



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Metodología de análisis por viento de una estructura desplegable

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

MAESTRÍA EN CIENCIAS (ESTRUCTURAS)

Presenta:

Ing. Xochitl Constante Torres

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Codirigido por:

Dr. Humberto Yáñez Godoy

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Presidente

Dr. Humberto Yáñez Godoy
Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Vocal

Dr. Guillermo Iván López Domínguez
Suplente

Dr. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Diciembre 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

Los domos desplegables son estructuras alternativas que pueden ser muy versátiles; sus características las hacen muy útiles como estructuras temporales, como lo son los refugios que pueden ser útiles en casos de desastres naturales que afectan a la población en distintas regiones del país. Su facilidad de transporte, montaje y desmontaje los convierte en una solución rápida y funcional para escenarios donde se requiere atención inmediata. Sin embargo, debido a su ligereza, la principal fuerza que puede convertirse en el principal agente de falla estructural si no se considera adecuadamente en el diseño es el viento. Por lo que este estudio está dedicado a ese efecto y al comportamiento estructural del modelo seleccionado. La investigación consiste en la simulación de 4 escenarios, en los que el impacto del viento se estableció en ángulos de 0° , 15° , 30° y 45° respecto a la perpendicular a una de las caras del domo. Se empleó una metodología combinada que integró la dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante ANSYS Fluent, así como el análisis estructural con el software RAM Elements, con la que se llegó al diseño de los elementos conforme a los esfuerzos calculados. Esto resultó en una estructura resistente a vientos en México, adecuada para ser refugio, manteniendo las características de ligereza, transportabilidad y compactibilidad.

(Palabras clave: estructuras desplegables, domos desplegables, refugios de emergencia, carga de viento, CFD)

ABSTRACT

Deployable domes are alternative structures that offer high versatility; their characteristics make them especially useful as temporary structures, such as emergency shelters in cases of natural disasters that affect populations across various regions of the country. Their ease of transport, assembly, and disassembly make them a quick, functional solution for scenarios that require an immediate response. However, due to their lightweight nature, wind becomes the main external force that can lead to structural failure if not adequately considered during the design process. Therefore, this study focuses on this phenomenon and the structural behavior of the selected model. The research consists of simulating four scenarios in which wind impacts the structure at angles of 0° , 15° , 30° , and 45° relative to the perpendicular of one of the dome's faces. A combined methodology was applied, integrating Computational Fluid Dynamics (CFD) through ANSYS Fluent, along with structural analysis using RAM Elements software. This approach resulted in the structural design of the components based on the calculated internal forces. This resulted in a wind-resistant structure in Mexico, suitable as a shelter while maintaining the characteristics of lightness, transportability and compactness.

(Keywords: deployable structures, deployable domes, emergency shelters, wind load, CFD)

A mis padres y hermanos.

“Valor, coraje y decisión”

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, que siempre me han permitido y empujado a vivir conforme a mis sueños, me han apoyado en todos los proyectos en los que me he involucrado a lo largo de mi vida, dando siempre lo mejor porque los tengo como mi soporte. A mi madre, por su amor incondicional, y a mi padre, por su fuerza y apoyo técnico en cada uno de mis proyectos.

A mis hermanos que siempre están para ayudarme y apoyarme, sacando una sonrisa y alegrando mis días.

A mis profesores, quienes, con su paciencia, sabiduría, conocimientos y experiencia, permitieron ampliar mis conocimientos en la ciencia y en el área de las Estructuras, y poder compartir con ustedes mi aportación mediante este trabajo. Al Dr. Luis Francisco Pérez Moreno, al Dr. Humberto Yáñez Godoy, al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel, al Dr. Guillermo Iván López Domínguez y al Dr. Iván Fermín Arjona Catzim, estoy sumamente agradecida con ustedes.

A mis compañeros de la Maestría, por su amistad, apoyo y compañerismo, y por el buen trato y el ambiente solidario que compartimos, les agradezco y deseo lo mejor en cada uno de sus caminos.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) en México y al Instituto de Ingeniería Mecánica (I2M) de la Universidad de Burdeos, en Francia, por el apoyo invaluable brindado en la realización de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 JUSTIFICACIÓN	15
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
2. ANTECEDENTES	18
2.1 ESTRUCTURAS DESPLEGABLES	18
2.1.1 <i>Clasificaciones</i>	18
2.2 ANÁLISIS POR VIENTO	22
2.3 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS POR VIENTO	25
2.4 METODOLOGÍA CFE	26
2.4.1 <i>Análisis Dinámico</i>	27
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	38
3.1 HIPÓTESIS	38
3.2 OBJETIVO GENERAL.....	38
3.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	38
4. METODOLOGÍA.....	39
4.1 ELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DEL MODELO RETRÁCTIL	40
4.1.1 <i>Evaluación de las necesidades de un refugio</i>	40
4.1.2 <i>Propuesta de alternativas de una estructura viable</i>	40
4.1.3 <i>Selección de la geometría y construcción del modelo</i>	43
4.1.4 <i>Anclajes para estabilidad</i>	44
4.2 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA PROPUESTA.....	44
4.2.1 <i>Evaluación de criterios para análisis por viento.</i>	44
4.2.2 <i>Ubicación y clasificación por condiciones externas.</i>	45
4.2.3 <i>Análisis dinámico</i>	45
4.3 DESARROLLO EN UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL.....	46
4.3.1 <i>Propuesta de una metodología de análisis de viento</i>	46
4.4 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	47
4.4.1 <i>Comparación de los resultados</i>	48
4.4.2 <i>Documentación de planos del sistema constructivo</i>	48

5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
5.1	CONFIGURACIÓN DEL MODELO RETRÁCTIL.....	49
5.1.1	<i>Necesidades de un Refugio.....</i>	49
5.1.2	<i>Geometría y construcción del modelo</i>	50
5.1.3	<i>Anclajes para estabilidad</i>	55
5.2	ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA PROPUESTA.....	56
5.2.1	<i>Criterios de evaluación para análisis por viento.....</i>	56
5.2.2	<i>Ubicación y clasificación por condiciones externas.</i>	57
5.2.3	<i>Análisis dinámico</i>	60
5.3	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL.....	64
5.3.1	<i>Metodología de Análisis de viento</i>	64
5.4	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	67
5.4.1	<i>Comparación de resultados.....</i>	77
5.4.2	<i>Aspectos constructivos</i>	78
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
7.	REFERENCIAS.....	87
	APÉNDICE.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Figura 1. Barras unidas en x por articulaciones. Elaboración propia.....	19
Figura 2. Familias de barras lineales y curvas	20
Figura 3. Malla plana con familias A y B perpendiculares	21
Figura 4. Mallas esféricas cuadrangulares	21
Figura 5. Mallas cilíndricas rectangulares	21
Figura 6. Elemento de malla triangular con 3 familias A, B y C.....	21
Figura 7. Diagrama de flujo para el análisis dinámico, modificado del manual de Comisión Federal De Electricidad, (2020)	27
Figura 8. Esquema de transporte con helicóptero de domo plegado	51
Figura 9. (a) Prototipo de arco desplegable en madera, (b) Prototipo plegado. Elaboración propia	52
Figura 10. Prototipo de domo en madera a escala. Elaboración propia	53
Figura 11. Secuencia de plegado del prototipo de domo en madera a escala. Elaboración propia	53
Figura 12. Gráfica de un arco desplegable con sus coordenadas.....	54
Figura 13. Anclajes de tornillo (screw-anchors) J. Llorens (2006).....	56
Figura 14. Instalación de anclajes de tornillo en el “TR 2003. Octavo Taller Internacional sobre Diseño y Realización Práctica de Estructuras Arquitectónicas de Membrana. Universidad Técnica de Berlín”. J. Llorens (2006).....	56
Figura 15. Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años del manual de la (Comisión Federal De Electricidad, 2020)	59

Figura 16.Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular 0°	63
Figura 17. Modelo con secciones HSS_RECT 4 x 2 x 1/4	63
Figura 18. Geometría del domo en SketchUp	64
Figura 19. Domo y enclosure en SpaceClaim	65
Figura 20. Características del mallado en Domo.....	66
Figura 21. Características de mallado en Enclosure	66
Figura 22. Presiones en Domo con viento perpendicular (0°)	68
Figura 23. Presiones en Domo con viento a 15°	68
Figura 24. Presiones en Domo con viento a 30°	69
Figura 25. Presiones en Domo con viento a 45°	69
Figura 26. Articulaciones en la estructura	70
Figura 27. Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular 0°	71
Figura 28.Modelo con secciones HSS_RECT 3 x 1 ½ x 1/8	72
Figura 29. Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular 15°	72
Figura 30. Modelo con secciones HSS_RECT 4 x 1 ½ x 3/16	72
Figura 31. Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular 30°	73
Figura 32. Modelo con secciones HSS_RECT 2 ½ x 1 x 1/8	73

Figura 33. Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular 45°	74
Figura 34. Modelo con secciones HSS_RECT 4 x 1 ½ x 1/4	74
Figura 35. Sección HSS Rectangular	75
Figura 36. Conexiones de cruz aleatorias. Elaboración propia	78
Figura 37. Conexiones de cruz aleatorias en los elementos. Elaboración propia .	79
Figura 38. Nodo coincidiendo con las líneas de la elipse con conexión en cruz ...	80
Figura 39. Copa esférica desplegable (Kalantar & Borhani, 2014).....	80
Figura 40. Unión de barras con la conexión en cruz	81
Figura 41. Medidas de los elementos de arco en centímetros ajustadas considerando las conexiones en cruz	82
Figura 42. Vista frontal del domo con el perfil de diseño final HSS 4 x 1 ½ x ¼ ...	83
Figura 43. Vista en planta del domo con la sección final de diseño HSS 4 x 1 ½ x ¼	83
Figura 44. Diagramas para el caso de cargas indicadas por CFE con viento en dirección perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3.....	90
Figura 45. Diagramas para el caso de cargas de viento en dirección perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3	91
Figura 46. Diagramas para el caso de cargas de viento en dirección de 15 grados respecto de la perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3.....	92

Figura 47. Diagramas para el caso de cargas de viento en dirección de 30 grados respecto de la perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3..... 93

Figura 48. Diagramas para el caso de cargas de viento en dirección de 45 grados respecto de la perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3..... 94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factor de topografía local, modificado de (Comisión Federal De Electricidad, 2020).....	29
Tabla 2. Coeficientes de escala de rugosidad.....	30
Tabla 3. Relación entre la presión barométrica y la altitud en metros sobre el nivel del mar.	31
Tabla 4. Tabla comparativa de evaluación de características a las geometrías propuestas.....	43
Tabla 5. Coordenadas de arco desplegable.....	54
Tabla 6. Datos de ubicación, velocidad regional con periodo de retorno, altitud y temperatura mínima.	61
Tabla 7. Secciones estructurales seleccionadas según la dirección del viento aplicada en el domo.	76
Tabla 8. Longitud en centímetros de los elementos de medio arco simétrico considerando conexiones en cruz	81

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras desplegables son un conjunto de elementos dispuestos en "x" y conectados en los extremos que cambia su geometría al expandirse, permitiendo su uso como cubiertas y facilitando su almacenamiento y transporte. Combinan fuerza, adaptabilidad, ligereza y versatilidad, por lo que resultan prácticas para diversas aplicaciones, aunque requieren un análisis estructural preciso para garantizar su funcionalidad y seguridad. Sin embargo, estas estructuras son vulnerables a los efectos del viento debido a su ligereza y gran cobertura, lo que las hace susceptibles a deformaciones significativas ante ráfagas de alta velocidad.

El análisis de estructuras desplegables sometidas a cargas de viento requiere metodologías que consideren su geometría y comportamiento. Entre estas se pueden mencionar métodos numéricos como el Análisis de Elementos Finitos (FEM), Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) y la metodología de CFE (Comisión Federal De Electricidad, 2020), que permiten modelar la interacción viento-estructura, considerando su efecto y deformaciones. También se utilizan ensayos experimentales en túneles de viento para validar las interacciones antes mencionadas. No obstante, dada la falta de normativas específicas para este tipo de estructuras, es esencial desarrollar nuevas metodologías confiables y precisas que permitan garantizar su seguridad y estabilidad frente a cargas por viento.

En las siguientes secciones se presenta el desarrollo del presente trabajo de investigación, el cual se organiza en capítulos que abordan de manera detallada el estudio de las estructuras desplegables sometidas a cargas por viento.

A continuación, se expone la justificación de este trabajo destacando la importancia del estudio de las estructuras desplegables y su vulnerabilidad ante los efectos del viento. Después, se describe el problema que motivó la realización de esta investigación, a partir de la falta de una metodología específica que contemple

las complejidades geométricas y de comportamiento de las estructuras desplegadas bajo cargas de viento.

En el capítulo 2 se recopilan los antecedentes existentes en relación con el tema de las estructuras desplegadas y los estudios previos relacionados con su análisis bajo la acción del viento. Se revisan el estado del arte y las investigaciones relevantes, especialmente aquellas que han propuesto soluciones para abordar el problema de la interacción entre el viento y las estructuras desplegadas.

En el capítulo 3 se presentan la hipótesis que sustenta este trabajo, así como el objetivo general y los objetivos específicos. Posteriormente, en el capítulo 4 se describe de manera detallada la metodología planteada con base en los objetivos específicos para el análisis de las estructuras desplegadas, que incluye el desarrollo del diseño de la estructura seleccionada, el análisis con normativas actuales, el desarrollo de una herramienta computacional y la validación de resultados.

En el capítulo 5 se presentan y se discuten los resultados obtenidos a lo largo de la investigación. Se expone el proceso de desarrollo de la metodología propuesta, así como el diseño y la implementación del programa de análisis computacional y de validación de resultados.

Finalmente, en el capítulo 6 se muestran las conclusiones derivadas del trabajo; se destacan los aportes significativos, como la creación de una metodología integral para el análisis de estructuras plegables bajo efectos de viento y el desarrollo de una herramienta computacional que permite modelar su comportamiento con precisión. Además, se hacen recomendaciones con base en estos resultados para el diseño de futuras estructuras desplegadas y se proponen investigaciones, sugiriendo áreas de mejora y enfoques adicionales que podrían explorarse en relación con el tema de esta tesis.

1.1 Justificación

El territorio mexicano cuenta con una variedad de zonas con climas y geografías vastas, por lo que su exposición a sufrir desastres naturales es grande. Se ha registrado que desde 1900 a 2018 ocurrieron más de 231 desastres, con más de 20 mil vidas perdidas y 18 millones de personas afectadas directa o indirectamente, con 105 tormentas, 69 inundaciones, 35 sismos, 12 procesos de remoción en masa, y 19 de actividad volcánica como específica Alcántara-Ayala (2019).

Los desastres naturales provocan diversos tipos de pérdidas en el ámbito humano. Entre 2015 y 2018, el promedio anual de desastres fue de 5.25, con los que hubo 166 víctimas fatales y más de 380 mil heridos, muchos de los cuales se deben a la lenta reacción de los servicios médicos. La recuperación de la población es el objetivo de los programas como Protección Civil, permitiendo la pronta estabilización con sus servicios en refugios.

En este contexto, es necesario contar con estructuras de protección que permitan brindar apoyo a las personas con refugio, servicios médicos o almacenaje. Estas estructuras deben poder adaptarse a diferentes terrenos y trasladarse a lugares remotos, por lo que deben ser de rápida instalación y fáciles de transportar.

Indicado en el manual Operativo de atención a la Población en Riesgo o Condición de Emergencia (APCE) por el Gobierno Federal de México (2011), en los refugios deben poder instalarse todos los servicios necesarios para auxiliar a la población, como alimentación, aseo, recreación, educación y atención psicológica, con los que se logrará la recuperación de la normalidad para la población. El impacto en la utilización de las estructuras desplegables para responder ante una emergencia, como lo es un desastre natural, es de gran importancia, por lo que habrá de garantizarse su funcionalidad y seguridad estructural.

Estas estructuras presentan ventajas como su práctica, ligereza y portabilidad, además de la versatilidad de su uso. Por lo mismo, el no realizar un estudio y análisis de viento sobre la estructura provocaría el mal funcionamiento, lo que ocasionaría un mayor número de accidentes y pérdidas a la población afectada.

Debido a lo anterior, la presente investigación se enfocó en la evaluación precisa de las presiones y succiones del viento. Los resultados permitirán clarificar el comportamiento de dichas estructuras en ambientes eólicos cambiantes por el cambio climático.

1.2 Descripción del problema

El manual APCE explícitamente indica que los refugios para ser seleccionados en la fase de prevención deben ser sólidos y techados, lo cual no siempre es posible, ya que en algunos lugares es necesario contar con refugios transportables y adaptables de rápida instalación, como las estructuras desplegadas.

La falta de este tipo de estructuras en Protección Civil de México y la necesidad de contar con ellas representan una oportunidad para desarrollar un sistema estructural novedoso y aportar una alternativa para mejorar la respuesta, el servicio y el rescate a la ciudadanía afectada por desastres naturales.

Los albergues temporales proporcionan una respuesta expedita a una emergencia por la ocurrencia de desastres naturales, ofreciendo un lugar seguro para refugiarse temporalmente y al mismo tiempo recibir atención médica y servicios básicos.

Los códigos de diseño utilizados en México, tales como el manual de CFE de diseño por viento, carecen de normatividad específica relacionada con las estructuras desplegadas y sugieren realizar un análisis dinámico, hacer ensayos en túnel de viento y consultar la opinión de los expertos. Sin embargo, el análisis sugerido no es suficiente para una estructura desplegable, ya que no considera su geometría compleja y sus propiedades físicas, como la rigidez y los materiales en

conjunto. Además, hacer análisis de túnel de viento es más complejo y no está disponible para todos.

Las estructuras desplegables, sin embargo, son ultraligeras y, por consiguiente, vulnerables a la acción de las ráfagas de viento de corta duración. Actualmente, para su diseño solo se han tomado en cuenta la geometría, el proceso constructivo y algunas cargas gravitacionales estáticas. El efecto del viento es el más significativo en este tipo de estructuras; debe considerarse como parte principal del análisis. Por la importancia de los refugios, su fallo puede provocar pérdidas materiales, económicas y el incumplimiento de garantizar la seguridad de las personas para recuperarse o refugiarse.

Se debe contar con una metodología que ofrezca beneficios significativos para abordar el problema de la falta de normativas que garanticen la funcionalidad y la seguridad al analizar las estructuras desplegables. Complementar la normativa actual con herramientas numéricas, como la dinámica de fluidos (CFD) y ANSYS Fluent, además del programa RAM, con los que se busca una evaluación más precisa del comportamiento del viento, considerando las fuerzas de presión y la sección sobre la geometría compleja y las propiedades de la estructura desplegable. Diseñando refugios que optimicen el tiempo de rescate y que además cumplan con las normativas y funciones establecidas por los manuales. Al desarrollar la metodología, representaría un avance ante los métodos tradicionales que no contemplan las particularidades de estas estructuras.

2. ANTECEDENTES

En el presente capítulo se examinan de manera detallada los antecedentes que fundamentan esta investigación. Se exploran los desarrollos y estudios previos más relevantes en el campo de las estructuras plegables, con énfasis especial en su comportamiento bajo cargas dinámicas provocadas por el viento. También, se analizan las metodologías utilizadas en investigaciones anteriores y las limitaciones encontradas.

2.1 Estructuras desplegables

Las estructuras desplegables son marcos espaciales formados por barras cruzadas en forma de x, articuladas en sus extremos y a lo largo de ellas, estas son capaces de desplegarse y expandirse para cubrir claros grandes. Dichas estructuras son geométricamente agradables y su uso en la arquitectura ha estado enfocado principalmente en cubiertas amplias tanto temporales como permanentes. Contienen elementos ligeros, compactos y transportables, cubiertos con membranas de tela. Tienen un factor de *Packaging ratio* alto que es definido por Zhu & Filipov (2024) como el volumen desplegado sobre el volumen compactado que tiene la estructura. Las características innovadoras que traen estas estructuras a la industria de la ingeniería civil son la habilidad de adaptarse, de contraerse para transportarse y reutilizarse, lo que las hace prácticas en situaciones de emergencia.

2.1.1 Clasificaciones

Las estructuras desplegables son estructuras con grandes oportunidades debido a su versatilidad y ligereza, (Crespo Pérez, 2017) por lo que están empezando a ser grandemente estudiadas, pueden clasificarse de diferentes formas. A continuación, se presenta una clasificación de estructuras de apertura rápida, las cuales no necesitan elementos extra para su armado y estabilidad, además de ejemplos en su uso como refugios.

2.1.1.1 Tipologías de apertura rápida y armado solo con el mismo sistema

Existen tipologías de estructuras cuyo funcionamiento es tan elemental que su mecanismo de apertura y cierre puede ejecutarse en cuestión de minutos, utilizando únicamente los dispositivos internos del sistema. Estas estructuras son capaces de adoptar múltiples configuraciones en el espacio, con la posibilidad de bloquearse en distintas posiciones, principalmente en su configuración completamente extendida o en su forma de volumen mínimo como lo son:

- *Tipo paraguas*, el cual se despliega sobre un punto de apoyo en el centro.
- *Tipo mecanismo con articulaciones bloqueables*, las cuales se encuentran en el interior de las barras, donde una vez en su configuración final la hacen rígida.
- *Tipo aspa* se basan en las distintas posiciones que pueden tomar los elementos unidos en x como en la Figura 1 formando mecanismos móviles que pueden desplegarse y plegarse por la compatibilidad geometría en la que está organizada.

