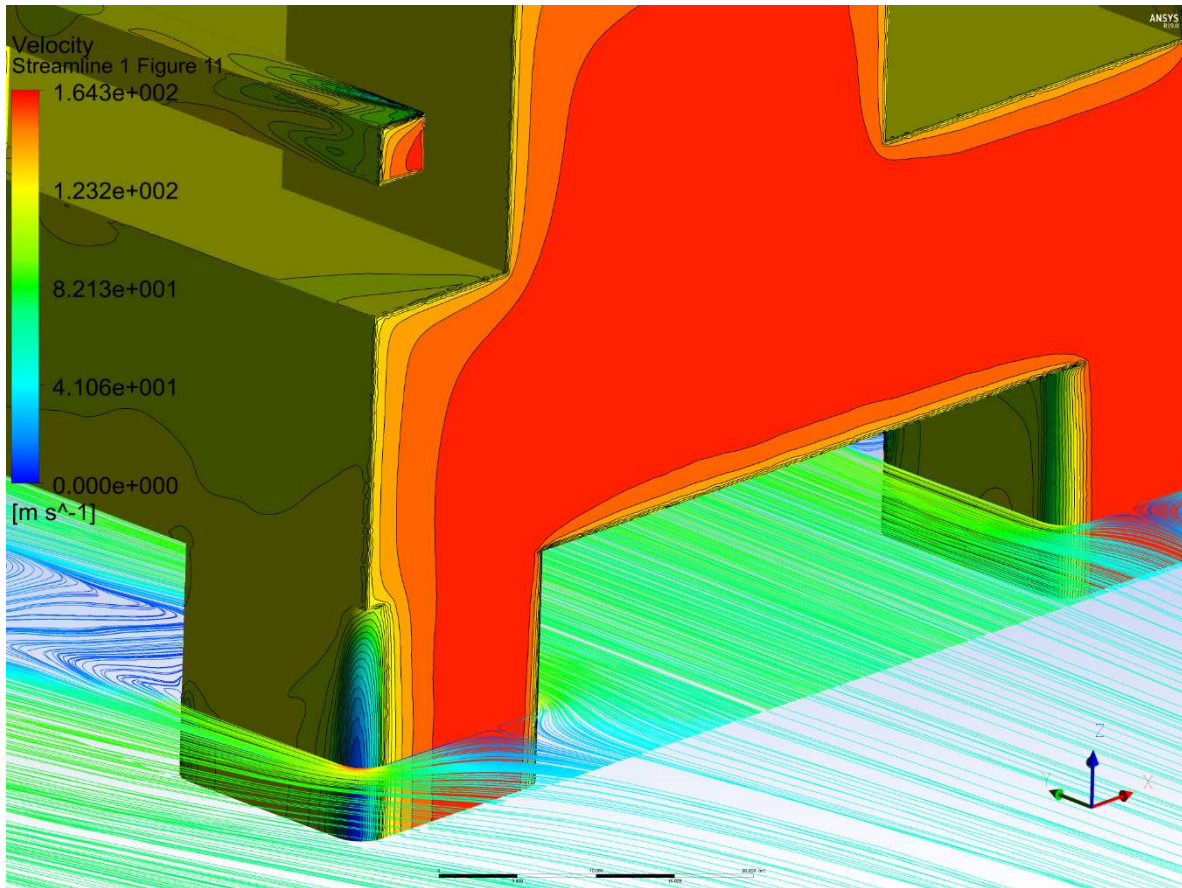
Los efectos del paso del viento en los diversos equipos y elementos de la plataforma se reflejan en aumento y disminución de velocidades. Por un lado, se observa una velocidad máxima de 164.3 m/s, la cual se presenta por encima y debajo de la plataforma. En contraste, la velocidad es fuertemente reducida en la parte posterior de los objetos (en relación con la incidencia del viento) debido al efecto de pantalla, lo cual se identifica en color azul. El aumento de la velocidad del viento y la formación de vórtices es principalmente de interés en la parte de superior de cubierta, pues es la zona de operación y existen equipos de proceso y módulos habitacionales.



**Figura 4.4. Líneas que muestran el comportamiento de la velocidad alrededor de la plataforma (0° de incidencia del viento).**

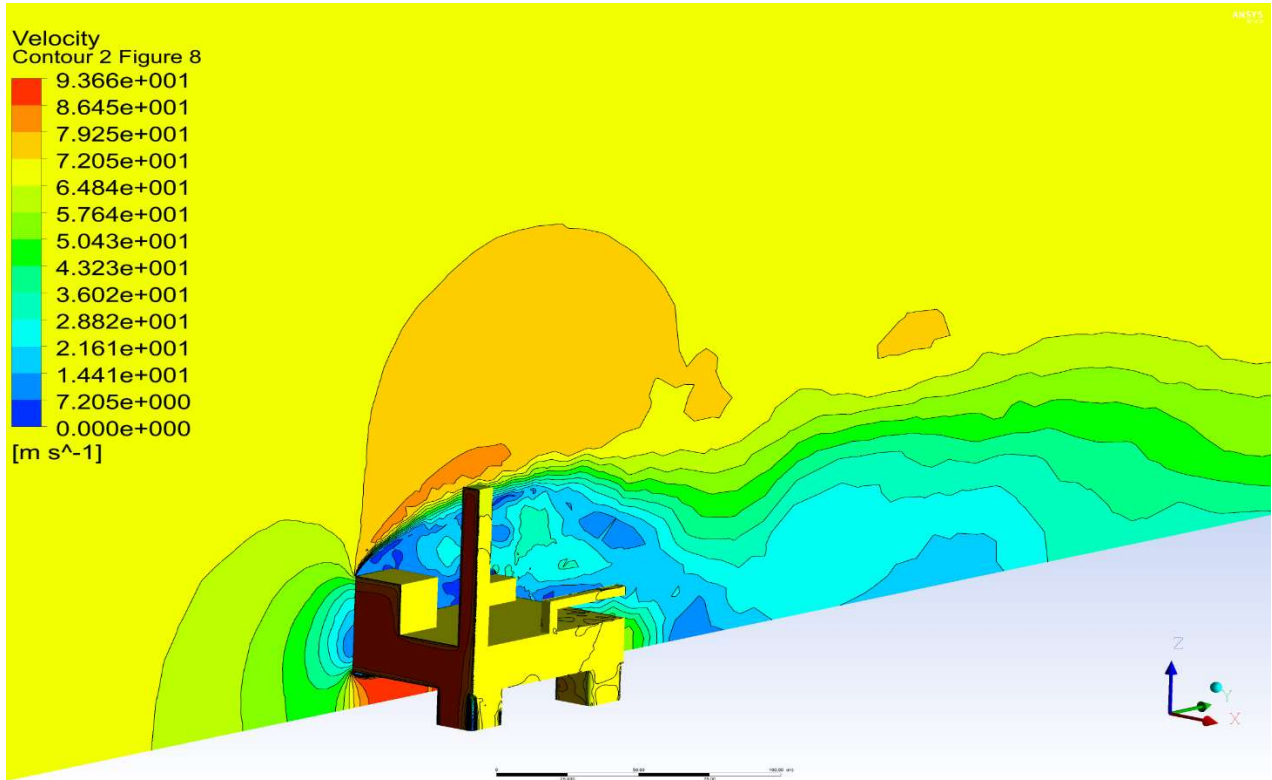
Para una mejor identificación del paso del flujo de viento en la parte inferior de la plataforma, en la Figura 4.5 se muestra un plano de las líneas de flujo a 5 m de la línea base de la plataforma, en el cual se aprecia la variación de la velocidad una vez que el viento impacta con las columnas generando, una velocidad máxima de 164.3 m/s, este aumento de la velocidad del viento se genera debido al principio de Bernoulli.

De acuerdo con el enunciado de Bernoulli, en los extremos de las columnas donde la sección es semicircular las partículas se aceleran y, por consiguiente, la presión disminuye en esta zona. La presión que se menciona en el principio de Bernoulli es la presión interna que el fluido ejerce en todas direcciones durante el flujo, esto debido a que los fluidos incompresibles tienen que aumentar su velocidad cuando alcanzan una sección más estrecha para mantener el volumen de flujo constante.



**Figura 4.5. Líneas que muestran el comportamiento de la velocidad alrededor de las columnas (0° de incidencia del viento).**

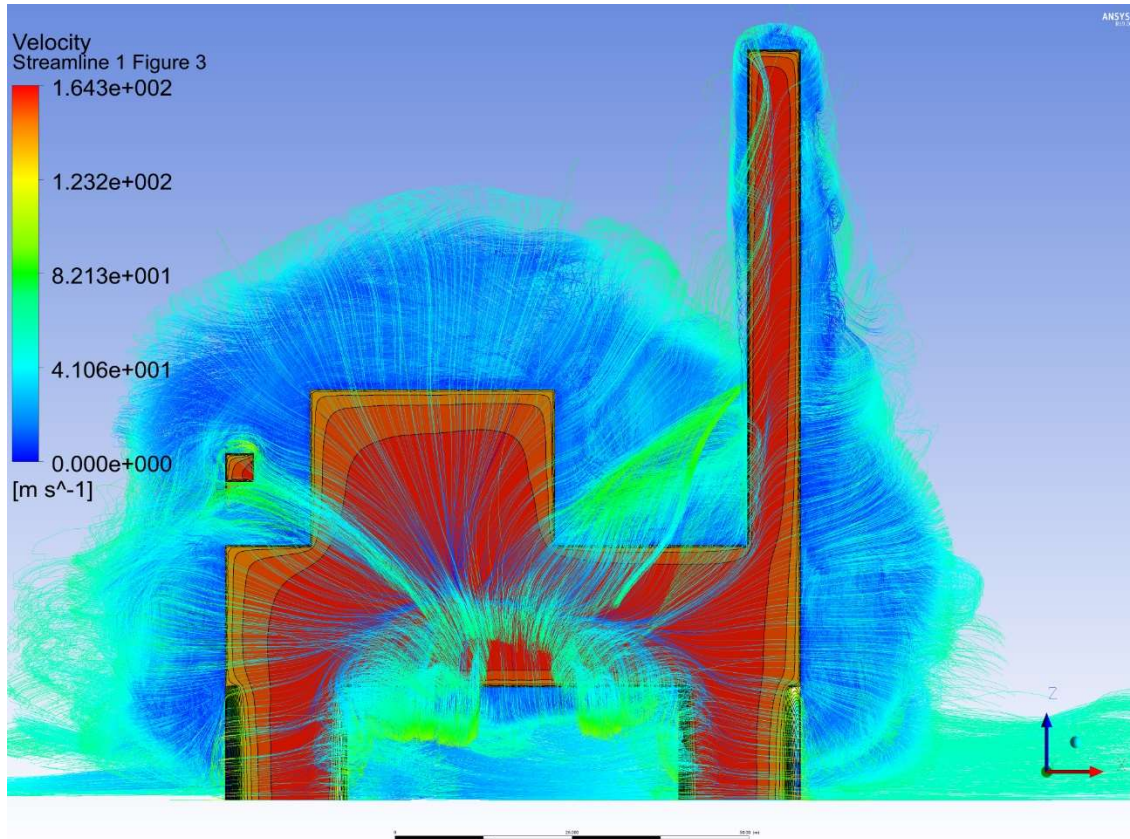
En la Figura 4.6 se muestra un perfil de velocidad a 5 m de la línea centro de la plataforma en el cual se aprecia la variación de la velocidad una vez que impacta con el módulo de proceso y la cubierta principal creando un gradiente de velocidades. En la parte inferior de la cubierta principal de la plataforma el flujo se separa obteniendo una velocidad máxima de 93.66 m/s.



**Figura 4.6. Perfil de velocidad a 5 m de línea centro (0° de incidencia del viento).**

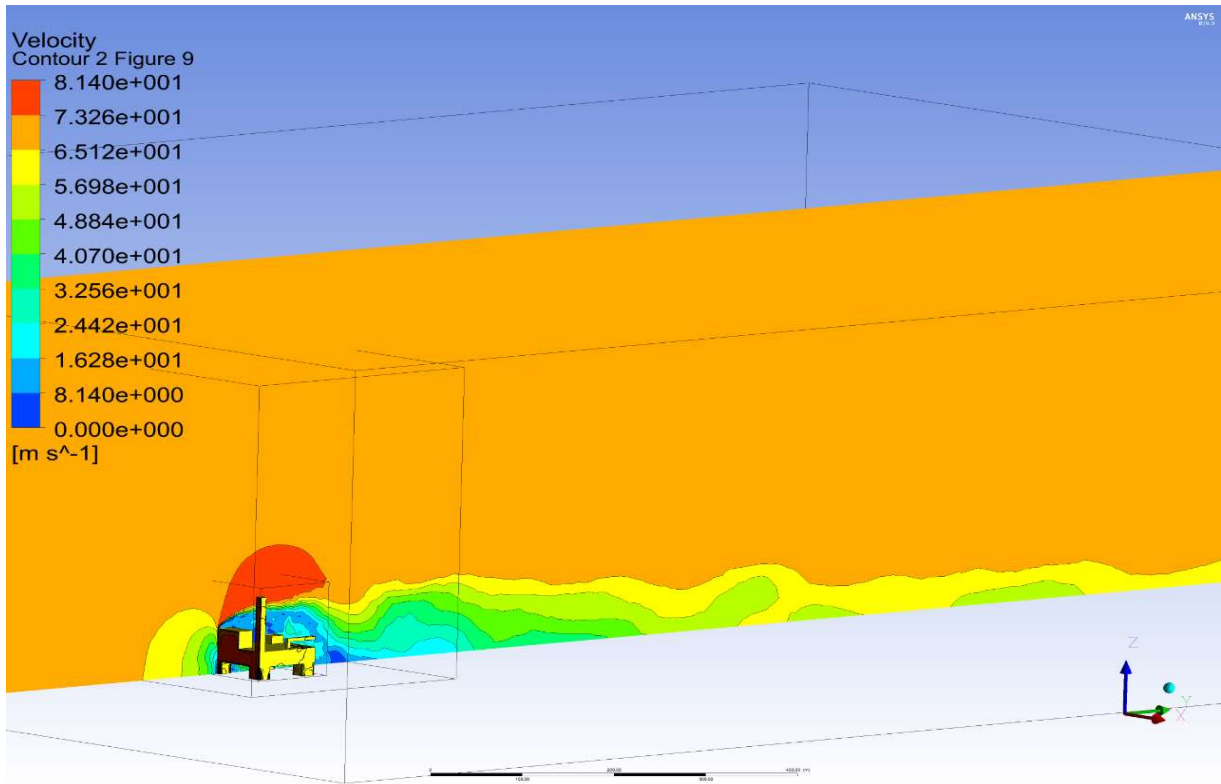
En la Figura 4.7 se muestra el comportamiento de las líneas de la corriente en una vista frontal mostrando como se dispersa el flujo a un gran ancho del túnel virtual Por ello la importancia de modelar el túnel de viento virtual con las dimensiones adecuadas para que haya un desarrollo adecuado del flujo, y las paredes del túnel no intervengan y se evite el efecto de bloqueo.





