

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

Departamento de Construcción y Estructuras

TESIS

METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA TENSO-ESTRUCTURAS APLICADA EN

INVERNADEROS

PRESENTA

Braian Filiberto López Herrera

Para obtener el grado de maestro en Ingeniería Civil con opción en
Estructuras

COMITÉ TUTORAL

Tutor: M. I. Daniel Enrique Reyna Valdivia

Co-tutor: Dr. José Ángel Ortiz Lozano

Asesor: Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

Aguascalientes, Aguascalientes, 02 de Noviembre de 2018

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE AGUASCALIENTES
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

M.EN FIL. OMAR VÁZQUEZ GLORIA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE


Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **BRAIAN FILIBERTO LÓPEZ HERRERA** con ID **222385** quien realizó la tesis titulada: **METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA TENSO-ESTRUCTURAS APLICADA EN INVERNADEROS**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así con ello continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.


Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 23 de Octubre de 2018

M.I. Daniel Enrique Reyna Valdivia 
Tutor de tesis

Dr. José Ángel Ortiz Lozano 
Cotutor de tesis

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León 
Asesor de tesis

✓ c.c.p.- Interesado: Braian Filiberto López Herrera
c.c.p.- Secretario de Investigación y Posgrado: Dr. Ricardo Arturo López León
c.c.p.- Jefatura del Depto. de Construcción y Estructuras
c.c.p.- Consejero Académico: Dr. José Ángel Ortiz Lozano
c.c.p.- Minuta Secretario Técnico: Dr. Miguel Ángel Soto Zamora


Vo.Bo.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



Oficio: CCDC-D-450-2018
Asunto: Conclusión de tesis

Dra. María del Carmen Martínez Serna
Dirección General de Investigación y Posgrado
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA TENSO-ESTRUCTURAS APLICADA EN INVERNADEROS". Presentado por el sustentante: Braian Filiberto López Herrera con ID: 222385, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE

Aguascalientes, Ags., 26 de octubre de 2018
"SE LUMEN PROFERRE"

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

- c.c.p. - Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
- c.c.p. - Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p. - M. Daniel Enrique Reyna Valdivia – Tutor de tesis.
- c.c.p. - Ing. Braian Filiberto López Herrera – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p. - Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
- c.c.p. - Archivo

CNIE 2018 | Notificación evaluación de artículo

Sistemas SMIE <sisistemas@smie.com.mx>

Mar 09/10/2018, 05:30 PM

Para: cronlopez07@hotmail.com <cronlopez07@hotmail.com>

Estimado **Ing. Braian Filiberto López Herrera**

La evaluación de su artículo para el XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural es:

Número consecutivo: **"09_9"**

Título: **Análisis y diseño de la cubierta de un invernadero aplicando el principio estructural de una tensoestructura y la afectación de variables ambientales en la presión de viento sobre una cubierta con ETFE**

Estatus: **Aceptado**

En breve se le notificará si será presentado en sesión técnica ó en sesión de póster.

Le recordamos amablemente que, para que su artículo sea presentado y publicado en las memorias del XXI CNIE, debe estar cubierta la cuota de inscripción de al menos un autor a más tardar el próximo **15 de octubre**.

Un mismo autor puede cubrir hasta 4 artículos con su inscripción.

El 15 de octubre vence la fecha límite para la inscripción de autores cuyos trabajos serán incluidos en el programa y memorias del XXI CNIE.

Una vez realizado el depósito de su inscripción, favor de enviar la ficha de comprobante de pago con sus datos al correo depositos@smie.com.mx dando el número del artículo, especificando también los datos de facturación en caso de requerirlo.

En el caso de que ya haya realizado el pago de su inscripción, favor de hacer caso omiso de este correo.

Atentamente

Comité Organizador XXI Congreso Nacional.

CNIE 2018 | Notificación evaluación de artículo

Sistemas SMIE <sisistemas@smie.com.mx>

Lun 08/10/2018, 04:35 PM

Para: cronlopez07@hotmail.com <cronlopez07@hotmail.com>

Estimado **Ing. Braian Filiberto López Herrera**

La evaluación de su artículo para el XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural es:

Número consecutivo: "**06_8**"

Título: **Determinación analítica y mediante software para la distribución de valores de coeficientes de presión debido a la acción del viento en una superficie con geometría curva simple (arco) y compleja (tensoestructura)**

Estatus: **Aceptado**

Le recordamos amablemente que, para que su artículo sea presentado y publicado en las memorias del XXI CNIE, debe estar cubierta la cuota de inscripción de al menos un autor a más tardar el próximo **15 de octubre**.

Un mismo autor puede cubrir hasta 4 artículos con su inscripción.

El 15 de octubre vence la fecha límite para la inscripción de autores cuyos trabajos serán incluidos en el programa y memorias del XXI CNIE.

Una vez realizado el depósito de su inscripción, favor de enviar la ficha de comprobante de pago con sus datos al correo depositos@smie.com.mx dando el número del artículo, especificando también los datos de facturación en caso de requerirlo.

En el caso de que ya haya realizado el pago de su inscripción, favor de hacer caso omiso de este correo.

Atentamente

Comité Organizador XXI Congreso Nacional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por el apoyo brindado mediante una beca y subsidio, de igual forma al CONACYT por la beca otorgada que permitieron poder desarrollar de una manera más sencilla mis estudios de Maestría.

Por otro lado agradecer a mis maestros que impartieron cada una de las clases y pude aprender mucho de ellos en cada uno de esos días durante el proceso de la maestría. A cada uno de mis compañeros que pudieron convertirse en muy buenos amigos tanto de mi área como de las demás áreas de estudio.

Agradecer a mi comité tutorial, al Dr. José Ángel Ortiz Lozano, Dr. Mario Eduardo Zermeño de León, Ing. Jorge Eudave por sus observaciones y consejos durante las revisiones semestrales y finales de mi trabajo de tesis, por su tiempo dedicado y su forma amable de apoyar e impulsar mi tesis, pero en especial a mi asesor/tutor M.I. Daniel Enrique Reyna Valdivia por creer en mi idea y firmar en blanco por ella; la mayoría de las ocasiones la relación de cualquier alumno durante su proceso de tesis en sus asesorías se asocia a sufrir por ellas, en cambio yo disfrute cada una de ellas, cada minuto porque con usted se pude hablar de todo ya que sabe un poco de todo, a pesar de ello lo mejor de cada asesoría es su forma de ser porque aparte de cuidar el aprendizaje, cuida a la persona, gracias por los consejos, su amistad, su guía y el tiempo dedicado. Durante este proceso de 2 años y un poco más hubo momentos donde las cosas eran difíciles y complicadas, sin embargo siempre apostó y creyó en que podría comprobar lo que pensábamos. Siempre, siempre me agradó que me daba la confianza de llegar al límite y mucha libertad para sacar lo mejor de mí.

DEDICATORIAS

Más que una dedicatoria, debería ser un agradecimiento más profundo, para ello agradezco a mi familia que supieron apoyarme con su buen humor en la distancia y con sus cuidados al verlos. A mis padres que siempre me han dado la libertad y apoyo para hacer lo que pienso y creo, y que en cada uno de sus días han sabido formarme siempre para ser amable más que inteligente, ya que eso vale mucho más. A mis hermanas que siempre dan buen humor a las cosas y a la forma en la que veamos la vida. En estos últimos tiempos hemos pasado tiempos difíciles pero siempre nuestra unidad y fe en Dios nos llevará a buen puerto.

A mis amigos de toda la vida que siguen estando ahí con buen humor y siendo un apoyo, como en la anterior tesis, les vuelvo a agradecer, y a los nuevos amigos hidrocálidos y foráneos que como ha sido un gusto estar con ustedes en este tiempo. También a los nuevos que han aparecido en este tiempo, Dios siempre pone las personas correctas en el momento indicado cuando nos disponemos a creer en él y en nosotros.

Y sobre todas las cosas y más que a nadie, gracias a Dios que me ha sostenido y sabido llevar con tantas enseñanzas en este tiempo donde he entendido que mi fe tiene el mismo límite de su amor hacia conmigo. Sea a donde sea que yo vaya o me toque ir en lo que sigue entiendo que nada vale si no es pensando en tu propósito y en servir a otras personas con esos dones. Durante este tiempo hubo un montón de momentos difíciles pero prefiero hablar con agradecimiento, por tu infinita fidelidad y cuidados. En esta ocasión prefiero que quede esto por siempre, más en agradecimiento, y sea a donde sea que ahora me lleves iré siempre pensando que “con todo lo que soy, con todo lo que tengo, te quiero demostrar que tú eres lo que yo amo más, cada día señor te daré mi corazón, mi vida será alabastro que quebraré ante tus pies”. Me ha gustado tanto la soledad porque me he conocido mejor y que más que en mi educación has trabajado tanto en mi corazón, gracias por este tiempo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	5
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	20
1.1 Prólogo	20
1.2 Objetivo General	21
1.3 Objetivos Particulares.....	21
1.4 Alcances	23
1.5 Justificación	24
1.6 Narrativa por capítulos.....	26
CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE (MARCO CONTEXTUAL)	29
2.1 Definición de una tensoestructura.....	31
2.2 Antecedentes	32
2.3 Clasificación de las tensoestructuras.....	33
2.3.1 Clasificación de acuerdo a la geometría.....	33
2.3.2 Clasificación de acuerdo a su trabajo estructural	34
2.3.3 Materiales utilizados comúnmente en las tensoestructuras.....	37
2.3.3.1 Poliéster	38
2.3.3.2 Fibra de vidrio.....	39
2.3.3.3 Clasificaciones alternativas.....	39
2.4 Capas en una membrana.....	41
2.5 Idealización y trabajo estructural de una tensoestructura	41
2.5.1 Relación tensión, esfuerzo, deformación y geometría.....	42
2.6 Criterios de análisis y diseño de una tensoestructura	43
2.7 Relación cubierta-funcionalidad.....	44
2.7.1 Tipos de cubiertas ligeras.....	45
2.7.1.1 Elementos que conforman el trabajo estructural.....	48

2.7.2 Cubiertas especiales	48
2.8 Definición de Invernadero	51
2.9 Funciones de un Invernadero	52
2.9.1 Naturaleza estructural	53
2.9.2 Naturaleza ambiental	55
2.9.3 Función agrícola y social	56
2.10 Problemas recurrentes en la estructura de un invernadero.....	56
CAPÍTULO III MARCO CONCEPTUAL.....	57
3.1 Tipos de invernaderos (afectación de la estructura)	57
3.1.1 Consideraciones a tomar en cuenta en la estructura de acuerdo a la cubierta	57
3.1.2 Formas a utilizar en el techo de un invernadero	58
3.2 Materiales utilizados en la estructura de invernaderos.....	59
3.2.1 Tipos de materiales para la cubierta	59
3.3 Criterios de análisis y diseño estructural para cubiertas.....	61
3.3.1 Fases del análisis y diseño a cualquier cubierta.....	62
3.3.2 Obtención de cargas y presiones de vientos.....	64
3.3.2.1 Franjas de diseño en base al área expuesta.....	65
3.3.3 Sistema cable-catenaria aplicado como cubierta.....	66
3.3.4 Obtención de la forma de una cubierta	67
3.3.5 Parametrización del comportamiento de curvas.....	68
3.4 El elemento finito aplicado en la obtención de la forma	69
3.5 Métodos de análisis estructural de acuerdo a la geometría y al tipo de material.....	72
3.5.1 Análisis lineal estático.....	73
3.5.1.1 Método de la rigidez transitoria	74
3.5.2 Análisis no lineal estático	75
3.5.2.1 Método de la relajación dinámica	75
3.5.2.2 Método de los mínimos cuadrados	76

3.5.2.3 Método de la densidad de fuerzas.....	78
3.6 Software especializado en el tratamiento de tensoestructuras.....	81
3.6.1 Formfinder	81
3.6.2 Rhinoceros a través de Grasshopper + Kangaroo	82
3.6.3 Wintess.....	82
3.6.4 Maple	83
3.6.5 Otros	84
CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	85
4.1 Enfoque de la investigación.....	85
4.2 Alcances (limitaciones y delimitaciones).....	86
4.3 Hipótesis de investigación	86
4.4 Procedimiento a seguir	86
4.4.1 Iteraciones mínimas para una tensoestructura	89
4.4.2 Mapa de metodología general para el análisis de una tensoestructura.....	91
CAPÍTULO V APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO Y EJEMPLO DE APLICACIÓN A UNA TENSOESTRUCTURA GENERAL.....	92
5.1 Conceptos básicos y consideraciones de diseño	92
5.2 Descripción de pasos a seguir en ejemplo general a realizar	93
5.2.1 Puntos de anclaje y forma	93
5.2.1.1 Método de densidad de fuerzas, formulación matricial.....	94
5.2.1.2 Corrección del método de acuerdo a la tensión o de acuerdo a la fuerza.....	97
5.2.2 Determinación de fuerzas reales en la estructura	98
5.2.2.1 Determinación de velocidad básica de diseño	99
5.2.2.2 Presión actuante sobre la construcción.....	104
5.3 Determinación, complejidad y descripción de presiones de viento en una geometría inusual	104
5.3.1 Vector normal y su relación con un coeficiente de presión de viento.....	105
5.3.2 Vector normal y evaluación a succión	106

5.3.3 La mecánica de fluidos y su aplicación para evaluar la succión	108
5.3.4 Placa inclinada y analogía para una geometría como una tensoestructura.....	110
5.3.5 Velocidad de aplicación en lado de sotavento	112
5.3.5 Determinación de coeficientes de presión de viento en problema general de aplicación.....	113
5.4 Tensión máxima de diseño y selección de membrana.....	118
CAPÍTULO VI METODOLOGÍA APLICADA EN EJEMPLO Y DISEÑO DE LA CUBIERTA DE UN INVERNADERO	120
Introducción.....	120
6.1 Cubiertas tipo arco, normativa de este tipo de geometría ante la acción del viento .	121
6.1.1 Normativa mexicana	121
6.1.2 Real decreto español.....	123
6.1.3 Código de Nueva Zelanda	123
6.1.4 Código ASCE (Estados Unidos)	124
6.1.4 Comparación del valor de C_p para diferentes códigos en un arco	125
6.1.5 Diseño como fluido y comparación con códigos de viento.....	126
6.2 Diseño de un invernadero, ejemplo de aplicación	128
6.2.1 Selección geográfica para el invernadero y análisis de variables ambientales.....	128
6.2.3 Selección del invernadero a utilizar e implementación de dimensiones	133
6.2.4 Posicionamiento del invernadero de acuerdo a la iluminación y dirección del viento	135
6.2.5 Determinación de salto térmico inicial y tasa de ventilación requerida en el invernadero	138
6.2.6 La tasa de ventilación y su afectación en la determinación de la presión de viento en la cubierta	142
6.2.7 Diseño de la inclinación y ángulo de apertura de la ventana	144
6.2.8 La renovación del aire y la ventilación	147
6.2.9 Selección del material en la cubierta, afectación en variables ambientales y de presión de viento	149

6.2.10 Material ETFE.....	151
6.2.11 La radiación y la evapotranspiración en el invernadero	155
6.2.12 La evapotranspiración y su relación con los coeficientes de presión de viento.....	159
6.2.13 El gradiente de temperatura por sombreado	159
6.2.14 La composición del material en la cubierta y el gradiente de temperatura final ...	161
6.2.15 Valores de presión interiores.....	164
6.2.16 Determinación de presión de viento exterior, comparación normativa CFE y datos de sitio	168
6.2.17 Distribución de valores de CP en el invernadero	170
6.2.18 Presión de viento final en la cubierta.....	176
6.2.19 Tensión y relación de esfuerzo en la membrana	179
6.2.20 Conclusiones particulares para el invernadero ejemplo	182
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES.....	184
7.1 Conclusiones estructurales	184
7.2 Conclusiones particulares para el diseño de un invernadero.....	188
7.3 Posibles y futuras líneas de investigación	189
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	191
ANEXOS.....	196

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Materiales utilizados para cubiertas ligeras..... 40

Tabla 2: Coeficientes de presión Cp para cubiertas en arco 122

Tabla 3: Coeficientes de presión exterior para construcciones con cubierta de arco circular donde el viento actúa normal a la generatriz 122

Tabla 4: Coeficientes de presión de viento para cubiertas curvas con relaciones $h/r < 2$ según el código de viento de Nueva Zelanda 124

Tabla 5: Valores para Cp de un arco según el ASCE 124

Tabla 6: Comparación de diferentes códigos para análisis de acciones por viento en cubiertas de tipo arco 126

Tabla 7: Comparación de valores Cp para un arco mediante distintos códigos en el mundo y un análisis como fluido 127

Tablas 8: Velocidad de viento mensual promedio y Tabla 9: Velocidad de ráfaga máxima por mes 130

Tabla 10: Dirección del viento mensual promedio y Tabla 11: Dirección de ráfaga máxima mensual..... 130

Tabla 12: Distribución de valores de temperatura para la estación de análisis 131

Tabla 13: Humedad relativa de acuerdo a la estación climática..... 131

Tabla 14: Temperaturas críticas en el tomate..... 132

Tabla 15: División de días para cada etapa de cálculo de radiación 140

Tabla 16: Radiación máxima para cada ciclo vegetativo del cultivo a nivel piso, además de salto térmico para cada etapa..... 141

Tabla 17: Tasa de ventilación a partir del gradiente térmico para cada etapa 143

Tabla 18: Duración de plásticos normalizados para invernaderos 150

Tabla 19: Tensiones máximas en láminas ETFE a diferentes temperaturas de ensayo 153

Tabla 20: Efectos de la radiación en la tensión máxima de una lámina ETFE..... 154

Tabla 21: Valores para Kc en el tomate de acuerdo al ciclo vegetativo 156

Tabla 22: Evapotranspiración máxima para cada etapa 158

Tabla 23: Extrapolación de gradiente de temperatura y temperaturas necesarias para el crecimiento óptimo..... 160

Tabla 24: Gradientes de temperatura, ΔT_1 debido a velocidad de viento sin sombreado ni diseño de ventanas, ΔT_2 por ventilación, ΔT_3 sombreado..... 161

Tabla 25: Cálculo de Radiación neta en el invernadero con ETFE en la cubierta 162