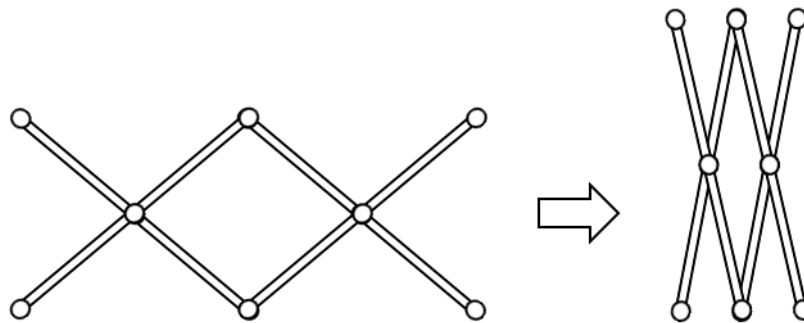


Figura 1. Barras unidas en x por articulaciones. Elaboración propia

Escrig & Valcárcel (1988), clasificaron y definieron las combinaciones que podían crear con estas últimas formadas por familias de barras como las de la Figura 2, que muestra 2 configuraciones una lineal y una curva, estas losas más estables como la losa plana (Figura 3):

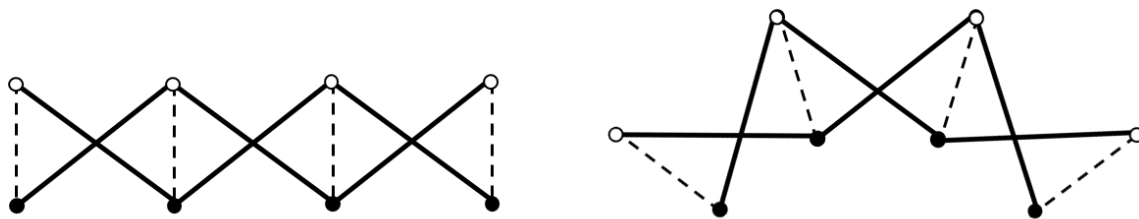


Figura 2. Familias de barras lineales y curvas

- Mallas esféricas cuadrangulares: a partir de una losa plana, curvar ambas familias para una configuración de superficie de doble curvatura.
- Mallas esféricas triangulares: curvar las 3 familias de vigas (Figura 4).
- Mallas cilíndricas rectangulares: formadas a partir de una losa plana de dos familias A y B unidas perpendicularmente, como se muestra en la Figura 5, en las que una de ellas es curva.
- Mallas cilíndricas triangulares: formadas por 3 familias de vigas como en la Figura 6, estas unidas en triángulos, en los que se pueden conseguir superficies cilíndricas curvando 2 o 3 de ellas.
- Mallas geodésicas: reducen la deformación en mallas cuadrangulares o triangulares sobre una esfera empleando poliedros geodésicos. (Escrig, 2006)
- Mallas esféricas tipo lamela: Estas mallas se forman mediante un patrón de rombos que se despliega desde el polo de la esfera, manteniendo constante la cantidad de rombos en cada paralelo. El número de rombos que convergen en el polo determina el orden de este tipo de estructuras.
- Mallas esféricas con aspas triples: se originan a partir de retículas triangulares, donde los elementos presentan dos grados de libertad adicionales en comparación con las aspas, lo que reduce significativamente los problemas de compatibilidad, aunque es necesario rigidizar los conjuntos adicionales. En esencia, es posible crear mallas curvas mediante el plegado de mallas planas o ajustándolas a poliedros geodésicos, siguiendo un enfoque similar al de las estructuras tipo aspa.

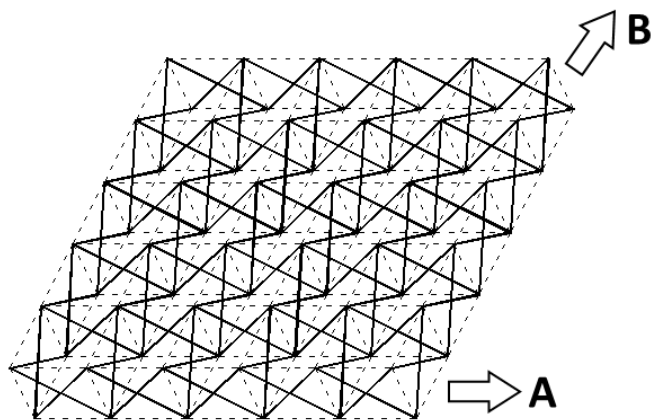


Figura 3. Malla plana con familias A y B perpendiculares

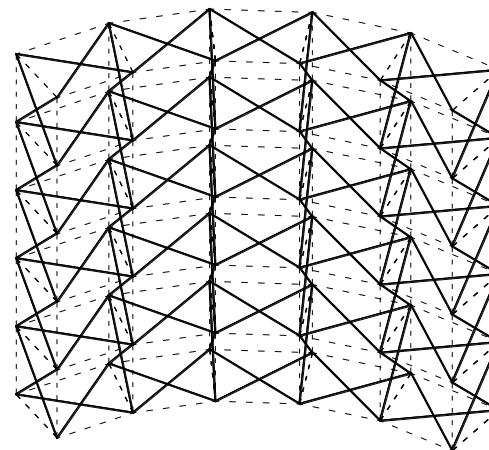


Figura 5. Mallas cilíndricas rectangulares

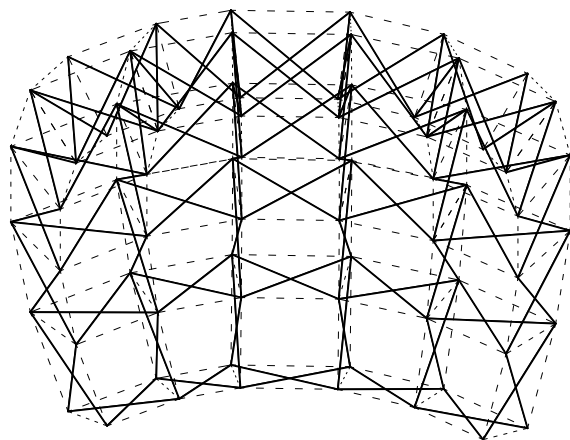


Figura 4. Mallas esféricas cuadrangulares

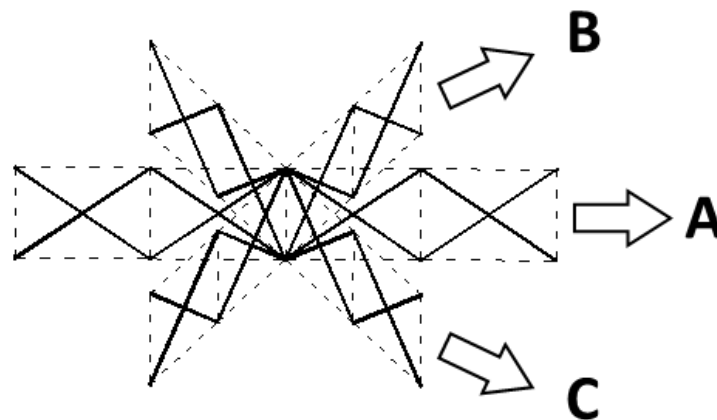


Figura 6. Elemento de malla triangular con 3 familias A, B y C

En este proyecto se analizará una estructura desplegable tipo aspa, con la configuración de malla esférica cuadrangular.

2.1.1.2 Ejemplos de estructuras desplegables como refugios.

Hoy en día las estructuras desplegables pueden ser utilizadas como refugios temporales o cubiertas para grandes áreas, por ejemplo, Thrall & Quaglia (2014) hicieron un compendio y clasificación de refugios plegables que han sido utilizados por el ejército estadounidense a lo largo de varios años. Estas clasificaciones son: refugios de muros de acordeón suaves, refugios de acordeón de pared rígida tipo almeja y refugios de acordeón de pared rígida de expansión longitudinal, los cuales han demostrado su funcionalidad efectiva como refugios de emergencia.

2.2 Análisis por viento

El análisis estructural en la ingeniería civil es el proceso con el que se evalúa el comportamiento de edificaciones, puentes, carreteras y otras infraestructuras bajo diferentes fuerzas, como las cargas muertas que provienen del peso propio, cargas vivas correspondientes a la ocupación y uso, y cargas accidentales como las cargas sísmicas correspondientes al movimiento del suelo y las presiones producidas por el viento sobre las estructuras. A través de cálculos matemáticos, modelos físicos y simulaciones computacionales, se analizan las tensiones, deformaciones y desplazamientos provocados en los elementos estructurales, como vigas, columnas y losas. Con el objetivo de garantizar que la estructura sea segura, resistente y cumpla con los requisitos normativos, evitando fallos que puedan comprometer su estabilidad o funcionalidad a lo largo del tiempo.

El análisis de las estructuras desplegables ha sido un tema de creciente interés en la ingeniería estructural, especialmente por su versatilidad, ligereza y capacidad de adaptación a diversas aplicaciones arquitectónicas. No obstante, su diseño y comportamiento frente a cargas dinámicas, como las producidas por el viento, plantean desafíos significativos.

El análisis de las estructuras desplegables depende de su geometría y configuración basadas en criterios de seguridad durante su vida de servicio, por lo que cuando se consideran únicamente cargas de servicio no es del todo correcto, ya que, al no incluir las cargas dinámicas del viento, el comportamiento tiende a ser linealmente elástico. Debido a esto, sus fallas más importantes serán por la resistencia, rigidez y pandeo como estableció Gantes (1991), quien modeló por elemento finito estructuras similares, donde los grados de libertad de rotación de las conexiones se consideraron independientes entre barras en elementos de tijera, se utilizó el enfoque de nodo maestro y nodo esclavo, lo que ha permitido obtener resultados suficientemente precisos con el uso de elementos de viga isoparamétricos de dos nodos para modelar partes de barras entre bisagras y conexiones pivotantes tomando en cuenta la importancia durante el despliegue y la figura desplegada.

El viento es una de las fuerzas a considerar a la hora de calcular una estructura, ya que sus efectos pueden tener consecuencias importantes que la llevarían a la falla estructural, con pérdidas humanas y económicas.

El análisis por viento es una etapa en el diseño estructural que considera la geometría de la estructura, la importancia que tiene, las velocidades de la región, su ubicación geográfica, la topografía del terreno, entre otras variables, con el objetivo de analizar cómo el viento y la estructura interactúan, así como el efecto que este producirá sobre la misma.

El trabajo de Chi (2007) propone una metodología que permite determinar el equilibrio y calcular el comportamiento estructural de dos estructuras de membranas desplegables mediante modelos numéricos. El análisis estructural de membrana se realizó mediante el método analítico por la teoría de membrana y elemento finito, tomando en cuenta las características físicas, el comportamiento esperado de la estructura, la precisión del análisis y la necesidad computacional del método. Se generaron diseños de estructuras de membrana desplegables, tensadas por puntales, y de alas de mariposa que permitieron encontrar un equilibrio de

autoesfuerzo; también se mencionan curvaturas óptimas y ángulos de inclinación que afectan el comportamiento de la estructura cuando trabaja bajo fuerzas dinámicas.

Jayson & Mathy (2013) analizaron un domo autoerigible, en el que realizaron un análisis por viento suponiendo un campo de presión similar al flujo sobre una esfera mediante un modelo de elementos finitos con el requerimiento de soportar vientos de al menos 100 mph. Se aplicó la carga de viento para considerar el momento de volteo y la influencia del anclaje, concluyendo que se requieren estacas para mantener la estructura fija a esas velocidades de viento.

Por otra parte, se han hecho estudios de comparación con túneles de viento como el presentado por Liu et al. (2018), quienes, para predecir los efectos del viento, utilizaron los métodos numéricos de simulación de grandes remolinos (LES, por sus siglas en inglés), el método *Discretizing and Synthesizing Random Flow Generation* (DSRFG, por sus siglas en inglés) y el método SGS.

Para el estudio se eligió la estructura de un techo de estadio desplegable en China; los métodos proporcionaron predicciones muy cercanas a los coeficientes de presión media y neta. El método para la evaluación de los efectos del viento considera los efectos del número de Reynolds y, de esta manera, supera las limitaciones de espacio en el modelo del túnel.

En México, Guzmán (2021) propuso un diseño de refugio emergente basado en sistemas desplegables, cuyo objetivo era su uso por la Cruz Roja como refugio para brindar un servicio óptimo ante desastres naturales. Esta investigación desarrolló principalmente el diseño, la geometría simplificada y la posibilidad de fabricar las piezas. El diseño se calculó en el software WinTess, basado en el código de Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD, por sus siglas en inglés), y sus cargas fueron tomadas de las normas de construcción de la Ciudad de México. En este análisis se consideraron las cargas por viento como estáticas, solo considerándolas como presiones fijas. No obstante, sería más adecuado

considerarlas con cargas dinámicas, ya que el viento modula la forma de la estructura y esta, a su vez, modula la trayectoria del viento.

2.3 Metodologías de análisis por viento

Entre las cargas accidentales se encuentra el viento que se define como una corriente que se mueve casi horizontal cercana a la superficie terrestre, se debe a el cambio de presión y temperatura lo que genera que el aire caliente se dilate y se mueva y nuevo aire más denso llegue a ocupar su lugar, este movimiento puede ser rápido y fuerte que sea considerable la afección que tiene en las estructuras explicado por Frías & Moreno (1986).

El diseño eólico que considera las fuerzas mínimas sobre los tipos de estructuras tiene procedimientos en donde se toma en cuenta la respuesta estructural que tiene ante la acción lineal del viento. El diseño estructural comienza por definir las variables, como la dirección, los factores de carga y resistencia, la seguridad contra el volteo, la seguridad contra el deslizamiento, la seguridad contra el levantamiento, los estados límite de servicio, las presiones interiores, la seguridad durante la construcción, el efecto de grupo debido a construcciones vecinas, el análisis estructural y la interacción suelo-estructura.

Existen dos metodologías principales para realizar el análisis estructural por viento: el análisis computacional y el análisis mediante túnel de viento. Estas ofrecen enfoques distintos para evaluar la respuesta de una estructura a las cargas dinámicas generadas por el viento.

El análisis computacional tiene su base en el uso de simulaciones numéricas para modelar el flujo de viento y sus efectos sobre una estructura. Esta metodología utiliza técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés), que permiten resolver con precisión las ecuaciones que describen el movimiento del aire alrededor de la estructura.

El análisis en túnel de viento es una técnica de análisis de tipo experimental que consiste en la construcción de modelos a escala de la estructura que se coloca dentro de un túnel de viento, donde se simulan diferentes condiciones de viento. Este enfoque permite medir directamente las fuerzas aerodinámicas y observar visualmente el comportamiento del flujo de aire alrededor de la estructura.

Ambas metodologías se complementan entre sí. El análisis computacional es ideal para las primeras fases del diseño, proporcionando flexibilidad y rapidez, mientras que el túnel de viento es crucial para la validación final y la obtención de mediciones detalladas y precisas.

2.4 Metodología CFE

En el capítulo de Análisis por Viento del Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento de CFE se presentan los procedimientos necesarios para determinar las velocidades del viento en la República Mexicana y las fuerzas correspondientes para desarrollar el diseño eólico en diferentes tipos de estructuras.

De acuerdo al manual de la CFE, la clasificación de las estructuras pone a las estructuras desplegables como las de estudio en Tipo C por su grado de seguridad bajo y ser elementos temporales menor a 6 meses, la clasificación de las estructuras por la respuesta que genera el viento es tipo 4 por su geometría que puede tener problemas inestables aerodinámicos por los ángulos de incidencia del viento. Estas clasificaciones recomiendan realizar un análisis dinámico; se presenta el diagrama de proceso en la Figura 7.

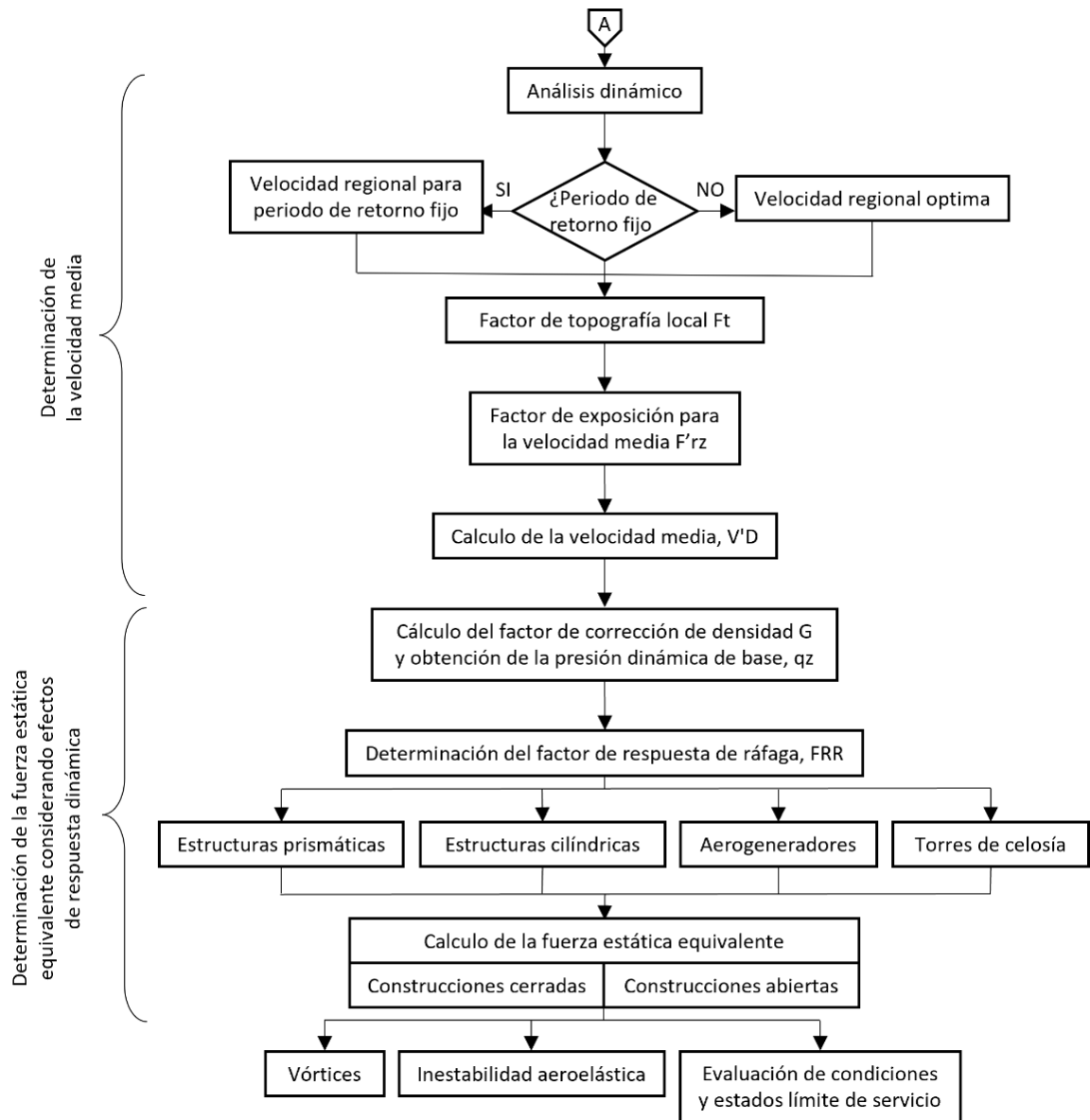


Figura 7. Diagrama de flujo para el análisis dinámico, modificado del manual de Comisión Federal De Electricidad, (2020)

2.4.1 Análisis Dinámico

En el análisis dinámico explicado por Arjona Catzim, (2020) se puede simplificar la estructura convirtiéndola en modelos matemáticos básicos. La estructura cambia su forma y su respuesta respecto al tiempo bajo los efectos del viento, por lo que las cargas cambian en su magnitud, posición y dirección de aplicación a lo largo del tiempo.

2.4.1.1 Determinación de la velocidad media

2.4.1.1.1 Velocidad regional para periodo de retorno fijo

Esta velocidad toma en cuenta la importancia y la localización de la estructura; se determina en km/h, relacionada con un periodo de retorno fijo T en años. En México están establecidos por el manual de CFE mapas de isotacas regionales con retorno de 10, 50 y 200 años.

2.4.1.1.2 Velocidad regional óptima

La velocidad V_R en km/h considera los costos tanto inicial de una obra como los costos que se generarían en caso de falla donde sean los mínimos y la localización geográfica.

Q es el parámetro del costo de pérdidas que se puede calcular con la ecuación (1):

$$Q = \frac{C_L}{C_I} \quad (1)$$

Donde:

C_L = los costos que provocaría una falla

C_I = costo de la construcción al inicio

2.4.1.1.3 Factor de topografía local F_T

Toma en consideración el efecto topográfico local del lugar donde estará ubicada la estructura desde laderas hasta colinas; se utilizará la Tabla 1.

Tabla 1. Factor de topografía local, modificado de (Comisión Federal De Electricidad, 2020)

Sitios	Ejemplos de topografía local	Ft
Protegidos	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno plano: pendientes menores a 5%	1.0
Expuestos	Montes, cerros, lomas, cimas, colinas, montañas. Terraplenes: Peñascos, acantilados, precipicios, diques, presas.	Ecuaciones (2), (3) y (4)

$$\text{Si } \frac{H_t}{zL_u} < 0.05 \quad \rightarrow \quad F_T = 1.00 \quad (2)$$

$$\text{Si } 0.005 \leq \frac{H_t}{zL_u} < 0.45 \quad \rightarrow \quad F_T = 1 \left[\frac{H_t}{3.5 (z_t + L_1)} \right] \left(1 - \frac{|X_t|}{L_2} \right) \quad (3)$$

$$\text{i } \frac{H_t}{zL_u} < 0.45 \quad \rightarrow \quad F_T = 1 + 0.71 \left(1 - \frac{|X_t|}{L_2} \right) \quad (4)$$

Donde:

H_t = altura del promontorio o terraplén,

L_u = distancia horizontal en barlovento desde $H_t/2$ a la cresta,

X_t = distancia horizontal en barlovento o sotavento de la estructura a la cresta,

L_1 = escala de variación vertical de F_t , entre $0.36L_u$ a $0.4H_t$, en metros

L_2 = escala de variación horizontal de F_t , $4L_1$ en barlovento, $10L_1$ en sotavento, en metros,

Z_t = altura de referencia del nivel promedio hasta la altura total de la estructura.

2.4.1.1.4 Factor de exposición para la velocidad media F'_{rz}

Se obtiene considerando la combinación de la rugosidad local y la variación de la velocidad según la altura. Es un factor sin dimensiones. Se calcula bajo las siguientes condiciones.

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \quad \text{si} \quad z \leq 10 \quad (5)$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha'} \quad \text{si} \quad 10 < z \leq 200 \quad (6)$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{\delta}{10}\right)^{\alpha'} \quad \text{si} \quad z \geq \delta \quad (7)$$

Donde:

\bar{b} = coeficiente de escala de rugosidad que se encuentra en la Tabla 2

α' = exponente de variación indicado en la Tabla 2

z = altura media en metros tomada a partir del nivel medio del terreno

δ = altura gradiente en metros de la Tabla 2

Tabla 2. Coeficientes de escala de rugosidad

Categoría del terreno	\bar{b}	α'	δ (m)
1	1.17	0.10	280
2	1.00	0.14	350
3	0.82	0.19	410
4	0.61	0.26	470

2.4.1.1.5 Cálculo de la velocidad media, V'_D

Velocidad en m/s en un tiempo de 10 minutos, con el cual se determina el factor de respuesta de ráfaga.