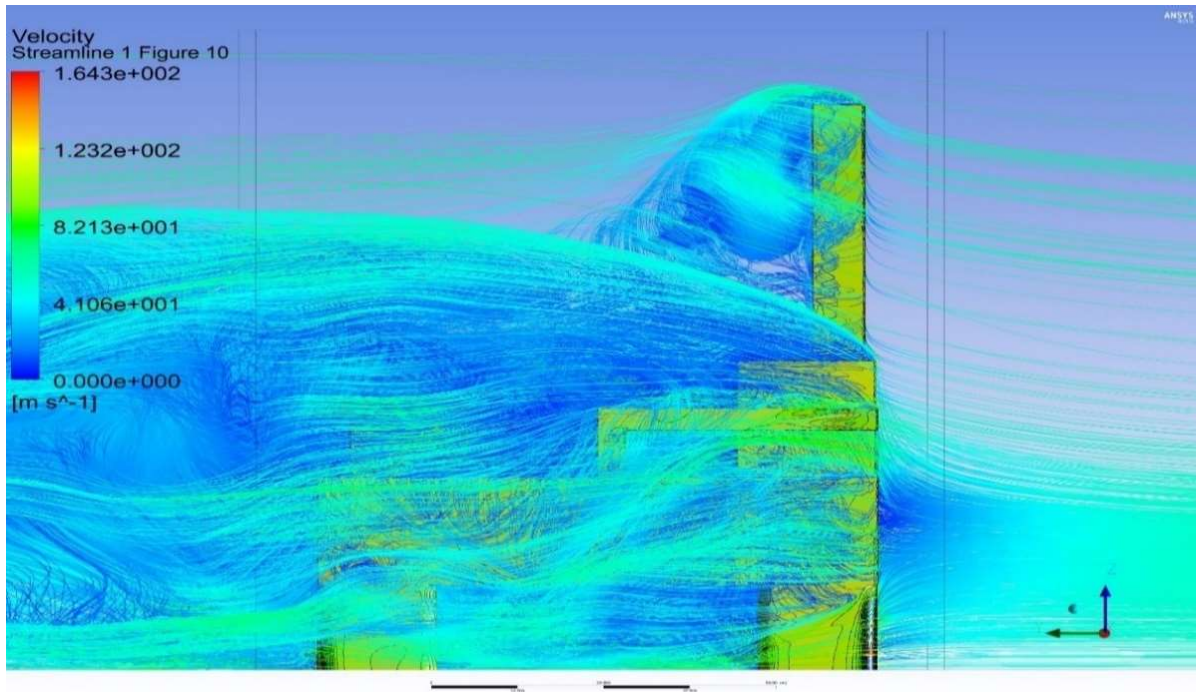
**Figura 4.7. Líneas que muestran el comportamiento de la velocidad del viento en la parte frontal (0° de incidencia del viento).**

En la Figura 4.8 se muestra un perfil de velocidad a 10 m de línea centro de todo el dominio en una vista isométrica en el cual se aprecia la variación de la velocidad a todo lo largo del túnel virtual, y la estabilización de la velocidad cada vez que se aleja el flujo del aire una vez que impacta con la plataforma, el túnel de viento virtual con las dimensiones adecuadas se debe de considerar para que haya un desarrollo adecuado del flujo y su longitud no intervenga en el desarrollo del flujo.



**Figura 4.8. Perfil de velocidad a 10 m de línea centro de todo el dominio (0° de incidencia del viento).**

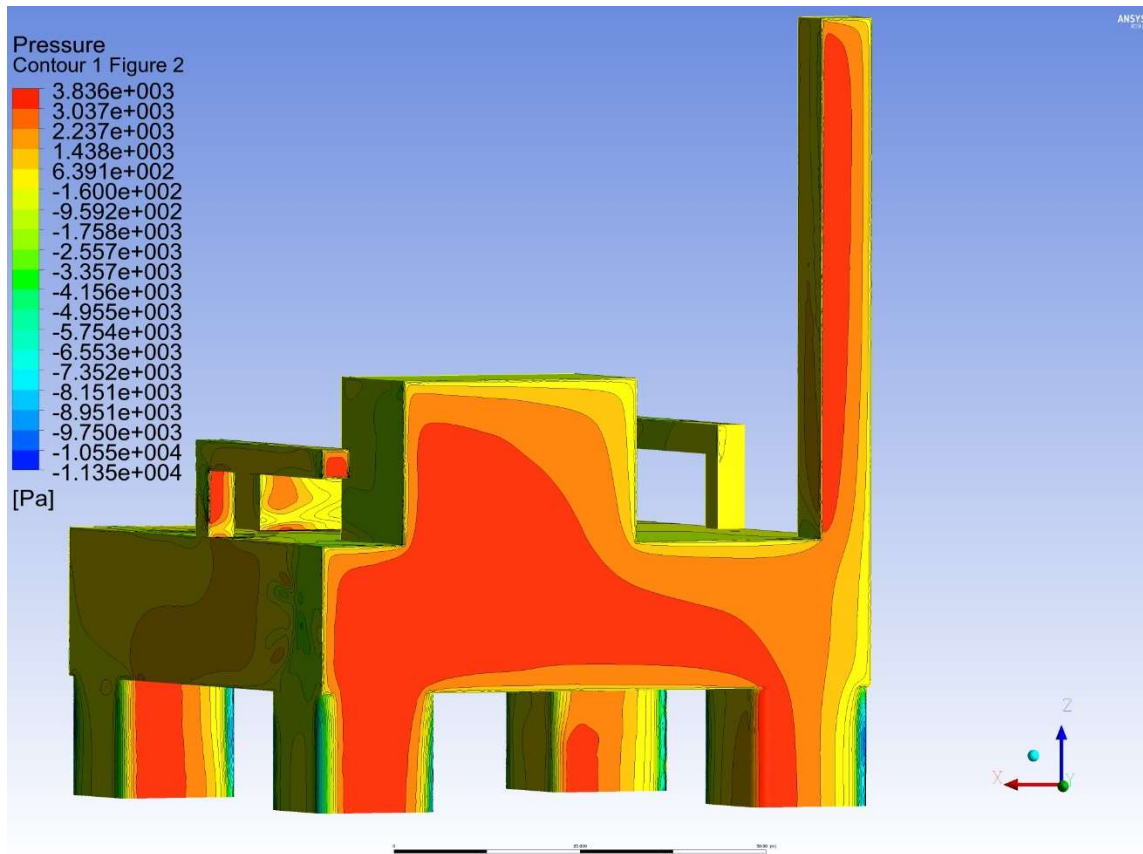
En la Figura 4.9 se visualiza las líneas de corriente de una vista lateral registrando una velocidad máxima en la punta del quemador, y entre la columna y cubierta de hasta 82.13 m/s aproximadamente. En esta figura se puede apreciar el efecto de pantalla de los equipos en cubierta.



**Figura 4.9.** Líneas que muestran el comportamiento de la velocidad en la parte lateral ( $0^\circ$  de incidencia del viento).

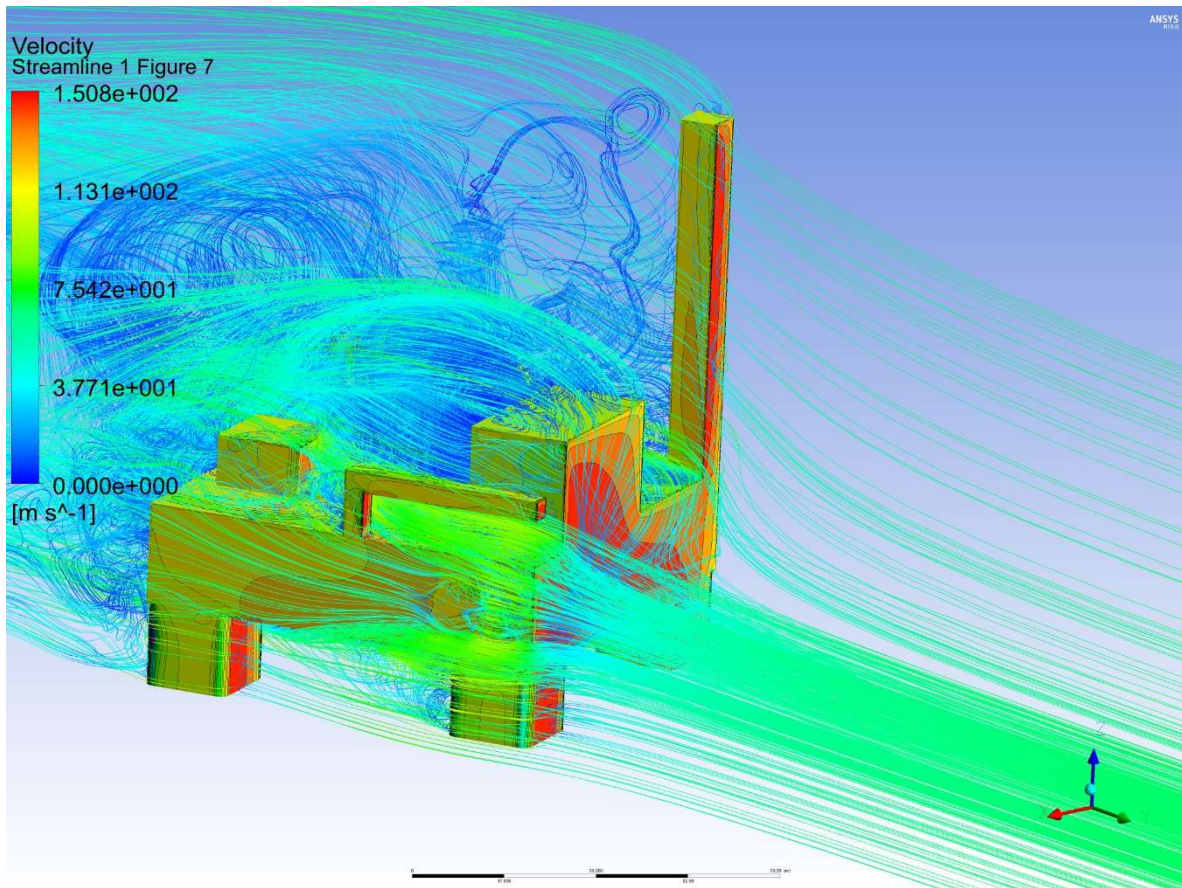
#### **4.1.2 Presiones y velocidades con incidencia de viento de $22.5^\circ$**

En la Figura 4.10 se observa (mediante una escala de colores) la variación de las presiones ejercidas por el viento sobre la plataforma semi-sumergible, donde se presentó una presión máxima de 3836 Pa en el área expuesta frontal e inclusive en parte de las columnas tanto de proa como de popa, debido a la incidencia del viento que es de  $22.5^\circ$  respecto a la plataforma. Debido a la incidencia del viento se puede observar cómo la mayor presión se ejerce más hacia estribor y proa de la plataforma.