Tabla 26: Calculo de déficit con el gradiente de temperatura 4 para sacar porcentaje de sombreado en la cubierta 163

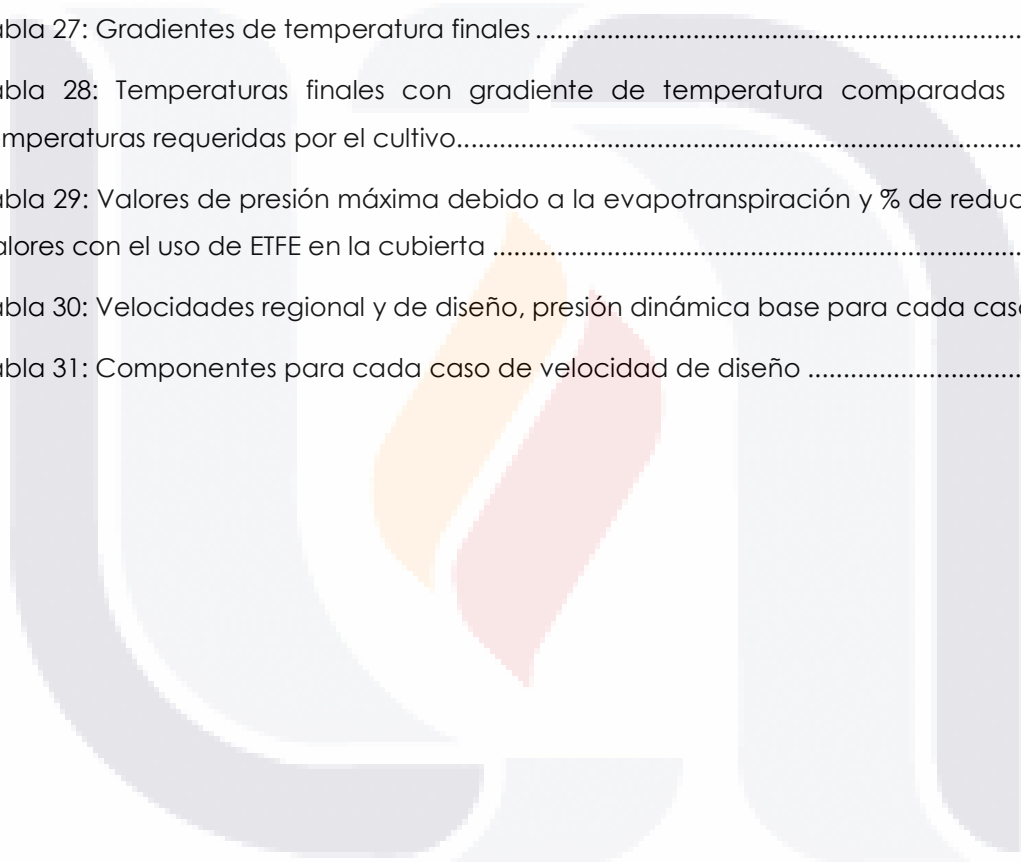
Tabla 27: Gradientes de temperatura finales 163

Tabla 28: Temperaturas finales con gradiente de temperatura comparadas con las temperaturas requeridas por el cultivo..... 164

Tabla 29: Valores de presión máxima debido a la evapotranspiración y % de reducción de valores con el uso de ETFE en la cubierta 165

Tabla 30: Velocidades regional y de diseño, presión dinámica base para cada caso..... 170

Tabla 31: Componentes para cada caso de velocidad de diseño 179



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema para el estado del arte (marco contextual y conceptual) y conocimiento definido para la investigación (Anexo A) 30

Figura 2: Ejemplo de una tensoestructura 31

Figura 3: Estructura de vivienda antigua a base de tensoestructura 32

Figura 4: Frei Otto, considerado padre de las tensoestructuras y uno de sus trabajos aplicados en el estadio olímpico de Múnich 33

Figura 5: Superficie anticlástica y sinclástica 33

Figura 6: Ejemplo de una membrana estructural 35

Figura 7: Estructura neumática aplicada en el estadio Allianz Arena 35

Figura 8: Cubierta a base del principio de tenseguridad 36

Figura 9: Cubierta en base a tensegritis 37

Figura 10: Poliéster utilizado en membranas 38

Figura 11: Membrana a partir de fibra de vidrio 39

Figura 12: Cubiertas a partir de ETFE y PTFE respectivamente 40

Figura 13: Capas en una membrana 41

Figura 14: Cubierta en el proyecto Edén en Reino Unido, tanto en iluminación natural como nocturna 45

Figura 15: Cubierta a partir de mástiles 46

Figura 16: Cubierta soportada por arcos 46

Figura 17: Cubierta apoyada en puntos en estadio olímpico de Múnich 47

Figura 18: Cubierta de un lucernario tipo bóveda 47

Figura 19: Ejemplo de una cubierta telescópica en una alberca 48

Figura 20: Cubierta flotante agrícola aplicada en cultivo 49

Figura 21: Cubierta ligera con cables secundarios 50

Figura 22: Cubierta colgante suspendida a base de cables y recubrimiento plástico 50

Figura 23 : a)Carpa estructural para un circo, b) Cubierta inflable, c) Pagoda tensada, d) Cubierta estructural temporal para eventos 51

Figura 24: Cubierta y estructura para un invernadero 52

Figura 25: Posibles configuraciones de invernaderos para techos con curvatura..... 58

Figura 26: a) Invernadero con cubierta de vidrio, b) cubierta de plástico rígido y c) cubierta en base a plástico flexible 60

Figura 27: Determinación de posibles franjas de diseño de acuerdo a la curvatura de la superficie y la presión de viento uniforme aplicada..... 66

Figura 28: Implementación de posibles puntos para el pretensado 68

Figura 29: Parametrización de un círculo en el espacio sin variación en el eje Z..... 69

Figura 30: Deformaciones en un elemento finito..... 71

Figura 31: Diagrama de esfuerzo y deformación de un material 72

Figura 32: Nodo de una red de cables idealizada 77

Figura 33: Verificación de esfuerzos en una tensoestructura en Formfinder 81

Figura 34: Parametrización de una superficie en Rhino con ayuda de Grasshopper..... 82

Figura 35: Ejemplo de presiones de viento aplicadas en un área expuesta de una tensoestructura 83

Figura 37: Configuración geométrica de la estructura a evaluar 93

Figura 38: Estructura para ejemplificar la formulación de la matriz del método de densidad de fuerzas..... 94

Figura 39: Matriz de conectividad ejemplificada para densidad de fuerzas 95

Figura 40: Ejemplo de cambios de curvatura en una superficie, número de ecuaciones para evaluar el comportamiento geométrico y así calcular la longitud de curva del elemento 96

Figura 41 Clase de estructura según su tamaño 100

Figura 42: Velocidad regional para la ciudad de Aguascalientes en Km/h..... 100

Figura 43: Factor de tamaño F_c 101

Figura 44 Valores de α y δ 101

Figura 45: Factor de topografía local F_T 102

Figura 46: Relación entre la altitud y la presión barométrica 103

Figura 47: Vector normal para una superficie de acuerdo a secciones 105

Figura 48.: Angulo de ataque del viento a partir de 0 o 90 grados..... 106

Figura 49: Análisis con túnel de viento para distintos, valores de coeficientes de presiones de viento en función del ángulo de ataque 107

Figura 51: Arrastre total en cuerpos bidireccionales..... 110

Figura 52: Segmentación en un arco buscando los vectores normales en cada parte 111

Figura 53: Prueba de túnel de viento para una placa inclinada..... 111

Figura 54: Vectores normales para la superficie estudiada..... 114

Figura 55: Velocidad de diseño y valores de presiones en Wintess3..... 114

Figura 56: Distribución de presiones en la superficie en Wintess3 115

Figura 57: Distribución de presiones en Flow Design 116

Figura 58: Valores de coeficientes de presión de viento en Wintess 3 para la geometría estudiada..... 117

Figura 59: Distribución de coeficientes de presión de viento para Autodesk Flow Design 117

Figura 60 Invernadero tipo capilla, la cual es la forma más semejante a un arco 120

Figura 61 Cubiertas en arco 121

Figura 62 Coeficiente de presión para construcciones de arco circular con viento paralelo a la generatriz 122

Figura 63: Valores de coeficientes de presión para un arco según decreto español..... 123

Figura 64: Nomenclatura para la geometría de arco y así obtener valores de coeficientes de presión de viento 124

Figura 65: Arco estándar de prueba para comparación de valores Cp 125

Figura 66: Ejemplo de como discretizar el arco para evaluar su vector normal..... 126

Figura 67: Dimensiones para un invernadero multicapilla 134

Figura 68: Dimensiones del invernadero 134

Figura 69: Calculo de mejor orientacion solar con el programa Ecotec..... 137

Figura 70: Valor para la mejor orientación del recinto 137

Figura 71: Esquema de direcciones del viento dominante y mejor posición solar..... 138

Figura 72: Aumento de temperatura en un invernadero cerrado y abundantemente regado en relación con la intensidad de la radiación solar y la velocidad del viento..... 139

Figura 73: Análisis de radiación diaria para el invernadero en el mes de Julio como ejemplo e implementación de la malla de análisis en el nivel del suelo 140

Figura 74: Calculo de radiacion a partir del programa Ecotect..... 141

Figura 75: Tasa de ventilación por superficie media de ventana en función de la velocidad del viento en el invernadero 143

Figura 76: Tasa de ventilacion m3/m2s en funcion del angulo de apertura de la ventana 145

Figura 77: Tasa de ventilación m3/m2s en función de la velocidad del viento (m/s) en invernaderos con ventana de tipo enrollable..... 145

Figura 78: Tasa de ventilación por unidad de superficie de suelo..... 146

Figura 79: Cotas para abertura en la ventana cenital a 20 grados (0.85 m) y una ventana solo abierta en 0.6 m..... 146

Figura 80: Estimación del volumen de aire renovado por hora Z en un invernadero correctamente regado para mantener la temperatura del aire en un valor dado Δt en relación a la intensidad de la radiación solar 148

Figura 81: Lámina ETFE instalada en monocapa en el estadio Allianz Rivera 151

Figura 82: Lámina ETFE instalada en sistema multicapa a base de cojines presurizados en el centro acuático nacional de Beijing-China 152

Figura 83: Sombramiento parcial en una lámina ETFE 153

Figura 84: Mapa de distribución de valores Kc para el cultivo de acuerdo a las etapas vegetativas..... 157

Figura 85: Distribución de presión interior en la cubierta debida a la evapotranspiración por el cultivo en la etapa C-D del ciclo vegetativo (anexo E) 166

Figura 86: Distribución de presión interior debido a la evapotranspiración por el cultivo sin tener efecto de algún material en la cubierta (anexo F) 167

Figura 87: Ingreso de componentes en Wintess para la fuerza resultante en la estructura 171

Figura 88: Distribución de presiones para el invernadero en Wintess 172

Figura 89: Valores de CP para el invernadero en batería (anexo G)..... 172

Figura 90: Distribución de presiones exteriores en el invernadero tomando como base CFE 174

Figura 91: Distribución de presiones exteriores conforme a la velocidad de sitio 175

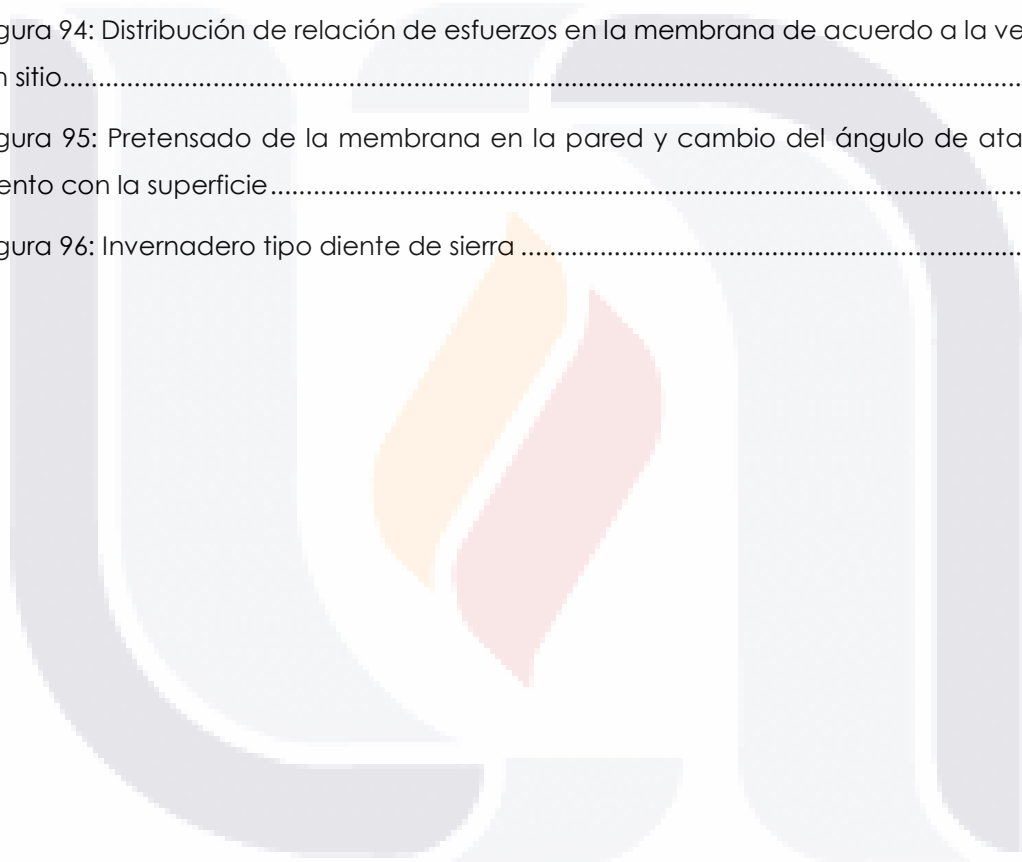
Figura 92: Distribución de presión fina en el invernadero, suma de presión interior sin ETFE y presión exterior por CFE 177

Figura 93: Distribución de presión final en el invernadero, suma de presión interior afectada con ETFE y presión exterior en base a la ráfaga de viento en sitio 178

Figura 94: Distribución de relación de esfuerzos en la membrana de acuerdo a la velocidad en sitio..... 180

Figura 95: Pretensado de la membrana en la pared y cambio del ángulo de ataque del viento con la superficie..... 181

Figura 96: Invernadero tipo diente de sierra 182



RESUMEN

El propósito de esta tesis es generar primeramente una metodología de diseño y análisis para las estructuras llamadas tensoestructuras, después enfocar los puntos necesarios y oportunos para generar una metodología más a fondo para el análisis y diseño de un invernadero; todo esto en base primero a la investigación del estado del arte para cualquier cubierta ligera tomando en cuenta tipos de material comúnmente usados, posterior a ello se enfoca la tipología de la geometría de los diferentes invernaderos existentes y que tipo de cubierta puede ser aplicable en ellos. Después de ello retomar los diferentes y pocos métodos para el tratamiento del análisis estructural de una estructura tensada, describiendo cada elemento de manera analítica y proponiendo opciones de software especializado para hacer el análisis y diseño de estas estructuras además de la búsqueda del estado tensional correcto para desarrollar las deformaciones previstas que puedan aprovechar la capacidad del material en la cubierta.

Se realizan dos ejemplos de diseño en los capítulos quinto y sexto, el primero de ellos aplicando la metodología de diseño generada para una cubierta de una tensoestructura básica comparando los diferentes coeficientes de presión de viento en los software de diseño Wintess y Autodesk Flow Design, además de emitir comentarios y recomendaciones para el análisis de una tensoestructura que además pueda ser de guía para otros debido a que en los diferentes códigos de viento no se citan geometrías de naturaleza curva o tan anormal como la de una estructura tensada.

Por su parte el segundo ejemplo de diseño se enfoca al diseño de un invernadero denotando principios propios de una tensoestructura (tensión) con la especialidad de ser una estructura que puede emitir presión interior debido al cultivo que alberga, la suma de la presión exterior debida al viento y esta presión interior muestran la presión final en la cubierta. Paralelamente se aplica en la cubierta el material ETFE (etileno tetrafluoretileno) buscando elevar la vida útil de la cubierta de 2 a 25 años además de concebir ahorro de agua en el cultivo, se muestra la afectación del material en el cultivo, la cubierta y la presión final sobre

ella, donde siempre se da como prioridad generar condiciones para el buen desarrollo de la planta observando también fuertemente la parte estructural de la cubierta, que es la parte del área de estudio que interesa.



ABSTRACT

The purpose of this document is to generate a methodology of design and analysis for tenso-structures specially and after that it focus the necessary points for generate another and more depth methodology for the design of a greenhouse; all this base on the research of art state for any light cover focused it on that could be use inside greenhouse. Then taking up the different and few methods of analysis for this type of structures and searching of the correct form of the tensional state on membrane, describing each element in an analytical way and proposing specialized software options to resolve these structures trying to develop the predicted deformations that can show the best capacity of the material on the roof.

Show two designs, the first one about applying the design methodology generated for a cover of a basic tensile structure comparing the different wind pressure coefficients on Wintess and Autodesk Flow Design software in addition to gave comments and recommendations for the analysis of a tensile structure and can be guide and help for others because in the diferrent wind codes over the world didnt mentioned how do the treatmeant of geometries with curved nature or as abnormal like a tensioned structure.

The second example focuses on the design of a greenhouse while denote principles of a tensile structure with the specially of this structure can emit internal pressure due to the crop inside, the sum of the external pressure due to the wind and this internal pressure will denote the final pressure on the cover. All the same time the ETFE foil is use don the roof seeking to increase the useful life of the roof from 2 to 25 years. Also thanks to the use of the material, wáter is saved because the internal pressure is reduced 40 %.

Show the affectation of the material in the crop, the cover and the final pressure on it, taking into account the way to develop the best conditions for the correct development of the plant inside.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 Prólogo

Toda estructura se crea para una o diferentes funciones, ya sea protección, resguardo, optimización, cuidado, etc. En todas una de las grandes razones es para mejorar el lugar de acuerdo al contexto que se quiere trabajar la estructura propuesta y así obtener beneficios de ella, como es el caso en las naves industriales para la industria y producción; estructuras de carácter civil para ejemplos como hospitales, escuelas, bancos, etc.; ambientales o hidráulicas como presas, bordos, canales, etc.; puentes y desniveles para la comunicación.