La siguiente ecuación describe el cálculo de la velocidad media.

$$V'_D = \frac{F_r * F'_{rz} * V_r}{3.6} \quad (8)$$

Donde:

F_r = factor de topografía sin dimensiones de toma de la Tabla 1

F'_{rz} = factor de exposición para la velocidad media

V_r = Velocidad regional de ráfaga en km/h encontrada en las isotacas

2.4.1.2 Determinación de la fuerza estática equivalente considerando efectos de respuesta dinámica

2.4.1.2.1 Cálculo del factor de corrección de densidad, G y obtención de la presión dinámica de base, q_z

La presión dinámica de base es la fuerza de presión en Pa ejercida perpendicularmente en una superficie a una altura z; se calcula con las siguientes ecuaciones.

$$q_z = 0.047 G V_D^2 \quad (9)$$

$$q_z = 0.0048 G V_D^2 \quad (\text{kg/m}^2) \quad (10)$$

Donde:

V_D = velocidad básica de diseño (km/h)

G = factor adimensional de corrección con respecto al nivel del mar conforme a la altura y la temperatura

$$G = \frac{0.392 \Omega}{273 + \tau} \quad (11)$$

Donde:

Ω = presión barométrica (mm de Hg) (Tabla 3)

τ = valor medio anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)

Tabla 3. Relación entre la presión barométrica y la altitud en metros sobre el nivel del mar

Altitud, hm (msnm)	Presión barométrica, Ω (mm de Hg)
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

2.4.1.2.2 Determinación del factor de respuesta de ráfaga, F_{RR}

2.4.1.2.2.1 Estructuras prismáticas

Las estructuras prismáticas se definen por su altura Z_s ; la respuesta de ráfaga máxima es influenciada principalmente por el modo fundamental de vibrar.

El factor de respuesta de ráfaga de las estructuras prismáticas se calcula con la siguiente fórmula.

$$F_{RR} = 1 + 2k_p I_v(z)_s \sqrt{B^2 + R^2} \quad (12)$$

Donde:

k_p = factor pico

$I_v(z)_s$ = índice de turbulencia (m)

B^2 = factor de respuesta de fondo

R^2 = factor de respuesta en resonancia

El factor de respuesta de fondo se obtiene mediante la ecuación (13).

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0.90 \left(\frac{b+h}{L(Z_s)} \right)^{0.63}} \quad (13)$$

Donde:

b = ancho promedio de la estructura prismática

h = altura de la estructura (m)

$L(Z_s)$ = longitud de la escala de turbulencia con referencia de Z_s (m)

Para la longitud de escala de turbulencia se toman las siguientes consideraciones:

$$(Z_s) = 300 \left(\frac{Z_s}{200} \right)^{\bar{a}} \rightarrow Z_s \geq Z_{min} \quad (14)$$

$$L(Z_s) = 300 \left(\frac{Z_{min}}{200} \right)^{\bar{a}} \rightarrow Z_s < Z_{min} \quad (15)$$

Donde:

Z_s = ancho promedio de la estructura prismática

\bar{a} = variación que presenta la longitud de la escala y la altura

Z_{min} = parámetro de la altura (m)

2.4.1.2.2.2 Estructuras cilíndricas

En este apartado se clasifican estructuras verticales y de sección transversal circular. Su factor de respuesta de ráfaga se calcula con la siguiente fórmula.

$$F_{RR} = 1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B_c^2 + R_c^2} \quad (16)$$

Donde:

k_p = factor pico

$I_v(z_s)$ = índice de turbulencia

z_s = altura de referencia (m)

B_c^2 = factor de respuesta de fondo

R_c^2 = factor de respuesta en resonancia

(1) Torres de celosía

Para torres de celosía el factor de ráfaga se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{RRT} = 1 + 2I_v(z_s)k_p\sqrt{B_w^2 + R_w^2}\left[\frac{C_{RG}}{C_G}\right]F_M \quad (17)$$

Donde:

$I_v(z_s)$ = índice de turbulencia

k_p = factor pico

B_w^2 = factor de respuesta de fondo para torres de celosia

R_w^2 = factor de resonancia para torres de celosia

C_{RG} y C_G = constantes correctivas de la forma modal

F_M = factor de corrección de la masa

2.4.1.2.3 Cálculo de fuerza estática equivalente (N)

2.4.1.2.3.1 Construcciones cerradas

$$F_{eq}(Z) = \left[\frac{p_e}{1 + 7I_v(Z)} F_{RR} - p_i \right] A_{exp} \quad (18)$$

Donde:

p_e = presión exterior (Pa)

p_i = presión interior (Pa)

F_{RR} = factor de respuesta de ráfaga

$I_v(Z)$ = índice de turbulencia

A_{exp} = área expuesta

2.4.1.2.3.2 Construcciones abiertas

$$F_{eq}(Z) = \frac{p_n}{1+7I_v(Z)} F_{RR} A_{exp} \quad (19)$$

Donde:

p_n = presión neta (Pa)

2.4.1.2.4 Vórtices

Las fuerzas que generan vibraciones generales y locales debidas al desprendimiento de vórtices, o fuerzas rápidas y giratorias se calculan:

$$F_w(Z) = (2\pi n_{1,y})^2 m(Z) \Phi_{1,y}(Z) Y_{F,max} \quad (20)$$

Donde:

$n_{1,y}$ = frecuencia fundamental del modo de vibrar en flexión

$m(Z)$ = masa de la estructura por unidad de longitud a una altura z (kg/m)

$\Phi_{1,y}(Z)$ = forma modal fundamental de la estructura

$Y_{F,max}$ = máximo desplazamiento transversal al flujo del viento (m)

2.4.1.2.5 Inestabilidad aeroelastica

Se considera inestabilidad cuando se presentan vórtices y problemas de turbulencia del viento, especialmente en estructuras tipo 4. Al desplazarse, cambia continuamente la dirección del viento, lo que genera movimientos divergentes u oscilatorios. Los atributos de estos movimientos son la resonancia con vórtices periódicos, la inestabilidad, el aleteo y el galopeo.

Galopeo son movimientos de amplitud que aumenta rápidamente con un solo grado de libertad, su velocidad puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$V_{CG} = n_{1,y} \frac{2bS_c}{a_G} \quad (21)$$

Donde:

$n_{1,y}$ = frecuencia fundamental del modo de vibrar en flexión

b = dimensión de la estructura

S_c = numero de Scruton

a_G = factor de inestabilidad por galopeo

2.4.1.2.6 Evaluación de condiciones y estados límite de servicio

Cuando las estructuras están sometidas a la acción del viento, deben ser evaluadas según los límites y las condiciones de servicio, lo que garantiza su funcionalidad y el adecuado funcionamiento en su uso.

El desplazamiento máximo que puede tener la estructura se calcula de la siguiente manera.

$$X_{max}(z) = \phi_{1,x}(z) \frac{\rho b C_o [V'_D(z_s)]^2}{2m_e (2\pi n_{1,x})^2} F_{RR} K_b \quad (22)$$

Donde:

$\phi_{1,x}(z)$ = forma modal del modo fundamental de vibrar

ρ = densidad del aire (1.225 kg/m^3)

b = dimensión de la estructura perpendicular al flujo de viento (m)

C_o = coeficiente de fuerza o de arrastre

$V'_D(z_s)$ = velocidad media de diseño (m/s)

F_{RR} = factor de respuesta de ráfaga

K_b = factor de corrección de la forma modal de vibración por la aceleración

m_e = masa equivalente de la estructura por unidad de longitud (kg/m)

$n_{1,x}$ = frecuencia fundamental del modo de vibrar en flexión de la estructura (Hz)

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 Hipótesis

Por medio de un análisis dinámico por viento es posible determinar las propiedades físicas y geométricas como material, tipos de conexiones y dimensiones de una estructura desplegable, amplia, ligera y transportable, que pueda ser utilizada como cubierta temporal cumpliendo con las condiciones de servicio y seguridad establecidas por las normativas.

3.2 Objetivo general

Diseñar una metodología para análisis por viento en una estructura desplegable que considere sus propiedades intrínsecas, de tal forma que esta cumpla con las condiciones de servicio y seguridad establecidas por la normativa.

3.3 Objetivos específicos

- Elegir una configuración de estructura desplegable que cumpla con las condiciones necesarias para utilizarse como refugio.
- Analizar la estructura propuesta con base en la normativa vigente.
- Desarrollar una metodología basada en herramientas computacionales, a partir de una metodología de análisis, que considere el comportamiento de los elementos, la geometría y las propiedades de la estructura desplegable.
- Comparar los resultados obtenidos a partir de la metodología propuesta y los de la normativa vigente.

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta una descripción detallada de la metodología, tomando como base cada uno de los objetivos específicos establecidos en el capítulo anterior.

En comparación con las investigaciones anteriormente presentadas en los antecedentes, como el refugio emergente por Guzmán (2021), el domo autoerigible diseñado y analizado por Jayson & Mathy (2013), y los estudios numéricos realizados por Chi (2007), el presente trabajo destaca la integración del estudio dinámico de los efectos del viento por medio de las simulaciones de fluidos (CFD) basándose en normativa mexicana (CFE y NTC), donde se especifican las condiciones del viento, para después analizar estructuralmente mediante el software RAM Elements. Este estudio, a diferencia de los anteriores que analizan la carga estática o se enfocan únicamente en el diseño geométrico, además, analiza el comportamiento de la estructura a diferentes ángulos de incidencia del viento y su geometría compleja tipo domo desplegable, lo cual es un nuevo punto de vista de avance metodológico frente a otros enfoques.

Una vez seleccionado el modelo de una estructura desplegable, se analizó tomando como base la reglamentación vigente en México, así como las normativas internacionales que contemplan estas estructuras, y posteriormente se propuso una metodología de análisis ex profeso. Las variables independientes son la geometría desplegable, la velocidad del viento, la forma de la estructura, los efectos de sitio, los anclajes, las conexiones, así como el estado de cargas al que estará sometida. Las variables de respuesta se definen por las velocidades críticas del viento y sus respectivas frecuencias de vibración.

4.1 Elección de la configuración del modelo retráctil

4.1.1 Evaluación de las necesidades de un refugio

Se consideró que el servicio de Protección Civil se encarga de la protección, el salvamento y la asistencia en casos de impacto de un desastre, destinados a personas y, a veces, a bienes materiales y al medio ambiente. El salvamento ofrece búsqueda y rescate, además de la instalación de puestos de socorro y el almacenamiento.

Con base en los lineamientos establecidos se evaluaron las necesidades de un refugio en el manual operativo de Atención a la Población en Riesgo o Condición de Emergencia “APCE”, bajo las condiciones especificadas por la secretaría de Protección Civil para cubrir los usos necesarios, tales como, dormitorios, bodegas, comedores, servicios médicos y la normatividad estructural, que son principalmente las deflexiones y desplazamientos laterales.

4.1.2 Propuesta de alternativas de una estructura viable

Con base en las necesidades identificadas, se presentaron varias alternativas de diseños de estructuras desplegables que pudieran satisfacer los requisitos establecidos. Además, en estas alternativas se consideraron factores como funcionalidad, resistencia, eficiencia y viabilidad técnica, con el objetivo de ofrecer soluciones óptimas y adaptables a las condiciones específicas del proyecto.

Asimismo, se analizó la capacidad de cada uno para cumplir con las expectativas de su propósito final.

4.1.2.1 Geometrías propuestas

A continuación, se describen brevemente las geometrías consideradas, denominadas en la literatura como “refugio ligero” (Jayson & Mathy, 2013), “refugio emergente” (Guzmán, 2021) y “copa esférica desplegable” (Negar Kalantar & Alireza Borhani). Estas geometrías se eligieron con base en las características de

facilidad de transporte, peso ligero, armado fácil, tamaño máximo extendido y rigidez (Tabla 4).

- Refugio ligero

Estructura desarrollada por Jayson & Mathy, (2013) formada por una lona colocada sobre un conjunto de elementos barra elásticos unidos en un nodo central y en sus extremos por un cable de tensión. Al tensar este cable, mediante el pandeo se logra una estructura en forma de cúpula, lo que permite una erección rápida. Los puntos fijos se encuentran en el suelo, por lo que no se considera que sea lo suficientemente rígida.

- Refugio emergente

Configuración diseñada por Guzmán (2021), que consta de arcos circulares con enlaces de tijera colocados de forma lineal, desarrollando una forma cilíndrica. Está diseñada con tubos, conexiones de tuercas y rondanas de acero galvanizado, y su apertura requiere el uso de grúas e intervención humana. En su forma plegada no es completamente compacta.

- Copa esférica desplegable

Domo propuesto por Kalantar & Borhani, (2014), que se compone de 10 arcos estructurados con elementos en tijera, cada uno conformado por ocho módulos de dos barras rectas unidas por una articulación pivotante. Estos arcos se disponen en dos conjuntos de cinco, paralelos entre sí e interconectados, formando una cuadrícula.

Esta configuración en cuadrícula mejora la estabilidad y permite que, con un número reducido de piezas, se alcance una gran amplitud en su estado extendido, mientras que en su estado plegado es altamente compacta.

4.1.2.2 Características a evaluar

- Facilidad de transporte

Es la capacidad de mover un objeto de un lugar a otro de manera eficiente, segura y con el menor esfuerzo posible. Debido a que se busca que estas estructuras funcionen como refugio, es necesaria la facilidad de transporte para trasladarlas a los lugares donde se ocupen.

- Peso ligero

Se refiere a la relación entre el peso y el volumen de los materiales de la estructura y el área que estos llegan a cubrir. En lugares de difícil acceso, estas deberán poder ser cargadas por helicópteros de ser necesario.

- Armado fácil

Define la capacidad de ensamblar una estructura de manera rápida, intuitiva y con el mínimo esfuerzo, con pocas o ninguna herramienta ni conocimiento técnico especializado. El diseño debe permitir su uso eficiente en el menor tiempo posible para comenzar las maniobras de emergencia.

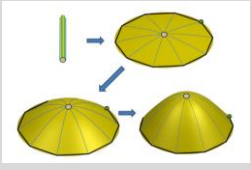
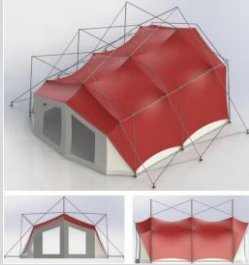

- Tamaño máximo extendido

Se refiere a las dimensiones totales que la estructura puede alcanzar cuando está completamente desplegada. Las configuraciones geométricas permiten una cierta longitud en la que no comprometen su resistencia y/o desempeño mecánico.

- Rigidez

Es la capacidad de la estructura para resistir las deformaciones a consecuencia de la aplicación de fuerzas externas, manteniendo su forma y funcionalidad. La función que tendrá será de refugio, por lo que su rendimiento debe asegurarse sin interrupciones.

Tabla 4. Tabla comparativa de evaluación de características a las geometrías propuestas

Geometrías Propuestas			
	Refugio ligero (Jayson & Mathy, 2013)	Refugio emergente (Guzmán, 2021)	Copa esférica desplegable (Kalantar & Borhani, 2014)
Características			
Facilidad de transporte	✓	✗	✓
Peso ligero	✓	✓	✓
Armado fácil	✓	✓	✓
Tamaño máximo extendido	✗	✗	✓
Rigidez	✗	✓	✓

De acuerdo con las características definidas, se evaluaron y se compararon las geometrías ilustradas en la Tabla 4, optando por seleccionar la diseñada por Kalantar & Borhani, (2014), ya que es la que cumple satisfactoriamente con las necesidades solicitadas para funcionar como refugio emergente.

4.1.3 Selección de la geometría y construcción del modelo

Se identificó un modelo retráctil para su estudio, el cual cumple con las condiciones de funcionalidad necesarias. La estructura debe ser plegable, además

de ligera, para que pueda ser transportada en helicóptero a los lugares más alejados.

A partir del modelo desarrollado por la doctora en Arquitectura Negar Kalantar, profesora de la Universidad de Artes en California, se obtuvieron las medidas para una maqueta que fue escalada para cubrir 10 metros de ancho y 10 metros de largo.

4.1.4 Anclajes para estabilidad

Para garantizar la estabilidad estructural del mecanismo desplegable, es necesario incluir un sistema de anclaje adecuado que asegure que la estructura permanezca fija al terreno. Esta necesidad surge debido a que las fuerzas externas como el viento pueden provocar que la estructura se eleve o vuelque, afectando la seguridad de los usuarios y objetos dentro de los refugios.

Al ser una estructura móvil, los anclajes cumplen dos funciones principales: mantener a la estructura rígida y estable en su despliegue total y, de esta manera, distribuir adecuadamente las cargas entre los elementos y el suelo.

El tipo de anclaje a utilizar debe ser práctico, sencillo y rápido de instalar, adaptándose a las características del terreno donde sea necesario, para mantener la eficiencia y la versatilidad del conjunto, que debe poder montarse y desmontarse con frecuencia en distintas localizaciones.

4.2 Análisis de la estructura propuesta

4.2.1 Evaluación de criterios para análisis por viento.

Se clasificó por el tipo de estructura e importancia para la sociedad, dependiendo de las afectaciones que tendría hacia otras estructuras y su función específica para las que fue diseñada y nivel de seguridad, su respuesta ante las acciones del viento, el terreno donde se encuentra, topografía, etc. según los criterios para diseño por viento solicitados en el manual de CFE. Los cuales calculan

factores de exposición y topografía para obtener las velocidades y las presiones del viento.

En función de su clasificación, se llevó a cabo un análisis dinámico conforme a la normativa vigente de la CFE, a las Normas Técnicas Complementarias (NTC) y a normas internacionales.

4.2.2 Ubicación y clasificación por condiciones externas.

La ubicación de la estructura, al querer hacerla generalizada para las zonas, especialmente del Pacífico, que son las más afectadas por desastres naturales, al estar cercanas a la costa y al cinturón de fuego, es vulnerable.

La zona se eligió por sus características geográficas, que comparte con el resto de los lugares cercanos, y podría considerarse promedio.

La clasificación de la estructura en función de las condiciones externas a las que estará expuesta es fundamental para determinar su comportamiento estructural y su durabilidad. Los factores más importantes dependen de la ubicación donde se colocará la estructura para obtener la velocidad y dirección del viento y la categoría y topografía del terreno.

Otra clasificación es conforme a la respuesta de la estructura ante las acciones del viento. Dependiendo de su comportamiento, se define el tipo de estudio necesario que requiere la estructura.

4.2.3 Análisis dinámico

Para este análisis se utiliza el diagrama con la metodología sugerida en el manual de Diseño por Viento de la CFE, con las operaciones de indicadas para obtener diversos factores definidos por las condiciones de la estructura y condiciones externas, con las que se pudo determinar la velocidad básica del viento y presión de base, factores fundamentales en la evaluación de cargas sobre la estructura.

Con los datos obtenidos en el análisis anterior, se procedió a realizar el cálculo estructural mediante el software RAM Elements. En el modelo computacional en el que se aplicaron las presiones de viento, permitiendo evaluar la respuesta de los elementos estructurales.

Los resultados de esfuerzos y deformaciones permitieron definir las dimensiones y las especificaciones de los elementos que garantizaran el cumplimiento de los requisitos normativos.

4.3 Desarrollo en una herramienta computacional

Durante esta etapa se desarrolló un modelo de análisis basado en principios de mecánica de fluidos computacional (CFD) y métodos numéricos que permitieron simular la interacción entre el flujo de aire y la estructura.

Los casos de estudio contemplan ángulos posibles de incidencia del viento, los cuales son dirigidos a una cara de la estructura, en dirección perpendicular al viento con 0° de giro, 15° , 30° y 45° .

4.3.1 Propuesta de una metodología de análisis de viento

Durante esta etapa se utilizó el programa Workbench, que crea una simulación de sistemas de fluidos mediante el modelado y métodos numéricos, resolviendo modelos matemáticos discretizados y sujetos a condiciones de contorno definidas.

El proceso que lleva a cabo consta de lo siguiente:

- Geometría: En esta etapa se definió la geometría de la estructura desplegable en su forma abierta, se colocó la superficie externa en diferentes posiciones y se la puso a prueba dentro de un túnel de viento, también definido alrededor de la geometría.

- **Mallado:** Durante esta etapa se definieron las condiciones iniciales de frontera como lo son entrada, salida, paredes y figura. Se genera el mallado y, de ser necesario, se refina en puntos de interés.
- **Fluent:** Se configuran los valores de velocidad del fluido en este caso, viento, los modelos con los que el programa estará resolviendo.
- **Results:** Se analizan los resultados de interés que son las presiones con las que se obtienen las gráficas en los puntos de interés.

4.4 Validación de los resultados obtenidos

Para la evaluación de los resultados se analizaron 4 casos en los cuales la estructura era afectada en diferentes direcciones los cuales son:

- **Viento perpendicular (0°):** En este caso, el flujo de viento impacta directamente en una de las caras del domo, lo que genera una presión directa.
- **Viento a 15° :** Este viento se dirigió a 15 grados respecto a la perpendicular del caso anterior para poder observar el cambio de cargas y cómo estas reaccionarían.
- **Viento a 30° :** En este caso, el viento cambió con un ángulo mayor que el perpendicular, lo que nos distribuyó las cargas de presión y succión de manera diferente.
- **Viento a 45° :** Se analizó el impacto del viento con un ángulo de 45° respecto a la perpendicular, que impactó directamente en la esquina del domo, lo que generó un cambio de esfuerzos en los elementos, tanto en presión como en succión.

Los escenarios fueron simulados en ANSYS Workbench, utilizando herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) con las que, a partir de la velocidad del viento calculada, se obtuvieron las presiones, a partir de las cuales en el Programa RAM se determinaron los esfuerzos y reacciones de la estructura y se pudieron diseñar las secciones.

Durante esta etapa, se realizó un examen detallado de los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta y se compararon con los resultados derivados de la normativa vigente, con el objetivo de comprobar y validar el diseño estructural expuesto en el proyecto.

4.4.1 Comparación de los resultados

Los resultados obtenidos en este estudio fueron comparados a partir de dos enfoques principales: por un lado, los derivados de la aplicación de la normativa vigente, específicamente las Normas Técnicas Complementarias (NTC) y el Manual de Diseño de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), y por otro, los resultados generados con base en la nueva metodología propuesta en el presente proyecto.

4.4.2 Documentación de planos del sistema constructivo

Se elaboraron los planos detallados de las estructuras, en los que se especifican con precisión las dimensiones de cada pieza que la compone, así como las uniones entre ellas. Estos planos proporcionan una representación gráfica clara de cómo deben ensamblarse los distintos componentes, garantizando que las dimensiones y la configuración se ajusten a los requisitos de diseño establecidos.

Además, se incluyeron cortes transversales y longitudinales de las estructuras, con los que se puede visualizar con mayor claridad cómo interactúan las diferentes partes de la estructura; también se incluyeron los planos de planta para mostrar la distribución de las estructuras desde una vista superior, permitiendo observar la imagen general de los elementos estructurales.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la metodología planteada en el capítulo 4.