**Figura 4.10. Presión que ejerce el viento sobre la plataforma a 22.5 ° de incidencia del viento.**

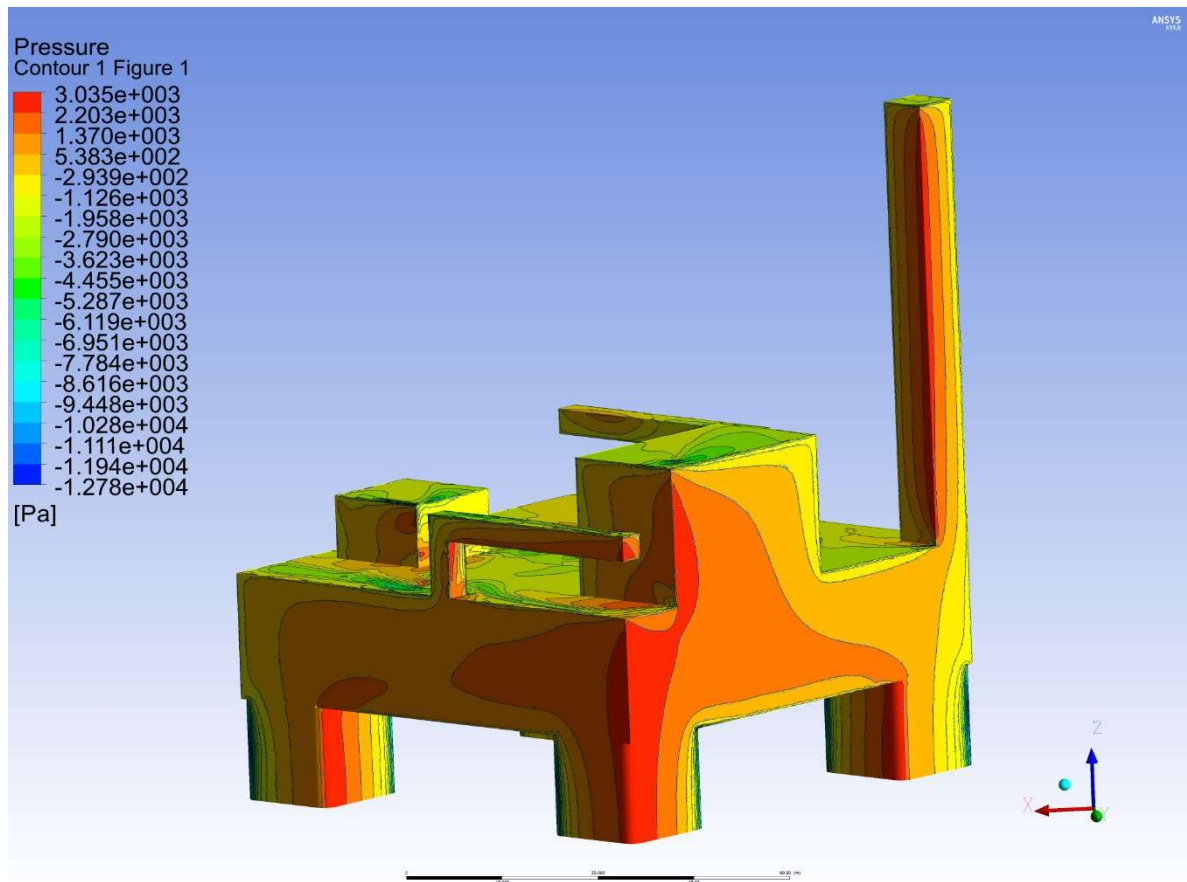
En la Figura 4.11 se visualiza las líneas de corriente de una vista frontal y lateral registrando una velocidad máxima en la punta del quemador y la columna de estribor de hasta 150 m/s. Además, se puede apreciar la generación de vórtices entre los módulos de proceso y los habitacionales, esta área involucra un gran riesgo si hubiese personal a bordo, sin embargo, con la aplicación de planes de contingencia, cuando se trata de fenómenos meteorológicos de gran magnitud como un huracán todo el personal es desalojado con anticipación.



**Figura 4.11. Líneas que muestran el comportamiento de la velocidad en la parte frontal y lateral de la plataforma a una de incidencia de 22.5 ° viento.**

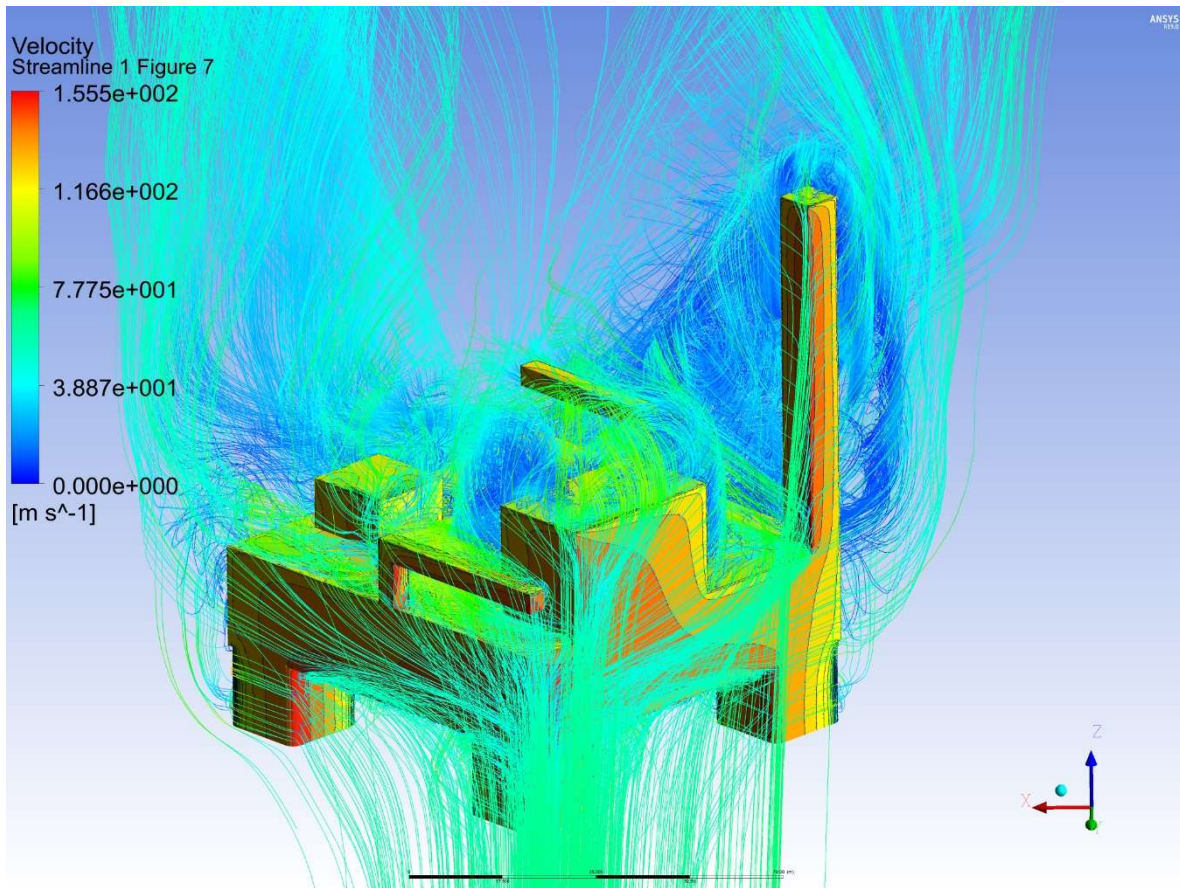
#### **4.1.3 Presiones y velocidades con incidencia de viento de 45°**

En la Figura 4.12 se observa (mediante una escala de colores) la variación de las presiones ejercidas por el viento sobre la plataforma semi-sumergible, donde se presentó una presión máxima de 3035 Pa en el área frontal y parte de las columnas tanto de proa como de popa debido a la incidencia del viento que es de 45° respecto a la plataforma, así mismo se observa como la mayor presión se nota más hacia estribor de la plataforma.



**Figura 4.12. Presión que ejerce el viento sobre la plataforma a 45 ° de incidencia del viento.**

En la Figura 4.13 se visualiza las líneas de corriente de una vista frontal y lateral donde se puede apreciar la generación de vórtices entre los módulos de proceso y los habitacionales, así como detrás del quemador debido a la incidencia de 45° del viento respecto a la estructura.



**Figura 4.13. Líneas que muestran el comportamiento de la velocidad en la parte frontal y lateral de la plataforma a una de incidencia de 45 ° viento.**

En la Figura 4.14 se muestra un perfil de velocidad en la diagonal de la columna de babor en una vista isométrica, en el cual se aprecia la variación de la velocidad a todo lo largo del túnel virtual para el viento a 45°. Para esta incidencia la estabilización de la velocidad cada vez que se aleja el flujo es menor en comparación cuando la incidencia del aire es de 0° como se muestra en la Figura 4.8.

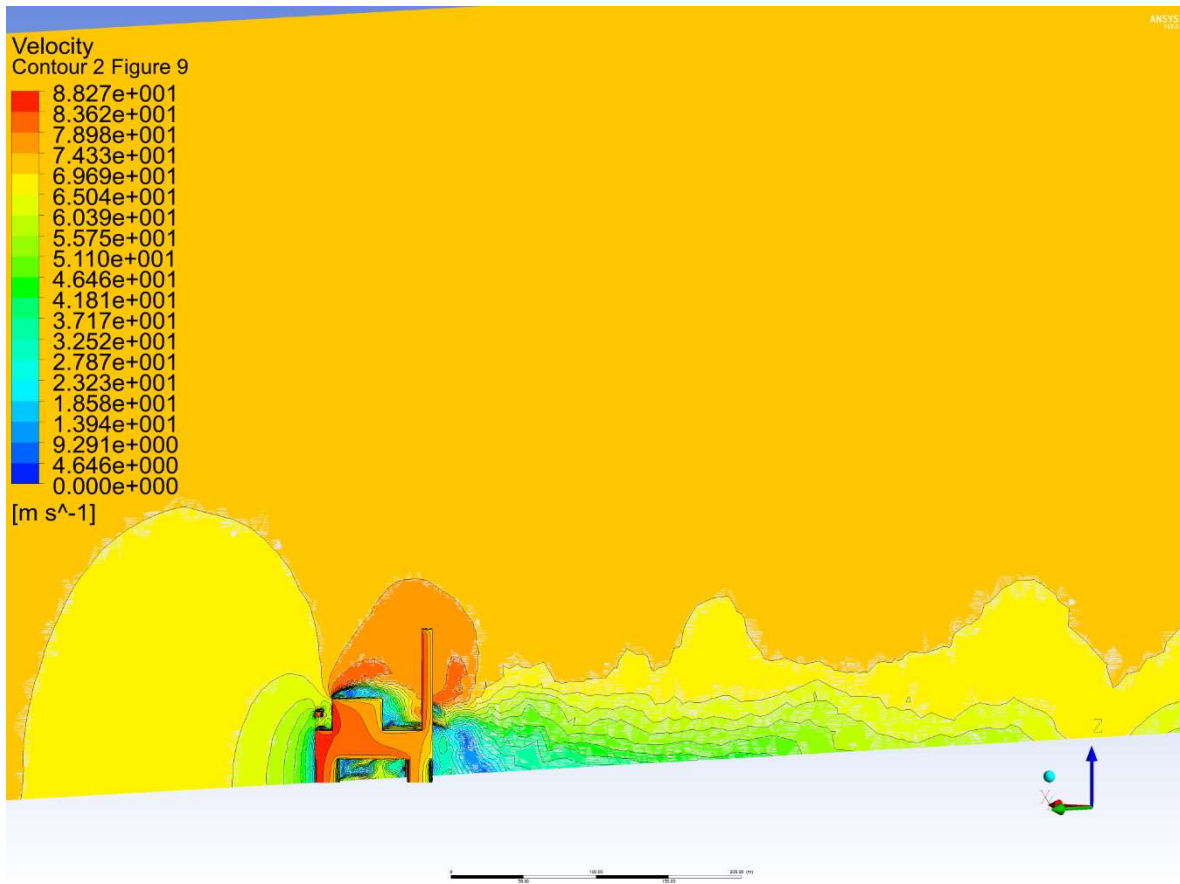


Figura 4.14. Perfil de velocidad a 10 m de línea centro de todo el dominio (45° de incidencia del viento).

#### 4.2 Fuerzas de arrastre, fuerzas de sustentación y fuerzas laterales

Mediante el uso del post-procesador de ANSYS se calcularon las fuerzas ejercidas sobre la plataforma en los ejes X Y y Z para todos los análisis que se llevaron a cabo. En la Tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos, cabe mencionar que las fuerzas en dirección Z son las fuerzas de sustentación, las fuerzas en X son fuerzas laterales, y las fuerzas en Y las de arrastre.

Las fuerzas para las diferentes direcciones se calcularon ingresando las siguientes expresiones en el post-procesador de ANSYS:  $force\_x()@platform$ ,  $force\_y()@platform$ ,  $force\_z()@platform$ , el cual es la suma de presiones por el área de incidencia para cada dirección.

Para cuestiones de referencia, la geometría de la plataforma quedó dentro del primer octante de acuerdo con una referencia en tres dimensiones, estando la geometría en los ejes X, Y y



Z positivos, en la Figura 4.1 se muestra cómo la parte de proa queda perpendicular al eje Y, cabe mencionar que la dirección del eje Y coincide con la dirección de la entrada del fluido.

**Tabla 4.1. Fuerzas obtenidas de las simulaciones para los diferentes mallados.**

Tipo de mallado	Fuerza lateral en X (N)	Fuerza de arrastre Y (N)	Fuerza de sustentación Z (N)
Mallado 1 - incidencia 0°	-9.54E+05	1.335E+07	-1.84E+06
Mallado 2 - incidencia 0°	-3.06E+05	1.314E+07	-8.52E+05
Mallado 3 - incidencia 0°	-5.84E+05	1.284E+07	-1.45E+06
Mallado 4 - incidencia 0°	-8.34E+05	1.309E+07	-2.65E+06
Mallado 5 - incidencia 0°	-9.71E+05	1.246E+07	9.15E+05
Mallado 6 - incidencia 0° **	8.54E+02	1.206E+05	9.74E+03
Mallado 7 - (reducción del dominio 10%) - incidencia 0°	-8.97E+05	1.246E+07	5.17E+05
Mallado 8 - (aumento del dominio 10%) - incidencia 0°	-8.37E+05	1.253E+07	5.15E+05
Mallado 9 - incidencia 22.5°	3.24E+06	1.425E+07	5.46E+06
Mallado 10 - incidencia 45°	7.31E+05	1.500E+07	8.56E+06

\*\*Mallado de prueba donde se cambió la velocidad de entrada a 7 m/s, solo para corroborar un análisis numérico correcto.

De acuerdo con los resultados obtenidos para una incidencia de 0° la fuerza de mayor magnitud resultó la fuerza de arrastre en la dirección Y, debido a que es la dirección donde impacta el viento. Para las fuerzas de arrastre se puede apreciar la variación de la magnitud debido al tipo de mallado, esto nos lleva a corroborar que un mallado más fino nos muestra mejores resultados, arrojando los mejores resultados para el mallado número 5, el cual resultó ser el mallado óptimo.