En el caso de las tenso estructuras, también conocidas como membranas ligeras, velarías, lonarías o bien estructuras ligeras; pueden cumplir la función civil que se requiera y a parte por su naturaleza a trabajar como lo dice su nombre en base a cargas y esfuerzos a tensión transmitidos al material del que están compuestas, pueden denotar un ahorro de material en el área a cubrir sosteniendo un buen índice de iluminación y ventilación.

Por su parte las estructuras de tipo invernadero que de acuerdo a la Real Academia de la lengua Española (2016), se definen un lugar cerrado, estático y accesible a pie, que se destina a la horticultura, dotado habitualmente de una cubierta exterior translúcida de vidrio o plástico, que permite el control de la temperatura, la humedad y otros factores ambientales para favorecer el desarrollo de las plantas. Es decir la estructura propuesta está brindando beneficios tanto a la planta como a los humanos que la consumen. Sin embargo este tipo de estructuras tienen una vida útil relativamente baja de entre 5 a 10 años para la cubierta y 10 a 25 años para la estructura portadora de la cubierta y protectora del recinto.

Estos dos datos no son tan atendidos por los productores para el cultivo, ni en los ingenieros o arquitectos para el diseño, ya que por lo regular los invernaderos reditúan la cantidad invertida en un principio, sin embargo mejorar estos dos datos para la vida útil sería un gran aporte. Además de que la casi nula metodología de diseño existente para el tratamiento de tensoestructuras y aún más aplicadas en invernaderos da a este trabajo otro aporte extra.

El trabajo de esta tesis estará orientado a describir la manera de obtener una metodología a seguir para el análisis de tensoestructuras aplicadas de manera general a cualquier cubierta y después enfocarla en la cubierta de un invernadero que además denote beneficios para el cultivo y prolongue la vida útil de la estructura y la misma cubierta. Pudiendo combinar las condiciones ambientales requeridas para este tipo de lugares con las condiciones estructurales, dando prioridad a las segundas sin dejar de lado como las primeras las afectan.

1.2 Objetivo General

Diseñar una metodología para el diseño de tenso estructuras que sea aplicada en el diseño de la cubierta de un invernadero y que esta cubierta pueda denotar el trabajo estructural de tensión en su cubierta, además de ser capaz de cubrir los requisitos y condiciones para el buen desarrollo del cultivo.

1.3 Objetivos Particulares

1. Revisar y elaborar el estado del arte referente al tema de la aplicación de tensoestructuras con diferentes materiales dando mayor énfasis en aquellas que son de carácter ligero, ya que son las que pueden ser aplicables en invernaderos, consultando factores de consideraciones ambientales para el cultivo, así como consideraciones estructurales para la cubierta.
2. Elaborar una metodología de diseño para tensoestructuras en general, la cual pueda describir cada etapa en el análisis y diseño de una estructura de esta naturaleza explicando y enfocando a la búsqueda del estado tensional de la membrana.
3. Describir y explicar la determinación de la presión de viento y los coeficientes de presión CP para estructuras con naturaleza curva en su geometría.

4. Revisar y elaborar una comparación entre los diferentes códigos de viento en el mundo para un arco simple comparando dichos valores con experimentación en túnel de viento y parte de la metodología propuesta.
5. Elaborar un ejemplo de análisis para una tensoestructura o una cubierta sencilla que ejemplifique la metodología y los pasos descritos; elaborar un segundo ejemplo que especifique las consideraciones y pasos a enfocar en un invernadero.
6. Definir el tipo de invernadero a utilizar conforme a la revisión del estado del arte y al análisis de variables ambientales (mayor exposición solar, ventilación, forma, cantidad de radiación). A partir de ello elaborar el análisis estructural de los valores de presión en la cubierta situando la estructura en el estado de Aguascalientes para la determinación de variables como temperatura, humedad relativa, velocidades de viento y cantidad de luz solar.
7. Evaluar la respuesta de la cubierta con la ayuda de los métodos de análisis descritos en esta tesis poniendo énfasis en la respuesta a la deformación, esfuerzo y temperatura dentro del invernadero, no dejando de lado el cerciorarse de generar las mejores condiciones para el desarrollo de la planta.
8. Evaluar la respuesta de la estructura propuesta en el software pertinente, donde se podrá tener un tratamiento y cálculo de mayor rapidez, todo ello comprendiendo y describiendo las bases del método de densidad de fuerza.
9. Elaborar la redacción de esta tesis y sostenerla a revisiones constantes para cada capítulo o punto por parte de los asesores seleccionados y el consejo académico de la maestría en Ingeniería Civil.
10. Difundir los resultados de este trabajo mediante artículos en revistas de la especialidad o bien congresos pertinentes al área de estudio.

1.4 Alcances

- Los alcances para esta tesis estarán limitados a modelización numérica y análisis estructural de la cubierta de un invernadero aplicando la metodología generada en este trabajo para el análisis de tensoestructuras y posteriormente su aplicación en estructuras de tipo invernadero.
- Se enfocará el problema primordialmente a la parte estructural y justificándolo con la ayuda de software para la modelización numérica, tanto para el análisis no lineal geométrico y el lineal del material a utilizar, donde el geométrico es para la elaboración y variación del área expuesta que deja en función los coeficientes de presiones de viento para la resolución numérica.
- Se asegurará el trabajo estructural de tensoestructura en la cubierta y su afectación en la estructura portadora, denotando la manipulación de variables como condiciones de temperatura y radiación en base al material utilizado en la membrana
- Para la obtención de variables ambientales como horas/luz sobre la estructura, estructurales como velocidad de viento, o bien mixtas como tipo de suelo, se situara el invernadero para su estudio modélico numérico en Aguascalientes.
- Se tendrá que generar una metodología para el tratamiento y análisis estructural de tensoestructuras en general y aplicar los puntos razonables de ella en la cubierta de un invernadero en el rango lineal y con posible tratamiento en él no lineal de acuerdo al material y a la geometría; con ello emitir recomendaciones para el análisis y diseño estructural, análisis e interpretación de deformaciones y esfuerzos.

1.5 Justificación

Una tenso estructura se define como una cubierta ligera a partir de un material textil o plástico tensada a una estructura primaria la cual abre un abanico de posibilidades de diseño y expresión; donde se pueden cubrir grandes áreas con poca cantidad en la estructura de soporte denotando como ventaja la iluminación natural dentro del recinto, por estas razones este tipo de trabajo y concepto estructural puede demostrar un ahorro dentro del material a utilizar en la estructura de un invernadero, lo cual se traduce a un ahorro económico.

Ahora retomando la definición para invernadero por parte de la RAE (2016), donde lo describe como un lugar cerrado, estático y accesible a pie, que se destina a la horticultura, dotado habitualmente de una cubierta exterior translúcida de vidrio o plástico, que permite el control de la temperatura, la humedad y otros factores ambientales para favorecer el desarrollo de las plantas.

Estructuralmente su metodología de diseño es inexistente o casi nula, dando paso a la experiencia del proyectista o quien construye este tipo de estructuras. El generar una metodología de diseño puede denotar grandes beneficios para quienes trabajan por vez primera en el diseño de estas estructuras, aplicando una tensoestructura en la cubierta que sea capaz de cumplir tanto condiciones de la estructura como ambientales del cultivo.

Sin embargo los invernaderos son tipo de estructuras especiales con los beneficios ambientales ya descritos y de control de temperatura los cuales como toda estructura conllevan una vida útil, la cual según Viracocha (2013) se divide en dos, una para la cubierta y otra para la estructura; para la primera oscila de 5 a 10 años, esto a causa de las emisiones de CO₂ que desprende el cultivo que se albergue; y al menos 25 años para la segunda si se trata de que sea metálica.

De los dos valores para vida útil, el de la cubierta es un valor relativamente corto, sin contar las posibles acciones de mantenimiento que se tengan a realizar entre cada cambio de cubierta en la estructura.

Para el segundo valor, a causa de que la cubierta pocas veces tiene un trabajo significativo estructuralmente, solo enfocando la mayoría de las ocasiones su uso en cuestiones referentes de aprovechamiento de la radiación solar y el mantenimiento de una temperatura ideal para el cultivo dentro del recinto.

Por esta razón y como ya se mencionó el poco trabajo estructural de los materiales utilizados como cubierta, los cuales normalmente trabajan en el rango elástico- lineal de sus propiedades, debido a la relativa seguridad de trabajar en este rango en la resistencia de materiales, es necesario proponerse un esqueleto con claros más cortos y secciones de mayor área para contrarrestar las presiones emitidas por el viento, que en el caso de los invernaderos son la carga de mayor consideración de manera conjunta con la carga generada por el cultivo, ésto finalmente arroja en estructuras de mayor precio y complejidad al montar.

Para mejorar el diseño estructural Bernabéu (2007) propone que algunos de los principales factores que definen el potencial de la estructura son:

- Valor expresivo de los materiales estructurales.
- Nivel de legibilidad y eficiencia de la estructura.
- Relaciones posibles entre arquitectura y estructura.

De acuerdo a esta descripción y de acuerdo al primer punto se tiene que elevar el valor expresivo de los materiales para que la estructura sea aún más eficiente se piensa en aplicar una tensoestructura en la cubierta con base de un material que denote mejoras en este punto.

Por otro lado como es mencionado el análisis de cualquier estructura parecida a un cascarón rígido- elástico o bien una membrana a tensión, su problema radica en su complejidad. Para el primer caso la forma curvilínea nos lleva a incorporar métodos y conceptos diferenciales debido a la geometría y con ellos formular las ecuaciones que rigen el desplazamiento. Las ecuaciones diferenciales parciales arrojan resultados que no son lineales, e incluso cuando se aplican diversas aproximaciones, en general, resultan analíticamente intratables.

Un problema similar pasa con el análisis estático de membranas a tensión ya que al modelar las diferentes superficies en el rango del comportamiento no lineal, la tensión en la membrana arroja ecuaciones diferenciales parciales no lineales con al menos dos variables (Lewis, 2003). Por lo que generar una metodología de diseño que pueda controlar estos puntos puede ser de gran beneficio para proyectistas que se inician en este tipo de trabajos.

Orientando el invernadero en una posición de máxima exposición solar (Montero 2012) y aprovechando los beneficios de una tensoestructura aplicada con un material pertinente puede mostrar condiciones ideales en mayor tiempo para la planta que éste albergue y con ello afectar condiciones de riego y lamina de riego que la misma planta requiera, traduciendo también en un posible ahorro de agua.

1.6 Narrativa por capítulos

Capítulo I Introducción

Para el primer capítulo se describe la introducción de esta tesis, se sitúa el tema de estudio en el contexto pertinente del área de investigación en que se puede desarrollar y se justifican las razones de la misma.

A partir de ello se desarrollan los objetivos tanto generales como particulares, así como los alcances para la investigación. Finalmente se desarrolla y menciona la metodología a seguir en el trabajo, tratando de cumplir o comprobar la hipótesis planteada.

Capítulo II Estado del arte (marco contextual)

En el segundo capítulo denota la parte del estado del arte donde se muestra los estudios e investigaciones iniciales que pueden servir para situar el tema de investigación en el contexto estructural que es el que se quiere priorizar. Así como describir las características iniciales de los materiales utilizados comúnmente en

cubiertas de invernaderos y sus propiedades físicas, estructurales y mecánicas de acuerdo a investigaciones consultadas en la literatura previamente elaborada.

Capítulo III Marco conceptual

El tercer capítulo hace referencia a la parte del estado del arte que servirá como guía en el problema de aplicación describiendo los tipos de invernadero existentes de acuerdo a sus ventajas y desventajas para este estudio; el análisis y diseño estructural para el tratamiento de la cubierta que en este caso será una tenso estructura; el posible comportamiento estructural del material de acuerdo a un análisis no lineal; los métodos de tratamiento estructural posibles y la participación del elemento finito además de los software seleccionados para el análisis y la determinación de las acciones sobre una membrana

Capítulo IV Metodología de la investigación

Describe a fondo la metodología a seguir para una tensoestructura en general dentro de la investigación y otros componentes que la rodean.

Capítulo V Aplicación de la metodología de diseño y ejemplo de aplicación a una tenso estructura general

Hace alusión al problema de aplicación y el tratamiento de la membrana como una tenso estructura básica. Describe el diseño estructural y el tratamiento del análisis por viento para la aplicación de las fuerzas que desequilibran al material de la cubierta.

Capítulo VI Metodología aplicada en ejemplo y diseño de la cubierta de un invernadero

Inicialmente compara los diferentes códigos por viento de distintas partes del mundo para el análisis y determinación de los valores de CP para un arco ya que es la estructura que se asemeja a la geometría de un invernadero tipo capilla. Después se hace el diseño y análisis para la geometría de un invernadero y la incidencia del viento sobre su estructura determinando la presión exterior conforme a la velocidad regional impuesta por el manual de diseño por viento de CFE y la

velocidad medida en sitio comparando ambas presiones; luego se trabaja en plantear condiciones ideales para un cultivo de tomate dentro del invernadero y como este afecta para desarrollar presión interior debido a la evapotranspiración que es efecto de la radiación en la cubierta. Finalmente la suma de ambas presiones muestra la presión final en la cubierta. Paralelamente se implementa el material ETFE en la cubierta para reducir los efectos de la presión interior y elevar la vida útil de la estructura y la cubierta, reduciendo también la cantidad de riego dentro del invernadero.

Capítulo VII Conclusiones

Describe las conclusiones del trabajo primero para la parte estructural de la metodología de diseño en una tensoestructura en general. Luego enfoca el problema a la determinación del efecto del viento en cualquier curva sin la necesidad de túnel de viento. Después relaciona dicha metodología con la de diferentes códigos para un arco y finalmente describe como se hace el diseño para un invernadero en función de variables ambientales y de qué manera afectan las variables estructurales.

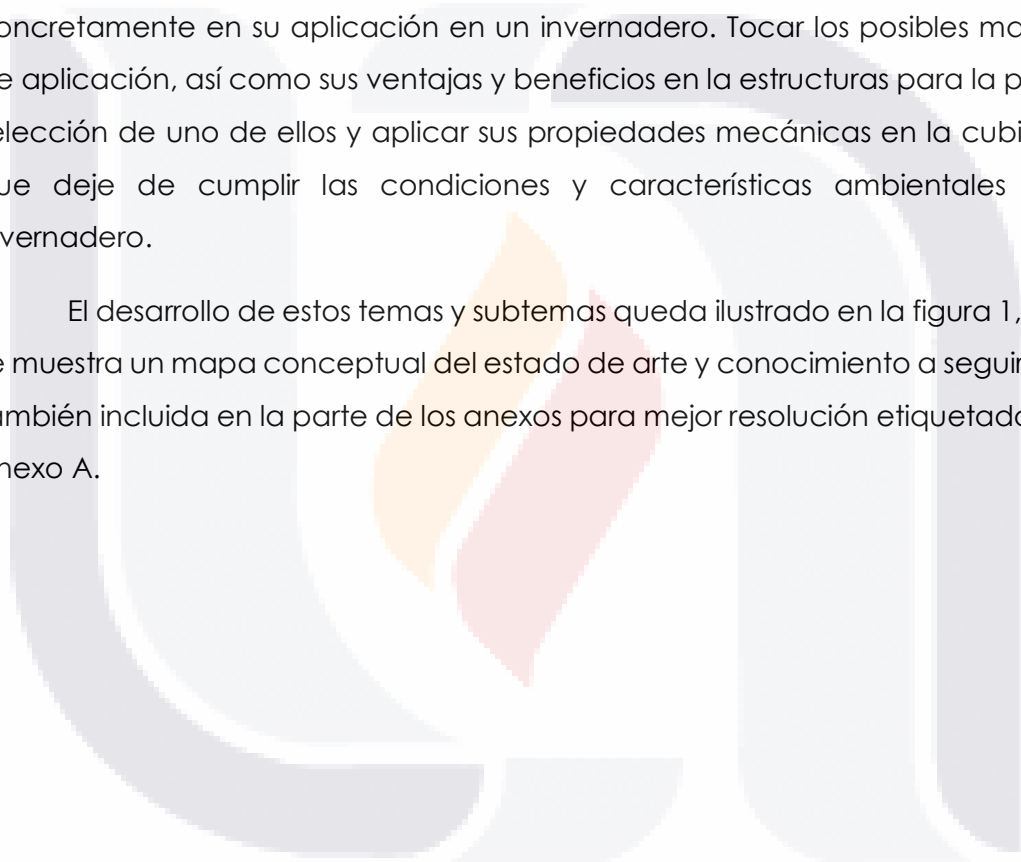
Capítulo VIII Anexos

El ultimo capitulo es en alusión a los diferentes anexos que se mencionan en las partes de los diferentes capítulos de este documento

CAPÍTULO II ESTADO DEL ARTE (MARCO CONTEXTUAL)

Para la delimitación del estado del arte y conocimiento de este trabajo, se ha dividido en dos, marco contextual referente a los antecedentes y definiciones básicas tanto del tipo de estructuras a trabajar en este caso que son invernaderos como del trabajo estructural que se pretende realizar en la cubierta, que es que actué como una tensoestructura. Para la parte de las tensoestructuras empezar desde lo básico y general, hasta lo complejo y específico, hablando de lo segundo concretamente en su aplicación en un invernadero. Tocar los posibles materiales de aplicación, así como sus ventajas y beneficios en la estructuras para la posterior selección de uno de ellos y aplicar sus propiedades mecánicas en la cubierta sin que deje de cumplir las condiciones y características ambientales de un invernadero.

El desarrollo de estos temas y subtemas queda ilustrado en la figura 1, donde se muestra un mapa conceptual del estado de arte y conocimiento a seguir. Figura también incluida en la parte de los anexos para mejor resolución etiquetado como anexo A.