5.1 Configuración del modelo retráctil

5.1.1 Necesidades de un Refugio

De acuerdo con lo indicado en el manual Operativo de Atención a la Población en Riesgo o en Condición de Emergencia (APCE), los refugios deben contar con ciertos servicios específicos para garantizar la seguridad, el bienestar y la recuperación de la población afectada por desastres naturales.

Las áreas fundamentales para las cuales debe ser diseñado un refugio son las siguientes:

- Área de alimentación: Espacio destinado a la preparación, distribución y consumo de alimentos, así como al almacenamiento de víveres, que debe contar con las medidas de higiene necesarias para evitar la contaminación y las enfermedades.
- Área de dormitorios: Zona destinada al descanso y al alojamiento temporal de la población refugiada, que proporciona un mínimo de confort y privacidad.
- Área de aseo: Zona destinada a la higiene personal, donde se procurará el acceso a duchas y lavabos.
- Área de sanitarios: Instalaciones con acceso a sanitarios.
- Área de recreación y educación: Espacio destinado a albergar actividades recreativas y educativas, especialmente para niños y jóvenes, a fin de mitigar el impacto de la situación de emergencia.

- Área de atención médica: Punto de asistencia donde el personal capacitado pueda atender emergencias médicas o problemas médicos, contando con insumos básicos y medicamentos.
- Área de asistencia psicológica: Espacio para brindar apoyo psicológico y emocional a la población afectada, contribuyendo a su proceso de recuperación y adaptación.

Estas áreas tienen el objetivo de proporcionar un entorno seguro y funcional que permita lograr la recuperación de la normalidad de la población afectada, no solo ofrecer un resguardo temporal.

En adición, los refugios deben contar con una infraestructura flexible y adaptable a distintos escenarios de emergencia, garantizando una respuesta eficiente y coordinada.

5.1.2 Geometría y construcción del modelo

La geometría seleccionada evaluada según las características de una estructura eficiente y funcional para un refugio de acuerdo a las áreas mencionadas en la sección anterior.

Se identificó un modelo retráctil para su estudio, el cual cumple con las condiciones de funcionalidad necesarias. El objetivo final de la estructura fue poder utilizarse como refugio; la idea principal es que pueda ser fácilmente transportada a lugares de difícil acceso en emergencias, como se representa en la Figura 8. El plegado compacto de la estructura podría permitir que, mediante helicópteros que podrían ser transportados, se mantenga cerrada por cinchas alrededor de la estructura.

Una vez en el lugar, el sistema de despliegue podría activarse manual o automáticamente, lo que permitiría su instalación rápida y segura.

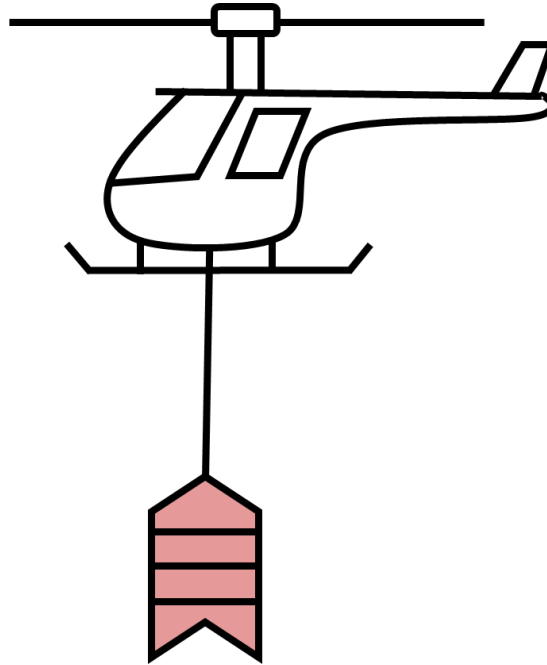


Figura 8. Esquema de transporte con helicóptero de domo plegado

A partir del modelo desarrollado por la doctora en arquitectura Negar Kalantar, profesora de la Universidad de Artes en California, se obtuvieron las medidas para una maqueta que fue escalada para cubrir 10 metros de ancho y 10 metros de largo.

5.1.2.1 Desarrollo de la estructura desplegable

Para desarrollar el modelo se tomó de referencia una fotografía de la maqueta hecha por Kalantar & Borhani (2014), la cual sirvió como base para el diseño del concepto, con la que se hicieron pruebas a menor escala con placas de cartón y luego de madera, por la facilidad que ofrecían para su manipulación.

Con las pruebas se permitió analizar las propiedades geométricas necesarias para cumplir con la característica de plegarse por completo, ya que es el objetivo principal del modelo. Algunos análisis visuales comenzaron por observar que la estructura estaba compuesta por arcos iguales, cuyos nodos superiores e inferiores formaban parte de dos elipses idénticas pero desfasadas verticalmente; además, en los puntos de conexión coincidían verticalmente. Esta configuración evidenciaba

un patrón simétrico, el cual garantiza el correcto plegado y desplegado de la estructura.

Después de varios ajustes y juegos geométricos, se hicieron prototipos de madera más rígidos que simulaban mejor las condiciones reales, lo que podía demostrar una mayor estabilidad durante su plegado y desplegado, como los de la Figura 9.

Esta experimentación permitió el entendimiento de la funcionalidad de las estructuras desplegables, facilitando la formulación geométrica de dos arcos en elipse que se complementa con los modelos descritos por Guzmán, (2022).

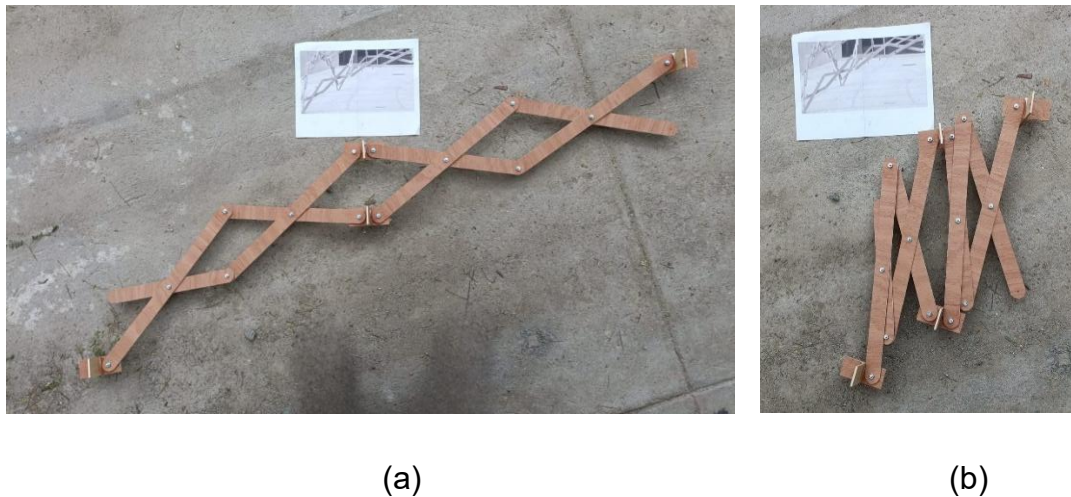


Figura 9. (a) Prototipo de arco desplegable en madera, (b) Prototipo plegado. Elaboración propia

La figura está formada por 10 arcos iguales, interconectados en sus nodos. Cinco de estos arcos están ordenados de forma paralela en una dirección, mientras que los otros cinco se disponen de manera perpendicular, formando una cuadrícula como en la Figura 10. Esta configuración permite estabilizar su comportamiento y facilita los movimientos de plegado mostrados en la secuencia de la Figura 11.

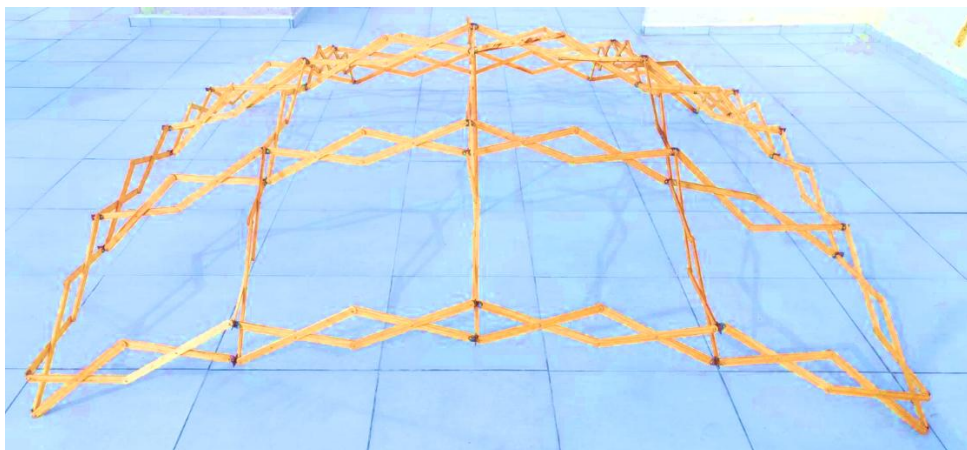


Figura 10. Prototipo de domo en madera a escala. Elaboración propia

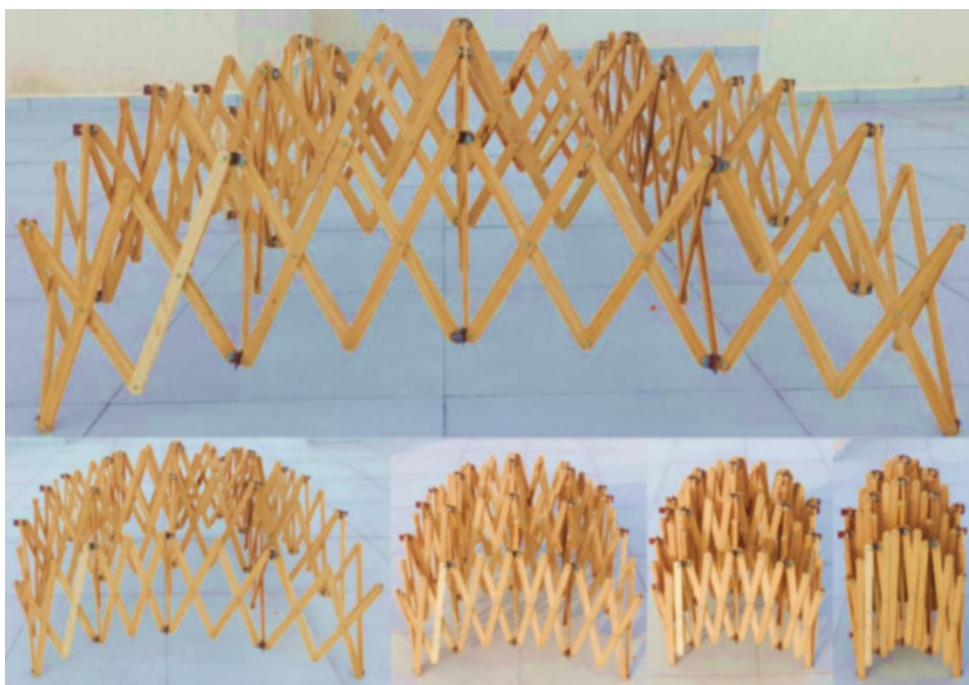


Figura 11. Secuencia de plegado del prototipo de domo en madera a escala. Elaboración propia

Cada arco de la estructura final tiene una longitud horizontal de 10 metros y en su punto más alto una medida vertical de 3,75 metros. Sus coordenadas se encuentran indicadas en la Tabla 5 e ilustradas en la Figura 12.

Tabla 5. Coordenadas de arco desplegable

	x	y	z
1	0	0	0
2	0	0.4029	0
3	0.5213	1.4934	0
4	0.4747	1.854	0
5	1.8148	2.5519	0
6	1.8148	2.9548	0
7	3.3138	3.1439	0
8	3.3044	3.5855	0
9	5	3.3471	0
10	5	3.75	0
11	6.6863	3.1439	0
12	6.6957	3.5855	0
13	8.1853	2.5519	0
14	8.1853	2.9548	0
15	9.4787	1.4934	0
16	9.5253	1.854	0
17	10	0	0
18	10	0.4029	0

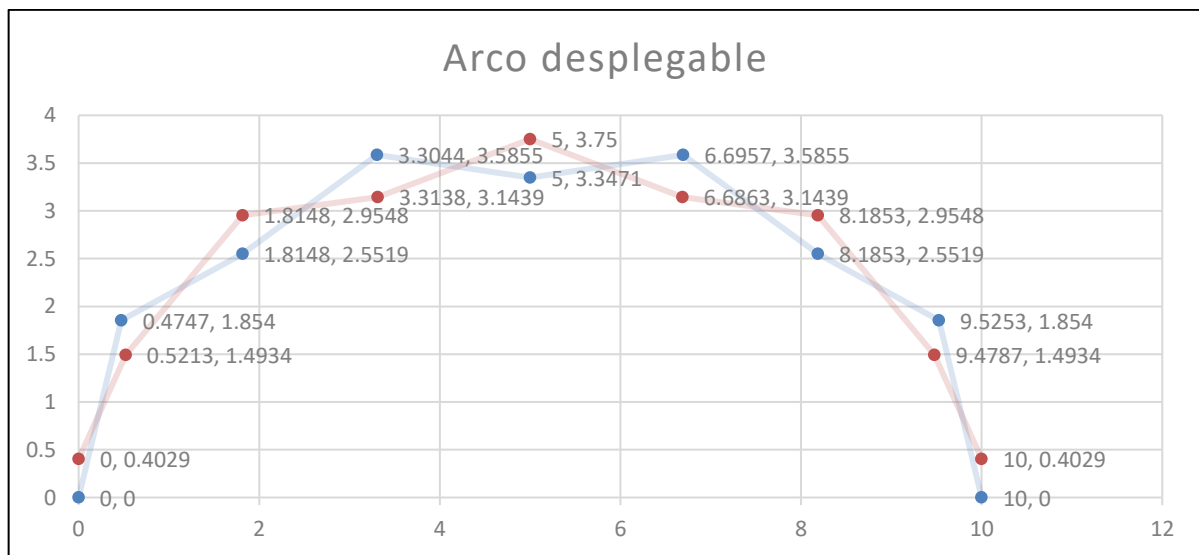


Figura 12. Gráfica de un arco desplegable con sus coordenadas

5.1.3 Anclajes para estabilidad

En su investigación J. Llorens (2006) sobre cimientos ligeros para estructuras con membranas, donde describe características para el diseño y selección de las anclas que existen, Entre los aspectos más relevantes especifica los tipos de materiales del cual están hechos, como puede ser el acero, madera, arena, agua; el proceso que puede ser prefabricado y transportado o directamente hecho en sitio para adaptarse mejor a las condiciones del lugar; el método de instalación que sería hincada, perforada o taladrada y puede depender del tipo de suelo; la geometría que describe la forma ancho y profundidad; capacidad de carga; y por último la eficiencia entre la resistencia y su peso.

El investigador muestra 2 tipos principales de sistemas de anclaje: los anclajes superficiales, que se apoyan directamente en el terreno, como estacas, ganchos, sacos de arena, tuberías y tanques, y los cuales son más fáciles de instalar y remover. Por otro lado, también existen los anclajes enterrados en el suelo que utilizan como parte de su función principalmente la fricción, como lo son troncos, tubos, rejillas, placas de forma circular, cuadrada y rectangular, placas expansibles y tornillos helicoidales.

Este tipo de cimentación es especialmente adecuado para las estructuras temporales, principalmente porque deben mantenerse ligeras y recuperables, ya que es parte del principio de las estructuras temporales. Unos anclajes sólidos irían en contra de las características esenciales de las estructuras desplegables.

En esta estructura, cuyo principal objetivo es ser refugio temporal para emergencias, se recomiendan los anclajes de tornillo, como el de la Figura 13, que cumplan con la practicidad buscada para su fácil transporte, sean ligeros y aseguren la seguridad, además de ser fáciles de instalar sin mayor esfuerzo.

Los anclajes de tornillo se hincan en el suelo de manera vertical o inclinada como se muestra en la Figura 14 para mejor sujeción, se gira sobre su eje para poder hincarse en el suelo, de manera que funciona como una zapata invertida empujando

el material hacia arriba impidiendo su levantamiento, entre más profundo la influencia de la superficie desaparece, la resistencia del suelo determina la cantidad de material a aplicar.

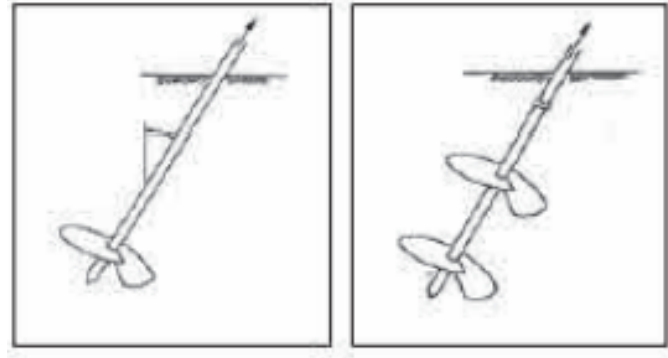


Figura 13. Anclajes de tornillo (screw-anchors) J. Llorens (2006)



Figura 14. Instalación de anclajes de tornillo en el “TR 2003. Octavo Taller Internacional sobre Diseño y Realización Práctica de Estructuras Arquitectónicas de Membrana. Universidad Técnica de Berlín”. J. Llorens (2006)

5.2 Análisis de la estructura propuesta

Siguiendo los criterios establecidos por CFE, se obtuvieron los factores de velocidad y de presión necesarios para el análisis estructural. Con los que se calculó la estructura, como indica el MDOC.

5.2.1 Criterios de evaluación para análisis por viento

De acuerdo al manual de la CFE, la clasificación de las estructuras pone a las estructuras desplegables como las de estudio en Tipo C por su grado de seguridad bajo y ser elementos temporales menor a 6 meses, la clasificación de las

estructuras por la respuesta que genera el viento es tipo 4 por su geometría que puede tener problemas inestables aerodinámicos por los ángulos de incidencia del viento. Estas clasificaciones recomiendan realizar un análisis dinámico; en el manual se proporciona el diagrama de proceso, que se muestra en la Figura 7.

5.2.1.1 Clasificación de la construcción según su importancia.

El nivel de seguridad necesario de la estructura de acuerdo a su importancia, ya que es ligera y temporal, se clasifica en el Grupo C, además, no se pone en riesgo otras instalaciones de los grupos A y B.

5.2.1.2 Clasificación de la construcción según su respuesta ante la acción del viento.

El comportamiento de la estructura ante los efectos principales del viento, se considera inestable por los elementos y conexiones con los que está formada, por lo que su clasificación sería **Tipo 4**.

Con estas clasificaciones se determina que debe calcularse mediante análisis dinámico, ya que no es lo suficientemente rígida como para aplicar el análisis estático, que solo es aplicable a estructuras Tipo 1.

5.2.2 Ubicación y clasificación por condiciones externas.

La ubicación seleccionada para cumplir con la homogeneidad en las zonas más vulnerables de México fue Uruapan, Michoacán.

Esta ciudad se encuentra en el centro-occidente del estado, en la Meseta Purépecha, sobre el Eje Neovolcánico que forma parte de la Sierra Madre Occidental. Cuenta con un clima templado húmedo y subhúmedo, con lluvias en verano y una temperatura media que oscila entre 16,8 y 21,7 °C. Su ubicación cercana a la costa, además de estar localizada sobre las placas tectónicas de Norteamérica, Rivera, Cocos y Pacífico, la hace susceptible a los desastres naturales, al igual que las zonas de México cercanas al Pacífico.

5.2.2.1 Clasificación por categoría del terreno según su rugosidad.

El tipo de terreno más común con el que se podría generalizar las zonas de interés que es donde se encuentra la población que podría necesitar en un futuro ayuda sería un terreno cercano a áreas urbanas y/o suburbanas con casas y viviendas cercana a bosques lo que nos indica diversas obstrucciones estrechamente espaciadas con alturas no mayores de 10 m, por lo que la clasificación del terreno sería **Categoría 3**.

5.2.2.2 Factor de topografía

Este factor adimensional se refiere al efecto topográfico local de donde estará la estructura. La zona presenta una condición normal: un terreno prácticamente plano, sin cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5%, por lo que se tendrá un factor de topografía.

$$F_T = 1.0.$$

5.2.2.3 Velocidad Regional

La velocidad regional se determina considerando las clasificaciones de la importancia de la estructura y su localización geográfica.

Su periodo de retorno, debido a que es considerada una estructura del Grupo C, es de 10 años, como se muestra en el mapa de Isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años (Figura 15).

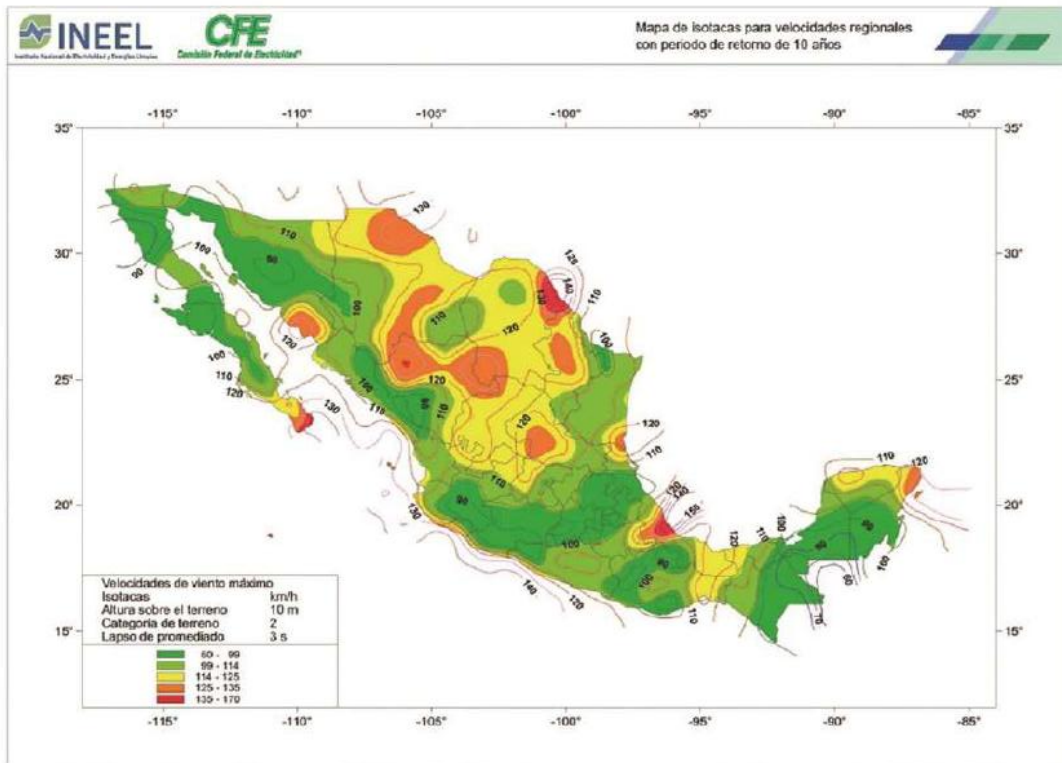


Figura 15. Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años del manual de la (Comisión Federal De Electricidad, 2020)

Encontrada en el Apéndice del manual de CFE de diseño por viento, se encuentra la Tabla C.1 donde están las ciudades más importantes del país con sus datos de velocidades regionales para periodos de retorno fijo T , velocidades regionales óptimas Q , altitud y temperaturas mínimas diarias. Se obtiene la Tabla 6.