Las fuerzas de sustentación en el eje Z, son mínimas en comparación con el peso de la plataforma. Se entendiera que estas fuerzas no perjudicarán a la estructura, pero también se debe contemplar las fuerzas de arrastre en la dirección del viento y las fuerzas laterales ya que estas fuerzas se presentan al mismo tiempo una vez que impacta el viento con la estructura.

En el eje Y se presentan las fuerzas de mayor magnitud, las cuales podrían provocar momentos de giro excesivos (*overturning moment*) en la plataforma, llevando a condiciones desfavorables en cuestiones de estabilidad. Además, se debe de tener en cuenta que en

condición de huracán otra carga ambiental de suma importancia es el oleaje, poniendo en gran riesgo la integridad tanto estructural como de estabilidad de la plataforma.

Para una incidencia de  $22.5^\circ$  (Mallado 9) las fuerzas en las tres direcciones aumentan respecto a las fuerzas para una incidencia a  $0^\circ$  (Mallado 5). Para las fuerzas en X y en Y hubo un aumento considerable debido a que ahora, con incidencia de  $22.5^\circ$ , el área expuesta aumenta. Del mismo modo hay un aumento considerable en la fuerza en Z, es decir, se presenta una mayor fuerza de sustentación.

Para una incidencia de  $45^\circ$  las fuerzas en las tres direcciones varían considerablemente respecto a las fuerzas para una incidencia a  $0^\circ$  debido a que, al igual que para la incidencia a  $22.5^\circ$ , el área expuesta es mayor.

Los resultados obtenidos varían de acuerdo con el tipo de mallado. Como referencia, en la Tabla 3.4 se muestra los diferentes tipos de mallado que se realizaron y sus características, como lo es el tamaño mínimo cerca de la pared y máximo en el dominio del fluido (lejos de la pared).

El mallado 1, es el primer mallado por defecto que ANSYS Meshing proporciona, de acuerdo con sus dimensiones cerca y lejos de la pared son extremadamente grandes para el tipo de simulación que se abordó en este trabajo y las buenas prácticas que se deben de llevar a cabo en un análisis aerodinámico con CFD, por lo tanto, los resultados obtenidos no son apropiados.

A partir del mallado 2 al mallado 4, se fueron modificando las características del tamaño promedio mínimo cerca de la pared reduciendo su dimensión gradualmente hasta llegar al mallado 5, el cual resultó ser la malla óptima de acuerdo con los resultados logrados.

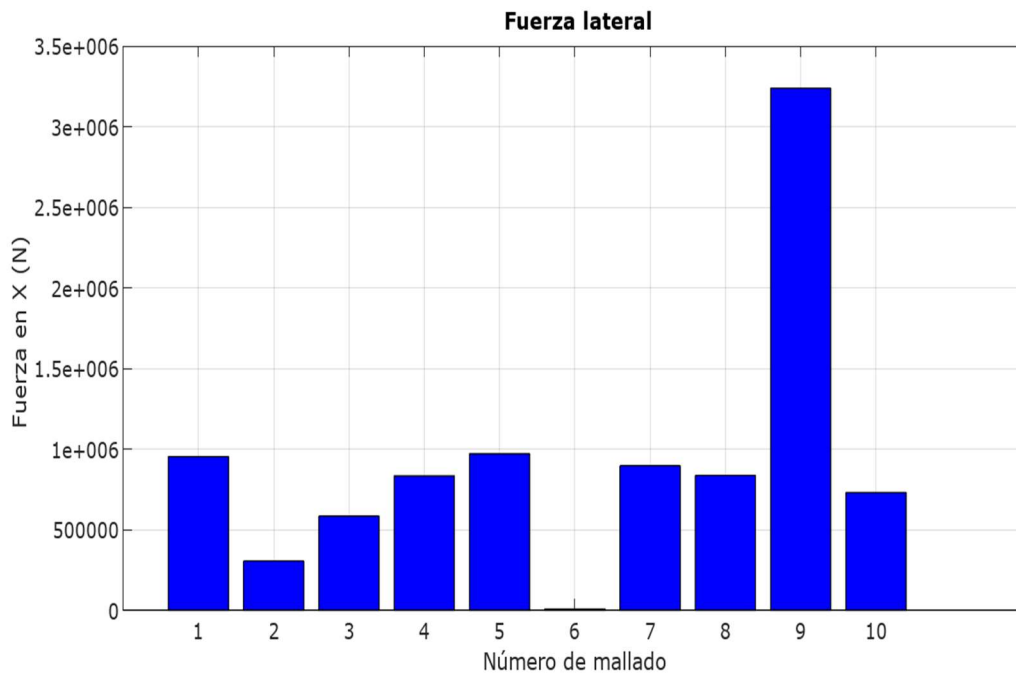
El mallado 6 tiene la misma configuración que el mallado 5, lo que varió fue la velocidad de entrada, que para este caso se redujo a 7 m/s con el fin de comprobar que el modelo numérico trabajaba bien, ya que por la naturaleza de un método numérico los resultados pueden variar de manera abrupta de acuerdo con los datos de entrada que el usuario elija. Como era de esperarse, las fuerzas son menores que las obtenidas con una velocidad de entrada de 70 m/s,

incluso para los mallados 1 y 2 las fuerzas son mayores que la del mallado 6 que tiene la configuración de malla óptima.

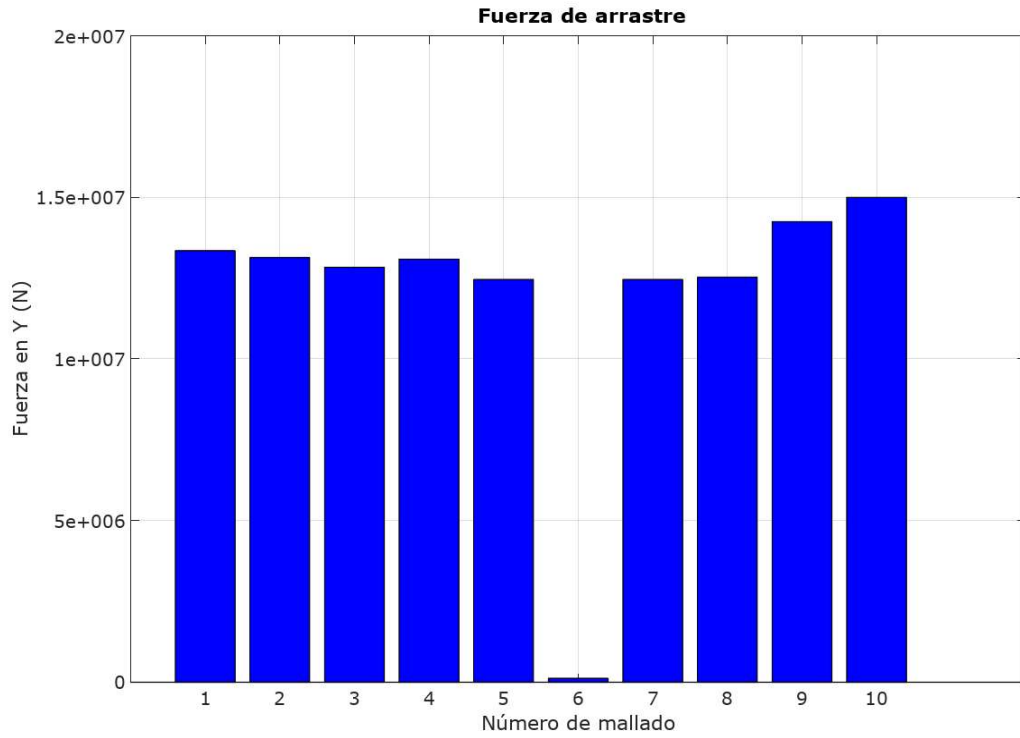
Para el mallado 7 se redujo las dimensiones del dominio en un 10% y para el mallado 8 se incrementó en un 10 %, con el fin de corroborar si el dimensionamiento del dominio del fluido es adecuado, la diferencia de los resultados obtenidos para estos dos mallados respecto al mallado 5 es mínima por lo tanto se concluye que el tamaño del túnel virtual es adecuado ya que hay un desarrollo adecuado del flujo del fluido.

Las mallas 9 y 10 tienen las mismas características que la malla 5, el único cambio es la incidencia del viento,  $22.5^\circ$  para el mallado 9 y  $45^\circ$  para el mallado 10 respecto a la plataforma semi-sumergible.

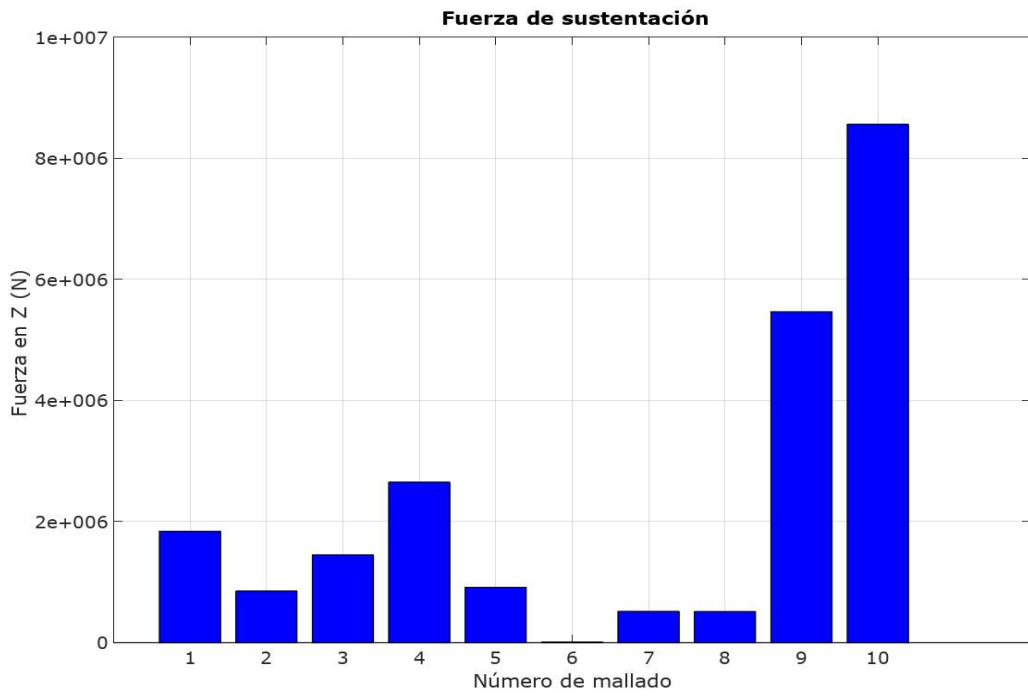
En las Figuras 4.15, 4.16 y 4.17 se muestra una gráfica de barras con las tres fuerzas obtenidas (lateral, de arrastre y sustentación), en las cuales se puede apreciar que las magnitudes de estas fuerzas para una incidencia de  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$  resultaron mayores que para una incidencia de  $0^\circ$ .



**Figura 4.15.** Gráfica de barras de la fuerza lateral en dirección del eje X para cada tipo de mallado creado.



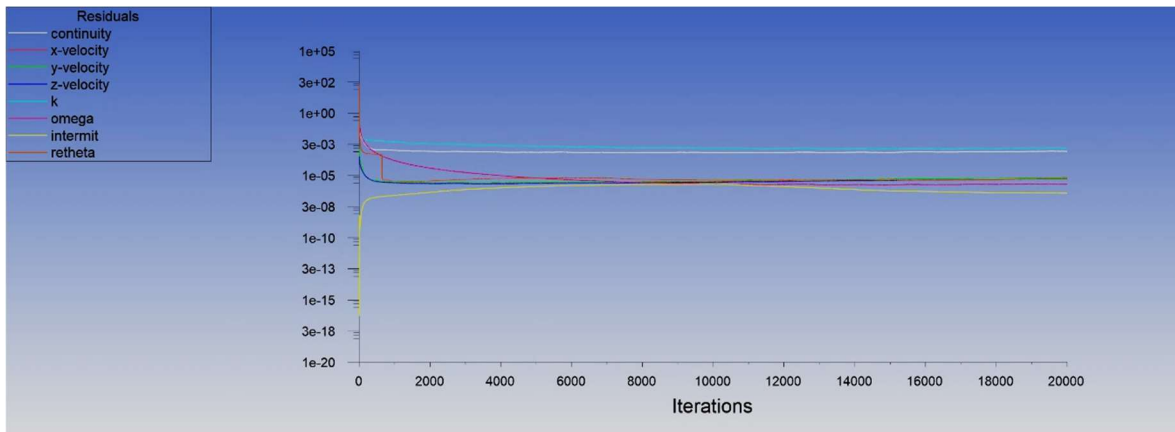
**Figura 4.16.** Gráfica de barras de la fuerza de arrastre en dirección del eje Y para cada tipo de mallado creado.



**Figura 4.17.** Gráfica de barras de la fuerza de sustentación sobre el eje Z para cada tipo de mallado creado.

### 4.3 Residuales

Los residuales obtenidos para el mallado 5, el cual es el mallado óptimo se muestra en la Figura 4.18, en donde se aprecia en las curvas que, a partir de la iteración 4000, no hubo una fluctuación considerable de los valores de los residuales.



**Figura 4.18. Residuales de la simulación para el mallado número 5.**

Los residuales obtenidos para las diferentes simulaciones de acuerdo con el tipo de mallado fueron semejantes al mostrado en la Figura 4.18, sin presentar grandes fluctuaciones en las primeras 4000 iteraciones, posteriormente se mantuvo uniformidad en los residuales, manteniendo una convergencia en los residuales.