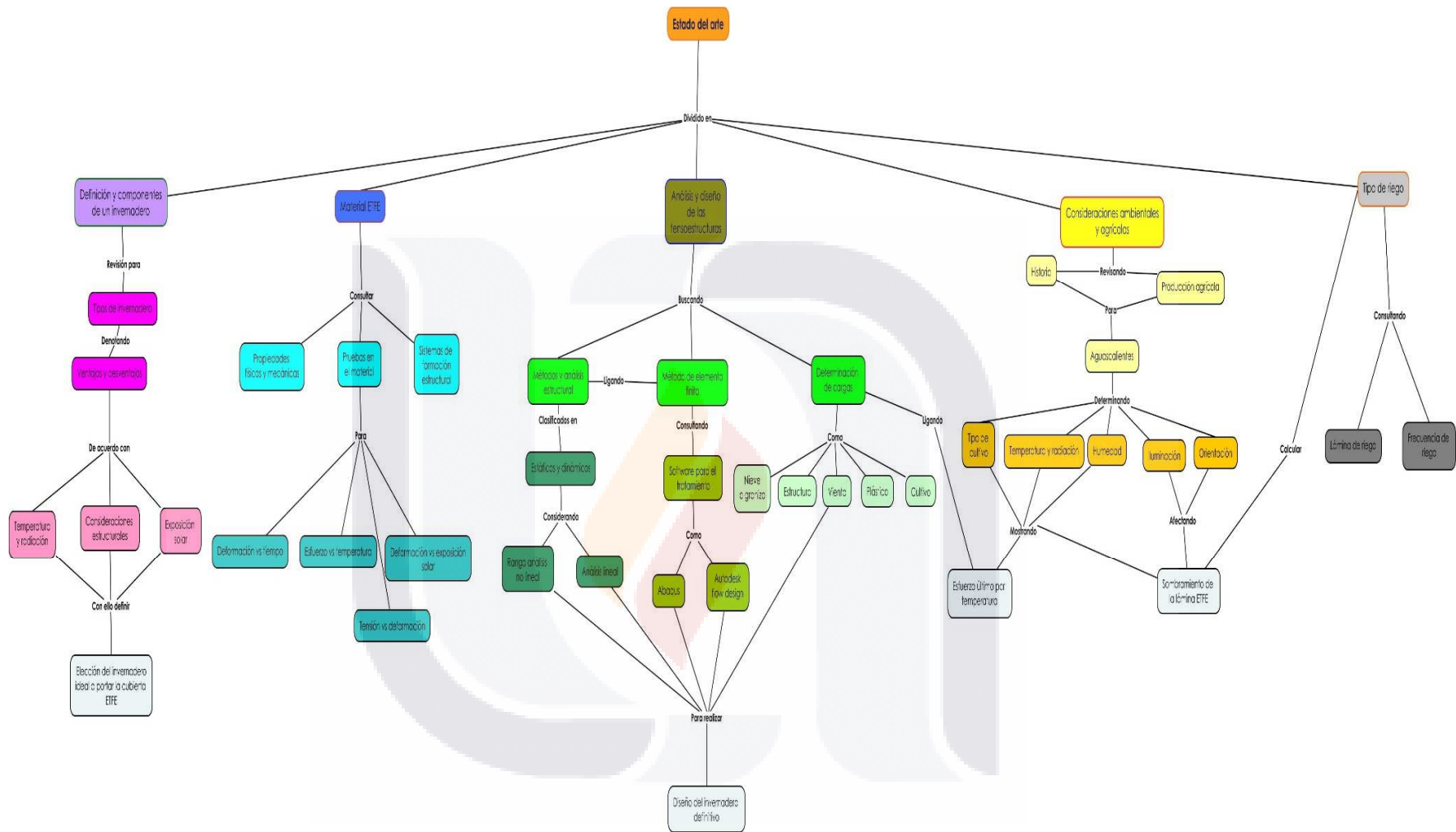


Figura 1: Esquema para el estado del arte (marco contextual y conceptual) y conocimiento definido para la investigación (Anexo A)

2.1 Definición de una tensoestructura

Las tenso estructuras reciben su nombre de acuerdo a su función estructural, que es la de trabajar a esfuerzos y comportamiento a la tensión. Están formadas por tejidos pretensados combinados con redes de cables que se sustentan a base de elementos rígidos, que en conjunto constituyen estructuras ligeras. (Basset, 2016).

En este tipo de sistemas se caracteriza por contar un mínimo de masa logrando un mejor trabajo estructural, sin embargo a diferencia como el concreto o las estructuras metálicas, las tensoestructuras cuentan con poca normativa a seguir para su diseño y concepción. La evolución tanto de herramientas digitales como de materiales a utilizar en este tipo de estructuras ha trasladado a un mayor uso de las mismas en diseños que de manera común son utilizados para cubrir grandes claros con mayor limpieza y menor cantidad de material en la estructura portadora.

Este tipo de estructuras generan un entorno moderno, atractivo y original. Su implementación radica en años recientes pero abre un nuevo mundo de posibilidades tanto para el diseño arquitectónico como para el diseño estructural (fig. 2).

Figura 2: Ejemplo de una tensoestructura



Fuente: www.plataformaarquitectura.cl

2.2 Antecedentes

Aunque el desarrollo de estas membranas es relativamente reciente y tomando gran base de los trabajos de Frei Otto cerca de los años 60 y 70 del siglo pasado (Basset, 2016), el principio de utilizar telas y redes como estructuras se conoce desde hace miles de años. Se puede considerar a los paraguas como los precursores de este tipo de estructuras, ya que eran utilizados tanto por los egipcios como los asirios. Posteriormente los romanos cubrían con toldos de tela sus anfiteatros y con ello protegerlos del sol. Por ejemplo en España se tendían toldos en las calles cerca de hasta el siglo XVI.

Para las personas hasta antes que se diera el sedentarismo en las civilizaciones, este tipo de estructuras eran fundamentales debido a su ligereza (fig. 3), flexibilidad y facilidad de transporte además como su fácil construcción. Su forma siempre han sido de diferentes maneras y con gran variación, desde cónicas, cúpulas y hasta abovedadas, etc.

Figura 3: Estructura de vivienda antigua a base de tensoestructura



Fuente: Pedroza (2015)

Como ya ha sido mencionada la aplicación de las tensoestructuras se produce en 1960, tomando como gran referente a Frei Otto (Songel, 2005).

Figura 4: Frei Otto, considerado padre de las tensoestructuras y uno de sus trabajos aplicados en el estadio olímpico de Múnich



Fuente: wiki.ead.pucv.c

2.3 Clasificación de las tensoestructuras

Retomando el punto 2.1 de acuerdo a la definición de una tenso estructura, la cual puede ser dividida de acuerdo a su geometría o bien de acuerdo al trabajo específico que se necesite de ella, claro partiendo de que todas funcionan a partir de la tensión como ya lo describe su nombre.

2.3.1 Clasificación de acuerdo a la geometría

De acuerdo a su geometría Pedroza (2015) comenta que pueden ser divididas en dos tipos fundamentales, la sinclástica y la anticlástica (figura 5).

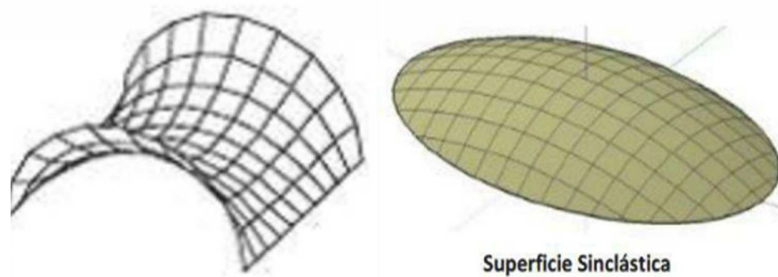


Figura 5: Superficie anticlástica y sinclástica

La primera y menos utilizada (Pedroza, 2015), se define a partir de una curvatura gaussiana positiva, donde algunos casos que denotan este tipo de geometría son las paraboloides circulares, esféricas y elípticas.

Para el caso de las que se hacen llamar anticlásticas, existen más variantes, debido a que la curvatura de la forma puede contar con una curvatura gaussiana negativa, algunos ejemplos de este tipo de superficies son el paraboloide hiperbólico, forma cónica y ondulada, tipo bóveda y en forma de velas.

Por lo regular su forma es la unión y combinación de una o distintas formas, esto debido a que para el área a cubrir la lona debe estar trabajando siempre en tensión para mantener la forma, que es el punto más importante en una estructura de este tipo, lo cual será expuesto en este documento en puntos posteriores.

2.3.2 Clasificación de acuerdo a su trabajo estructural

También conocidas como membranas estructurales, están compuestas por diferentes elementos estructurales los cuales pretenden y funcionan en conjunto.

El material ya sea membrana o textil que se utilice en la tensoestructura, su principal función estructural es la de transmitir las diferentes cargas recibidas como viento (principalmente), lluvia, nieve, etcétera, hacia los elementos estructurales que comúnmente son muros, mástiles, pilares, vigas o cables (los cuales también pueden actuar como refuerzo de la membrana), quienes finalmente las transmiten a los apoyos por medio de los anclajes.

Los elementos básicos, fundamentales e importantes para un buen trabajo estructural de las tensoestructuras son la doble curvatura y la pretensión, la cual está íntimamente ligada al form finding (búsqueda de forma) de la membrana.

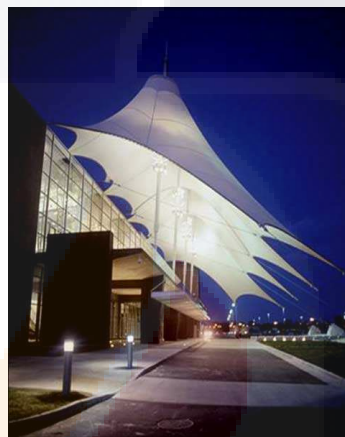
Estructuralmente de acuerdo a sus apoyos o bien el tipo de material que participe, pueden dividirse en 4 grandes grupos (Marroquín, 2012):

- Membranas
- Estructuras neumáticas

- Tensegritis
- Tensairitis

Para las membranas, la misma membrana asume el rol estructural que predomina, aquí los puntos de cuidado son que esté construida de un material capacitado para resistir las tracciones de diseño, radiaciones ultravioleta y condiciones de mitigación y polución ambiental.

Figura 6: Ejemplo de una membrana estructural



Fuente: www.metlica.com.br

En el caso de las estructuras neumáticas el sistema de construcción liviano se basa en las diferencias en las presiones de aire generadas en el interior de una membrana y su interacción con el entorno, lo que termina por producir una tensión que otorgan rigidez y firmeza.

Figura 7: Estructura neumática aplicada en el estadio Allianz Arena



Fuente: wordpress.com

El tensegrity o Tensegritis en castellano, es un concepto que proviene de la contracción de “integrity” y de “tensional” (Torné, 2008), existen muchas definiciones para ello pero una básica es aquella que menciona que: “una estructura Tensegrity es cualquier estructura realizada mediante cables y barras, en la que se impone un estado de pretensado” (Miura, 1999). La definición tiene en cuenta que existen dos tipos de elementos, barras a compresión y cables a tensión donde dichas barras se encuentran completamente aisladas entre sí.

La tensegridad es un principio estructural basado en el empleo de componentes aislados comprimidos que se encuentran dentro de una red tensada continua, de tal modo que los miembros comprimidos (generalmente barras), las cuales no se tocan entre si y están unidos solamente y mediante los componentes a tracción, usualmente cables, quienes son los que delimitan espacialmente dicho sistema (Gómez, 2007). Desde que aparecen se han utilizado básicamente en aplicaciones estáticas donde la longitud de todos los elementos se mantiene constante. En la arquitectura se utilizan en cúpulas, torres y arcos.



Figura 8: Cubierta a base del principio de tensegridad

En el caso de Tensairitis (Bublik, S.A.) el principio está basado en la interacción sinérgica entre una viga tubular neumática y cables de acero enrollados de manera helicoidal a lo largo de la misma, lo que se traduce en un componente estructural muy resistente y ligero a la vez.

La presión es independiente de los elementos constitutivos. Este sistema solo necesita el 1% de la presión del aire. Usualmente se fabrica de PVC, fibra de vidrio-silicona, fibra de PTFE o bien lámina ETFE.

Figura 9: Cubierta en base a tensegritis



Fuente: www.linkedin.com/company/tensairity-solutions

2.3.3 Materiales utilizados comúnmente en las tensoestructuras

Buscando la eficiencia de la estructura, los materiales utilizados han ido cambiando, un ejemplo claro es la implementación de textiles provenientes de materiales orgánicos o bien a base de plásticos, los cuales pueden implementar una gran variedad de tejidos tensados. En gran medida los textiles hechos a base de plásticos son de materiales como el PVC, nylon, politetrafluoretileno, fibra de vidrio con teflón, poliéster y la fibra de carbono (kevlar). El resultado (De Olivera, 2011) puede contener diversas combinaciones de estos materiales ya sea para aumentar resistencia a los esfuerzos o condiciones ante la intemperie.

El diseño de una tensoestructura puede combinar materiales de ayuda o soporte para la membrana o textil; los cables de acero son los que principalmente adoptan este rol debido a su simplicidad. Su principal función radica en actuar como tensores que den refuerzo a la membrana y ello le permita estar conectada al elemento rígido que la soporte.

Usualmente llamadas fibras pueden ser subdivididas en dos grandes grupos (Bublik, S.A), las naturales y las químicas. Para las primeras pueden dividirse en animales, vegetales y minerales; mientras que las segundas en fibras polímero artificiales y sintéticas además de las químicas.

Los materiales de mayor uso para las membranas especialmente de fachada son la fibra de vidrio y el poliéster.

2.3.3.1 Poliéster

Llamado poliéster sintético o plástico (fig. 10), proveniente del petróleo; es el resultado de proceso de polimerización de estireno y otro productos donde se obtiene la fibra (Rainer, 2009).

Figura 10: Poliéster utilizado en membranas



Fuente: www.archiexpo.es

Propiedades físicas del poliéster

No es absorbente, resistente a los ácidos, álcalis y blanqueadores, resistencia a manchas, es 50% cristalino, sensible a procesos termodinámicos, su punto de fusión es de 250 °C.

Ventajas

Eficiente a la humedad, productos químicos y fuerzas mecánicas; con ello proporcionando mayores valores para los módulos de elasticidad y tenacidad.

Desventajas

Son sensibles a los rayos UV y a la hidrólisis; sin embargo esto puede mejorarse al revestirlo con PVC.

2.3.3.2 Fibra de vidrio

Es una fibra mineral elaborada a partir de sílice, cal y magnesita.

Material fibroso obtenido de hacer fluir vidrio fundido y cuando el mismo se solidifica adopta suficiente flexibilidad para ser utilizado como fibra. Su resistencia depende del diámetro de las fibras conforme a su distribución (Bublik, S.A.).

Figura 11: Membrana a partir de fibra de vidrio



Fuente: archiexpo.es

Sus propiedades rondan en:

- Altamente resistente a la tracción
- Muy maleable
- Poseer bajo peso
- Muy buen aislamiento térmico y soportar altas temperaturas
- No productor de gases tóxicos
- Inerte a muchas sustancias
- Sin embargo su resistencia va a depender del diámetro de las fibras debido a su distribución.

2.3.3.3 Clasificaciones alternativas

Otras clasificaciones generales hablan de materiales textiles y posibles divisiones en base a:

- Poliéster + PVC
- Fibras de vidrio + PTFE
- Fibras de vidrio + Silicona
- Fibras de PTFE
- Láminas de ETFE

Figura 12: Cubiertas a partir de ETFE y PTFE respectivamente



Fuente: iasoglobal.com

Tabla 1: Materiales utilizados para cubiertas ligeras

Tejido	Poliéster	Poliéster	Poliéster	Fibra de Vidrio	Fibra de Vidrio	PTFE	ETFE
Revestimiento	PVC	PVC	PVC	PTFE	Silicona	PTFE	
Capa Acabado	Acrílico	PVDF	Tedlar	FEP			
Expectativa Vida (Años)	10	15	15	30	20	30	30
Resistencia Envejecimiento	Aceptable	Buena	Buena	Excelente	Muy Buena	Excelente	Excelente
Grado Auto limpieza	Pobre	Aceptable	Buena	Excelente	Aceptable	Excelente	Excelente
Trasparencia	Buena	Buena	Muy buena	Muy buena	Excelente	Excelente	Excelente
Resistencia al fuego	Buena	Buena	Muy buena	Muy buena	Excelente	Muy buena	Buena
Plegabilidad	Muy buena	Buena	Aceptable	Pobre	Aceptable	Excelente	Pobre
Costo-Ejecución	Muy baja	Baja	Baja	Alta	Media	Muy alta	Muy alta

Fuente Mendoza (2017)

2.4 Capas en una membrana

Blum et. Al (2009) definen que una membrana estructural puede ser subdividida en capa de protección principal, exterior y finalmente de tratamiento de superficie para un posible sellado o impresión.

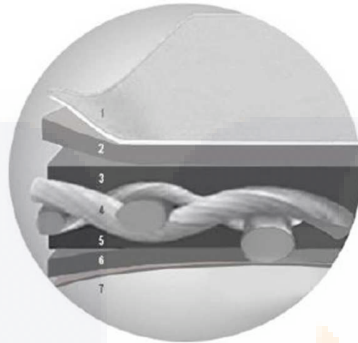


Figura 13: Capas en una membrana

Fuente: Blum (2009)

CAPAS EN UNA MEMBRANA

1. Superficie de sellado
2. Segundo recubrimiento de la capa superior
3. Primer recubrimiento de la capa de imprimación
- 4 Tela
5. Primera capa (capa de imprimación)
6. Segunda capa (capa superior)
7. Punto final

La primera consiste a la función principal y está protegida a su vez por una fina capa químicamente diferenciada.

La capa exterior tiene mayores variantes ya que es acorde a la naturaleza química del revestimiento y el sellado final. Los materiales de mayor uso son los tejidos poliéster, PVC, fibra de vidrio con revestimiento PTFE o silicona, tejido PTFE revestido con PTFE, láminas ETFE solas o con revestimiento PTFE, aramida y polímeros de cristal líquido basados en poliéster aromático LCP.

Las capas superficie son compuesta de materiales poliméricos como acrílicos, fluoruro de polivinidelo (PVDF), fluoruro de polivinilo (PVF) para tejidos de poliéster revestidos de PVC y fluoretilenopropileno (FEP) para tejidos de fibra de vidrio revestidos con PTFE.