Tabla 6. Datos de ubicación, velocidad regional con periodo de retorno, altitud y temperatura mínima

Ciudad	Uruapan, Michoacán
Longitud	-102.07
Latitud	19.405
Periodo de retorno T	10 años
Velocidad regional (km/hr)	95.24
Altitud (msnm)	1617
Temperatura mínima diaria (°C)	4.7

5.2.3 Análisis dinámico

El análisis dinámico según las clasificaciones anteriores es el sugerido, debido a que la estructura es sensible a los efectos dinámicos producidos por el viento, y consiste en calcular las cargas estáticas equivalentes por el viento.

La metodología se presenta en la Figura 7, mencionada anteriormente en los antecedentes.

Continuando los cálculos a partir de las clasificaciones realizadas con anterioridad.

1. Factor de exposición

El factor de exposición local, Fr_z , adimensional, describe la variación de la velocidad del viento con la altura en función de la categoría del terreno.

La altura es menor a 10 metros, por lo que el Factor de exposición indicado en la **Tabla 2** es igual al coeficiente de escala de rugosidad, por lo que obtenemos:

$$F_{rz} = 0.83$$

2. Velocidad básica de diseño

Esta velocidad es la que se tomó para programar el túnel de viento en ANSYS. Se obtiene con los factores anteriores.

$$V_D = V_R * F_{rz} * F_T$$

$$V_D = 95.24 * 0.832 * 1.00$$

$$V_D = 79.24 \text{ km/hr} \rightarrow 22.19 \text{ m/s}$$

3. Presión dinámica de base

Obtenida a partir de los datos de ubicación como presión y temperatura.

$$G = \frac{0.392 * \Omega}{273 + T_{min}^{\circ}}$$

$$G = \frac{0.392 * 626.81}{273.15 + 4.7}$$

$$G = 0.8843$$

$$q_z = 0.047 * G * V_D^2$$

$$q_z = 0.047 * 0.8843 * 79.24^2$$

$$q_z = 260.97 \text{ Pa} \rightarrow 26.63 \text{ kg/m}^2$$

5.2.3.1 Análisis CFE

Por medio del programa RAM Elements, se analizó la geometría antes descrita, con sus coordenadas y las cargas de presión exteriores, tanto de barlovento como de sotavento, en el primer caso, en el que el viento tiene una dirección perpendicular a una de las caras de la geometría.

Presiones exteriores

$$P_e = C_{pe} * K_a * K_l * K_{ra} * q_z$$

K_a = Área tributaria en metros cuadrados menor de 100 = 1.0

K_l = Estructura principal = 1.0

K_{ra} = Estructuras cerradas = 1.0 $P_e = C_{pe} * q_z$

- Barlovento

$$P_e = C_{pe} * q_z = 0.8 * 26.63$$

$$P_e = 21.307 \text{ kg/m}^2$$

- Sotavento

$$P_e = C_{pe} * q_z = 0.5 * 26.63$$

$$P_e = -13.317 \text{ kg/m}^2$$

En las imágenes a continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el software RAM. La gráfica de la relación de esfuerzos por elemento se muestra en la figura 16, mientras que la figura 17 ilustra el domo con las secciones que corresponden a dicha relación de esfuerzos.

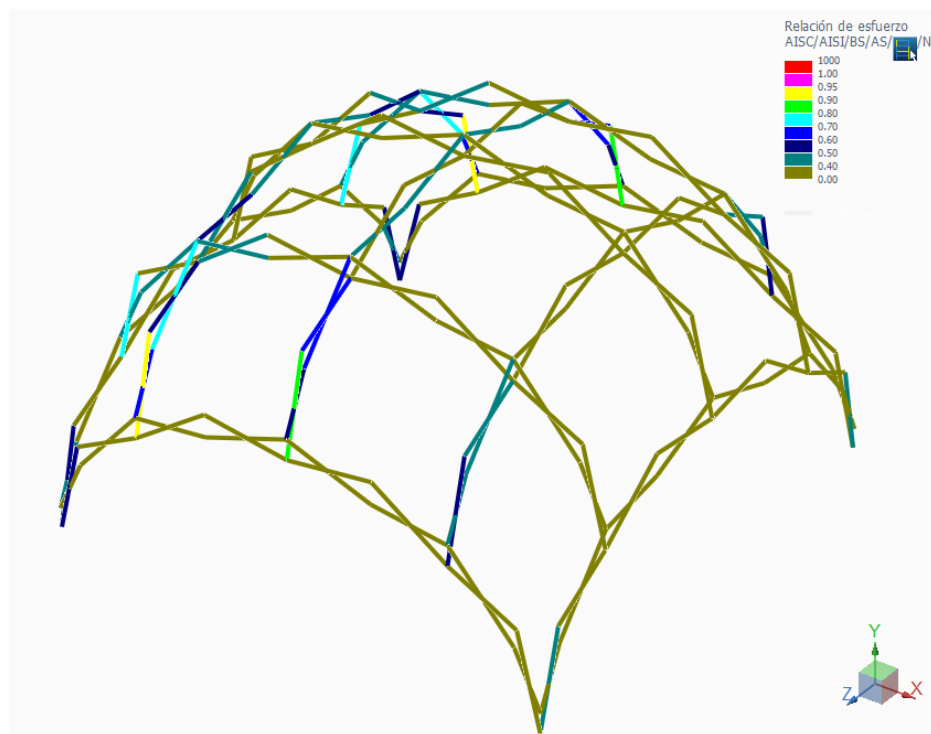


Figura 16. Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular 0°

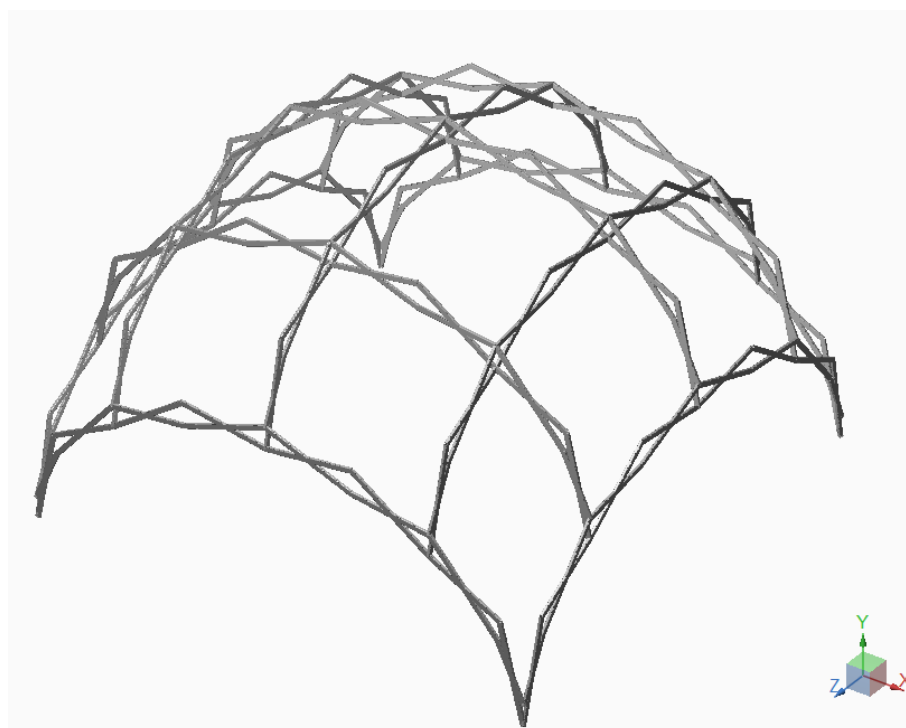


Figura 17. Modelo con secciones HSS_RECT 4 x 2 x 1/4

5.3 Herramienta Computacional

La herramienta utilizada para calcular las presiones fue Workbench de ANSYS, por medio de métodos numéricos de CFD y los parámetros de viento dirigidos a un domo de membrana con estructura principal desplegable con base en elementos en tijera. A continuación, se utilizó el programa RAM Elements, en el que se modelaron los elementos conforme a sus esfuerzos.

En seguida, se describe la metodología que se siguió para este análisis desde el modelado geométrico hasta el análisis de resultados.

5.3.1 Metodología de Análisis de viento

La siguiente metodología integra los análisis de CFE con el análisis de dinámica de fluidos (CFD) mediante ANSYS, con el objetivo de obtener un análisis más completo y preciso del comportamiento del domo.

- Modelado Geométrico

Mediante el programa SketchUp se elaboró la geometría del domo. En un modelo tridimensional, lo más cercano posible a la estructura real. Como se muestra en la Figura 18.

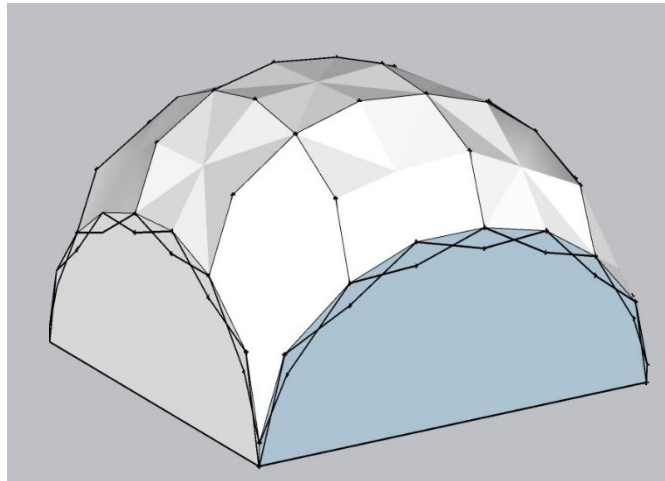


Figura 18. Geometría del domo en SketchUp

El modelo fue importado de SpaceClaim, donde se verificaron y repararon errores en la geometría debido a su irregularidad, para que las superficies fueran continuas y no existieran aristas o caras faltantes.

Se generó un enclosure alrededor del sólido, estableciendo un dominio de simulación con dimensiones determinadas de 155 m x 85 m x 45 m para garantizar un desarrollo del flujo de viento adecuado, como se representa en la Figura 19. Estas medidas cumplen con los requerimientos mínimos mencionados por Franke et al. (2004) donde se especifica que para edificios individuales la entrada, las paredes laterales y superiores deben estar a $5H$ de la estructura a evaluar, donde H es la altura del edificio, cumpliendo con la tasa de bloqueo inferior al 3%, por otro lado, la pared de salida debe ubicarse a una distancia de $15H$ mínimo por detrás de la estructura. Estas medidas permiten el desarrollo adecuado del flujo para obtener mejores resultados.

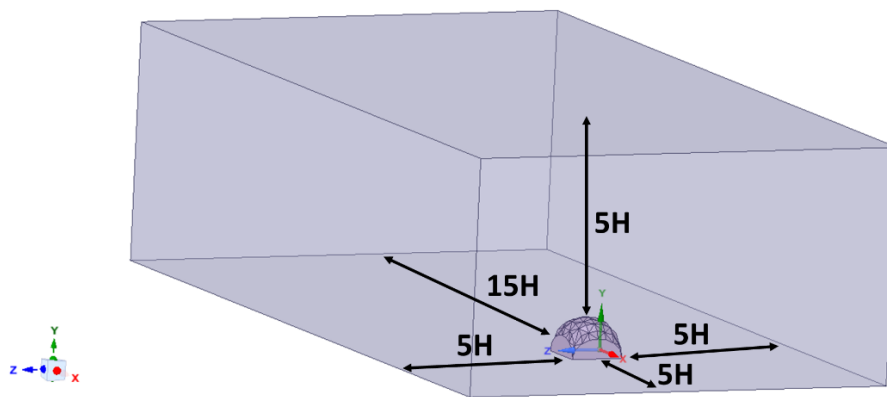


Figura 19. Domo y enclosure en SpaceClaim

- Generación de mallado

En el módulo Mesh se definió la discretización del dominio; primero se nombraron las secciones para identificarlas como entrada, salida, paredes y el cuerpo sólido.

La forma de mallado se aplicó con refinamiento progresivo, utilizando el comando de sizing en todo el dominio para garantizar una malla uniforme, como se muestra en la Figura 20 y la Figura 21. En las paredes del domo se utilizó un refinamiento para conocer con mayor precisión los efectos del viento sobre el sólido.

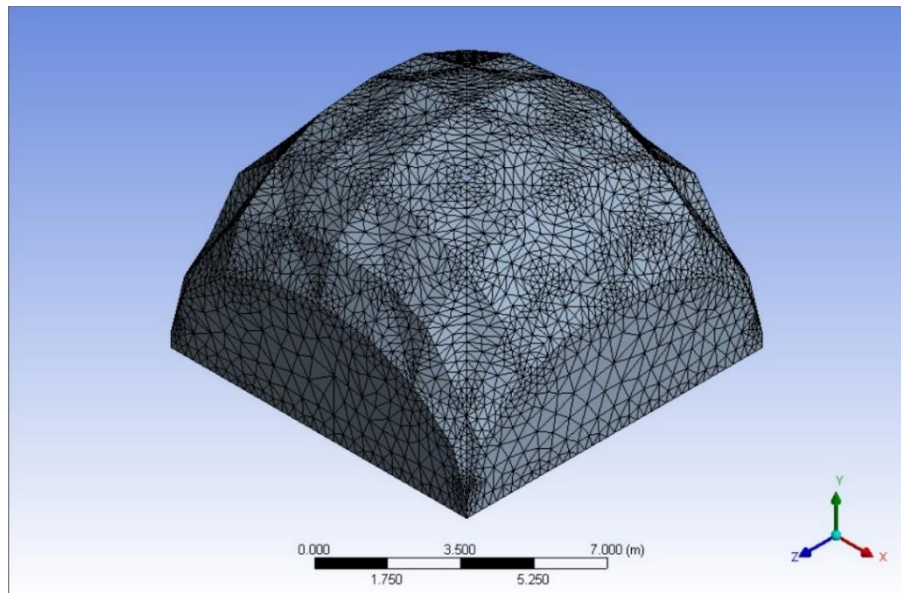


Figura 20. Características del mallado en Domo

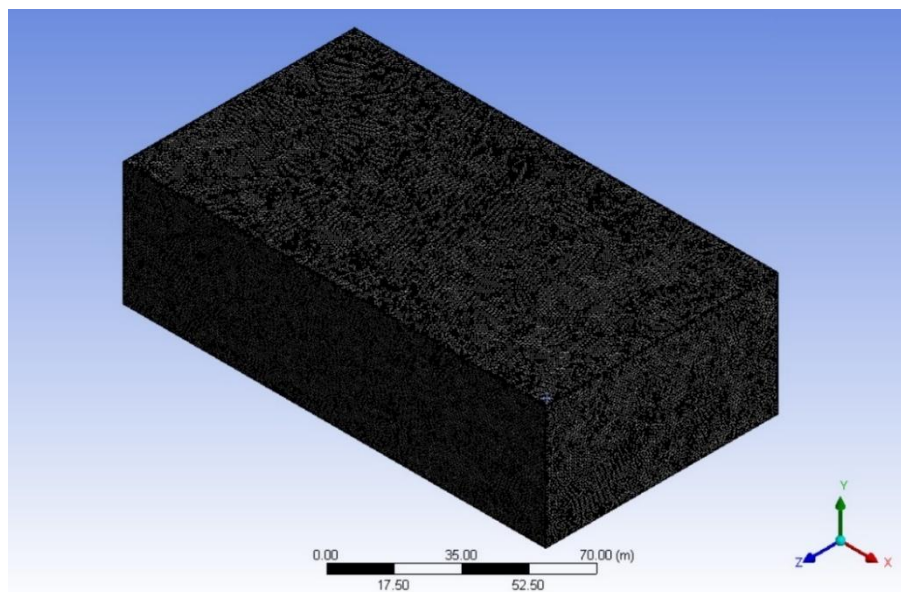


Figura 21. Características de mallado en Enclosure

- Simulación en Fluent

El modelo mallado se importó a Fluent para asignar las condiciones de frontera en la entrada y salida del túnel de viento virtual. Posteriormente se definió un modelo de turbulencia k-epsilon comúnmente utilizado en problemas de aerodinámica, garantizando una estabilidad numérica, (Fernández Oro, 2012), con el que se llevaron a cabo las iteraciones del volumen discretizado hasta alcanzar convergencia.

- Análisis de resultados en Results

En este módulo se visualizaron los resultados de la simulación mediante contornos de presión y velocidad; además, se generaron planos y polilíneas auxiliares para leer y extraer datos, de modo que pudieran visualizarse en gráficas.

Este procedimiento se repitió para 4 casos en los que se determinaron 4 direcciones en las que el viento impactaba al domo, en estos se giró el enclosure, lo que permitía que el domo pudiera coincidir con los ejes y que los planos y polilíneas auxiliares pudieran seguir generando las gráficas para comparar los resultados.

5.4 Validación de Resultados

Los resultados que se muestran en las siguientes imágenes (Figura 22, Figura 23, Figura 24 y Figura 25) corresponden a las simulaciones realizadas sobre el modelo de domo de membrana con estructura desplegable bajo distintas condiciones de flujo de viento.

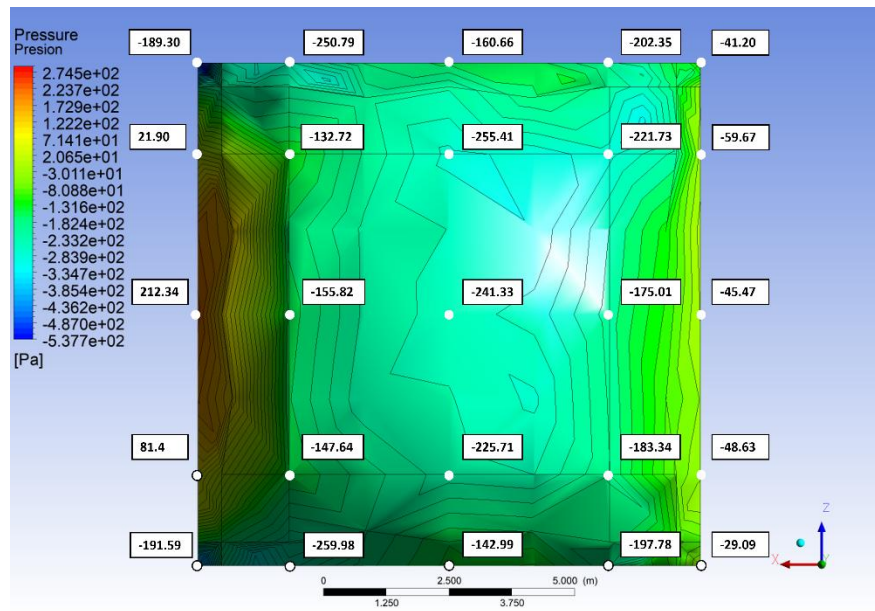


Figura 22. Presiones en Domo con viento perpendicular (0°)

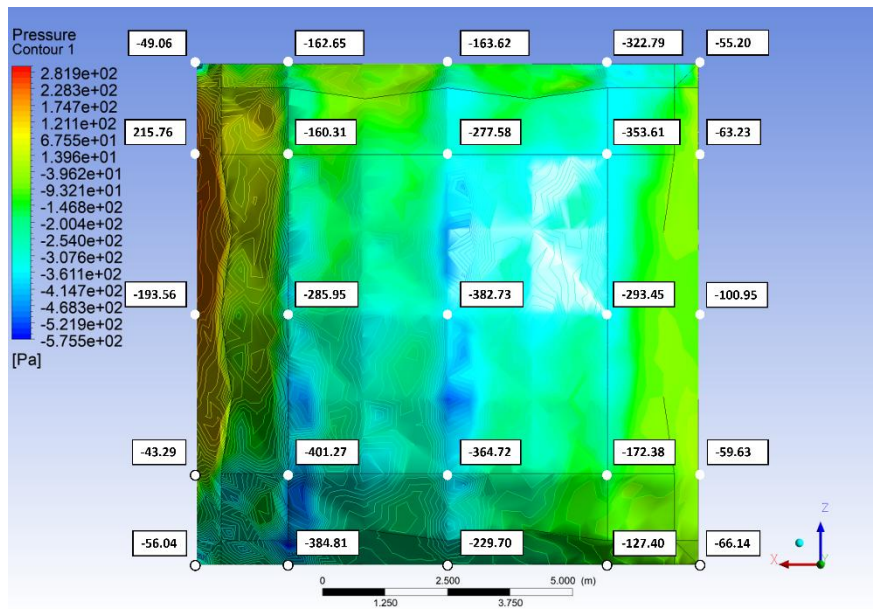


Figura 23. Presiones en Domo con viento a 15°

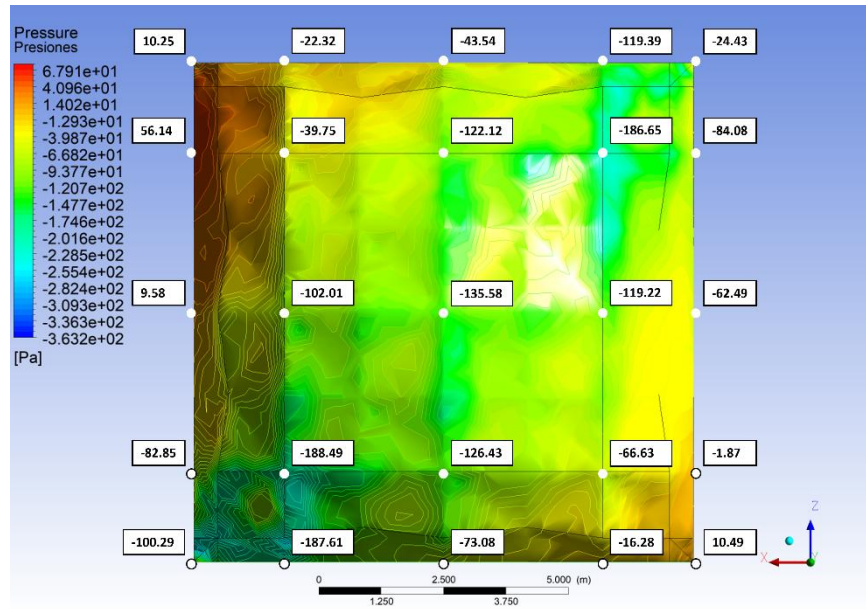


Figura 24. Presiones en Domo con viento a 30°

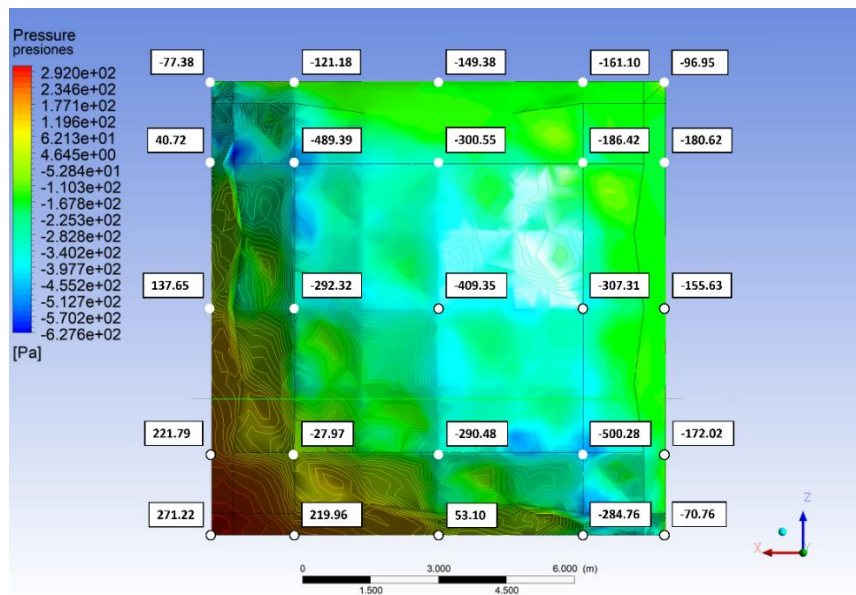


Figura 25. Presiones en Domo con viento a 45°

Las consideraciones tomadas para el modelado estructural mediante el programa RAM Elements se centraron especialmente en las condiciones de apoyo y en las propiedades de conexión entre los elementos. Los apoyos se colocaron articulados, ya que están físicamente asegurados al terreno mediante estacas que

permiten la transmisión de momentos, pero no los desplazamientos en sus grados de libertad. Por otra parte, según el comportamiento cinemático que las uniones adquieren durante el proceso de plegado y desplegado, a sus elementos se les dio libertad de rótula en el eje local 3, como se muestra en la Figura 26, lo que permite ese giro sin restringir los desplazamientos para el correcto funcionamiento del mecanismo desplegable.