Aun cuando a partir de 4000 iteraciones las simulaciones se mantenían estables, se decidió simular hasta 20000 iteraciones para mantener una buena precisión en los resultados obtenidos, cabe recalcar que la definición de precisión hace referencia a la literatura de métodos numéricos.

Aunque no hubo una convergencia de acuerdo con el valor establecido en el solucionador, debido al comportamiento de los residuales se deduce que los resultados numéricos trabajaron bien, ya que la precisión de los resultados es muy buena.

En la Figura 4.19 se muestran los residuales de la simulación del mallado 1 el cual a pesar de ser un mallado muy burdo, los residuales se mantienen semejantes a partir de la iteración 6000.

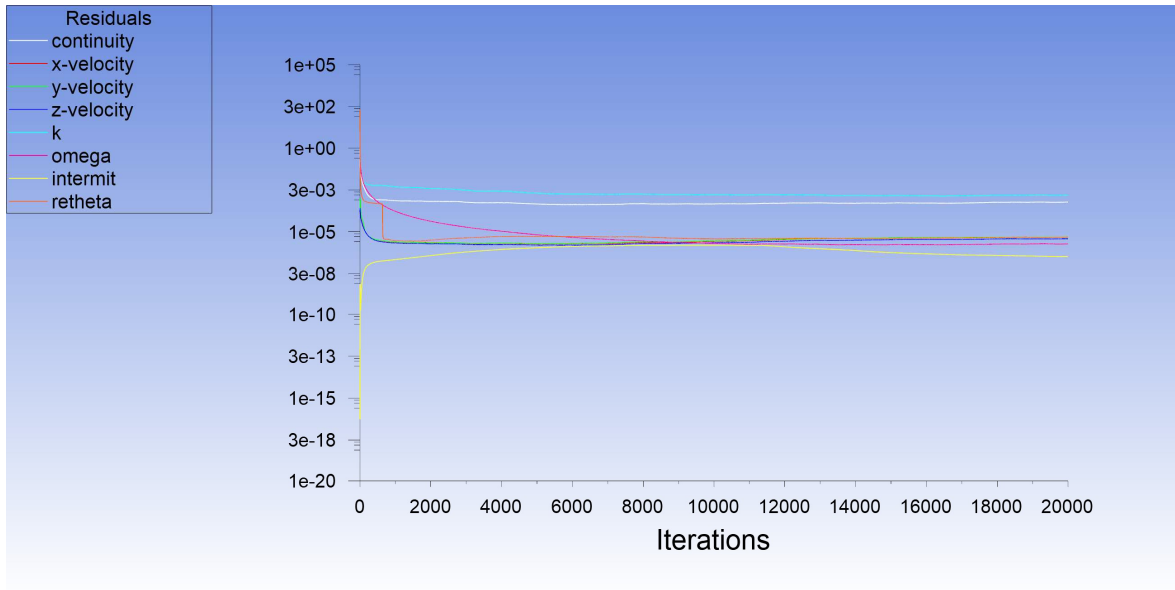


Figura 4.19. Residuales de la simulación para el mallado número 1.

#### 4.4 Comparación de la fuerza de arrastre por CFD y el cálculo analítico

Como un estudio adicional, se calculó la fuerza de arrastre para una incidencia de  $0^\circ$  de manera analítica con el fin de comparar los resultados de las fuerzas de arrastre de la simulación, obteniendo un valor de  $1.82E+07$  N del cálculo analítico contra  $1.246E+07$  N de la simulación numérica, del cálculo analítico se obtiene una fuerza de arrastre mayor debido a que se considera cada componente de la plataforma por separado. Con esto se corrobora que el cálculo analítico se encuentra del lado conservador, percibiéndose adecuado su uso en etapas de revisión preliminar de una estructura de este tipo para un análisis aerodinámico.

El cálculo analítico se realizó en base a la formulación que proporciona la casa clasificadora ABS (por sus siglas en inglés *American Bureau of Shipping*) en sus reglas de clasificación *Mobile Offshore Drilling Units 2018*. En el Anexo 1 se muestra el cálculo realizado.

#### 4.5 Costo computacional

Para este tipo de proyectos es importante describir el equipo computacional que fue utilizado. La ejecución de los análisis se llevó a cabo en ANSYS Fluent<sup>®</sup> de acuerdo con los diferentes tipos de mallado se realizaron en un tiempo de 2160 horas (tres meses aproximadamente). Este tiempo, a pesar de percibirse grande, se debe considerar que fue logrado utilizando dos

estaciones de trabajo de alto rendimiento. Cada uno de estos equipos poseen un procesador Intel® Xeon® E5-2680 v4, con 14 núcleos y 28 subprocesos a 2.40 GHz y una memoria RAM de 64GB, más una tarjeta de video dedicada NVIDIA Quadro K6000 de 12GB.

Todas las simulaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Simulación Numérica de Fenómenos Metoceánicos e Hidrodinámicos, que es parte del Centro de Tecnología para Aguas Profundas (CTAP), perteneciente al Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), el cual cuenta con la licencia de ANSYS 19® y los equipos de cómputo mencionados.

Cabe señalar que este tipo de trabajos son factibles en un equipo de cómputo de grandes capacidades, ya que una laptop o pc de escritorio de recursos básicos limita el alcance de las simulaciones.

Llevar a cabo este tipo de trabajos con un nivel de detalle aceptable de acuerdo con las publicaciones de trabajos similares donde el rango del número de elementos de la malla oscila entre 11 y 25 millones es posible con un buen equipo de cómputo como el que se describió anteriormente. No obstante, este nivel de simulación está a un nivel medio hablando del equipo de cómputo que se utilizó y el número de elementos que se logró simular, debido a que este tipo de simulaciones pueden realizarse en súper equipos de cómputo como lo son los *clústeres* y lograr un mayor detalle en la creación de la estructura, mayor número de elementos en el dominio del fluido y lograr simularlos en tiempos aceptables.

## Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros.

En este capítulo se reportan las conclusiones que se derivan de los resultados obtenidos del caso de estudio de este trabajo. Así como trabajos futuros que pueden realizarse para este tipo de estructuras.

### 5.1 Conclusiones

El objetivo general de esta tesis fue llevar a cabo un análisis aerodinámico en condición de huracán de la obra viva de una plataforma semi-sumergible de producción de hidrocarburos, para operar en aguas profundas, mediante simulación numérica con CFD. Del análisis numérico se determinaron las fuerzas de arrastre, así mismo se obtuvo mediante líneas de flujo el comportamiento del fluido al interactuar con las superficies de la plataforma semi-sumergible, con el fin de detectar formaciones de turbulencia sobre la superestructura.

En análisis aerodinámico de la plataforma semi-sumergible permitió calcular las fuerzas de arrastre ejercidas por el viento de un huracán, la distribución de presiones en las áreas expuestas, así como las velocidades y trayectoria del flujo. Se identificó que, además de identificar la posible inestabilidad de la plataforma bajo esa condición extrema, es de suma importancia identificar las áreas que pudieran representar un peligro para la parte operativa de la plataforma.

Con respecto a los análisis de CFD en Ansys Fluent se ha identificado una serie de factores de suma importancia para obtener resultados satisfactorios. Iniciando con el análisis de sensibilidad de malla, se comprobó que para este tipo de análisis su calidad y refinamiento son factores de suma importancia para determinar valores adecuados de las fuerzas de arrastre, ya que durante la solución del problema los residuales se comportan de una manera uniforme indicando un flujo estable y sin fluctuaciones.

Otro factor de importancia que impacta los resultados es el espesor de la capa límite. Esto es clave en este tipo de análisis, ya que una definición apropiada de la capa límite mejora los resultados de la simulación, ya que permite capturar de manera correcta los efectos de turbulencia cerca de la pared, así como una generación adecuada del flujo mostrada por los resultados como lo es las líneas de corriente o *streamlines* y los contornos de presión.



Los resultados obtenidos en la Tabla 4.1 son valores relativamente insignificantes respecto al peso de la estructura que es de 58,356 toneladas aproximadamente, pero las fuerzas obtenidas son de importancia para la estabilidad de la plataforma semi-sumergible. Como se mencionó anteriormente, estas fuerzas pueden provocar grandes momentos, generando grandes ángulos de escora en la plataforma semi-sumergible aunado al oleaje que se genera con un huracán categoría 5 lleva a una condición crítica a la estructura.

Las fuerzas de arrastre, sustentación y laterales de mayor magnitud resultaron de una incidencia de  $45^\circ$  de acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 4.1, continuando con las fuerzas de  $22.5^\circ$  y por ultimo las fuerzas de  $0^\circ$  de incidencia, todo esto por el tamaño del área expuesta.

La capacidad del equipo de cómputo con el cual se trabajará se debe de tener en cuenta, ya que es un factor clave para desarrollar un análisis conveniente y eficaz, debido a que el equipo de cómputo limita el número de elementos que se puede mallar y por supuesto la cantidad de elementos posibles para simular, al inicio de este trabajo se crearon mallas hasta de 150 millones de elementos, pero a la hora de simular, las pc no tenían la capacidad suficiente para simular esa cantidad de elementos.

Para el mallado el recurso más importante es la memoria RAM de la computadora, y para la solución del problema la cantidad de procesadores es crucial, el cual también va de la mano con la memoria RAM. Así mismo, la capacidad de la tarjeta gráfica juega un papel importante en el procesamiento y visualización de los resultados de una forma gráfica y efectiva para la presentación de resultados, ANSYS Fluent tiene la capacidad de utilizar la tarjeta gráfica como apoyo a los procesadores para la solución del problema.

Un factor importante que considerar para llevar a cabo este tipo de simulaciones es el tiempo de computo que se toma el poder simular la interacción fluido estructura, ya que para este trabajo la ejecución de cada análisis se llevó aproximadamente 14 días, dando un total de 140 días para todas las simulaciones presentadas en este proyecto, porque se consideraron 20,000 iteraciones para cada una de las simulaciones, esto con el fin de asegurar un buen desarrollo del flujo y la obtención de los resultados precisos y consistentes.

## 5.2 Trabajos futuros

El principal trabajo que se debe de considerar a futuro es el de llevar a cabo pruebas experimentales en un túnel de viento apropiado para este tipo de estructuras, con el fin de validar los resultados obtenidos en la simulación numérica.

Deberá calcularse mediante métodos probabilísticos la velocidad de viento requerida para un periodo de retorno determinado.

Llevar a cabo análisis numéricos mejorando la capa límite del mallado y la mejora de la calidad de la malla hasta comprobar que no hay tanta diferencia en los valores obtenidos.

Llevar a cabo un análisis en estado transitorio e ingresar una variación de la velocidad del viento en condición de huracán.

Utilizar diferentes modelos de turbulencia del grupo RANS y LES para poder comparar resultados y definir sus ventajas y desventajas para este tipo de análisis.

Variar el valor del pseudo-transitorio para comprobar una elección correcta.

Realizar análisis numéricos en software libre como OpenFOAM (*The OpenFOAM Foundation*, 2018), para poder comparar resultados de un software de código abierto y un software comercial, y si deriva buenos resultados ver como una opción principal el uso de software libre teniendo como consecuencia una reducción del gasto económico de este tipo de proyectos.

Realizar un modelo de la plataforma donde no se simplifique la superestructura y equipos con el fin de poder simular un modelo lo más cercano a la realidad, así mismo la interacción aeroelástica, pues las grúas y chimeneas pueden tener vibraciones importantes que pueden causar su falla ante viento.

## Referencias bibliográficas:

- American Bureau of Shipping, Mobile Offshore Drilling Units (2018), PART 3 - HULL CONSTRUCTION AND EQUIPMENT, Section 3 - Environmental Loadings.
- ANSYS. (2013). ANSYS Fluent Tutorial Guide.
- ANSYS. (2016). ANSYS Fluent Tutorial Guide.
- Bai, Y., & Jin, W.-L. (2016). Chapter 7 - Loads and Dynamic Response for Offshore Structures. In Y. Bai & W.-L. Jin (Eds.), *Marine Structural Design (Second Edition)* (pp. 119-151). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- B. Nebenführ. OpenFOAM. (2010) A tool for predicting automotive relevant flow fields. Master's thesis. Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Buckingham, E. (1914): On physically similar systems. Illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review*, 4: 345 – 376.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Mecánica de fluidos*. México.
- Chakrabart, S. (1998). Physical Model Testing of Floating Offshore Structures. Paper presented at the DYNAMIC POSITIONING CONFERENCE.
- Cho, S., Hwang, S., Jung, J., Sung, H., Park, B., & Vazquez-Hernandez, A. (2018). Estimation of Wind and Current Load on Offshore Structures Using Wind Tunnels and CFD. Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
- Croonenborghs, E., Sauder, T., Fouques, S., & Reinholdtsen, S. A. (2013). Comparison of Various Methods for the Assessment of Wind and Current Loads on a Semi-Submersible Platform. Paper presented at the Offshore Technology Conference Brasil.
- Eriksson, J. (2017). Simulation of the Flow around a Semi-Submersible using CFD. (Master's thesis Master's Thesis in Naval Architecture and Ocean Engineering), Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. (2017:X-15/331).
- G. Kalitzin, G. Medic, G. Iaccarino, and P. Durbin (2004). Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions. *Journal of Computational Physics* 204.
- Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 293-306. doi:10.1080/00221686.2011.578914
- Hirdaris, S. E., Bai, W., Dessi, D., Ergin, A., Gu, X., Hermundstad, O. A., Incecik, A. (2014). Loads for use in the design of ships and offshore structures. *Ocean Engineering*, 78, 131-174. doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.09.012.
- Kalitzin, G., Medic, G., Iaccarino, G., & Durbin, P. (2005). Near-wall behavior of RANS turbulence models and implications for wall functions. *Journal of Computational Physics*, 204(1), 265-291. doi: 10.1016/j.jcp.2004.10.018
- Liu, H., Guoming, C., Tao, L., Hong, L., Zhu, B., & Huang, A. (2016). Wind-induced response of large offshore oil platform. *Petroleum Exploration and Development*, 43(4), 708-716. doi:10.1016/s1876-3804(16)30083-0.