2.5 Idealización y trabajo estructural de una tensoestructura

El principal comportamiento de una velaría, como coloquialmente se le llama a una tensoestructura, se basa en la tensión inducida por los materiales de anclaje y

mástiles. Comúnmente las estructuras convencionales su comportamiento se basa en el peso y la rigidez (Castro, 2010), sin embargo en este tipo de estructuras el peso y la rigidez es mucho menor en el área a distribuir las cargas, ante esto y en base a la definición de rigidez, la cual es la capacidad de un cuerpo a no deformarse, que se determina a partir del cociente de la fuerza entre la deformación; para el caso de las tensoestructuras al ser susceptibles a grandes deformaciones, su rigidez se ve directamente disminuida y con el propósito de mitigar un poco estas deformaciones o bien incrementar la rigidez del sistema y de los elementos que componen el mismo, se realizan los pretensados de los materiales para aportar equilibrio al momento de la aplicación de las cargas.

El comportamiento puede ser dividido en tres etapas (Santoso, 2004):

- 1) La membrana y estructuras auxiliares como los cables pasan del reposo a desarrollar esfuerzos
- 2) Inician las deformaciones debido a las cargas muertas
- 3) Etapa donde se aplican las cargas vivas y dinámicas

A partir de estas etapas se crea un comportamiento no lineal estructural de los elementos lo cual comúnmente invalida las soluciones analíticas y hace necesaria la resolución con sistemas de análisis computacionales con resultados muy próximos a las deformaciones reales.

2.5.1 Relación tensión, esfuerzo, deformación y geometría

Como se ha explicado en puntos anteriores la rigidez del sistema queda relativamente condicionada en gran parte a la tensión que se aplique en el sistema (Linkwitz, 1971), el cual para mitigar grandes deformaciones es necesario que sea expuesto a un pretensado del material (Sánchez, 2005).

La tensión en el sistema la podemos dividir en dos, una provocada por la mencionada pretensión y la segunda debido a los agentes externos que provocan esfuerzos en la membrana o superficie según sea el caso. Combinadas darán la forma final del sistema.

$$T_{total} = T1 + T2$$

Donde

Ttotal es la tensión total aplicada en el sistema

T1 = Tensión efecto de las cargas externas en el sistema

T2 = Pretensión aplicada en el sistema

Surge la pregunta ¿Por qué darán la forma final en el sistema a analizar? Es sencillo explicar esto, ya que la tercer parte del sistema matemático $F = KD$ aunado al análisis que sería la deformación, se trata de desplazamientos en el sistema, al aplicar una fuerza, será propicio conocer los desplazamientos y con ello controlar la forma de la geometría, es por ello que el pretensado se convierte en un paso sumamente importante.

Recapitulando la geometría es consecuencia de la deformación provocada por los dos agentes de tensión de los cuales uno de ellos es controlable y es llamado pretensión del sistema. La suma de las dos tensiones al igual que el esfuerzo provocado en el material que se aplican dicta la tensión de diseño y la tensión de resistencia última respectivamente.

Está claro que al aumentar la tensión, el esfuerzo también crecerá, por lo que este mismo dictará en buena parte la selección del material a utilizar en la membrana que pueda resistir la tensión aplicada en un rango razonable para su análisis, ya sea en el rango elástico lineal o no lineal.

2.6 Criterios de análisis y diseño de una tensoestructura

Como se ha tocado, la búsqueda de forma se hace el paso de mayor peso en el análisis de una tensoestructura, también se le conoce como formfinding, esto debido a que la forma ya toma en cuenta las cargas previamente aplicadas, es decir la forma es consecuencia de las deformaciones por las cargas aplicadas y no como usualmente se trabaja en la mayoría de las estructuras donde la

geometría espacial influye en parte para la forma que se prepara para soportar las cargas aplicadas donde es claro que puede variarse la sección debido a las cargas pero no depende en su totalidad de ellas como el caso de una tensoestructura.

De acuerdo al libro de Marroquín (2012) define unos posibles pasos a seguir para el diseño de una tensoestructura sencilla, los cuales se desprenden de la siguiente manera:

- 1) **Concepción espacial:** Definir la especialidad de la tensoestructura y sus requerimientos funcionales, con ello hacer la búsqueda de forma inicial formfinding.
- 2) **Calculo estructural:** Dimensionar la estructura de acuerdo a las normas pertinentes
- 3) **Acondicionamiento ambiental:** Adaptación al clima de la región, evaluación de agua de lluvias, estudio de viento y estudio acústico, iluminación y asolamiento requerido.
- 4) **Patrones de membrana:** Diseño de las plantillas para la membrana o fibra textil y el diseño de los bordes.
- 5) **Diseño de accesorios:** Diseño del sistema de fijación y el desarrollo de uniones
- 6) **Desarrollo y fabricación:** Tanto de la estructura metálica portadora si es el caso como el de la membrana, tomando en cuenta en la segunda el corte y tamaño de las plantillas y el sellado de la membrana.
- 7) **Instalación y montaje:** Traslado de los componentes e instalación y montaje de la cubierta.

2.7 Relación cubierta-funcionalidad

Las cubiertas ligeras son aquellas que su concepción es en base a materiales sujetos a tensión, como es el principio fundamental de la generalidad de este tipo de estructuras, las tensoestructuras. En una cubierta para su buena funcionalidad se cuida que sea ligera, impermeable, que produzca y contenga buena iluminación

diurna y si es el caso también nocturna (figura 14), sostenga aislamiento térmico y acústico, sea de gran comportamiento ante agentes como el fuego y el viento.

Figura 14: Cubierta en el proyecto Edén en Reino Unido, tanto en iluminación natural como nocturna



Fuente: espores.org

Al ser una subdivisión de las tensoestructuras pueden ser concebidas a partir de membranas textiles hasta particularidades de fibra de vidrio.

2.7.1 Tipos de cubiertas ligeras

Desprendiéndose de la clasificación de las tensoestructura acorde a su forma donde se dividen en Sinclástica y Anticlástica. Las primeras son conocidas por su curvatura Gaussiana positiva, teniendo menor número de variantes y siendo entre ellas las más conocidas las esferas y globos. Por su parte las segundas (anticlásticas) cuentan con varias configuraciones geométricas que se definen de acuerdo a la estructura portadora, la cual define en gran medida la forma de la membrana.

Dichas configuraciones pueden ser divididas en (Carranza, 2011):

- **Soportada por mástiles:** Los mástiles soportan las cargas de compresión, lo cual se convierte en gran ayuda en membranas con amplios claros ya que los cables que ayudan al sistema de la membrana parten desde el mástil y no condicionan a apoyos interiores. Para ello se consideran tres tipos importantes de esta división siendo mástiles articulados en la base

estabilizados con tensores de cable o bien con la membrana, y los mástiles empotrados.

Figura 15: Cubierta a partir de mástiles



Fuente: velaria.mx

- **Soportadas por arcos:** En este caso la cubierta se logra colocando debajo de la membrana algunos arcos que logren tensarla, los cuales deben ser rígidos y así estabilizar el sistema.



Figura 16: Cubierta soportada por arcos

- **Apoyada en puntos:** Se pueden lograr a partir de diferentes variaciones como suspender el mástil en cables

Figura 17: Cubierta apoyada en puntos en estadio olímpico de Múnich



Fuente: timberplan.es

- **Tipo bóveda:** Esta forma de cubiertas se diferencia por crear la doble curvatura a partir de cables en los dos sentidos. La membrana va por encima de ellos y la forma se logra a partir de tensar los cables

Figura 18: Cubierta de un lucernario tipo bóveda



Fuente: lucernarios.es

- **Cubiertas planas:** Aquellas que son auto portantes de un eje rectilíneo constituidas por yuxtaposición de las chapas con sobre posición lateral. En este tipo la rigidez está dada por la forma ondulada de la sección y se usa para salvar claros no muy grandes.

2.7.1.1 Elementos que conforman el trabajo estructural

Los elementos que comúnmente conforman el sistema estructural de una cubierta pueden ser numerados como (Construmática, 2017):

- Correas
- Vigas portantes
- Pilares estructurales y de cierre
- Anclajes
- Arrostramiento
- Cubierta
- Lucernario
- Canales
- Aislamiento térmico
- Falso techo

2.7.2 Cubiertas especiales

Cubiertas telescópicas

Son cubiertas formadas de manera sucesiva por piezas longitudinales que pueden ensamblarse cada una con la anterior y la posterior. Dichas cubiertas permiten cambiar su longitud, ya sea contraerse o desplegarse según lo desee el usuario, su principal uso es de ayuda a la climatización de albercas (figura 19).

Figura 19: Ejemplo de una cubierta telescópica en una alberca



Fuente: www.archiexpo.es

Deben cumplir un fácil funcionamiento y ser fabricadas en base a materiales probados para captar y conservar la energía solar diurna, aumentando entre 8 a 10 °C la temperatura del agua y del ambiente sin necesidad de climatización eléctrica.

Comúnmente como material utilizan el metacrilato compacto o colado, el cual brinda una resistencia 250 veces mayor a los cristales. Al crear un control del ambiente este tipo de cubiertas reditúan beneficios económicos en el ahorro de gas para mantener la temperatura en piscinas además de ofrecer mayor seguridad en el espacio.

Cubierta flotante

Las cubiertas flotantes se basan en láminas de materiales plásticos como el polietileno o el poliéster (Construmática, 2017), las cuales se instalan sobre primordialmente cultivos a proteger. También son llamadas mantas térmicas las cuales sirven para crear, contener y mantener un clima apropiado para el tratamiento de los cultivos reduciendo necesidades de tratamientos fitosanitarios.

Figura 20: Cubierta flotante agrícola aplicada en cultivo



Fuente: www.horticulturalog.com

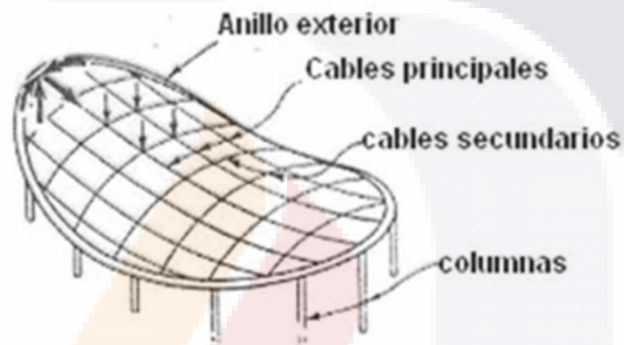
Consiste en la cubrición del lugar con láminas de plástico una vez que se ha realizado la siembra o plantación del cultivo, instaladas de tal forma que cuando la planta vaya creciendo, la cubierta también se va elevando. Su función es muy

parecida a la de una cubierta de invernadero, con la gran diferencia radicando en la rigidez y estabilidad de la estructura portadora de la capa.

Cubiertas colgantes

Concebidas a base de cables catenarios y suspendidas con la función de cubrir grandes luces sin componentes estructurales internos a la vista (Moya, S.A). A través de los cables de acero quedan suspendidas entre las juntas de compresión. Los cables trabajan a tensión con una flecha variable (figura 21).

Figura 21: Cubierta ligera con cables secundarios



Fuente: Moya et. Al (S.A.)

Dicha red de cables se reviste de una capa delgada de concreto o una lámina de plástico flexible extendida sobre el tramado. Para contrarrestar los efectos del viento se instalan de forma vertical refuerzos entre los cables superiores e inferiores para lograr la rigidez requerida.

Figura 22: Cubierta colgante suspendida a base de cables y recubrimiento plástico

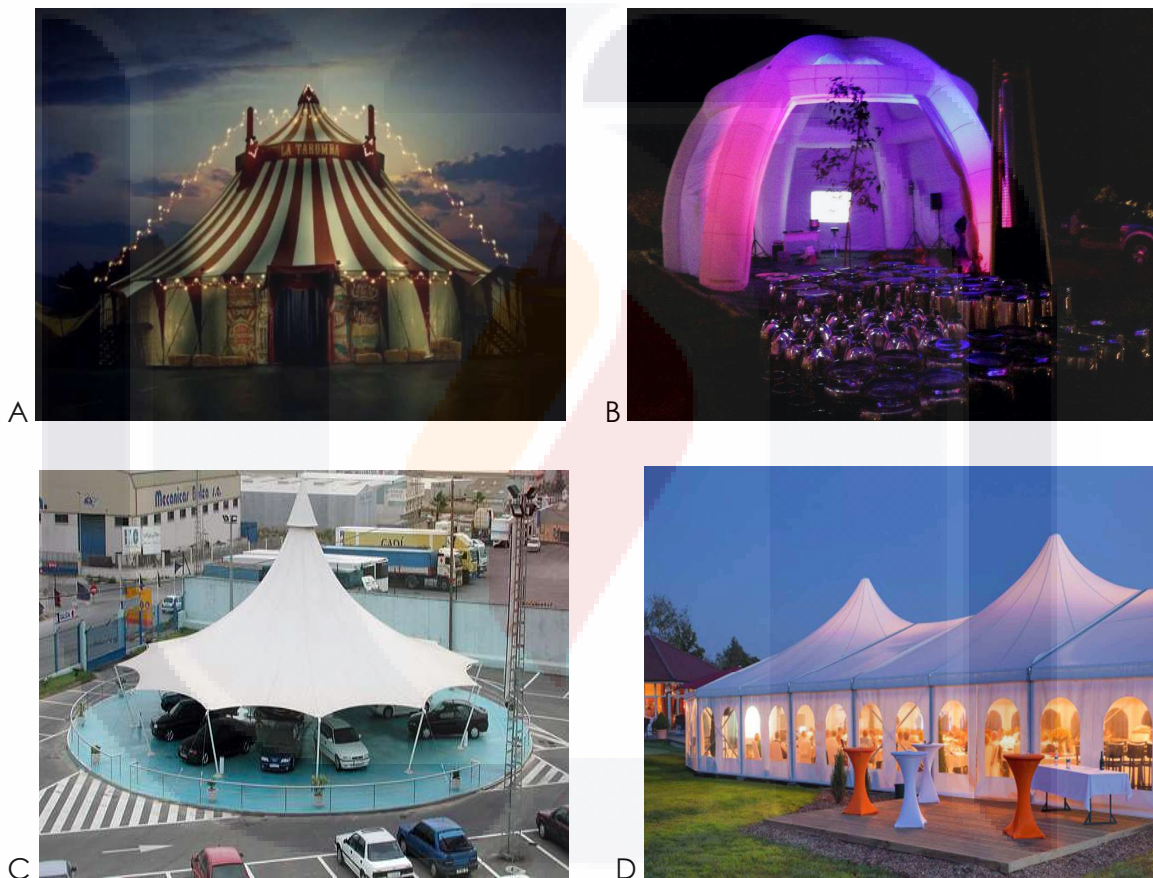


Fuente: <http://articulosdeestructura.blogspot.mx>

Cubiertas espaciales temporales

Dentro de este rubro existen buena cantidad de ejemplos de cubiertas que solo se requiere su uso en un periodo de tiempo corto donde no se necesita una estructura fija sino una flexible, de fácil instalación y montaje rápido. Solo se hace mención y ejemplos de ellas en las siguientes figuras.

Figura 23 : a)Carpa estructural para un circo, b) Cubierta inflable, c) Pagoda tensada, d) Cubierta estructural temporal para eventos



2.8 Definición de Invernadero

Gutiérrez (2012) define que un invernadero (o invernáculo), es una construcción de vidrio o plástico en la que se cultivan plantas, a mayor temperatura que en el exterior. La cual aprovecha el efecto producido por la radiación solar que, al atravesar un vidrio u otro material traslúcido, calienta los objetos que hay adentro;

estos, a su vez, emiten radiación infrarroja, con una longitud de onda mayor que la solar, por lo cual no pueden atravesar los vidrios a su regreso quedando atrapados y produciendo el calentamiento.

Por lo que con esta aproximación inicial queda definido que en un invernadero uno de los grandes factores a cuidar es la temperatura, la cual deberá ser mayor que la del exterior.

Figura 24: Cubierta y estructura para un invernadero



Fuente: agrodalimentando.com

2.9 Funciones de un Invernadero

Fernández (2014) describe que el estudio de las construcciones de tipo invernadero, desde un punto de vista ingenieril, se enfoca principalmente en dos puntos:

- Estructural
- Instalaciones y cuidado de la climatización

Sin embargo la mayor parte de los invernaderos se construyen sin proyectos de construcción, basados principalmente en la experiencia que van adquiriendo las empresas constructoras y proyectistas a lo largo de los años. Establecen unas dimensiones fijas para su cálculo y añaden y eliminan túneles o pórticos según sus necesidades. Debido a la naturaleza de este trabajo se agrega y divide las funciones y naturaleza de un invernadero en tres (estructural, ambiental y social) tratando de denotar la parte estructural, la cual es la de principal interés en el

estudio, tomando en cuenta que todas afectan de algún modo y son una unidad de estudio.

2.9.1 Naturaleza estructural

La naturaleza estructural antes de un análisis preliminar de fuerzas es la geometría y un invernadero puede clasificarse según su geometría y atendiendo a determinadas características, formas o tipos de la siguiente manera (Duarte, 2007):

- a) Planos o tipo parral
- b) Tipo raspa y amagado
- c) Asimétricos
- d) Capilla (a dos aguas, a un agua)
- e) Doble capilla
- f) Tipo túnel o semicilíndrico
- g) De cristal o tipo venlo

Otra manera de clasificarlos según su naturaleza estructural es a base de su cobertura y dos ámbitos de la misma, cobertura rígida y cobertura de plástico (Fernández, 2014).

Invernaderos con cobertura rígida (vidrio o plástico), la cual está en función del ancho de luz:

- Invernaderos con luz > 12 m
- Invernaderos con anchura media de luz (entre 6.40 y 12 m)
- Invernaderos tipo Venlo (luz <6.4 m). Modelo más popular dentro de los invernaderos de cristal.

Invernaderos con cobertura de filme plástico, la cual es de acuerdo a su conformación estructural y perfil externo:

1) Parral

La cubierta presenta poca o nula inclinación y puede ser plana, simétrica o asimétrica. No se aconseja usarla en zonas lluviosas.

2) Cubierta a un agua. Diente de sierra.

Unión en batería de naves "un agua", cuya cubierta está formada por planos inclinados de 30° y cuyo pie más alto tiene contacto con el pie más bajo de la siguiente nave.

3) Cubierta a dos aguas, de forma simétrica o asimétrica.