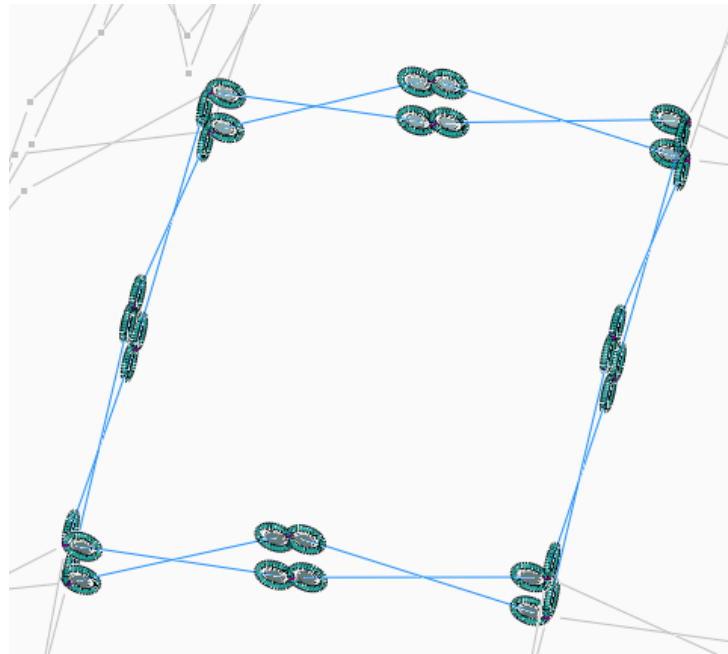


Figura 26. Articulaciones en la estructura

Los resultados obtenidos del análisis de cargas de viento calculadas previamente mediante la simulación CFD se ingresaron como cargas puntuales en los nodos principales en el software RAM Elements para realizar el diseño estructural de los elementos que conforman el domo desplegable.

En el Apéndice se incluyen los diagramas correspondientes a cada caso de estudio, de esfuerzos axiales, cortantes 2 y 3, torsiones y momentos 2 y 3, en los que se puede observar que las principales fuerzas que afectan a la estructura desplegable son fuerzas axiales, lo que concuerda con la configuración de uniones que se le ha dado. Por esto, se propusieron secciones y se evaluaron en función de la relación de esfuerzos.

En las siguientes imágenes (Figura 27 a la Figura 34) se muestran las representaciones de los domos, la relación de esfuerzos de cada elemento y la sección correspondiente.

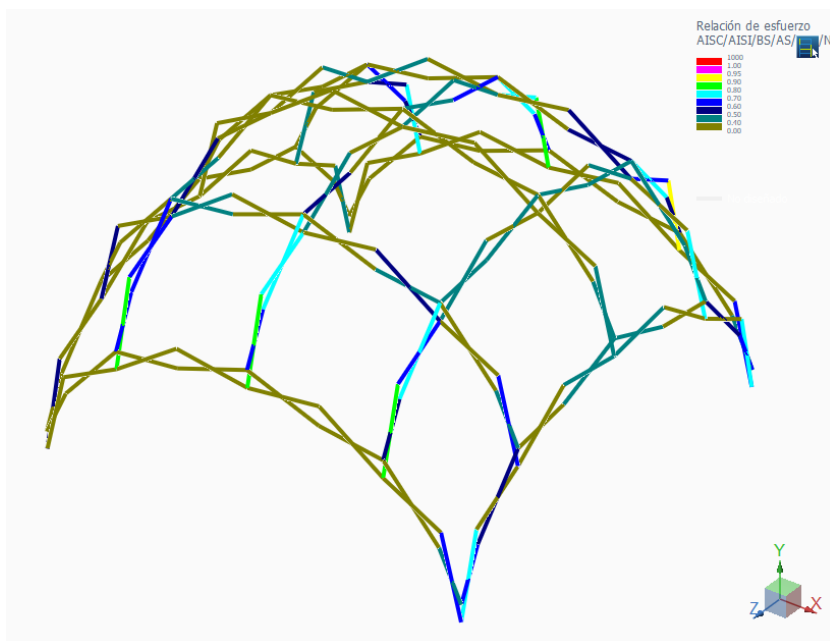


Figura 27. Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular
0°

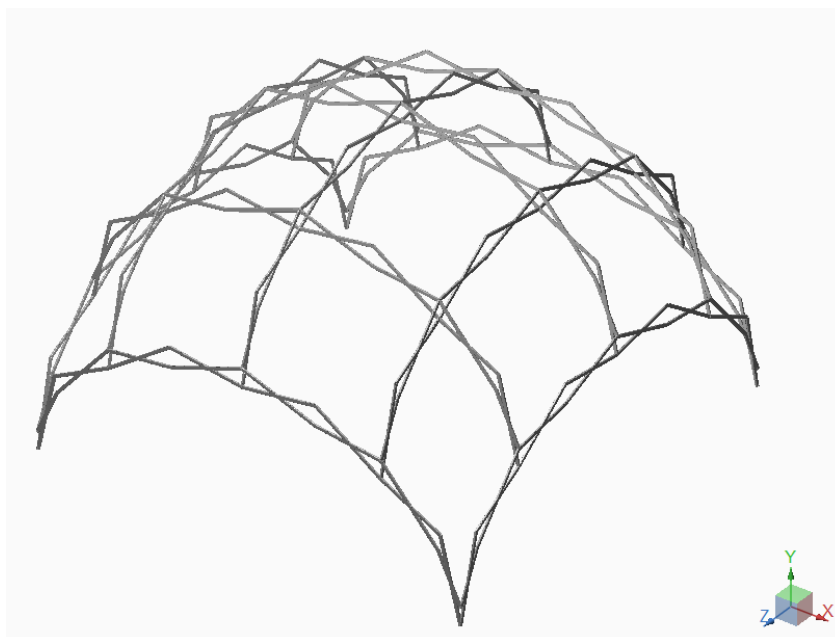


Figura 28. Modelo con secciones HSS_RECT 3 x 1 ½ x 1/8

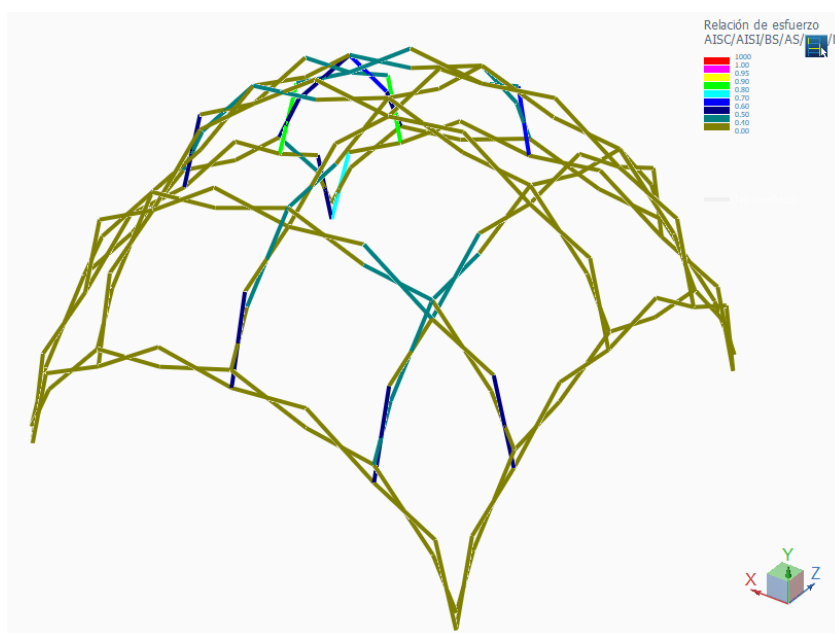


Figura 29. Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular 15°

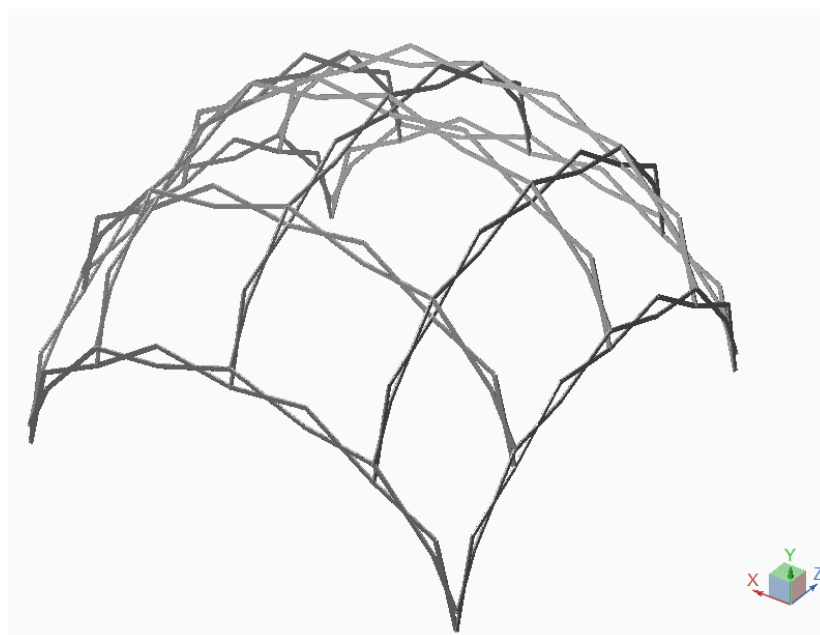


Figura 30. Modelo con secciones HSS_RECT 4 x 1 ½ x 3/16

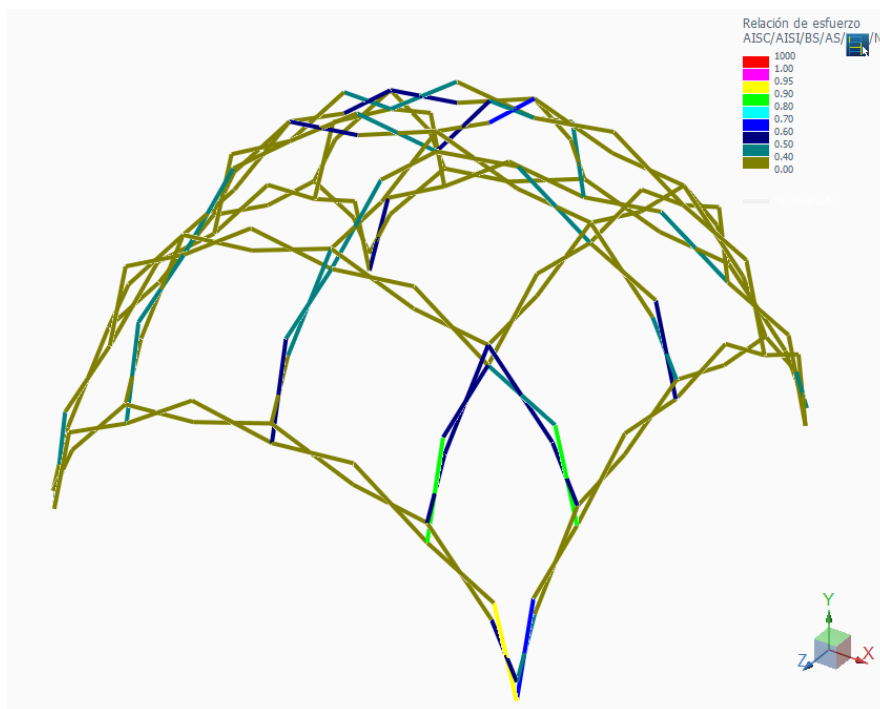


Figura 31. Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular 30°

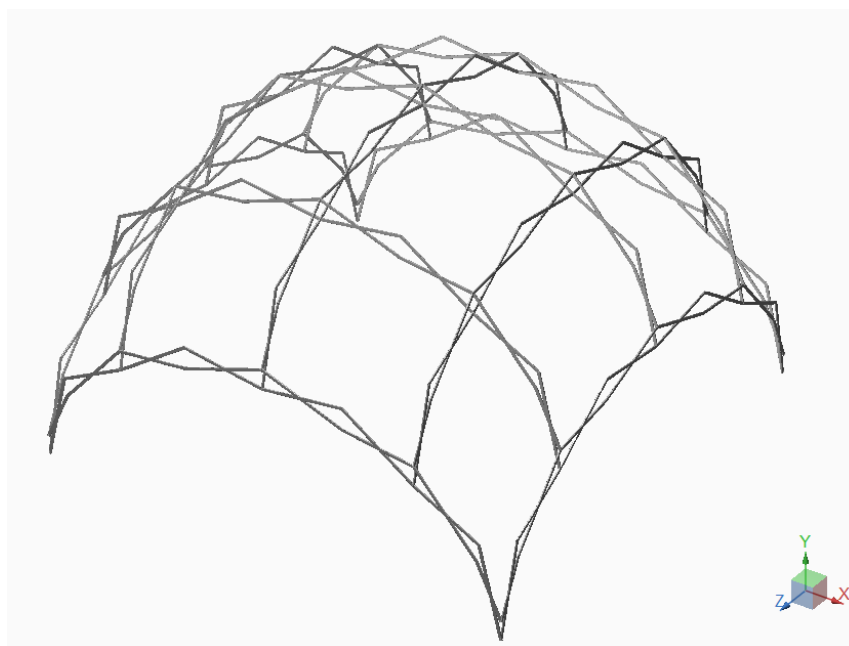
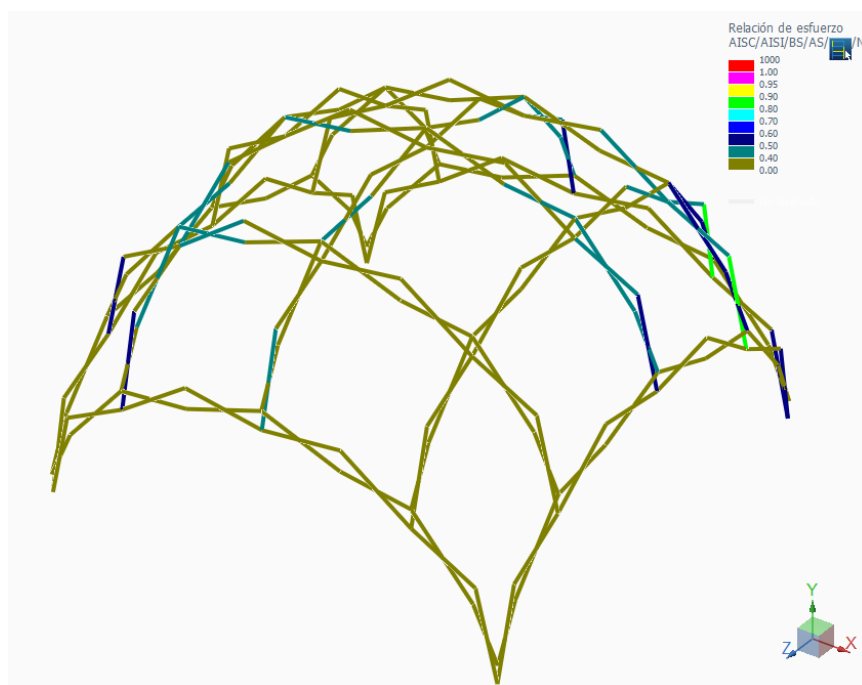


Figura 32. Modelo con secciones HSS_RECT 2 ½ x 1 x 1/8



**Figura 33. Relación de esfuerzos de modelo retráctil con viento en dirección perpendicular
45°**

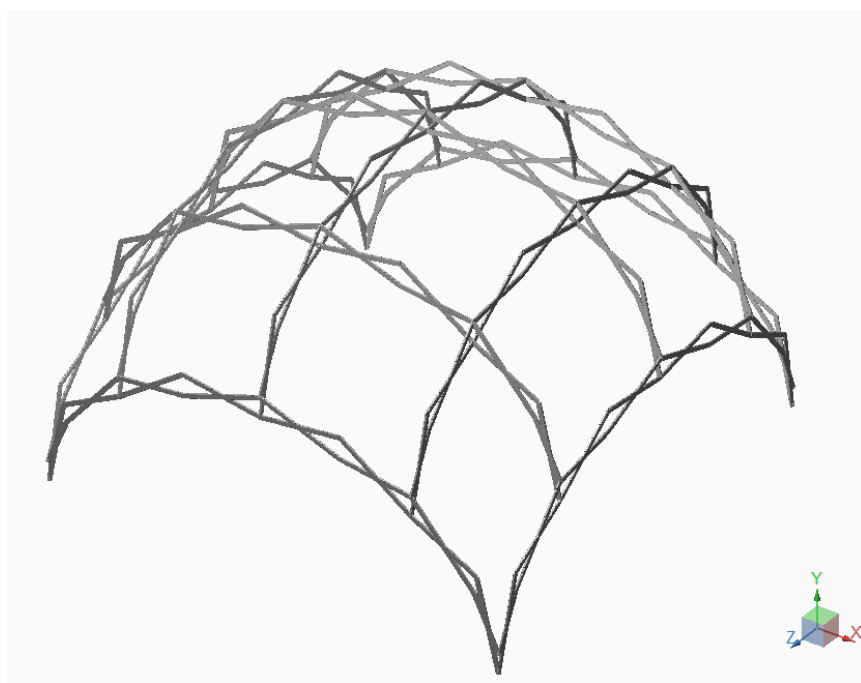


Figura 34. Modelo con secciones HSS_RECT 4 x 1 ½ x 1/4

Las secciones estructurales resultantes, obtenidas mediante el análisis bajo fuerzas de viento en diferentes direcciones, se muestran en la Tabla 7. Las secciones fueron seleccionadas según la relación de esfuerzos de cada elemento. Se determinaron las dimensiones de perfil HSS convenientes para cada caso que representaban diferentes direcciones del viento, y las dimensiones que representarían el cálculo por la normativa de CFE.

La densidad del material seleccionado es de 7850 kg/m^3 , correspondiente a un acero A36 utilizado comúnmente por la industria de la construcción, con secciones HSS Rectangular como la de la Figura 35.

Se tomó en cuenta que, por facilidad de construcción, se uniformarían las secciones, por lo que, al medir las piezas, se obtuvieron 268,26 metros lineales de perfil necesarios para la construcción de la armadura total.

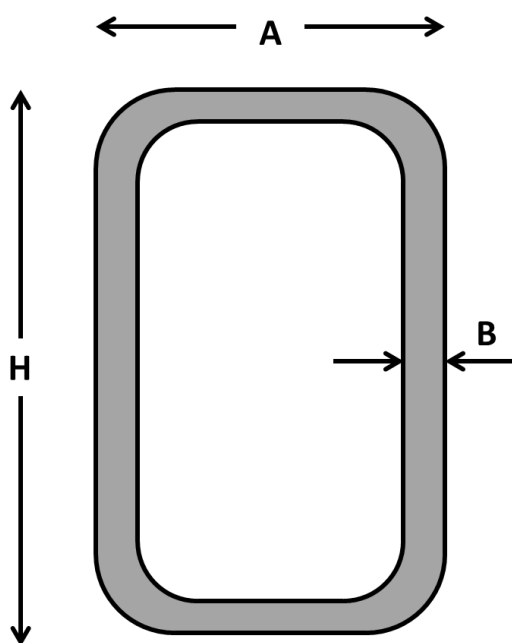


Figura 35. Sección HSS Rectangular

Tabla 7. Secciones estructurales seleccionadas según la dirección del viento aplicada en el domo

	H (in)	A (in)	B (in)	H (cm)	A (cm)	B (cm)	AREA (in2)	AREA (cm2)	kg/m	PESO TOTAL kg	PESO TOTAL Ton
DOMO 0	3	1.5	3/16	7.62	3.81	0.47625	1.55	9.98	0.08	21.02	0.0210
	3.5	1.5	1/8	8.89	3.81	20/63	1.19	7.66	0.06	16.13	0.0161
DOMO 15	3	1.5	1/4	7.62	3.81	0.635	2.00	12.90	0.10	27.17	0.0272
	3.5	1.5	1/4	8.89	3.81	0.635	2.25	14.52	0.11	30.57	0.0306
	4	1.5	3/16	10.16	3.81	10/21	1.92	12.40	0.10	26.11	0.0261
DOMO 30	2	1	3/16	5.08	2.54	0.47625	0.98	6.35	0.05	13.37	0.0134
	2.5	1	1/8	6.35	2.54	20/63	0.81	5.24	0.04	11.04	0.0110
DOMO 45	3.5	2	3/16	8.89	5.08	0.47625	1.92	12.40	0.10	26.11	0.0261
	4	1.5	1/4	10.16	3.81	40/63	2.50	16.13	0.13	33.97	0.0340
DOMO 0 CFE	4	2	1/4	10.16	5.08	0.635	2.75	17.74	0.14	37.36	0.0374

En la Tabla 7 se puede ver las medidas tanto en pulgadas como en centímetro de las secciones estructurales seleccionadas, el área transversal de cada sección, y finalmente el resultado de lo que sería el peso total de la estructura en kg y su equivalencia en toneladas, lo que permite tener una visión general de los casos críticos y la comparación de secciones que podrían formar la estructura.