- Ma, J., Zhou, D., Han, Z., Zhang, K., Nguyen, J., Lu, J., & Bao, Y. (2017). Numerical Simulation of Fluctuating Wind Effects on an Offshore Deck Structure. *Shock and Vibration*, 2017, 17. doi:10.1155/2017/3210271
- Nebenfuhr, B. (2010). OpenFOAM: A tool for predicting automotive relevant flow fields. (Master's Thesis), CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Goteborg, Sweden. (SE-412 96 Goteborg)
- Pallanich, J. (2017). Flexible floater. In (pp. COST CONSCIOUS: KBR designed the GVA 10000 to be an economically viable development solution in a \$10040 per barrel oil price environment.
- Rosengaus M., Jiménez M., Vázquez M. (2014). Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), versión electrónica, ISBN 970-628-633-0.
- SNAME. (1998), Guidelines for Wind Tunnel Testing of Mobile Offshore Drilling Units.
- Simiu, E., & Scanlan, R. H. (1996). Wind effects on structures: fundamentals and applications to design. New York John Wiley & Sons, 1996.
- Stern, F., Wang, Z., Yang, J., Sadat-Hosseini, H., Mousaviraad, M., Bhushan, S., . . . Grenstedt, J. L. (2015). Recent progress in CFD for naval architecture and ocean engineering. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 27(1), 1-23. doi:10.1016/s1001-6058(15)60452-8
- Tajadura, R. B. (2004). Turbulencia, curso, área de mecánica de fluidos, Gijón España.
- Tajadura, R. B., Pérez, J. G., Oro, J. M. F., & Díaz, K. M. A. (2003). Técnicas numéricas en mecánica de fluidos (R. B. Tajadura Ed.). Gijón, España.
- Tu, J., Yeoh, G.-H., & Liu, C. (2018). Chapter 2 - CFD Solution Procedure: A Beginning. In *Computational Fluid Dynamics (Third Edition)* (pp. 33-63): Butterworth-Heinemann.
- The OpenFOAM Foundation, (2018). London, England Recuperado de: <https://openfoam.org/>.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics (Second ed.)*. England.
- White, F. M. (2011). *Fluid mechanics*. New York, N.Y.: McGraw Hill.
- Wnęk, A. D., & Guedes Soares, C. (2015). CFD assessment of the wind loads on an LNG carrier and floating platform models. *Ocean Engineering*, 97, 30-36. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.01.004
- Zhang, S., Lei, W., Shi-zhi, Y., & Huan, Y. (2010). Numerical evaluation of wind loads on semi-submersible platform by CFD. Paper presented at the Conference on Ocean Offshore & Arctic Engineering Shanghai, China.

## Anexo 1. Cálculo analítico de la fuerza de arrastre para una incidencia de 0°

De acuerdo con las reglas para clase y construcción de ABS (por sus siglas en inglés *American Bureau of Shipping*) para unidades móviles costa afuera de perforación 2018 (Mobile Offshore Drilling Units 2018, PART 3 - HULL CONSTRUCTION AND EQUIPMENT, Section 3 - Environmental Loadings) la fuerza debida al viento se puede calcular de la siguiente manera:

$$F = P * A$$

Donde: P es la presión ejercida por el viento (N/m<sup>2</sup>) y A (m<sup>2</sup>) es el área proyectada en la dirección del viento. Para el cálculo de la presión se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = f * V_k^2 * C_h * C_s$$

Donde f = 0.611, V<sub>k</sub> = Velocidad del viento, C<sub>h</sub> = *Coefficiente de altura* y C<sub>s</sub> = *Coefficiente de forma*.

Los valores para C<sub>s</sub> y C<sub>h</sub> se tomaron de la Tabla 1 (3-1-3) y Tabla 2 (3-1-3) de la regla de clasificación mencionada en el primer párrafo.

En la Tabla 1 de este anexo se muestra el desglose del cálculo de la fuerza debida al viento.

Tabla1. Cálculo analítico de la fuerza ejercida sobre la plataforma debida al viento.

	C <sub>s</sub>	C <sub>h</sub>	P (N/m <sup>2</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	F (N)
Columnas	0.5	1.52	2275.36	275.2	2504721
Cubierta principal	1	1.52	4550.73	1624	7390382
Módulos de proceso	1	1.52	4550.73	690	3140002
Módulos habitacionales	1	1.52	4550.73	170	773623.8
Quemador	1.5	1.52	6826.09	525	3583698
Grúas	1.5	1.52	6826.09	56	764522.3
				Total:	<b>1.82E+07 N</b>
f	0.611				
V <sub>k</sub>	70	m/s			

## Apéndice 1. Registro de proyecto



Universidad Veracruzana  
Dirección General de Vinculación  
Departamento de Fomento a la Vinculación  
Sistema de Información para la Vinculación Universitaria

REPORTE DE PROYECTO

12/4/2018 13:01:42

**CAMPUS:** VERACRUZ  
**AREA ACADEMICA:** TECNICA  
**FACULTAD DE INGENIERIA**

### DATOS GENERALES DE LA ENTIDAD O DEPENDENCIA

**TIPO DE ENTIDAD:** AC  
**DIRECCION:** CZA ADOLFO RUIZ CORTINEZ 455

### 1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO

**PROPOSITO ESENCIAL:** LA IMPLEMENTACION SISTEMATICA DE ACCIONES PARA PROPONER ALTERNATIVAS DE SOLUCION A LOS PROBLEMAS DEL ENTORNO MEDIANTE LA INVESTIGACION, LA INNOVACION Y EL DESARROLLO TECNOLÓGICO.

**TIPO DE PROYECTO:** DISEÑO, INNOVACION O DESARROLLO DOCUMENTAL

**NATURALEZA DEL PROYECTO:** DISCIPLINARIO

**CON LA PARTICIPACION DE:** FACULTAD DE INGENIERIA / REGION VERACRUZ

**AMBITO:** LOCAL

**TEMPORALIDAD:** PERIODICIDAD DEFINIDA

**FECHA DE INICIO:** 1/1/2018

**FECHA DE TERMINO:** 1/7/2018

**SECTORES BENEFICIADOS:** CIENCIA Y TECNOLOGIA

### 2. DATOS ESPECIFICOS DEL PROYECTO

#### PLANEACION

**TITULO DEL PROYECTO:** ANALISIS AERODINAMICO DE UNA PLATAFORMA SEMI-SUMERGIBLE DE PRODUCCION DE HIDROCARBUROS

**JUSTIFICACION:** LA IDEA DE ESTE TRABAJO SURGE POR EL INTERES NACIONAL EN EL DESARROLLO ENERGÉTICO DE MÉXICO Y LA EXPLOTACIÓN DE HIDROCARBUROS CON ESPECIAL ATENCIÓN EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO, ASÍ MISMO DAR UN ENFOQUE HACIA LA INDUSTRIA COSTA AFUERA POR LA FALTA DE DESARROLLO DE ESTE TIPO DE TRABAJOS. LOS CAMBIOS QUE SE ESTÁN GENERANDO POR LA REFORMA ENERGÉTICA DEL GOBIERNO DE MÉXICO, CREARÁN UNA DEMANDA DE TÉCNICOS ALTAMENTE ESPECIALIZADOS; PARA EL 2023 ESTÁ PREVISTO PONER EN MARCHA UNA TERMINAL DE APOYO PARA LA INDUSTRIA OFFSHORE EN EL PUERTO DE ALVARADO (FORO: "VERACRUZ, EL FUTURO DE LA PRODUCCIÓN OFFSHORE DE HIDROCARBUROS EN MÉXICO", SEDECOP, 2017).

**OBJETIVO GENERAL:** DESCRIBIR LOS CRITERIOS Y LA METODOLOGÍA PARA ELABORAR EL ANÁLISIS AERODINÁMICO DE UNA PLATAFORMA TIPO SEMISUMERGIBLE DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS PARA OPERAR EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO.



**OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

ELABORAR LA GEOMETRIA BASICA DEL SISTEMA FLOTANTE, LA SUPERESTRUCTURA Y EL EQUIPO SOBRE CUBIERTA DE UNA PLATAFORMA SEMISUMERGIBLE EXISTENTE Y REALIZAR EL ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL ÁREA EXPUESTA AL VIENTO DE LA PLATAFORMA SEMISUMERGIBLE.

**1**

**Meta**

1.1 LOGRAR UNA GEOMETRIA APTA PARA EL EQUIPO DE COMPUTO CON EL QUE CONTAMOS.

	<b>Acción</b>	<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Fecha de Término</b>
1.1.1	SIMPLIFICAR EL MODELO DE LA GEOMETRIA DE ACUERDO A LA CAPACIDAD DE COMPUTO.	1/abr/15	30/abr/15

REALIZAR EL MODELO A ESCALA DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA FLOTANTE (IMPRESIÓN EN 3D) Y LLEVAR A CABO PRUEBAS EN UN TÚNEL DE VIENTO DEL MODELO GENERADO A ESCALA.

**2**

**Meta**

2.1 LLEVAR A CABO PRUEBAS EXPERIMENTALES CUMPLIENDO PARAMETROS ESTABLECIDOS POR LA LITERATURA Y ALGUNAS REGULACIONES.

	<b>Acción</b>	<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Fecha de Término</b>
2.1.2	IMPRIMIR EL MODELO EN UNA IMPRESORA 3D Y REALIZAR PRUEBAS DE EXPERIMENTACIÓN EN UN TUNEL DE VIENTO.	1/may/15	15/may/15



**IMPLEMENTACION**

**CARACTERISTICAS:** DESCRIBIR LA METODOLOGIA PARA EFECTUAR EL ANALISIS AERODINAMICO DEL AREA EXPUESTA AL VIENTO DE UNA PLATAFORMA SEMISUMERGIBLE DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS PARA OPERAR EN EL GOLFO DE MÉXICO, UTILIZANDO LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, CFD POR SUS SIGLAS EN INGLES) PARA OBTENER LAS FUERZAS DE ARRASTRE Y POSTERIORMENTE MEDIANTE PRUEBAS EXPERIMENTALES EN UN TÚNEL DE VIENTO DETERMINAR LOS COEFICIENTES DE ARRASTRE DEL MODELO A ESCALA DE LA PLATAFORMA SEMISUMERGIBLE Y COMPARAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

**ACADEMICOS:**

**Responsables:**

No. Pers.	ACADEMICO	TIPO DE CONTRATACION	TIPO DE PARTICIPACION	CORREO ELECTRONICO
21926	HERNANDEZ HERNANDEZ JOSE	POR HORAS	RESPONSABLE	josehernandez02@uv.mx

**OTROS PARTICIPANTES:**

NOMBRE	INSTITUCION	CIUDAD	ESTADO	PAIS
SANCHEZ MONDRAGÓN JOEL	INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO	BOCA DEL RÍO	VERACRUZ	MÉXICO

**ALUMNOS:**

No. DE MATRICULA	ALUMNO	NIVEL ACADEMICO	TIPO DE PARTICIPACION	CORREO ELECTRONICO
S16017046	SALAZAR PASCUAL NICK ALEJANDRO	MAESTRIA	TESISTAS	nicksalazarnaval@gmail.com

**INSTITUCIONES CON LAS QUE SE VINCULA:**

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO                      INSTITUCIONES PUBLICAS

**RECURSOS UTILIZADOS.**

**FUENTES DE FINANCIAMIENTO:**

PRESUPUESTO INSTITUCIONAL                      40  
 RECURSOS PROPIOS DEL ALUMNO                      60

**INFRAESTRUCTURA UTILIZADA:**

BIBLIOTECA  
 LABORATORIOS  
 SALA DE JUNTAS





TEMAS ATENDIDOS:

INVESTIGACION  
TECNOLOGÍA

### 3 DIAGNOSTICO DEL PROCESO DE GESTION DE LA VINCULACION DEL PROYECTO

#### BENEFICIOS DE LA VINCULACION

BENEFICIOS INTERNOS: ACCESO AL TALENTO INTELECTUAL (CONOCIMIENTO DE EXPERTOS)

PROCESO DE GESTION DE VINCULACION:

POR EL DESARROLLO DE ACTIVIDADES ACADEMICAS  
POR INTERES DE ALUMNOS  
POR INTERES PERSONAL DE ACADEMICOS

OBSTACULOS PARA LA VINCULACION:

FALTA DE RECURSOS FINANCIEROS

FACTORES DE EXITO:

DISPOSICION E INTERES DE LOS ACADEMICOS PARA REALIZAR LA VINCULACION

#### COMPROMISOS

ME COMPROMETO A REALIZAR LAS ACCIONES NECESARIAS PARA LLEVAR A CABO EL REGISTRO, SEGUIMIENTO Y ACTUALIZACION DEL MISMO, DENTRO DEL SISTEMA DE INFORMACION PARA LA VINCULACION UNIVERSITARIA (SIVU), EN LOS PERIODOS ESTABLECIDOS POR LA ADMINISTRACION SIVU.

AVALO LA EXISTENCIA DE ESTE PROYECTO DE VINCULACION Y AUTORIZO SU REGISTRO DENTRO DEL SISTEMA DE INFORMACION PARA LA VINCULACION UNIVERSITARIA.