Con pendiente superior al 10%. Son similares a invernaderos de cristal o plástico rígido, pero con menor dimensión, al presentar poca altura, ancho luz menor a 10 m y poca pendiente en cubierta.

4) Cubierta en forma de arco, tipo túnel o multitudes.

Los túneles tienen la estructura totalmente curva desde su fijación en el suelo hasta la cumbre. El invernadero multitudes consiste en la unión de distintos túneles.

Por otro lado Alva (2011) los clasifica estructuralmente en dos clases A y B. Donde la A es para estructuras de invernaderos unitarios o en batería y la B para estructuras Dostipo Casa-Sombra y macro túneles.

De acuerdo a sus elementos constructivos también los clasifica por su perfil externo, por su fijación o movilidad, por el material de cubierta y según el material de la estructura.

Perfil externo

- Parral "plano".
- Capilla (Simple a dos aguas o a un agua, doble)
- Diente de sierra (Varios dientes y un diente)
- Parral "raspa y amagado" (Simétrico y asimétrico)
- Túnel o semicilíndrico
- Semielíptico

- Asimétrico

Material en su cubierta

- Lámina flexible (Polietileno, copolímero, policloruro de vinilo y polipropileno)
- Placa semirígida (Policarbonato, poliéster, policloruro de vinilo, polimetacrilato de vinilo)
- Rígido (Cristal)

Material de la estructura

- Madera
- Palos y alambre (parral)
- Metálica (Perfil en ángulo, tubo circular o cuadrangular, de hierro redondo o cabilla)
- De concreto u hormigón

2.9.2 Naturaleza ambiental

La naturaleza ambiental de un invernadero como ya se ha descrito es la de aprovechar el efecto producido por la radiación solar y a partir de ella emitir la radiación infrarroja, la cual sostiene una longitud de onda mayor que la solar quedando atrapada y produciendo el calentamiento, el cual ayuda al cultivo a obtener mejores condiciones para desarrollar la germinación, respiración, transpiración y fotosíntesis.

Además de proteger al cultivo de lluvias, fuertes vientos, animales plagas y enfermedades. Lo cual también facilita un mayor y más eficiente control sobre la temperatura de las plantas y la cantidad de luz requerida.

En una región donde son comunes las nevadas, los techos están diseñados y preparados para soportar pesadas cargas por la acumulación de nieve, mientras que en climas más cálidos permiten al máximo la penetración de la radiación solar y la conservación del calor dentro de él (Gutiérrez, 2012).

2.9.3 Función agrícola y social

La función social de un invernadero puede radicar en al aumentar la producción de cultivos para satisfacer la demanda de la población además de dar un producto con mayor higiene y calidad; también elevando los ingresos del agricultor reeditando mayor ganancia y cuidándolo de posibles desastres naturales como sequias, heladas o lluvia excesiva sobre su producción. De manera agrícola puede reeditar como ya se dijo un mayor cuidado y tratamiento para el cultivo propiciando las condiciones más cercanas a las óptimas que el mismo pueda requerir.

2.10 Problemas recurrentes en la estructura de un invernadero

Podemos dividir los problemas recurrentes en este tipo de estructuras como 4:

- La mayor parte de los invernaderos se construyen sin proyectos de construcción, basados principalmente en la experiencia de quien los proyecta y construye.
- La casi nula o poca normativa a seguir para este tipo de estructuras; la poca que existe no se obtiene gratuita, debe pagarse por ella.
- La pequeña vida útil de la cubierta como de la estructura debido a los gases que desprende la planta.
- La interacción cultivo-hombre que puede afectar la temperatura dentro del recinto y con esto modificar parámetros estructurales que tienen relación con la temperatura.

CAPÍTULO III MARCO CONCEPTUAL

3.1 Tipos de invernaderos (afectación de la estructura)

La tipología de los invernaderos en una clasificación generalizada como la realizada en puntos previos de acuerdo a su naturaleza ambiental, agrícola, social y estructural donde esta última es la que es pertinente a estudiar con mayor enfoque para el diseño de una cubierta. Conforme a la naturaleza estructural en búsqueda de la concepción de un invernadero con mayores beneficios para el cultivo puede ser dividida de acuerdo a su estructura o de acuerdo a su geometría, donde ambas conllevan en menor o mayor porcentaje el beneficio de la planta, que sin duda es la función principal y primordial de la instauración de este tipo de estructuras.

Una manera de conformar en gran medida la estructura es con relación a la cubierta, la cual puede ser rígida (primordialmente de vidrio) o plástica, siendo el segundo caso el de énfasis para que pueda ser aplicable el principio de las tensoestructuras y el trabajo estructural de las mismas (la tensión).

Considerando primordialmente los invernaderos a base de cubierta plástica, la concepción estructural del mismo debe tener en cuenta algunos aspectos como el diseño de la construcción, la composición química y las propiedades de la película prevista para la cubierta, la sujeción de la cubierta, el tensado sobre el material y la cantidad de ventilación con la que puede ser participe la estructura.

El diseño de la estructura puede ayudar a resolver dichas consideraciones aparte de regularizar la temperatura diurna y nocturna.

3.1.1 Consideraciones a tomar en cuenta en la estructura de acuerdo a la cubierta

Los invernaderos de cubierta plástica deben de considerar las siguientes ventajas y desventajas (Baudoin, 2012):

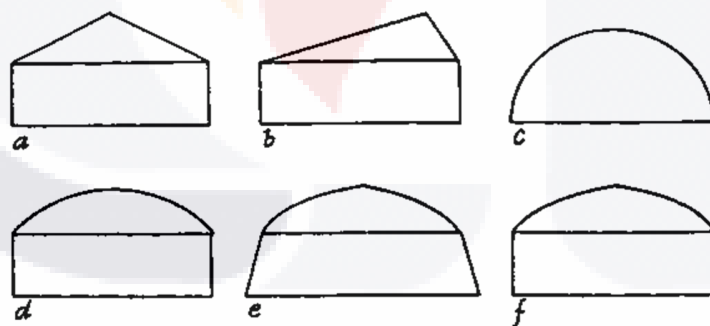
- Bajo costo en la concepción y el mantenimiento

- Mayor resistencia ante el viento
- Mano de obra menor para posibles cambios de la cubierta
- Eliminación del daño en la lámina debido a la acción del viento
- Uso de elementos sencillos para la tensión
- Ventilación efectiva
- Eliminación del contacto entre la lámina y la parte de la estructura que es calentada por el sol.
- Altura suficiente para las paredes laterales
- Poca cantidad de elementos estructurales dentro del invernadero para permitir el desarrollo del cultivo

3.1.2 Formas a utilizar en el techo de un invernadero

Baudoin (2002) define que de acuerdo a las formas a utilizar con regularidad (figura n) son los techos planos simétricos a dos aguas (a), planos asimétricos (b), arco redondeado sin (c) o con paredes verticales (d), arco en punta con paredes laterales en pendiente (e) y arco en punta con paredes verticales laterales (f).

Figura 25: Posibles configuraciones de invernaderos para techos con curvatura



Fuente: Baudoin (2002)

El arco se hace presente en casi todas las configuraciones debido a que es más fácil tensar las películas de plástico en techos con formas curvas a diferencia de aquellos que sostienen una forma plana.

3.2 Materiales utilizados en la estructura de invernaderos

Comúnmente como ya se ha mencionado los materiales para estructuras tensadas radican en su mayoría en subdivisiones y variantes de materiales textiles o bien a partir de la fibra de vidrio, sin embargo en el caso de invernaderos las cubiertas de los mismos sostienen otro tipo de análisis para la elección del material a utilizar.

Debido a que la planta demanda una cierta capacidad de radiación solar para efectuar sus procesos de alimentación y fotosíntesis, los materiales a base de textiles son poco redituables (aunque son utilizados materiales como los agro textiles) ya que su acabado no permite de gran manera la transparencia necesaria para que pase la luz que necesita la planta, por lo que los plásticos y variantes de la fibra de vidrio en función de esta características se convierten en una gran alternativa de uso. Las propiedades que deben ser puestas en énfasis y atención para la selección del material son físicas, ópticas y térmicas, claro todas estas en función del cultivo seleccionado, dichos agentes pueden ser resumidos en (Matallana, 1995):

- 1) Propiedades ópticas, térmicas y mecánicas del material
- 2) De acuerdo al anclaje en la estructura portadora de la cubierta
- 3) Respuesta agronómica del material en cuanto a la producción y calidad

Estructuralmente la elección del material estará encaminada a las características mecánicas del material que bien puede ser recubierto por otras fibras y así elevar la resistencia a la tensión y los esfuerzos provenientes de acuerdo a los cortantes y fuerzas generadas tanto de las cargas externas como del comportamiento del esqueleto de la estructura, sin embargo la elección definitiva será un variante de la combinación de ambas partes, estructural y ambiental.

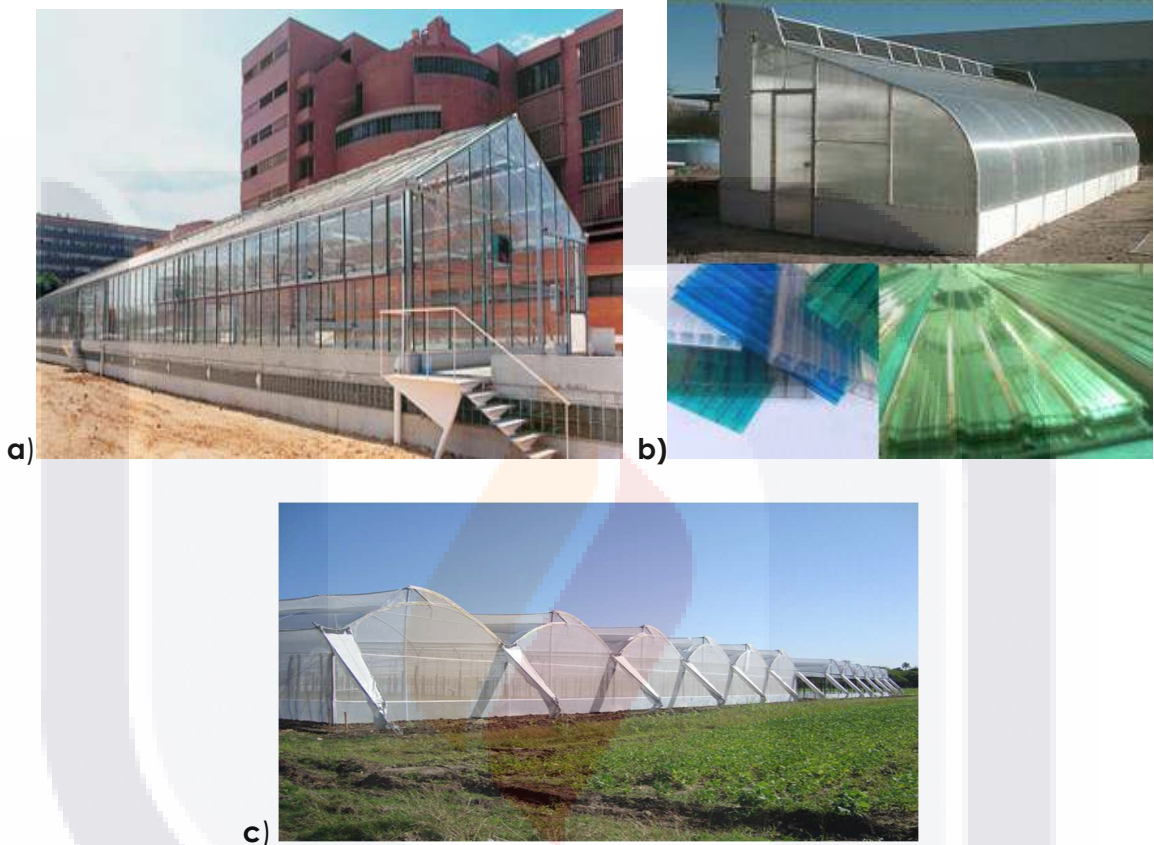
3.2.1 Tipos de materiales para la cubierta

Los materiales de cubierta pueden ser clasificados en tres grupos:

- Vidrio impreso (primero en utilizarse hasta que fueron empleados los materiales plásticos).

- Plásticos rígidos
- Plásticos flexibles

Figura 26: a) Invernadero con cubierta de vidrio, b) cubierta de plástico rígido y c) cubierta en base a plástico flexible



La importancia del material sin duda para la cubierta es directamente proporcional a modificar el agente del clima a donde se dispone implantar un invernadero (Espí, 2012).

De estas divisiones pueden elaborarse pequeñas descripciones y variantes de los mismos de acuerdo a sus características y uso común (Meléndez, 2015):

- **Acrílico:** Con la mayor resistencia a la intemperie, permite una gran transmisión de luz cercana al 90% y no se ve afectado debido a los rayos UV.
- **Vidrio:** Tiene dos variantes como recocido o templado (donde aumenta su fuerza) y ofrece una trasmisión de luz entre 77 a 88%.

- **Polycarbonato:** Es aquel que ofrece la mayor fuerza de impacto y de todas las cubiertas plásticas es la de mayor resistencia ante el fuego. Está disponible en paneles corrugados o en paredes múltiples. Su transmisión de luz es entre el 80 y 90%.
- **Películas de polietileno:** Son un plástico con alta flexibilidad, su variabilidad radica en su fabricación mejorando sus características ante la intemperie. Existen dos tipos, el primero un material duro y fuerte de alta densidad, el segundo de menor densidad y fusión. Entre todas las cubiertas plásticas es la de menor costo.

También como en cualquier campo de estudio se han desarrollado nuevas tecnologías y sistemas de implantación para materiales en cubiertas de invernadero, solo se hace mención de ellos si es de interés del lector:

- Filmes antivirus y fotodegradables
- Plásticos fotoselectivos
- Filmes antibotrytis
- Plásticos multicapa
- Plásticos anti goteo
- Películas biodegradables

3.3 Criterios de análisis y diseño estructural para cubiertas

Definir un criterio único para el análisis de una tensoestructura es algo no universal, ya que el buen diseño depende de las condiciones a las que esta citada la estructura. Sin embargo pueden existir una serie de puntos que pueden ser comunes para cualquier cubierta, sin importar el fin y propósito que ella tenga.

Sin duda en este caso el análisis estructural eleva su dificultad aunque puede ofrecer otros beneficios que en otras estructuras no se presenta que es tener casi el 100% de control de ella.

De entre un análisis estático y uno dinámico en una tensoestructura, parece ser de mayor razonabilidad el estático ya que en él se tiene mayor control de la fuerzas

externas que influyen en la cubierta, aunque se denote las deformaciones y movimiento de la estructura como una parte importante que es de mayor facilidad y rapidez conocer por un análisis estático. El análisis dinámico debido a la gran cantidad de iteraciones que puede contener el diseño de una tensoestructura además de la no tan verdadera manera de considerar la concentración de las masas (las cuales son pequeñas debido al peso de los materiales que se utilizan comúnmente), con la ayuda de herramientas computacionales es evidente que un análisis dinámico puede llevarse a cabo, sin embargo debido a la geometría de la estructura debería ser separada en una cierta y posible partición finita de muchos planos en la componente Z para poder concentrar la masa y así obtener la frecuencia, además de la malla vista desde la planta, la cual habla del comportamiento de los desplazamientos verticales, debido al difícil control y ambigüedad de datos verdaderos al controlar ambas mallas, puede no despreciarse la masa pero si darle un menor peso en el análisis, poniendo como gran componente el análisis de las deformaciones impuestas por el pretensado y las cargas en el sistema. El análisis dinámico sin ordenadores computacionales es de dificultad alta elaborarlo, aunque con pruebas de modelos en un túnel de viento puede ser efectuado en base a sensores que midan los desplazamientos en los puntos previamente establecidos donde una doble integral podrá denotar aceleraciones, con ello conocer la envolvente de los picos mediante distintos métodos (transformada rápida de Fourier por ejemplo) y así con adecuaciones conocer la frecuencia de la estructura.

3.3.1 Fases del análisis y diseño a cualquier cubierta

Partiendo en el supuesto e idealización de que una tensoestructura o una cubierta actúan estructuralmente de manera cercana a un cable se puede hablar de una cierta cantidad de pasos a seguir para su análisis, donde la profundidad y estilo de resolución dependerán del proyectista.

A partir de tener una idea inicial del área y espacio a cubrir por el proyecto previamente definido por la tensoestructura puede suponerse como un plano, el

cual todas sus componentes en el eje z son cero y variar la geometría de acuerdo a las ecuaciones paramétricas que describan el comportamiento geométrico deseado en el proyecto.

De manera paralela al seleccionar los puntos fijos y tipo de borde, tipo de estructura portadora y tipo de material a utilizar, los cuales determinaran en gran medida el movimiento y desplazamientos de la cubierta. En base a ellos se puede conocer las reacciones del sistema, ya sea isostático o hiperestático, estas fuerzas son participes en parte del pretensado.

De igual forma y al tener determinado esto, puede procederse al análisis y determinación de las fuerzas y cargas externas consecuencia de viento, lluvia, nieve, etc. Las cuales son otra componente para la determinación del pretensado.

Puede denotarse que el agente de mayor persistencia, incidencia y duración y posible variabilidad en su magnitud es el viento, por lo que se hace la componente de mayor importancia a determinar con eficacia y con valores cercanos a la realidad.

Las presiones de viento están directamente ligados al área expuesta de la cubierta, su valor se determina a partir de la variación geométrica en cada punto que también se ve afectado por el esfuerzo y deformación del material. Su función es buscar la optimización del material, acercando sus valores a la realidad. Y no tener diseños sobre excedidos.

Las presiones de viento mejor controladas son en base a una malla por medio de elemento finito que permite la implementación de franjas de diseño las cuales ayudan a análisis posteriores y refinación del modelo, además de que esta malla considera las propiedades del material.