Un aspecto importante al seleccionar las secciones como la mostrada en la Figura 35 es que deben ser esbeltas, lo que significa que, en lo posible, H sea mucho mayor que A; las secciones deben parecer más a barras que a perfiles cuadrados, ya que, por la configuración de la estructura, en su forma plegada, sea lo menos voluminosa posible. Con esta información se pueden analizar aspectos como la factibilidad de montaje y transporte.

La medida de perfil que, por medio de la metodología, cumple con los casos de estudio sobre los efectos del viento en diferentes direcciones es el perfil HSS rectangular de $4 \times 1 \frac{1}{2} \times \frac{1}{4}$, como puede verse en la Figura 34; sería la apariencia de la estructura final.

5.4.1 Comparación de resultados

Como se puede observar en la **Tabla 7** el domo analizado por CFD más afectado fue el domo que recibió el viento a 45 grados, atacando directamente en la esquina, donde se requiere un perfil de HSS $4 \times 1 \frac{1}{2} \times \frac{1}{4}$, el cual no es muy diferente al perfil solicitado por los criterios de cálculo de CFE que fue HSS $4 \times 2 \times \frac{1}{4}$.

Los casos fueron calculados en el software RAM Elements, que utiliza para el diseño la normativa AISC 22 LRFD, referida al manual de 2022, para diseño de estructuras de acero mediante el método de factores de carga y resistencia, con cargas aumentadas y resistencias reducidas.

Se calculo por el factor de relación de esfuerzos que es un método de verificación en el cual la capacidad de resistencia permisible del elemento es menor al esfuerzo actuante, esto es porque la estructura solo es para uso de cubierta, por lo que es más importante que las secciones resistan a los esfuerzos, que a las deformaciones que puedan presentarse.

Si bien no se logra una reducción muy grande, el análisis por CFD ayuda a describir mejor el comportamiento real de cada elemento y sus efectos individuales, por lo que, al optimizar seleccionando diferentes perfiles, se puede lograr una mayor precisión en las zonas que lo requieren. Como ya se mencionó, cuanto más esbeltos sean los perfiles, más compacta será la configuración plegada del domo.

5.4.2 Aspectos constructivos

Los detalles constructivos para los arcos incluyen la longitud de los elementos, la cual varía ligeramente, ya que los nodos son conexiones de cruz aleatorias, como se muestra en la Figura 36.

Varias opciones de nodos para estructuras desplegadas son mencionadas por Escrig (1984), donde también se destaca que los nodos son los componentes fundamentales del funcionamiento eficaz del conjunto, ya que permiten interconectar los arcos sin interrumpir los movimientos de cada elemento, lo que posibilita el plegado y desplegado de la estructura.

Para este proyecto se seleccionó este tipo de nodos, mostrados en la Figura 36, ya que eran los más adecuados para el comportamiento cinemático y la fuerte conexión que generan, lo que permite su reutilización en múltiples montajes sin comprometer su integridad. Además, estos nodos permiten sustituirlos o cambiarlos fácilmente, sin necesidad de desmontar toda la estructura, como se muestra en la Figura 37.



Figura 36. Conexiones de cruz aleatorias. Elaboración propia



Figura 37. Conexiones de cruz aleatorias en los elementos. Elaboración propia

Como se mencionó en el análisis geométrico, se observó que el acomodo de los nodos formaba un arco en forma de elipse, como se muestra en la Figura 38 y la Figura 39. Al añadir conexiones de cruz al diseño, es necesario modificar ligeramente la longitud de las barras para mantener la geometría funcional.

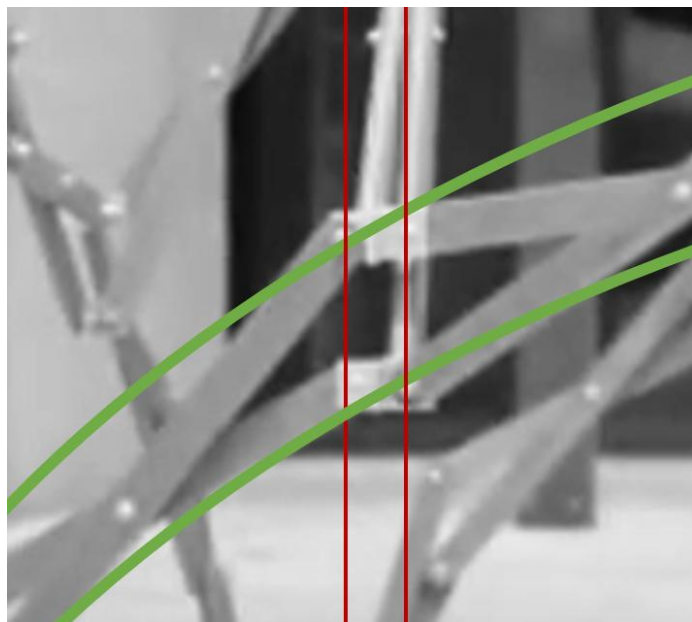


Figura 38. Nodo coincidiendo con las líneas de la elipse con conexión en cruz

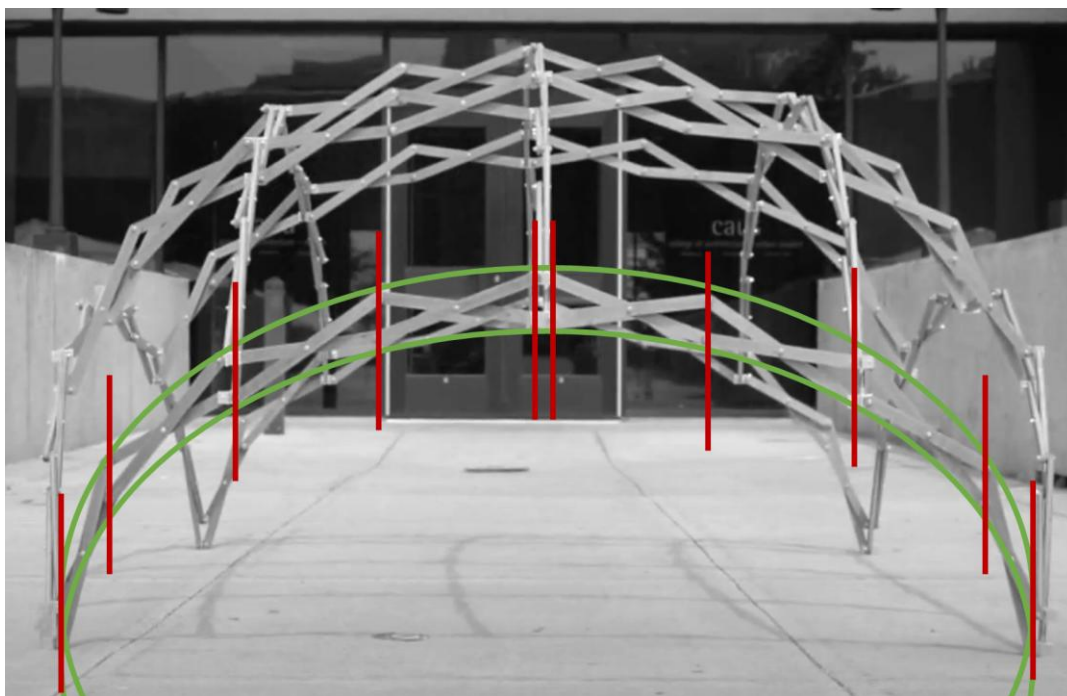


Figura 39. Copa esférica desplegable (Kalantar & Borhani, 2014)

A continuación, en la Tabla 8 se presentan las longitudes en centímetros de los elementos de medio arco simétrico con conexiones en cruz; se muestran las modificaciones en las longitudes de las barras por dichas conexiones, como se muestra en la Figura 41. Con lo que de conexión de barra a barra tendría una medida de 11.67 cm como en la Figura 40:

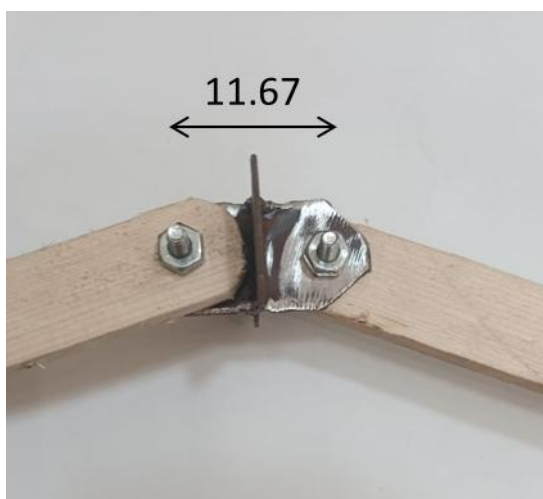


Figura 40. Unión de barras con la conexión en cruz

Tabla 8. Longitud en centímetros de los elementos de medio arco simétrico considerando conexiones en cruz

BARRA	LONGITUD cm
1	120.58
2	171.15
3	163.37
4	128.36
5	159.48
6	136.14
7	151.70
8	143.92

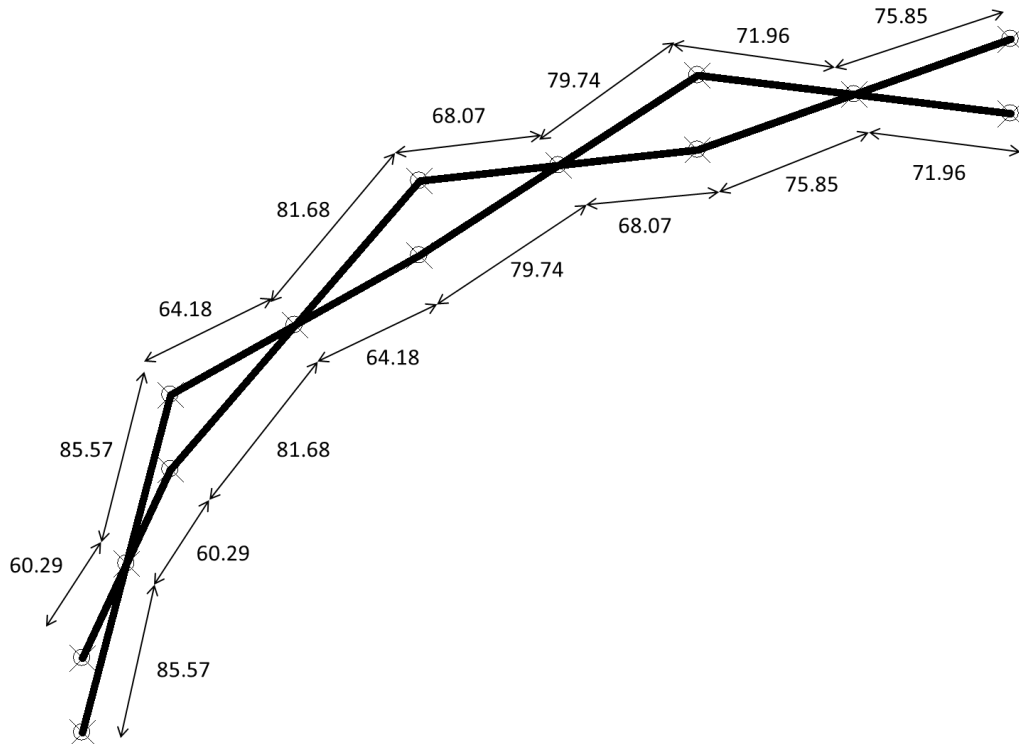


Figura 41. Medidas de los elementos de arco en centímetros ajustadas considerando las conexiones en cruz

Las siguientes imágenes (Figura 42 y Figura 43). Vista en planta del domo con la sección final de diseño HSS 4 x 1 ½ x ¼. Vista frontal del domo con el perfil de diseño final HSS 4 x 1 ½ x ¼, muestra el frontal y en planta de cómo se vería la estructura con los perfiles metálicos. Esta representación permite visualizar a escala la configuración espacial del sistema desplegable una vez armado con los elementos reales.

En la vista de frente se aprecian las proporciones entre los elementos y el domo, considerando medidas de 10 metros de ancho y 3.347 metros de altura del primer arco, y 7.097 metros de altura de la estructura total, con perfiles de **HSS 4 x 1 ½ x ¼**. La vista de planta muestra la organización de los arcos y conexiones entre ellos.

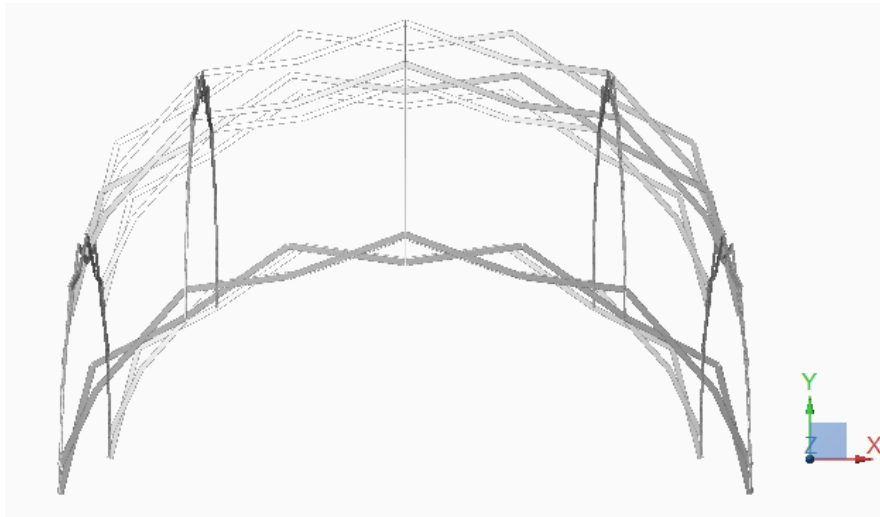


Figura 42. Vista frontal del domo con el perfil de diseño final HSS 4 x 1 ½ x ¼

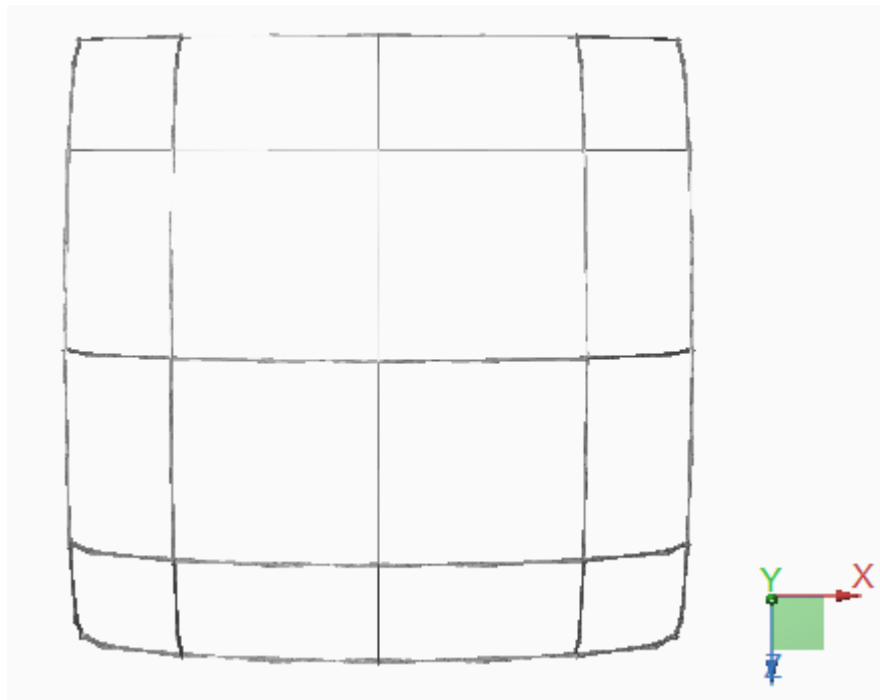


Figura 43. Vista en planta del domo con la sección final de diseño HSS 4 x 1 ½ x ¼

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta investigación se logró diseñar y aplicar con éxito una metodología que integra las propiedades especiales de las estructuras desplegables para el análisis por viento, donde se parte de lo indicado en la normativa vigente de la CFE complementado con simulaciones avanzadas de dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante ANSYS Fluent para obtener las presiones y análisis estructural con RAM Elements y definir las secciones que cumplieran con la normativa.

Esta metodología permitió evaluar el comportamiento del domo de estructura desplegable bajo cargas de viento en 4 casos de incidencia de 0° , 15° , 30° y 45° respecto de la perpendicular a una de sus caras.

Los resultados obtenidos a partir del análisis CFD muestran distribuciones de presión y succión más precisas que las mostradas por el enfoque de CFE, lo que optimiza las secciones estructurales, lo que demuestra que las herramientas computacionales pueden generar diseños más eficientes sin comprometer la resistencia.

La estructura seleccionada, basada en la copa esférica desplegable de Kalantar y Borhani (2014), fue evaluada según los criterios establecidos en el manual APCE para refugios, además de las características clave buscadas: facilidad de transporte, ligereza y rigidez.

Las simulaciones mostraron cómo actuaban las presiones sobre el domo y cuáles son los elementos de cada caso más afectados, siendo los de la parte superior los que podrían optimizarse en futuros trabajos.

Este trabajo contribuye al desarrollo de soluciones de refugio para una respuesta rápida ante situaciones de riesgo y ofrece una herramienta práctica para ingenieros civiles en el diseño de estructuras desplegables, seguras y adaptables.

La comparación entre los resultados de la metodología propuesta y los obtenidos según la normativa confirma la precisión del enfoque CFD y destaca las limitaciones de los métodos actuales al evaluar geometrías complejas.

La metodología desarrollada con la integración de normativa actual y métodos numéricos a diferencia de los métodos convencionales que suelen simplificar las cargas de viento y no consideran además las geometrías complejas, permitió evaluar con mayor precisión las presiones dinámicas de ciento a diferentes ángulos de incidencia, lo que dio resultados más realistas que además optimizaron el diseño de los elementos estructurales sin afectar los niveles de seguridad.

Asimismo, frente a otros trabajos previos especificados en el estado del arte que se centraron en geometrías específicas o simplificación de presiones, la metodología subraya el enfoque integral que incluye normativas y simulaciones numéricas. El trabajo de Guzmán (2021) solo se consideraron cargas estáticas; aquí se consideraron cargas dinámicas que simulan un comportamiento más cercano a lo real de las fuerzas eólicas.

La metodología puede aplicarse a otras geometrías de estructuras desplegables si se desarrollan en ANSYS WORKBENCH. La metodología consiste en una secuencia de pasos en la que se utiliza el modelo geométrico, se define un contorno y se realiza una simulación CFD con ANSYS Fluent para obtener las presiones, que se analizan mediante el software de análisis estructural RAM Elements. Lo que daría resultados más precisos y eficientes. (No es exclusiva de una geometría).

Resumiendo, se ha mejorado la precisión del diseño, lo que establece un antecedente para el desarrollo de normativas para estructuras complejas y geométricamente dinámicas.

Algunas recomendaciones sugeridas a partir del desarrollo de esta investigación son que las estructuras, especialmente las estructuras desplegables

por sus configuraciones y características, incluyan metodologías de análisis dinámico de viento para que se garantice su funcionalidad.

También se sugiere, para validar aún más los resultados obtenidos, realizar experimentos con túneles de viento y continuar experimentando con configuraciones geométricas diferentes o con materiales alternativos más ligeros, fortaleciendo el campo de las estructuras desplegables en la ingeniería civil.

Con los resultados de comportamiento de esta geometría, las propuestas de secciones y la metodología utilizada también constituyen una base para futuras investigaciones con geometrías diferentes, para explorar materiales alternativos, ligeros y sostenibles, así como anclajes que incluyan estudios geotécnicos.

Además de sugerir y ampliar el uso de estas estructuras en el ámbito arquitectónico, así como su integración en los protocolos de Protección Civil para una respuesta más efectiva.

7. REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I. (2019). Disasters in Mexico: Maps and notes around an unfinished story. *Investigaciones Geográficas*, 100. <https://doi.org/10.14350/rig.60025>
- Arjona Catzim, I. F. (2020). *ANÁLISIS DINÁMICO INTEGRAL DE UNA PLATAFORMA PARA EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS EN AGUAS SOMERAS* [Universidad Autónoma de Querétaro]. <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/2259>
- Chi, T. (2007). *NOVEL DEPLOYABLE MEMBRANE STRUCTURES: DESIGN AND IMPLEMENTATION*.
- Comisión Federal De Electricidad. (2020). *Manual de diseño de Obras Civiles Sección C: Estructuras Tema 1: Criterios Generales de Análisis y Diseño*.
- Crespo Pérez, I. (2017). *DESMONTABILIDAD Y RIGIDEZ: Estructuras desplegables y espaciales fijas* [Trabajo de fin de grado]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Escrig, F. (1984, Septiembre). Colaboraciones: ESTRUCTURAS ESPACIALES DE BARRAS DESPLEGABLES (SPACIAL STRUCTURES OF EXPANDABLE FRAMES). *Informes de la Construcción*, Vol.36, n.º 365. <https://doi.org/https://doi.org/10.3989/ic.1984.v36.i365.1895>
- Escrig, F. (2006). New Designs and Geometries of Deployable Scissor Structures. In F. J. M. Scheublin, A. D. C. Pronk, A. Borgard, & R. Houtman (Eds.), *ADAPTABLES 2006 : proceedings of the joint CIB, Tensinet, IASS international conference on adaptability in design and construction, Volume 2* (pp. 18–22). Eindhoven University of Technology.