HERNANDEZ HERNANDEZ JOSE

NOMBRE Y FIRMA DEL RESPONSABLE DEL PROYECTO

VO. BO. DEL RESPONSABLE DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

SELLO DE LA ENTIDAD O DEPENDENCIA

Apéndice 2. Carta de convenio con industria

Apéndice 3. Caratula de Beca Conacyt

**MÉXICO**  
PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA



**DIRECCIÓN ADJUNTA DE POSGRADO Y BECAS**  
**DIRECCIÓN DE BECAS**

México, D.F., a 20 de octubre de 2016

**A QUIEN CORRESPONDA  
PRESENTE**

Por medio de la presente hacemos constar que el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, ha otorgado una beca a el C. NICK ALEJANDRO SALAZAR PASCUAL con número (CVU/Becario): 767399/606031, a partir de la fecha 1 de agosto de 2016 hasta el 31 de julio de 2018, para realizar sus estudios de MAESTRÍA en el programa MAESTRÍA EN INGENIERÍA APLICADA en la UNIVERSIDAD VERACRUZANA.

La beca incluye una asignación igual a 4.5 veces el Salario Mínimo General Vigente en el Distrito Federal, equivalente a \$9,860.40 a la fecha de expedición de este documento; así como el servicio médico proporcionado por el ISSSTE en los períodos escolares comprendidos durante la vigencia de la beca.

Extendemos esta carta a petición de el interesado para los fines que considere pertinentes.

Atentamente

**M. en C. María Dolores Sánchez Soler**  
**Directora Adjunta**

Apéndice 4. Publicaciones durante la maestría.



TECNOLOGICO  
NACIONAL DE MEXICO



ACADEMIA JOURNALS  
OFFICE PRO SCIENTIA ET STUDIIUM

Congreso Internacional de Investigación Academia Journals  
Chetumal 2018

AcademiaJournals.com

**CERTIFICADO**

otorgado a

Ing. Nick Alejandro Salazar Pascual  
Ing. Claudia Martínez Gonzáles  
Ing. Jorge Armando Galó Romero  
Mtro. José Hernandez Hernandez

por su artículo intitulado

Simulación del comportamiento estructural de un marco de  
celosía de una subestación eléctrica ante viento

(Artículo No. Che433)

el cual fue presentado en el Congreso desarrollado del 23 al 25 de mayo de 2018  
en Chetumal, Quintana Roo, México y publicado en el portal de Internet  
*AcademiaJournals.com*, con ISSN 1946-5351 online, Vol. 10 #4, 2018  
y en el libro electrónico online intitulado  
*Compendio de Investigación Chetumal 2018* con ISBN 978-1-939982-37-7

Ing. Mario Vicente González Robles  
Director  
Instituto Tecnológico de Chetumal



Dr. Rafael Moras, P.E.  
Editor, Academia Journals  
Profesor de Ing. Industrial, St. Mary's University

# SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UN MARCO DE CELOSÍA DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA ANTE VIENTO

Ing. Nick Alejandro Salazar Pascual<sup>1\*</sup>, Ing. Claudia Martínez González<sup>2</sup>, Jorge Armando Galó Romero<sup>3</sup>,  
Mtro. José Hernández Hernández<sup>4</sup>

**Resumen** — En este artículo se determinan los desplazamientos de un marco de celosía de una subestación eléctrica, empleando elemento finito para la simulación de la interacción viento-estructura. Los resultados de las simulaciones se compararon con los valores admisibles de desplazamientos que marcan las especificaciones de la Comisión Federal de Electricidad. Los resultados muestran que los valores obtenidos del análisis de la estructura se encuentran dentro del rango de lo permitido por la CFE, lo cual nos indica que el diseño estructural cumple con las condiciones de operación.

**Palabras clave** — MEF, Análisis estructural, subestación, CFE.

## Introducción

Las subestaciones eléctricas son de gran importancia para la transformación de energía. Las estructuras que la conforman llegan a alcanzar grandes alturas, por lo que se ven expuestas a importantes velocidades del viento. Debido a este fenómeno es necesario determinar las presiones de viento que son ejercidas sobre los diferentes elementos estructurales que la componen ante velocidades del viento que soportan a lo largo de su vida útil, esto es, verificar que estas estructuras cumplan con la función para la que fue diseñada. Para lo cual, es necesario tomar en cuenta las velocidades regionales para un periodo de 200 años con base en el Manual de Diseño por Viento <sup>[1]</sup>. Como hablamos en estos casos de estructuras altas y esbeltas, los elementos estructurales que la componen pueden ser vulnerables al viento, representando un riesgo para la subestación. El efecto principal del viento se representa en la forma de presiones normales a las superficies exteriores de la columna. Por lo comentado, se plantea determinar mediante simulación numérica el comportamiento estructural de elementos de celosía ante la acción del viento, como primera fase sólo se contempla un análisis estático. El procedimiento antes descrito se aplicó en el marco de la subestación eléctrica “Ojo de Agua”, que se encuentra ubicada a un costado de la Autopista Córdoba-Orizaba, a la altura del kilómetro 280, hacia el camino de la comunidad Moyoapa, Ixtaczoquitlán, Veracruz. Los resultados que se presentan en este artículo tienen como objeto examinar los desplazamientos ocasionados por el viento en la estructura antes mencionada, misma que fue evaluada simulando el viento al que puede estar expuesta la estructura.

## Descripción del Método

### *Método de los elementos finitos*

El método del elemento finito (MEF en español o FEM en inglés) es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales, el cual puede ser aplicado en análisis de estructuras de cualquier tipo. En el MEF una solución puede ser modelada analíticamente reemplazándola con un arreglo de elementos discretos. Esto permite reducir un número infinito de incógnitas del problema a uno con un número finito de incógnitas. Por otro lado, el método también permite variar las condiciones (parámetros elásticos, viscosidad, densidad, temperatura, etc.) de los elementos individualmente o en grupos de acuerdo con las ecuaciones constitutivas que se empleen en el problema. Para la solución de problemas de diseño y análisis de estructuras se emplean programas de cómputo especializados, entre los que destacan GeniE. Este es un software para diseñar y analizar estructuras marítimas hechas de vigas y

<sup>1</sup> \*El Ing. Nick Alejandro Salazar Pascual es estudiante de la Maestría en Ingeniería Aplicada de la Universidad Veracruzana, México, [nicksalazarnaval@gmail.com](mailto:nicksalazarnaval@gmail.com)

<sup>2</sup> La Ing. Claudia Martínez González es estudiante de la Maestría en Ingeniería Aplicada de la Universidad Veracruzana, México, [claudia\\_martinezg@hotmail.com](mailto:claudia_martinezg@hotmail.com)

<sup>3</sup> El Ing. Jorge Armando Galó Romero es estudiante de la Maestría en Ingeniería Aplicada de la Universidad Veracruzana, México, [jorgearmandogalo@hotmail.com](mailto:jorgearmandogalo@hotmail.com)

<sup>4</sup> El Mtro. José Hernández Hernández es profesor del núcleo académico básico de la Maestría en Ingeniería Aplicada de la Universidad Veracruzana, México, [josehernandez02@uv.mx](mailto:josehernandez02@uv.mx)

placas, aunque se puede emplear para analizar estructuras metálicas de cualquier tipo, el modelado, análisis y procesamiento de resultados se realizan en el mismo entorno gráfico de usuario [1].

### Análisis por Viento

Las cargas actuantes sobre la estructura de la subestación consisten en la carga muerta de los elementos estructurales, la carga de los equipos, cables y la carga de viento determinada del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad [2]. Las presiones causadas por el empuje del viento  $p_z$  en los elementos estructurales de la subestación pueden determinarse mediante las ecuaciones 1 y 2.

$$P_z = C_a q_z F_{ADE} \quad (1)$$

$$q_z = 0.0048 G (F_T F_{rz} V_R)^2 \quad (2)$$

En donde  $F_{ADE}$  es el factor de amplificación dinámica,  $q_z$  es la presión dinámica de base,  $C_a$  es el coeficiente de arrastre, en función de la relación de solidez,  $G$  es un factor corrector por presión y temperatura,  $F_T$  es el factor que toma en cuenta la topografía alrededor de la estructura,  $F_{rz}$  toma en cuenta la variación de la velocidad del viento con la altura y  $V_R$  es la velocidad regional acorde a la importancia de la estructura.

El coeficiente de arrastre para la columna depende del área expuesta al viento sobre la cara de la columna, para estructuras de celosía donde todos sus miembros expuestos tienen superficies planas [3], como el caso de estudio, se emplea la ecuación 3.

$$C_a = (4.1727 \phi_i^2 + 6.1681 \phi_i + 4.0088) \quad (3)$$

Donde  $\phi_i$  es la relación de solidez, adimensional, y se determina con la ecuación 4.

$$\phi_i = \frac{A_z}{A_t} \quad (4)$$

Donde  $A_z$  es el área sólida total de la cara de la sección considerada de la estructura y expuesta a la acción del viento, en un plano vertical y perpendicular a la dirección del viento, en  $m^2$  y  $A_t$  es el área bruta circunscrita por el perímetro de la sección correspondiente, proyectada sobre el plano mencionado, en  $m^2$ .

#### Velocidad de diseño

La velocidad de diseño  $V_D$ , es la velocidad con la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre un componente de la misma [3]. La  $V_D$ , en  $km/h$  se obtiene de acuerdo con la ecuación 5.

$$V_D = F_T F_{rz} V_R \quad (5)$$

El factor  $F_{rz}$  establece la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el nivel del terreno,  $z$ , y está en función de la categoría del terreno según su rugosidad [3]. Este factor de exposición se obtiene de acuerdo con las ecuaciones 6, 7 y 8.

$$F_{rz} = c \quad si \quad z \leq 10m \quad (6)$$

$$F_{rz} = c \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \quad si \quad 10m < z < \delta \quad (7)$$

$$F_{rz} = c \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \quad si \quad z > \delta \quad (8)$$

Los coeficientes  $c$ ,  $\alpha$  y  $\delta$  [2] están en función de la categoría del terreno según su rugosidad de acuerdo con los valores dados en Manual de diseño de obras civiles de la CFE, diseño por viento.

#### *Factores y combinaciones de carga*

Las condiciones de carga que se consideraron para el análisis y diseño de las estructuras mayores de la subestación que se estudia se enlistan a continuación:

1. **PP**= Peso propio de la estructura.
2. **PEC**= Peso del equipo y cables
3. **TTminsv**= Tensión en cables a temperatura mínima (-10°C), sin viento.
4. **TTmedsv**= Tensión en cable a temperatura media sin viento.
5. **TTmedVmax x**= Tensión en cables a temperatura media con viento máximo en la dirección x, y carga perpendicular al cable inducida por el viento.
6. **TTmedVmax z**= Tensión en cables a temperatura media con viento máximo en la dirección z, y carga perpendicular al cable inducida por el viento.
7. **PVmaxEx**= Presión de viento máximo sobre la estructura, en la dirección x.
8. **PVmaxEz**= Presión de viento máximo sobre la estructura, en la dirección z.

#### *Combinaciones y factores de carga para la estructura*

Las combinaciones propuestas para este diseño son de acuerdo con las Especificaciones para diseño de subestaciones, Especificación JA100-57, de la Comisión Federal de Electricidad.

9.  $1.4(PP+PEC+TTminsv)$
10.  $1.2(PP+PEC) + 1.3(TTmedVmax\ x + PVmax\ Ex)$
11.  $1.2(PP+PEC) + 1.3(TTmedVmax\ z + PVmax\ Ez)$
12.  $1.2(PP+PEC) + 0.65TTmedVmax\ x + 0.65\ TTmedVmax\ z + 0.78\ PVmaxEx + 0.78\ PVmaxEz$
13.  $PP+PEC+TTminsv$
14.  $0.9(PP+PEC) + 1.3(TTmedVmax\ x + PvmaxEx)$
15.  $0.9(PP+PEC) + 1.3(TTmedVmax\ z + PVmaxEz)$
16.  $0.9(PP+PEC) + 0.65TTmedVmax\ x + 0.65\ TTmedVmax\ z + 0.78\ PVmaxEx + 0.78\ PVmaxEz$

#### **Características de la subestación ojo de agua**

La subestación eléctrica "Ojo de Agua" se encuentra ubicada a un costado de la Autopista Córdoba-Orizaba, a la altura del km 280, hacia el camino de la comunidad Moyoapa, Ixtaczoquitlán, Veracruz. El análisis por viento de esta subestación se realizó empleando el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOCCFE), diseño por viento, tomando en cuenta las siguientes características del sitio:

- Altura sobre el nivel del mar: 1230 m
- Temperatura media anual:  $T=15.4^{\circ}C$
- Estructura del Grupo: A
- Periodo de retorno:  $T_r = 200$  años.
- Velocidad Regional,  $V_R = 163$  km/h, para el periodo de retorno adoptado.

Es importante comentar que la velocidad regional se determina con un tiempo de promediación de 3 s, por lo cual toma en cuenta ráfagas de viento que afectan a estructuras flexibles y esbeltas como la analizada en este estudio. Además, las velocidades del viento se determinan para un periodo de retorno de 200 años, determinada a partir de las

consecuencias que tendría su falla en el suministro de energía eléctrica de la región. Este periodo de retorno significa que la probabilidad de excedencia de la velocidad regional en un año es de  $1/T_r = 0.005$ .

### Análisis Estático

Para el análisis estático, se empleó el software GeniE, mismo donde se modelaron las condiciones a las que puede estar sometida la estructura durante su vida útil. El análisis se realizó conforme a los factores y combinaciones de carga arriba descritos, tomando en cuenta las condiciones del sitio. El análisis estructural debe incluir todos los miembros de la estructura considerando los efectos de orden superior debido a los desplazamientos <sup>[3]</sup>.

#### Deformaciones elásticas admisibles

La deformación máxima permisible para estructuras (trabes y columnas) debe ser de acuerdo con la Tabla 1.