Entonces los pasos comunes a seguir pueden denotarse como

1. A partir de la geometría propuesta por el proyectista, elaborar las ecuaciones paramétricas para las 3 direcciones de la misma, que controlen el comportamiento geométrico y de coordenadas en cualquier punto de la tensoestructura

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
2. Con base de dicha geometría realizar un análisis de fuerzas que pueda denotar deformaciones y esfuerzos de la estructura debido a su peso propio y con ello refinar la malla geométrica debido a las ecuaciones paramétricas.
 3. A causa de esto y en base a un análisis de la dirección del viento dominante y suponiendo el comportamiento estructural de una tensoestructura como una catenaria, realizar un segundo análisis para conocer deformaciones preliminares debido a agentes externos, en donde el de mayor incidencia y cuidado es el viento.
 4. Elaborar una malla en base a elemento finito donde se toma en cuenta las características y propiedades del material a utilizar
 5. Con las presiones de viento se pueden determinar coeficientes de presión y hacer posibles análisis iterativos para conocer la forma de la tensoestructura a partir del pretensado, aparte de conocer que componente y magnitud para las fuerzas del pretensado son las que se requieren. Claro todos estos pasos para que sean cercanos a la realidad o a lo que teóricamente se está pensado, es necesario determinar lo más eficiente posible las presiones de viento a aplicar.
 6. En base al método elegido para el análisis estructural definir el grado de pretensado, el cual estará en base a la deformación y esfuerzo del material primordialmente.
 7. Cabe decir y es obvio que el diseño de una tensoestructura es un proceso de muchas iteraciones y refinamiento de la forma en el problema

3.3.2 Obtención de cargas y presiones de vientos

En base a tener la configuración geométrica inicial de la estructura y tomando en cuenta si sobrepasa los 15 metros de altura y tenga una planta cercana a la rectangular para elaborar un análisis con el método simplificado o bien estático.

Inicialmente será necesario determinar la velocidad de diseño, la cual puede ser obtenida a partir de (NTC, 2004):

$$VD = F_{TR}F_{\alpha}V_R$$

Donde F_{TR} es el factor de corrección que toma en cuenta la topografía y rugosidad del terreno alrededor del sitio del desplante

F_{α} es el factor que toma en cuenta la variación de la velocidad con la altura y V_R hace referencia a la velocidad regional según la zona que le corresponde al sitio donde se construye la estructura.

A medida que la altura aumenta, la velocidad media varía más lentamente hasta considerarse constante y se reduce a medida que se acerca al terreno.

Definidos estos valores puede hacerse la determinación de la presión de diseño, la cual según NTC se define como la presión que ejerce el flujo del viento en una construcción determinada, la cual está dada en pascales y se obtiene de acuerdo a la forma. Su ecuación se define como:

$$P_z = 0.47C_p V_D^2$$

Donde V_D hace referencia a la velocidad de diseño y C_p a los coeficientes locales de presión que dependen de la forma de la estructura, donde la ya establecida no linealidad geométrica convierte este componente de la ecuación a uno con mayor complejidad de cálculo.

3.3.2.1 Franjas de diseño en base al área expuesta

Su determinación en el caso de una tensoestructura puede hacerse bajo el apoyo y determinación de franjas de diseño (figura 27) donde el área cubierta por esa geometría no tenga tanta variación en su forma, claro de la mano de ser ésta parte del área expuesta del sistema. Dichas franjas pueden ser refinadas en base a la parametrización de la cubierta o bien para mayor información con una malla en base a elemento finito.

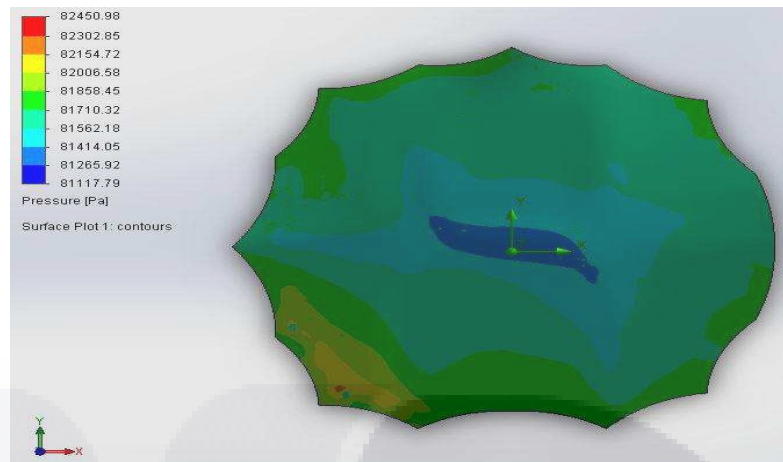


Figura 27: Determinación de posibles franjas de diseño de acuerdo a la curvatura de la superficie y la presión de viento uniforme aplicada

Como en su gran mayoría las tensoestructuras poseen aberturas también deberá ser de cuidado y énfasis la determinación de las presiones interiores.

Los factores de presión para el lado de barlovento conforman que la presión aumenta con la altura de la misma manera que lo hace la velocidad del viento, la succión se realiza en el lado de sotavento y se hace constante con la altura. Para cubiertas curvas donde la variación de presiones es distinta en varios puntos, puede considerarse una zona de barlovento correspondiente al primer arco y una de sotavento al último cuarto (Instituto de Ingeniería UNAM, 1989).

3.3.3 Sistema cable-catenaria aplicado como cubierta

Los planteamientos y metodología a aplicar tanto estáticamente como dinámicamente para el tratamiento de tensoestructuras son escasos y los pocos que existen no demuestran el trasfondo del cálculo y obtención tanto del pretensado como de la determinación de desplazamientos. La mayoría de la resolución de los problemas de tensoestructuras radica en la experiencia del autor con modelos pasados.

Como es ya comentado, este tipo de estructuras tienden a presentar deformaciones considerables por lo que la implementación de modelos dinámicos

presenta un grado de dificultad extenso ya que implica un apartado para la masa del sistema donde a causa de estas deformaciones se hace complicado situarla en un punto para el análisis, una manera sencilla de idealizarla es concentrándola en los nodos planteados para el posible análisis. Sin duda un tratamiento del lado de la seguridad para este tipo de estructuras sería el análisis estático, claro teniendo en cuenta que es un proceso de muchas iteraciones y tedioso.

Definiendo que una tensoestructura es efecto del equilibrio y posición de una membrana donde se idealiza su trabajo solo con esfuerzos axiales. Debido a su curvatura y su geometría la manera más sencilla de idealizar el trabajo de una estructura de este tipo es la catenaria, donde se puede discretizar el área en un número finito de cables y así poder tener cierto control y análisis en su comportamiento.

Sin embargo debido a este comportamiento podría confundirse que trabajan de manera idéntica a las barras de una armadura, las cuales solo presentan y se idealizan con fuerzas axiales alrededor de su eje principal en los casos más sencillos. La diferencia radica en que las barras obtienen su rigidez a partir de su naturaleza de fabricación mientras que una tensoestructura obtiene su rigidez final después de un proceso iterativo y en buena medida del pretensado aplicado sobre ella, es consecuencia del análisis y no viene antes del mismo. Por lo que podemos decir que la deformación del sistema está ligada proporcionalmente al grado de pretensado del sistema y la rigidez del mismo en esta ocasión no depende únicamente de las propiedades del material.

3.3.4 Obtención de la forma de una cubierta

La obtención de la forma de una cubierta como ya se ha comentado está ligada al grado de pretensado del sistema sin embargo el control de dicho pretensado puede hacerse por áreas con ayuda de las cargas y presiones de viento previamente obtenidas en el área a analizar y el prototipo a cubrir la misma.

La implementación de puntos estratégicos que sean representativos para conocer el comportamiento de la estructura se convierte en un paso importante

ya que ello puede simplificar el trabajo a realizar, una manera de obtener estos puntos donde pueden ser aplicadas las presiones de viento es a base de mallas o sistemas coordenados que permitan el control para una mejor lectura y análisis de resultados. Debido a estas razones puede ser aplicable el elemento finito para la geometría y distribución de la sección.

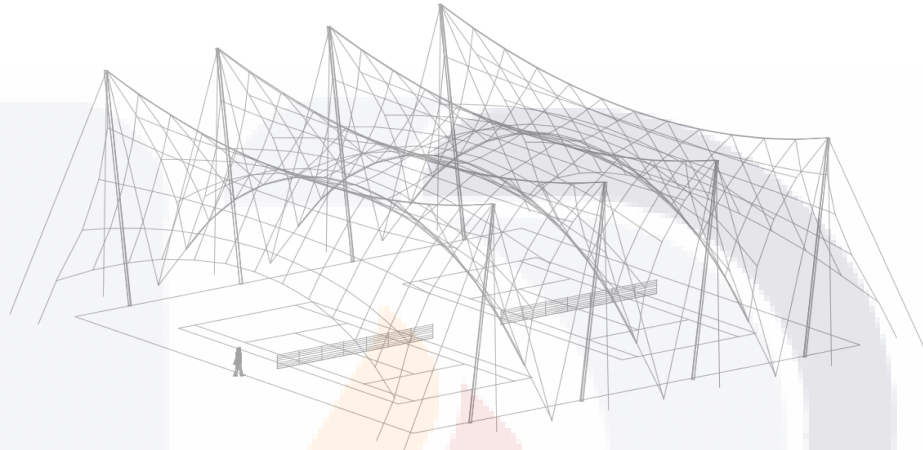


Figura 28: Implementación de posibles puntos para el pretensado

3.3.5 Parametrización del comportamiento de curvas

Las curvas y superficies sostienen tres maneras de ser representadas (Universidad de Sevilla, 2011), ya sea explícitamente o implícitamente. Las primeras dos son dependientes de los ejes, sin embargo las explícitas carecen de representar funciones con múltiples valores.

Las curvas paramétricas tienen la ventaja de facilitar la localización cualquier punto en la curva por medio de un parámetro. La curva paramétrica se representa en función de 3 componentes, siendo

$$x = f(t), y = g(t), z = h(t)$$

Donde t es el parámetro que controla la curva.

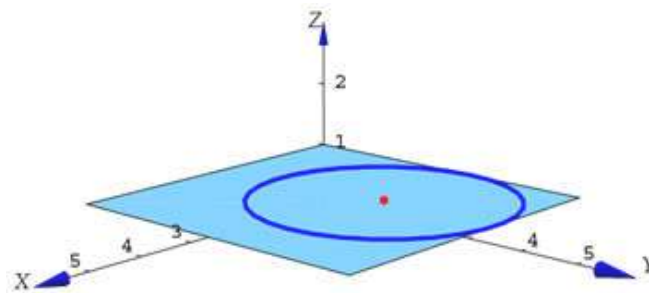


Figura 29: Parametrización de un círculo en el espacio sin variación en el eje Z

A fin de las tantas posibilidades y facilidades que pueden denotar las curvas paramétricas, existen operaciones complejas para las mismas, como es la intersección entre dos curvas o bien la distancia de un punto a una curva.

Existen varias formas de parametrizar una curva y llamar a su superficie, entre ellas:

- 1) Curvas B-Splines con la variabilidad de ser racionales
- 2) Curvas de Bézier

3.4 El elemento finito aplicado en la obtención de la forma

Ante la parametrización de la curva y con ello cumplir el control de la variación en su geometría dentro del área a cubrir por la cubierta estructural, es debido también buscar el control a mayor o menor detalle, según se requiera del trabajo interno de la membrana o material utilizado en una tensoestructura y el buen empleo de una malla a base del elemento finito puede hacerlo.

El proceso de análisis por elemento finito puede ser descrito en una manera iterativa o bien única por:

1. **Modelado geométrico:** Se refiere a la creación del modelo matemático capaz de reproducir el sólido o elemento en forma precisa y con ello la geometría que cubre su superficie.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
2. **Modelado de elemento finito:** Dicha geometría subdividirla en elementos discretos en los cuales se pueden asignar propiedades del material y del elemento.
 3. **Definición del ambiente:** La aplicación de las cargas y condiciones de borde que sostendrá el ambiente
 4. **Análisis:** Inferir e interpretar los resultados de acuerdo a las tensiones y deformaciones en la membrana.
 5. **Iteración:** Corroborar los resultados repitiendo el proceso y comparando con los criterios de diseño para la estructura.

A causa y desde el punto de vista de la programación algorítmica modular, las tareas a realizar son tres (Carnicero, 2011), el pre proceso, cálculo y el pos proceso; en reserva de utilizar un método alternativo para el cálculo de los agentes y presiones externas, puede ser suficiente para algunos casos aplicar el pre proceso, el cual infiere la definición de la geometría y la generación de la malla, condiciones de contorno y la asignación de propiedades al material.

El análisis estático puede clasificarse basándose en el método de discretización, el cual puede ser mediante elementos finitos, diferencia finitas, fronteras finitas, volúmenes finitos, espectral y el mallado automático. La función es convertir el modelo en uno discreto con un número finito de grados de libertad.

Considerando un elemento finito cualquiera el cual está definido por un número de nodos n , puede ser definido en el plano de acuerdo a un desplazamiento definido por u , el cual tiene dos componentes $(u(x,y); v(x,y))$. Se supone que las deformaciones en los nudos solo emplean desplazamientos pero no giros (figura 30), reciben un estado tensional en el caso de las tensoestructuras.

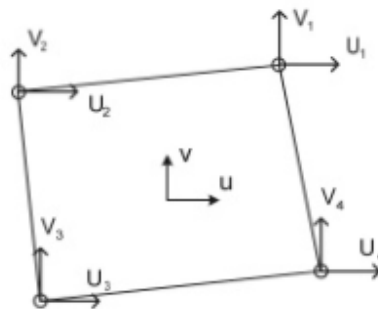


Figura 30: Deformaciones en un elemento finito

Sin embargo debido al número finito de elementos de acuerdo al mallado para conocer la totalidad de puntos, en ocasiones es necesario hacer interpolaciones del elemento. Funciones que son de acuerdo a las coordenadas de posición. Donde ambos desplazamientos se interpolan por separado, si se denota con \$N_i\$ la función que interpola el elemento la cual tiene influencia en el desplazamiento total de ambos puntos para ambas direcciones, la deformación de funciones puede ser representada matricialmente como \$u=N*d\$. En la cual \$N\$ tiene tantas filas como desplazamientos tenga el punto de análisis y tantas columnas como tantos grados de libertad tengan todos los nudos del elemento. Es claro que dichas funciones por lo regular son polinomios que solo son válidos en el interior del elemento y no fuera. Para problemas de elasticidad la matriz se representa de la siguiente manera:

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_n \end{bmatrix}$$

Si es tomado en la las 3 componentes en el espacio a partir de un cubo unitario, la matriz será:

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & \dots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix}$$

Las cuales deformaciones unitarias al ser convertidas en función de las deformaciones nodales mediante las funciones de interpolación y mediante la ecuación constitutiva definida por el tensor de tensiones en dicho punto y el

material a utilizar puede considerar un dominio mayor en las tensiones de dicho punto de análisis.

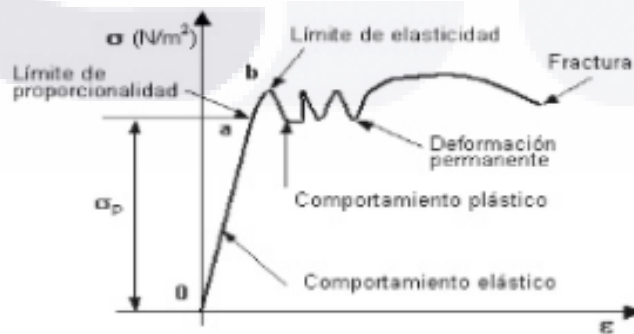
$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_0) + \sigma_0$$

Donde D es la matriz elástica que depende del módulo de elasticidad y el módulo de Poisson (Celigueta, 2008).

3.5 Métodos de análisis estructural de acuerdo a la geometría y al tipo de material

Las dos posibles linealidades a tratar dentro del análisis de una tensoestructura, las cuales son primero debido a la geometría (puede ser controlada a partir de ecuaciones y la parametrización del comportamiento en la curva y en la superficie) y la segunda de acuerdo al esfuerzo-deformación en términos y parámetros de la ley de Hooke aplicada en la resistencia de materiales, la no linealidad para el material en términos prácticos se define en base a un valor de esfuerzo en el material que arroja una deformación que pasa el punto de fluencia o límite de proporcionalidad del materia (figura 31). Cuando el material supera este estado tensional límite comienza a perder rigidez a pesar de seguir soportando carga en él.

Figura 31: Diagrama de esfuerzo y deformación de un material



Fuente: Camacho (2012)

Al sobrepasar esta frontera las deformaciones suelen crecer con mayor rapidez. A pesar de que los materiales que se utilizan en las tensoestructuras son susceptibles a grandes deformaciones y se puede creer no tener peligro en la estructura al sobrepasar el límite elástico lineal, una componente que se vería seriamente afectada es la pretensión del sistema la cual lleva un gran peso de la estructura como lo es la geometría y la rigidez total, variar este valor podría afectar las estructuras auxiliares como los cables o sistemas de anclaje secundario. En dado caso y teórico de poder tomar este punto en el análisis será necesario incluirlo indirectamente en el análisis de las fuerzas de pretensado. La no linealidad también puede ser atacada desde el punto de vista discreta y del elemento finito además de procesos iterativos en función de Newton-Raphson, es evidente que formular el incremento puede traer consigo pequeños errores, pero ese punto es tema de otro enfoque.

Denotando la no linealidad de acuerdo a la geometría y al material, el análisis de fuerzas y deformaciones puede ser estudiado con distintos métodos, como los que se hacen mención a continuación en los siguientes puntos, poniendo en consideración primordialmente el análisis estático de fuerzas y cargas.

3.5.1 Análisis lineal estático

Como se ha tocado la linealidad para un comportamiento elástico es fundamental asegurarse de ella en el análisis de una tensoestructura, no por el material de la cubierta (los cuales comúnmente pueden recibir grandes esfuerzos y deformaciones) sino por el equilibrio de la estructura portadora y una posible modificación en sus esfuerzos. Tanto el análisis lineal y no lineal pueden ser controlados con los siguientes métodos de resolución, considerando que si pasan el punto de fluencia del material pueden llegar a ser iterativos con la finalidad de cuidar la deformación y determinar los nuevos valores del material para su módulo de elasticidad.

3.5.1.1 Método de la rigidez transitoria

El método de la rigidez transitoria (Machado, 2014), el cual comúnmente puede ser utilizado para el análisis no lineal en estructuras de concreto, puede definirse de la siguiente manera.

El método presupone dependencia lineal de las deflexiones con base a las fuerzas que actúan en el sistema con relación a la ecuación fundamental

$$F = k * d$$

Donde F es la fuerza aplicada, K la rigidez del sistema y d es la deformación del mismo.