- Escrig, F., & Valcárcel, J. P. (1988). *ESTRUCTURAS ESPACIALES DESPLEGABLES CURVAS (EXPANDABLE CURVE SPACE BAR STRUCTURES)*. <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>
- Fernández Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. Editorial Reverte.
- Franke, J., Hirsch, C., Jenses, A. G., Krus, H. W., Schatzmann, M., Westbury, P. S., Miles, S. D., Wisse, J. A., & Wright, N. G. (2004). Recommendations on the use of CFD in wind engineering. *Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics*. <https://www.researchgate.net/publication/251814717>
- Frías, A., & Moreno, G. (1986). *INGENIERÍA DE COSTAS* (A. C. Asociación Mexicana de Ingeniería Portuaria, Ed.).
- Gantes, C. (1991). *Design Methodology for Deployable Structures*. Massachusetts Institute of Technology.
- Gobierno Federal de México. (2011). *Manual Operativo "APCE"*.
- Guzmán, C. C. M. (2021). Emergency refuge design with Plegable systems. *Arquiteturarevista*, 17(1), 1–19. <https://doi.org/10.4013/arq.2021.171.08>
- Guzmán, C. C. M. (2022). Simplified Development of a Descriptive Geometry for Folding Transformable Roofs. *Módulo Arquitectura CUC*, 28, 285–322. <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.28.1.2022.10>
- J. Llorens. (2006). Lightweight Recoverable Foundations For Structural Membranes. In F. J. M. Scheublin, A. D. C. Pronk, A. Borgard, & R. Houtman (Eds.), *ADAPTABLES 2006 : proceedings of the joint CIB, Tensinet, IASS international conference on adaptability in design and construction, Volume 2* (pp. 23–27). Eindhoven University of Technology.

- Jayson, E. M., & Mathy, G. R. (2013). *RAPIDLY DEPLOYABLE LIGHTWEIGHT SHELTERS FOR AUSTERE ENVIRONMENTS*.
<http://www.drash.com/Products/Shelters/SSeries.aspx>
- Kalantar, N., & Borhani, A. (2014, January 16). *Transformable Design-Deployable Domes*. <https://www.youtube.com/watch?v=sM55HwF3bSU>.
- Liu, M., Li, Q. S., Huang, S. H., Shi, F., & Chen, F. (2018). Evaluation of wind effects on a large span retractable roof stadium by wind tunnel experiment and numerical simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, 39–57. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.014>
- Thrall, A. P., & Quaglia, C. P. (2014). Accordion shelters: A historical review of origami-like deployable shelters developed by the US military. In *Engineering Structures* (Vol. 59, pp. 686–692).
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.009>
- Zhu, Y., & Filipov, E. T. (2024). Large-scale modular and uniformly thick origami-inspired adaptable and load-carrying structures. *Nature Communications*, 15(1).
<https://doi.org/10.1038/s41467-024-46667-0>

APÉNDICE

A continuación, se incluyen los diagramas de fuerzas axiales, cortantes, de torsión y momentos para cada caso analizado, con sus valores máximos y mínimos generales.

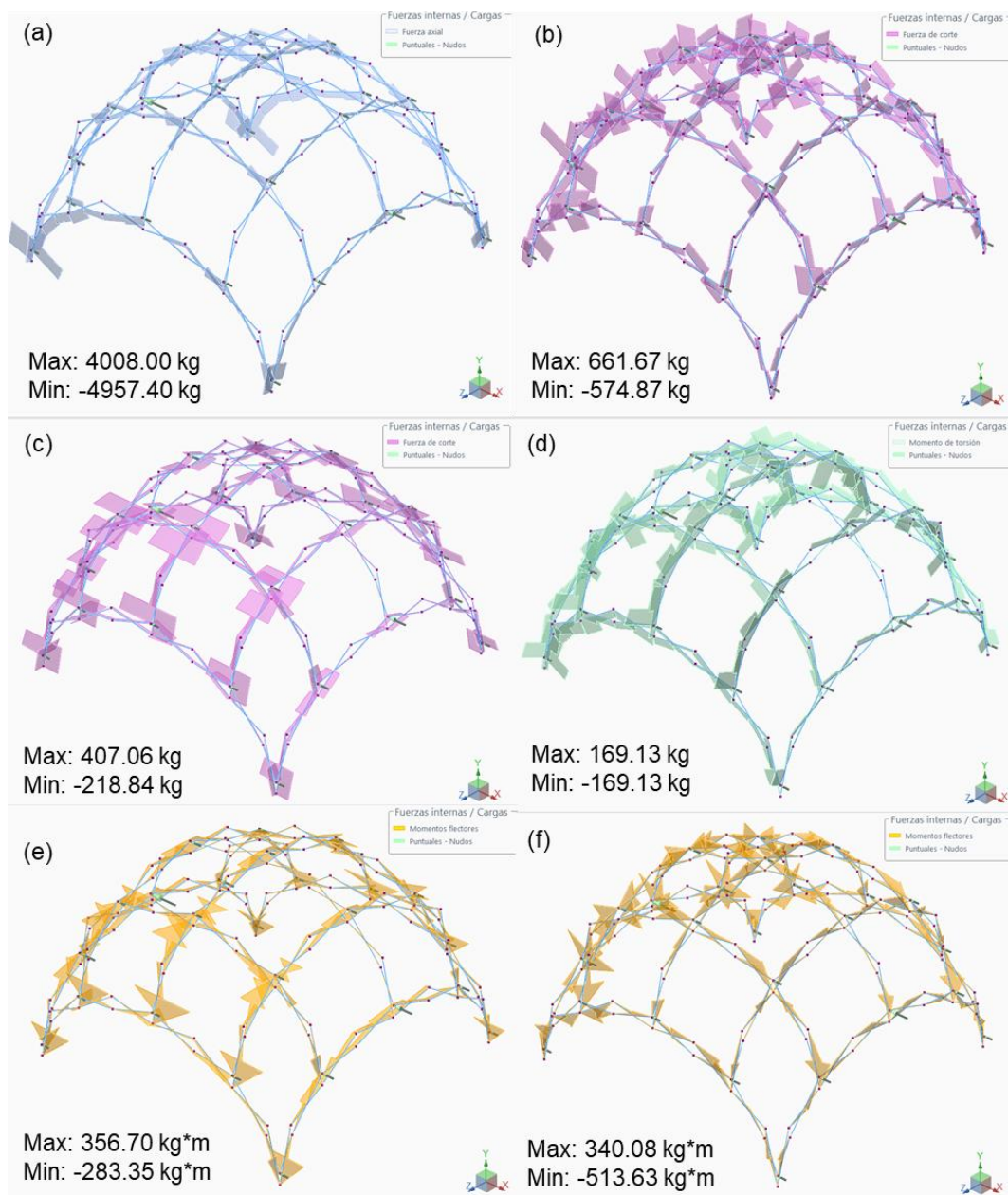


Figura 44. Diagramas para el caso de cargas indicadas por CFE con viento en dirección perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3

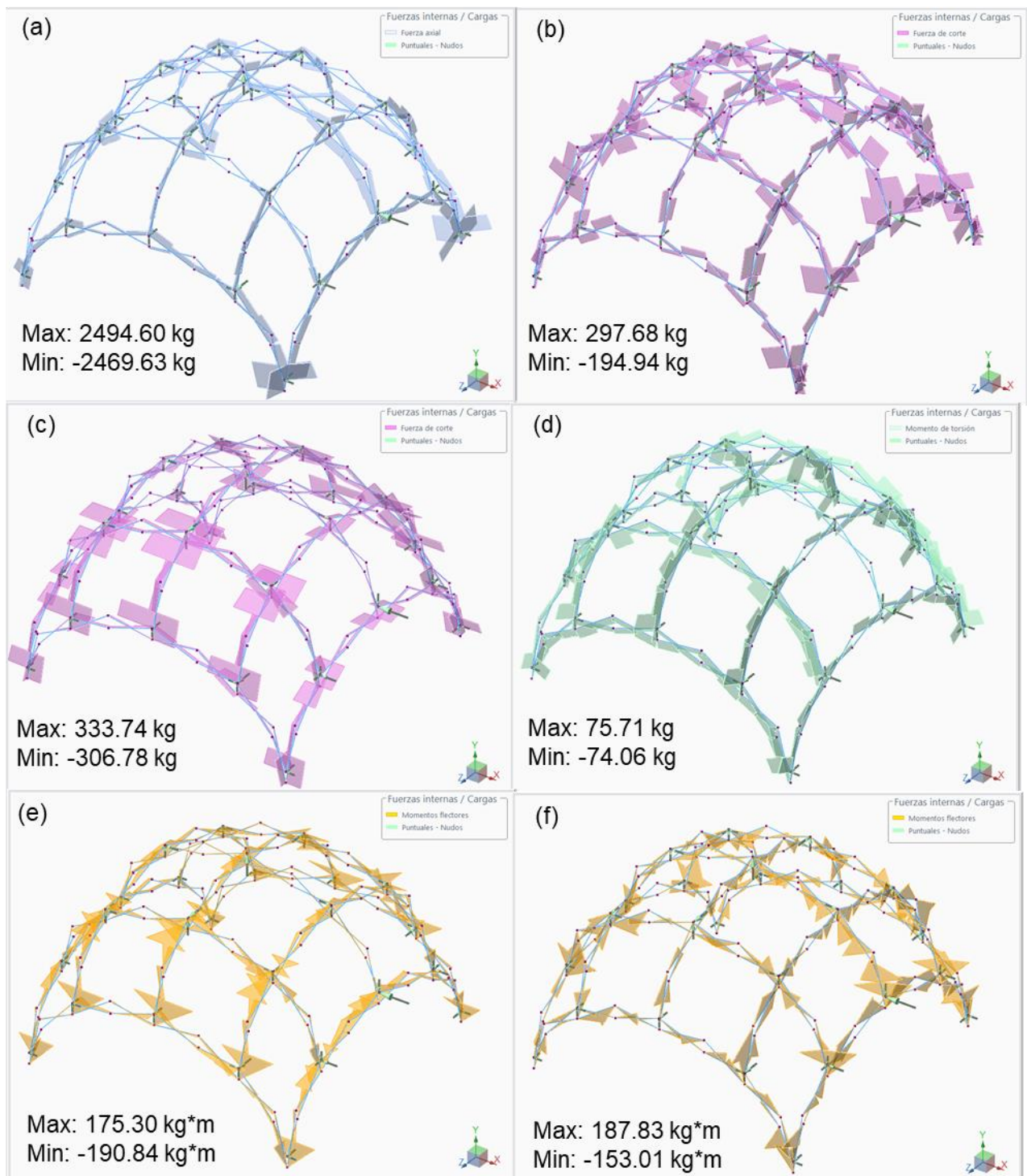


Figura 45. Diagramas para el caso de cargas de viento en dirección perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3

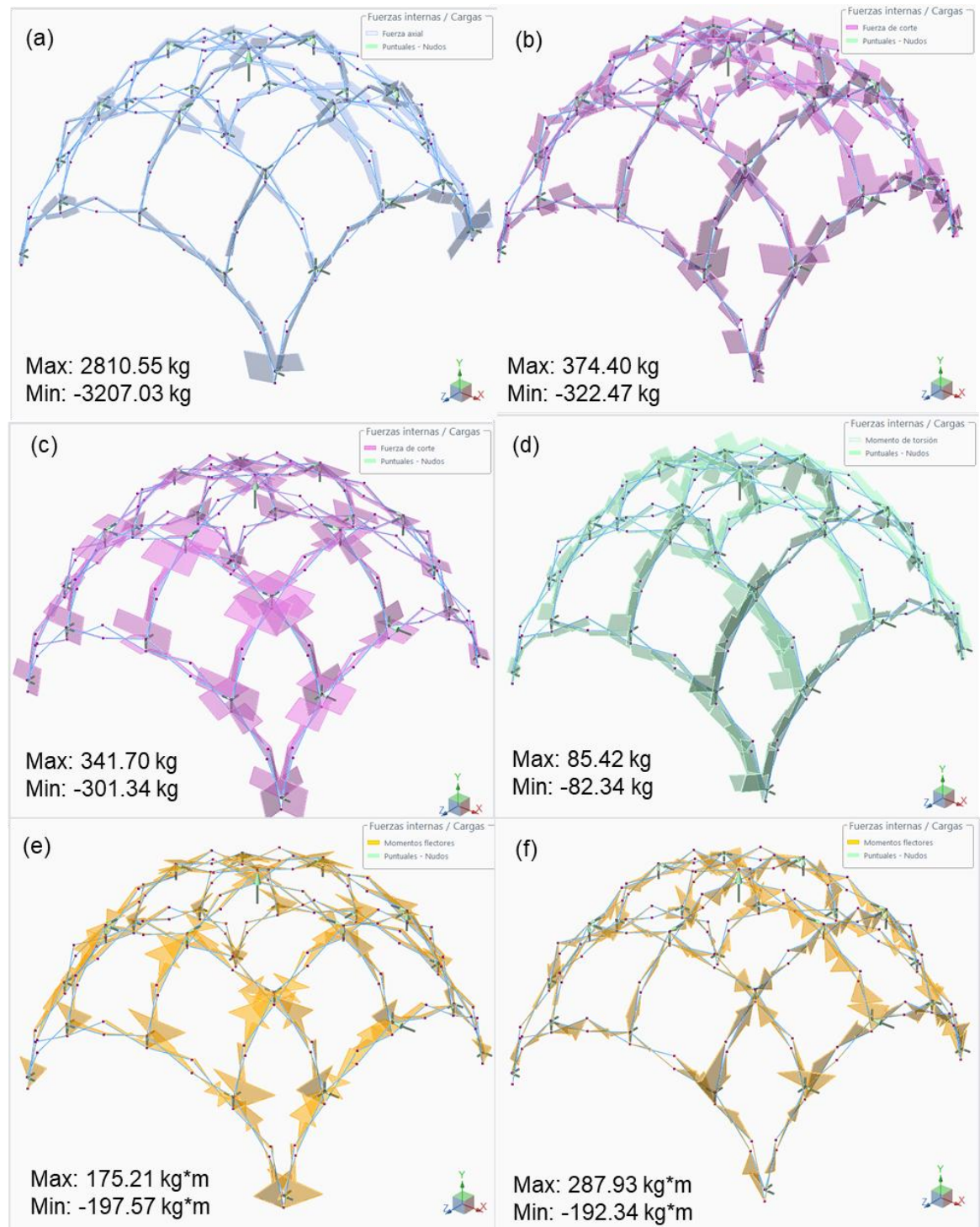


Figura 46. Diagramas para el caso de cargas de viento en dirección de 15 grados respecto de la perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3

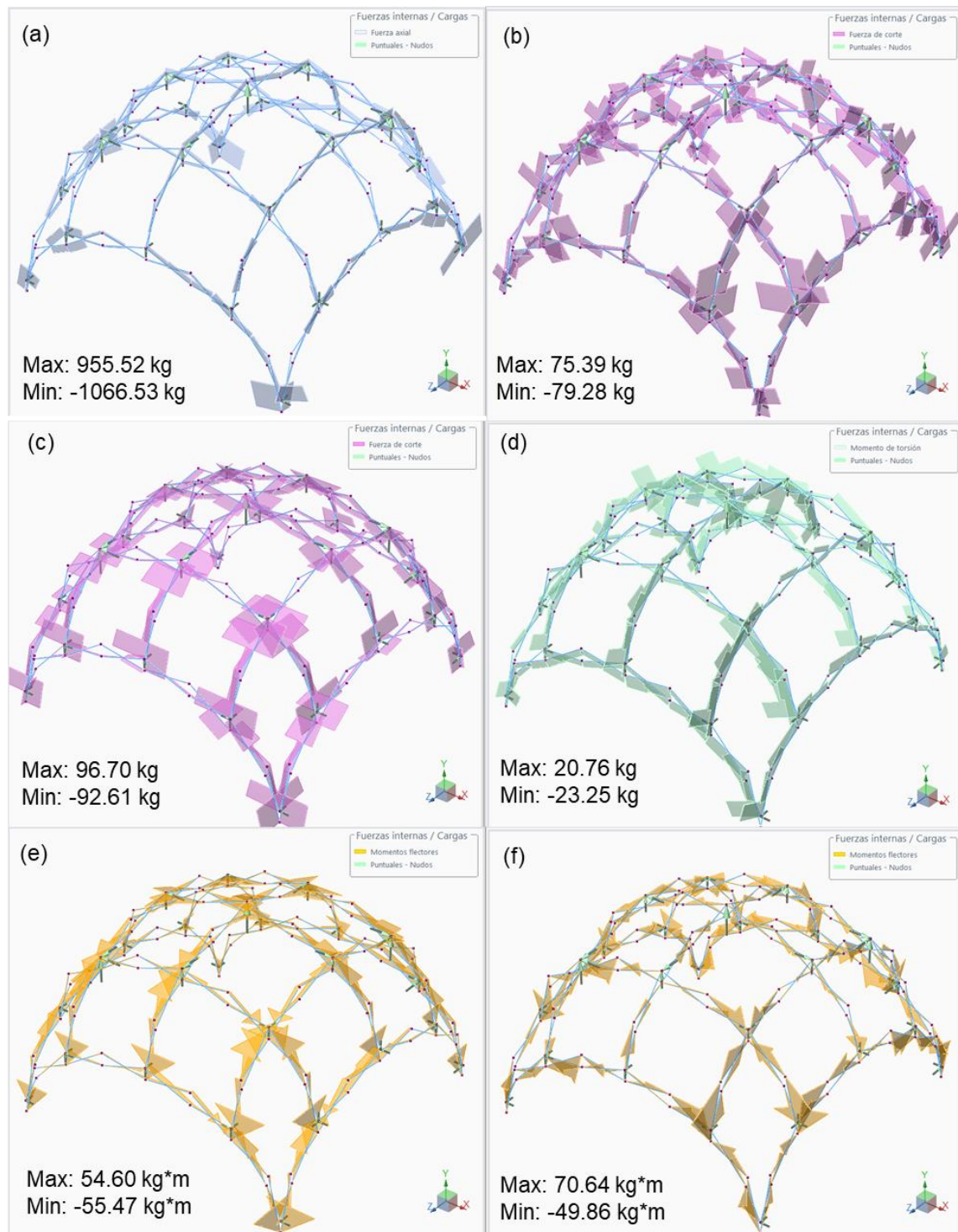


Figura 47. Diagramas para el caso de cargas de viento en dirección de 30 grados respecto de la perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3

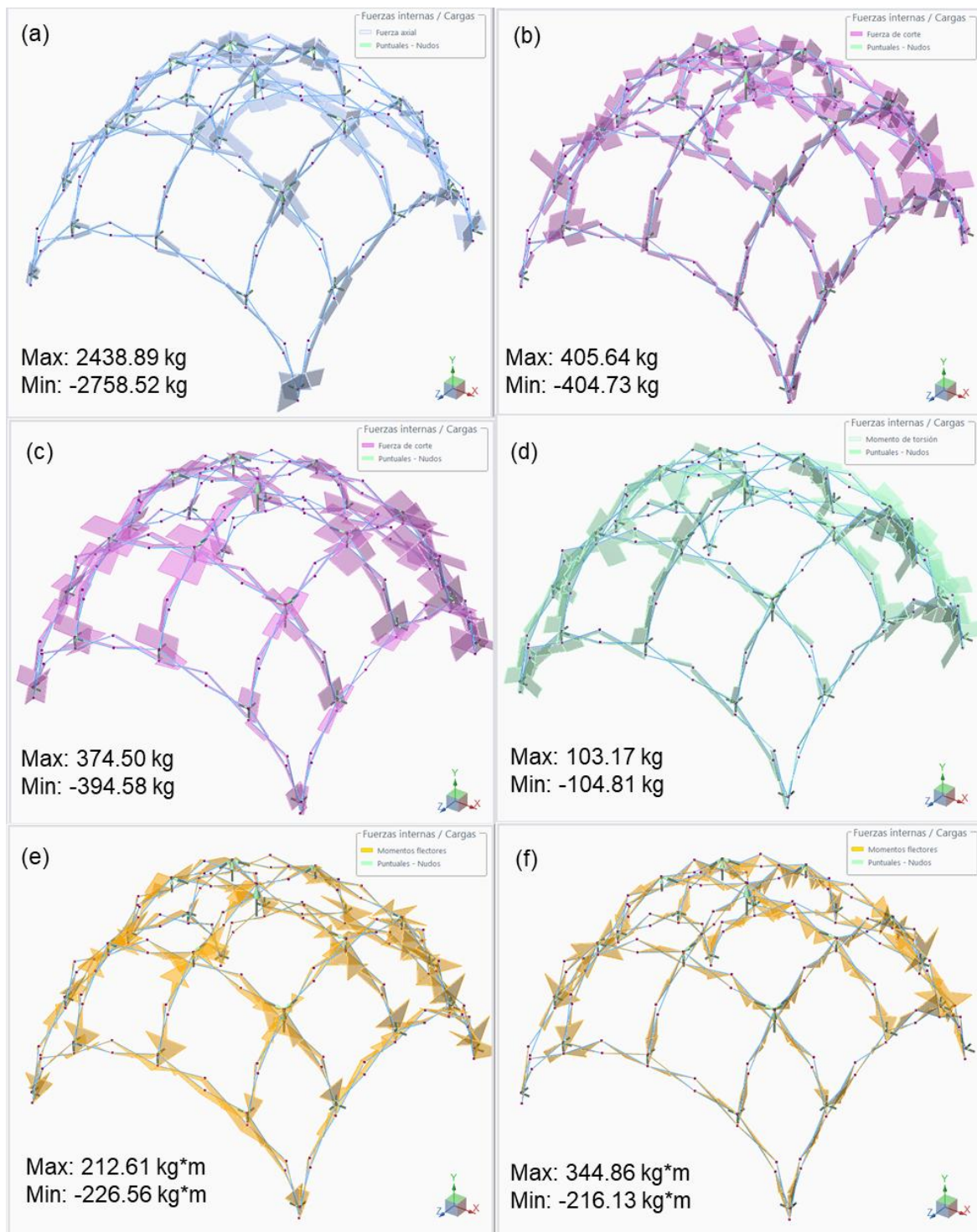


Figura 48. Diagramas para el caso de cargas de viento en dirección de 45 grados respecto de la perpendicular a una cara. (a) Axiales (b) Cortante 2 (c) Cortante 3 (d) Torsión (e) Momento 2 (f) Momento 3