Tipo de estructura	Combinación de carga 13 Carga permanente sin factorizar: PP+PEC+TTminsv
Trabes de celosía	L/360 (horizontal y vertical)
Columnas de celosía	H/360 (horizontal en el extremo libre)

Tabla 1. Deformaciones lineales permisibles <sup>[3]</sup>

Donde L es la longitud de la trabe en mm y H la altura de la columna en mm.

#### Elementos utilizados

Los perfiles para las estructuras metálicas deben ser de celosía a base de ángulos. Todas las estructuras mayores y su tornillería deben ser galvanizadas por inmersión en caliente. Para el diseño de la estructura que se está estudiando se emplearon perfiles de acero mexicanos. Las características de los materiales empleados se enlistan a continuación:

Secciones: Ángulos

Tipo de Acero. ASTM A-36

Perfiles de acero estructural según norma NMX-B-285  $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$

Tornillería, según norma NMX-H-14 (ASTM-325)  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

Tuercas ASTM A-563 grado DH

### Metodología de estudio

#### Diseño del modelo

El modelo de estudio se trata de un marco de celosía de una subestación eléctrica, misma que está conformada con perfiles de acero estructural ASTM A-36, a base de ángulos de lados iguales. En la Figura 1 se muestran los perfiles utilizados.

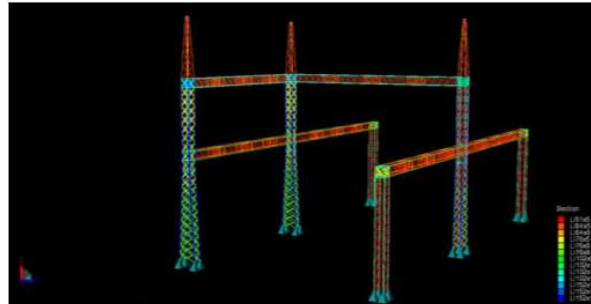


Figura 1. Secciones de perfiles estructurales

Para el diseño de las torres de celosía se considera que los apoyos se encuentran articulados, permitiendo únicamente tres grados de libertad, es decir que se desliza en las tres direcciones, pero no transmite momento.

*Cargas que inciden en la estructura*

**Peso propio de la estructura:** El peso de la estructura se determina con el software GeniE de la paquetería de SESAM DNV, en colaboración con la Facultad de Ingeniería UV, quien cuenta con la licencia de este programa, mismo que se usa para su modelado.

**Peso de equipos:** Para este caso no se colocarán equipos sobre la estructura.

**Peso de cables:** El peso de los cables se calcula considerando un peso unitario del cable de 1.870 kg/m. Para el cable de guarda, el peso por metro es de 0.3896 kg/m. Tomando en cuenta lo anterior se define el peso de cable para cada situación.

**Cargas debidas a la tensión de los cables:** Las tensiones en los cables se obtienen de la memoria de cálculo de flechas y tensiones del área eléctrica de la subestación y del remate de la línea de transmisión, considerando tensión mínima sin viento, tensión media sin viento, tensión media con viento máximo en la dirección  $x$  y  $z$ .

*Cargas debidas a la acción del viento*

**Presión de viento máximo sobre la estructura, en la dirección  $x$ ,  $z$ :** Para determinar las cargas que afectan la estructura debido a la acción del viento se debe realizar el análisis por viento, en base al Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento [2].

## Resultados

Los resultados del análisis estático se obtuvieron tomando en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente. Los desplazamientos se revisan en condiciones de carga de servicio (combinación 13).

### PP + PEC + TTminsv

La Figura 2 muestra los desplazamientos que presenta la estructura bajo la combinación de carga 13.

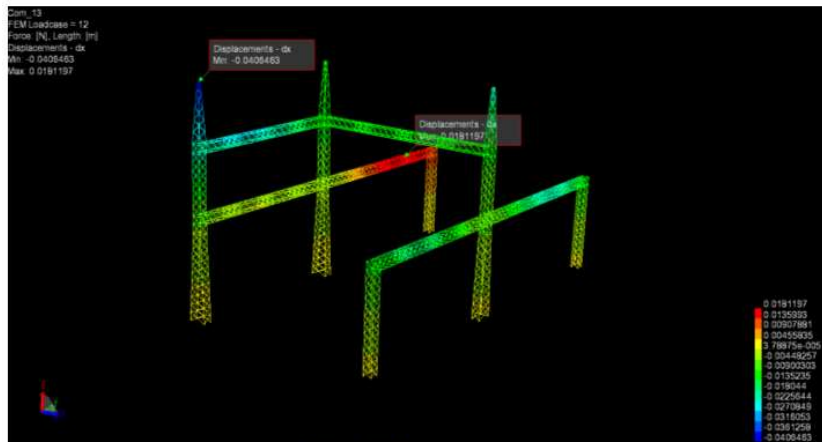


Figura 21. Desplazamientos.



Como se observa el máximo desplazamiento registrado en la columna bajo condiciones de servicio es de 40.64 mm, localizado en el capitel del marco de celosía, mientras que para los elementos localizados en la trabe se tiene un desplazamiento máximo de 18.12 mm, ambos en la dirección x. El análisis con el software GeniE, también nos permite conocer las fuerzas a tensión y compresión a las que se encuentran sometidas los elementos estructurales del modelo estudiado. La fuerza máxima a tensión fue de 528 733 N, mientras que a compresión 669 289 N, en la dirección x, ambas registradas en la parte inferior de las columnas, bajo la combinación de carga 16.

#### *Comparación de los resultados con los valores normativos*

Los resultados obtenidos en el análisis en GeniE se compararon con los valores máximos de desplazamientos obtenidos de la especificación JA 100-57 “Estructuras Metálicas Mayores y Menores” (agosto 2011), en la Tabla 2 se muestran los resultados.

Elemento	Longitud/Altura (mm)	Desplazamiento permisible (mm)		Desplazamiento máximo (mm)
		L/360	H/360	
Columna	31600	87.77		40.64
Trabe	28000		77.77	18.12

Tabla 2. Máximos desplazamientos

La Tabla 2 muestra que los desplazamientos que se tienen tanto para la trabe como para la columna cumplen con lo establecido en la especificación de CFE. Esto garantiza que el diseño del modelo de estudio cumple con las condiciones para las que fue diseñada.

#### *Conclusiones*

Mientras las subestaciones se encuentran en operación existen factores externos que ponen en riesgo su funcionamiento, afectando el suministro de energía eléctrica, entre ellos la acción del viento. El impacto del viento afecta mayormente a las estructuras mayores, ya que pueden alcanzar alturas de 24 a 32 m, encontrándose sujetas a fuerzas aerodinámicas que ocasionan presiones y succiones sobre los elementos de las estructuras.

El uso del software GeniE permitió realizar un análisis de la respuesta de un marco de celosía de una subestación eléctrica ante la acción del viento. Se obtiene que los desplazamientos resultan ser menores que los mencionados en la especificación CFE JA100-576<sup>[3]</sup>.

Como se observa el resultado obtenido nos garantiza una confiabilidad estructural de la subestación, disminuyendo la probabilidad de falla.

#### *Recomendaciones*

Se pretende continuar con la investigación, involucrando otros parámetros como la fuerza sísmica registrada en la zona, y llevar a cabo un análisis dinámico fluctuando el viento a diferentes velocidades.

#### **Referencias**

- [1] GeniE, (2008), “Engineering for the future”, DNV Software.
- [2] CFE (Comisión Federal de Electricidad), (2008), “Manual de diseño de obras civiles de la CFE, diseño por viento”, México.
- [3] CFE (Comisión Federal de Electricidad), (2011), “Estructuras Mayores y Menores para Subestaciones”, Especificación JA100-57.

## Apéndice 5. Impresión de CVU

<b>gob mx</b>		
<b>CONACYT</b>		
Reporte CVU Completo		
1. Datos básicos	2. Formación académica	3. Trayectoria profesional
<a href="#">Datos generales</a>	<a href="#">Grados Académicos</a>	
<a href="#">Domicilio de residencia</a>		<a href="#">Estancias de investigación</a>
4. Producción científica, tecnológica y de innovación		
4.1 Científica		4.2 Tecnológica y de innovación
5. Formación de capital humano		
5.1 Docencia	5.2 Tesis dirigidas	5.3 Diplomados
<a href="#">Cursos impartidos</a>		
6. Comunicación pública de la ciencia, tecnológica y de innovación		
6.1 Difusión		6.3 Divulgación
<a href="#">Publicación de artículos</a>	<a href="#">Participación en congresos</a>	
7. Vinculación		8. Evaluaciones
	<a href="#">Proyectos de investigación</a>	
9. Premios y distinciones	10. Lenguas e idiomas	
	<a href="#">Idiomas</a>	

## Reporte CVU Completo

Datos generales		
CURP: SAPN920413HMCLSC05	Fecha de nacimiento: 13/abr/1992	RFC:
Nombre: NICK ALEJANDRO	Primer apellido: SALAZAR	Segundo apellido: PASCUAL
Sexo: Masculino	Estado conyugal:	País de nacimiento: México
Entidad federativa: MÉXICO		CVU: 767399
Contacto principal: nicksalazamaval@gmail.com		Nacionalidad: Mexicana

Medios de contacto			
Medio de contacto	Categoría de contacto	Correo / Teléfono	Principal
Correo electrónico	Personal	nicksalazamaval@gmail.com	SI

Grados académicos	
Título: Ingeniero Naval	
Nivel de escolaridad: Licenciatura	Estatus: Grado obtenido
Cédula profesional: 9852770	Opciones de titulación: Tesis
Título de tesis: "Diseño análisis estructural preliminar de una plataforma semisumergible de producción de hidrocarburos para aguas profundas en el Golfo de	
Fecha de obtención: 15/dic/2015	
Institución de obtención de grado: Universidad Veracruzana	
País de obtención de grado: México	

Áreas de conocimiento	
Área: Ingeniería y tecnología	Campo: Ingeniería
Disciplina: Ingeniería naval	Subdisciplina: Transportes marítimos

Grados académicos	
Título: Maestría en Ingeniería Aplicada	
Nivel de escolaridad: Maestría	Estatus: Proceso
Institución de obtención de grado: Universidad Veracruzana	
País de obtención de grado: México	

Áreas de conocimiento	
Área: Ingeniería y tecnología	Campo: Ingeniería
Disciplina: Ingeniería naval	Subdisciplina: Transportes marítimos

Estancia Investigación			
Nombre de estancia: Centro de Tecnología para Aguas Profundas			
Tipo de estancia: Académica			
Institución: Instituto Mexicano del Petróleo			
Fecha inicio: 15/feb/2018	Fecha Fin: 01/ago/2018		

Reporte CVU Completo

Áreas de conocimiento			
Área:	Ingeniería y tecnología	Campo:	Ingeniería
Disciplina:	Ingeniería naval	Subdisciplina:	Transportes marítimos

Cursos impartidos	
Institución:	Universidad Veracruzana
Nombre del programa:	Propedéutico
Nombre del curso o asignatura:	Física
Año:	Horas totales: 40

Áreas de conocimiento			
Área:	Ingeniería y tecnología	Campo:	Ingeniería
Disciplina:	Ingeniería naval	Subdisciplina:	Transportes marítimos

Participación en congresos			
Nombre del congreso:	XXIV COPINAVAL 2015		
Título del trabajo:	Diseño análisis estructural preliminar de una plataforma semisumergible de producción de hidrocarburos para aguas		
Título de participación congreso:	Ponencia		
Fecha:	01/ene/2015	Pais:	Uruguay
Palabra clave 1:	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	Palabra clave 2:	FEM
		Palabra clave 2:	SEMISUMERGIBLE

Proyectos de investigación	
Nombre del proyecto:	Análisis aerodinámico de una plataforma semi-sumergible de producción de hidrocarburos
Tipo de proyecto:	Investigación
Inicio:	31/ago/2016
Fin:	31/jul/2018
Institución:	Universidad Veracruzana (UV)

Áreas de conocimiento			
Área:	Ingeniería y tecnología	Campo:	Ingeniería
Disciplina:	Ingeniería naval	Subdisciplina:	Transportes marítimos

Colaboradores

Nombre: José Hernández Hernández			
Sexo:	Masculino	Nivel de escolaridad:	Maestría
		Nacionalidad:	Mexicana
Área:		Campo:	
Disciplina:		Subdisciplina:	
¿Pertenece al S. N. I.?:	No	Producto generado:	
Tiempo de colaboración:	6	Tipo de colaborador:	Catedrático no CONACYT
Medio de contacto:	Correo electrónico	Categoría de medio de contacto:	Personal
		Correo:	josehernandez02@uv.mx

Nombre: Joel Sánchez Mondragón			
Sexo:	Masculino	Nivel de escolaridad:	Doctorado
		Nacionalidad:	Mexicana

## Reporte CVU Completo

Área:		Campo:	
Disciplina:		Subdisciplina:	
¿Pertenece al S. N. I.?: Sí		Producto generado:	
Tiempo de colaboración: 6		Tipo de colaborador: Investigador SNI	
Medio de contacto: Correo electrónico	Categoría de medio de contacto: Personal	Correo: jsmbalam@gmail.com	

Idioma	
Idioma:	English

Grado de dominio			
Grado de dominio:	Intermedio	Nivel de conversación:	Intermedio
Nivel de lectura:	Intermedio	Nivel de escritura:	Intermedio
Fecha de evaluación:	17/mar/2017	¿Cuenta con certificación?:	Sí
Documento probatorio:	TOEFL ITP	Vigencia de:	17/abr/2018 a 20/abr/2020
Puntos / porcentaje:	503	Nivel conferido:	Intermedio
Institución que otorgó certificado:	ETS		