La matriz de cada elemento ayuda al ensamble de la matriz de rigidez de la estructura. El proceso se realiza tantas veces sea necesario, solo cambiando el vector de deformaciones o desplazamientos por la nueva o recién calculada, la diferencia entre los vectores F representa un nuevo vector llamado, vector de fuerzas residual el cual da la corrección del vector de desplazamientos, el cual actualiza el estado geométrico de la estructura y con ello se recalcula la matriz de rigidez, hasta que el residuo entre las rigideces es cero se puede decir que se alcanza el estado de equilibrio. Las ecuaciones del proceso pueden ser representadas de la siguiente manera.

$$d_{k+1} = K^{-1}_k P$$

Donde la nueva posición de los nodos es: $X_{k+1} = X_k + d_{k+1}$

K_{k+1} es la nueva matriz de rigidez y P_{k+1} es el vector de cargas internas. Claro es que el vector P se cambia por el vector de fuerzas residual que es $R_{k+1} = P - P_{k+1}$, el cual da a conocer la corrección:

$$\Delta d_{k+1} = k_{k+1}^{-1} R_{k+1}$$

El método de la rigidez transitoria sería bien aplicable y programable sin embargo necesitaría debido a la naturalidad de la geometría de una tensoestructura ser discretizado en segmentos que puedan describir

correctamente el comportamiento de la estructura, por lo que sería de mayor practicidad trabajar con una resolución por elemento finito debido a la discretización en los tres planos.

3.5.2 Análisis no lineal estático

El cálculo lineal y estático suele ser el método de análisis escogido para dimensionar una estructura, ya que si se tiene la hipótesis de la elasticidad casi se puede estar seguro de que también se cumplirá el estado límite último, sin embargo existirán estructuras a las cuales no se les puede tener control del punto de pasar de análisis lineal a no lineal por diferentes razones o hasta por beneficio de aprovechar propiedades de un material que sería favorable llevarlo al análisis no lineal, sea cualquier el caso y la variabilidad del análisis no lineal en el material además de su comportamiento (con endurecimiento o con ablandamiento).

Es verdad que de preferencia no se recomienda pasar el límite elástico del material por las ya mencionadas posibles complicaciones en el sistema de la estructura portadora. Los métodos que se mencionan a continuación pueden tomar y tratar la no linealidad del material sin problemas. Por lo que si se toma en cuenta en el pretensado, no debería causar anomalías.

3.5.2.1 Método de la relajación dinámica

El método de la relajación dinámica es capaz de dar tratamiento a la no linealidad geométrica del diseño de una tensoestructura. El método da pequeños incrementos de tiempo para cada nodo hasta que finalmente el amortiguamiento concreta el estado de equilibrio en la misma.

Si se desea sostener un análisis de acuerdo a las cargas externas será básico iniciar desde la pretensión, sino es de esta manera el método comienza con la fuerza residual y su incidencia en el sistema

Según Sánchez (2006) la fuerza residual es la resultante de las fuerzas internas dadas por los nodos adyacentes (ec. 1) y las fuerzas aplicadas en cada nudo (ec. 2).

$$F_i = \frac{\delta L_i \cdot E_i \cdot A_i}{L_i}$$

$$R_i = \sum F_i - P_i$$

A partir de esta fuerza es creada una aceleración para cada masa en cada nudo, por lo que el movimiento del nudo se da a partir de:

$$R_i = M_i \cdot \ddot{V}_i + K_i \cdot V_i$$

Donde M es la masa del nudo y k el coeficiente de amortiguamiento viscoso.

Para los diferentes instantes se recalcula la fuerza residual y la nueva posición hasta que la diferencia entre iteraciones sea muy pequeña. Por lo que la nueva posición del nudo puede ser obtenida a través de la velocidad como:

$$x_{j+1/2} = x_{j+1/2} + \Delta t \cdot V_{j+1}$$

El método a pesar de ser largo e iterativo puede resultar sencillo si se cuenta con las herramientas y software necesario para realizar las operaciones matemáticas pertinentes; la dificultad radica en representar adecuadamente los valores para la masa. El incremento de tiempo y el coeficiente viscoso ya que si no se eligen adecuadamente puede arrojar en la no convergencia del método

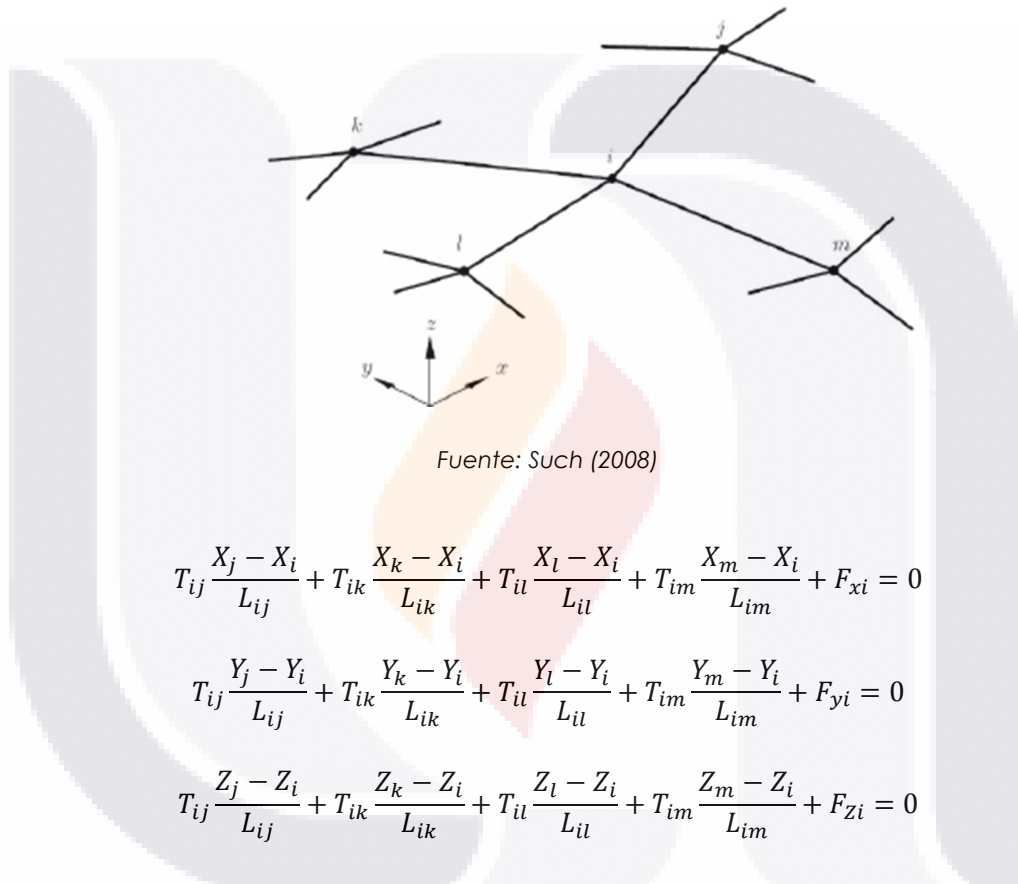
3.5.2.2 Método de los mínimos cuadrados

La mayoría de los métodos de cálculo para una tensoestructura consideran la geometría o desplazamientos de la membrana como la incógnita del problema, sin embargo si se diera el caso que la geometría ya es conocida de antemano, en este caso la incógnita del problema pasaría a ser la distribución de fuerzas internas de la estructura o membrana a analizar derivando de la ecuación:

$$At = f$$

Si se considera un nodo i en una red de cuatro cables como en la figura 32, las ecuaciones de equilibrio en las direcciones Y , X y Z se pueden escribir como:

Figura 32: Nodo de una red de cables idealizada



$$T_{ij} \frac{X_j - X_i}{L_{ij}} + T_{ik} \frac{X_k - X_i}{L_{ik}} + T_{il} \frac{X_l - X_i}{L_{il}} + T_{im} \frac{X_m - X_i}{L_{im}} + F_{xi} = 0$$

$$T_{ij} \frac{Y_j - Y_i}{L_{ij}} + T_{ik} \frac{Y_k - Y_i}{L_{ik}} + T_{il} \frac{Y_l - Y_i}{L_{il}} + T_{im} \frac{Y_m - Y_i}{L_{im}} + F_{yi} = 0$$

$$T_{ij} \frac{Z_j - Z_i}{L_{ij}} + T_{ik} \frac{Z_k - Z_i}{L_{ik}} + T_{il} \frac{Z_l - Z_i}{L_{il}} + T_{im} \frac{Z_m - Z_i}{L_{im}} + F_{zi} = 0$$

Y convirtiendo $At = f$ a la forma matricial de las 3 ecuaciones anteriores:

$$A_{\gamma, \alpha\beta} = \frac{\alpha_\beta - \alpha_\gamma}{L_{\gamma\beta}}$$

$$t_{\gamma, \alpha} = T_{\gamma, \beta}$$

$$f = F_{\gamma, \alpha}$$

Donde:

$$\alpha = x, y, z; \beta = j, k, l, m; \gamma = 1, 2, \dots, N$$

Siendo α, β, γ , los grados de libertad, los nodos adyacentes y el nodo de estudio respectivamente.

Si el sistema resultara incompatible, que se tenga más ecuaciones que incógnitas, entonces se puede usar un método para hacer que la solución se aproxime más al equilibrio, empleando el método de los mínimos cuadrados que se resume a la siguiente expresión.

$$A^T A t = A^T f$$

Una de las mayores desventajas del método es que no se tiene algún control en cuanto a la distribución de fuerzas.

En el método se buscan las variables como la topología de la estructura, condiciones de contorno y la geometría; mientras que la incógnita es la distribución de fuerzas internas.

3.5.2.3 Método de la densidad de fuerzas.

El método de la densidad de la fuerza permite conocer en aquellos problemas donde no se pueden aplicar restricciones en algunos puntos del análisis de la membrana para su simplificación y resolución más sencilla. En este método se aborda un sistema lineal equivalente además de que permite conocer la forma de equilibrio de una tensoestructura o membrana donde previamente se han establecido condiciones de contorno y acciones de viento que actúan sobre la malla establecida, idealizándola como un conjunto de cables que trabajan de forma libre y sostienen fuerzas axiales.

Para obtener el sistema lineal equivalente se parte de las ecuaciones de fuerzas, las cuales son no lineales debido a que la longitud de cada elemento está en función de las coordenadas de los nodos propuestos.

El método puede reducirse a unos cuantos principios básicos para su aplicación (Muñiz, 2014):

El equilibrio será calculado en cada nudo donde debe ser cumplido a partir de las acciones transmitidas por las barras idealizadas entrantes al nudo y las cargas externas aplicadas en el mismo.

La forma es consecuencia de la búsqueda de equilibrio. Lo único conocido en el sistema son las acciones aplicadas en los nudos y las reacciones en los apoyos y la manera que se relacionan los nudos entre sí con las barras idealizadas por la malla propuesta de control en el sistema.

La densidad de fuerza es la caracterización de cada barra en función de la relación entre la fuerza actuante sobre la barra y su longitud (Schek, 1974), es decir:

$$D = F * L^{-1}$$

Donde:

D es la densidad de fuerza de la barra

F es la fuerza aplicada

L es la longitud de la barra

Si se quiere conocer la densidad de fuerza para una barra en una dirección parcial o con respecto a un eje coordenado, solo será necesario multiplicarla por la proyección sobre el eje estudiado, entonces se definiría como:

$$F * \frac{\Delta_{(X,Y \text{ ó } Z)}}{l}$$

Sabiendo esto se puede establecer que la proyección del esfuerzo de una barra es definida por el producto de la densidad de fuerza de la barra por la longitud proyectada de la misma en función de las coordenadas de los nudos donde participa la misma.

$$D * ((X, Y \text{ ó } Z)_{final} - (X, Y \text{ ó } Z)_{inicial})$$

Esta idealización permite dar un planteamiento al problema con un sistema de ecuaciones estableciendo el equilibrio de cada nudo de acuerdo a su

componente y ello facilita conocer las coordenadas de los nudos, las cuales son las incógnitas del problema.

La manera de equilibrar resultante dependerá de gran medida de las condiciones de contorno del sistema y la vinculación de los nudos provendrá de la geometría básica de la tensoestructura, mientras que la densidad de fuerzas será un parámetro que representa las propiedades del sistema y el grado del pretensado asignado.

Reescribiendo la ecuación anterior en términos de sus coordenadas y proyecciones en cada eje y definiendo un radio para cada elemento con su densidad de fuerza como $q = F/L$ buscando la fuerza f respectiva quedará (Petra, 2012):

Para la proyección en X

$$q_{ij}(X_j - X_i) + q_{ik}(X_k - X_i) + q_{ii}(X_i - X_i) + q_{im}(X_m - X_i) = Fx$$

Para la proyección en Y

$$q_{ij}(Y_j - Y_i) + q_{ik}(Y_k - Y_i) + q_{ii}(Y_i - Y_i) + q_{im}(Y_m - Y_i) = Fy$$

Para la proyección en Z

$$q_{ij}(Z_j - Z_i) + q_{ik}(Z_k - Z_i) + q_{ii}(Z_i - Z_i) + q_{im}(Z_m - Z_i) = Fz$$

Según Sierra (2006) el método de la densidad de fuerzas puede ofrecer beneficios como:

1. Flexibilidad para hacer cambios en el estadio tensional del material o de la tela a analizar
2. Rapidez en la generación del equilibrio en la estructura
3. Facilidad de realizar y analizar todo tipo de especificaciones y topologías
4. Calidad en los resultados obtenidos.

3.6 Software especializado en el tratamiento de tensoestructuras

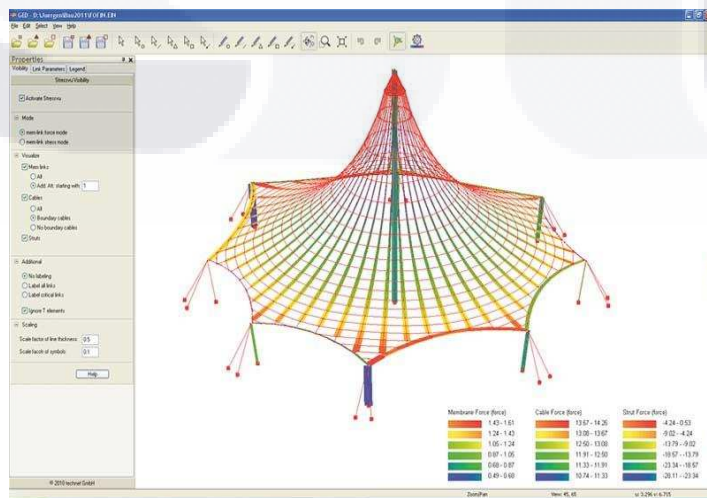
La mayoría del software especializado en el campo de las tensoestructuras básicamente trabaja bajo los principios de la densidad de fuerza o la relajación dinámica. Se puede tener un pequeño listado de acuerdo a los que han sido consultados en la literatura durante la investigación y los que se han trabajado por acercamiento propio y sugerencia del asesor de tesis.

3.6.1 Formfinder

Creado en 2003 por Robert Wehdom (Formfinder, 2017), tomando como principio el método de densidad de fuerza, como lo define su propio website, formfinder es tan sencillo como dibujar en papel y con pluma. Permite examinar posibles formas geométricas y físicas de acuerdo al diseño arquitectónico. Ofrece esfuerzos y tensiones máximas en los elementos rígidos y en la membrana a analizar además de poder proporcionar datos de soleamiento de acuerdo a la latitud y longitud solicitada.

Formfinder cuenta con una amplia base de proyectos previos los cuales pueden ser utilizados como guía, sostiene pocos videos tutoriales, sin embargo es gratuito y puede ser descargado en la website del software www.formfinder.at

Figura 33: Verificación de esfuerzos en una tensoestructura en Formfinder



Fuente: tectónica-online

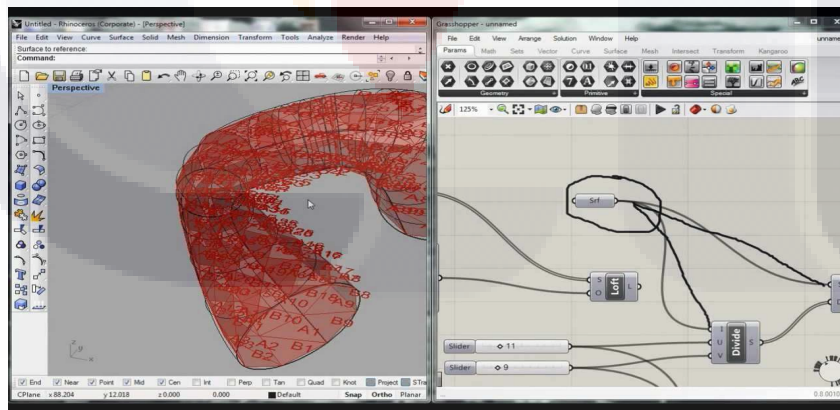
3.6.2 Rhinoceros a través de Grasshopper + Kangaroo

Rhinoceros 3D utilizado para el diseño industrial, automotriz, naval y de joyas además de la arquitectura se especializa en el modelado libre mediante NURBS. Contando con extensiones y componentes para el diseño paramétrico como Grasshopper. A partir de RhinoScripts es posible programar formar y superficies a analizar además de poderlas parametrizar de acorde a funciones paramétricas que las describan. En base a Grasshopper también es posible la generación de la malla geométrica para el análisis de la tensoestructura y los puntos de borde o fijación para el elemento.

Sin embargo la generación de la malla y sus desplazamientos a partir de las fuerzas de otro componente llamado Kangaroo puede ser de gran ayuda.

Otro componente que puede ayudar en la generación del mallado es Weaverbird, ambos componentes pueden ser descargados gratuitamente al igual que Grasshopper en Food4Rhino, sin embargo Rhinoceros si debe ser adquirida una licencia previa. A partir de Khangaroo puede denotarse una simulación más grafica del viento en la tensoestructura y como interactúa.

Figura 34: Parametrización de una superficie en Rhino con ayuda de Grasshopper



Fuente: Parametric design rhino 3D grasshopper (Youtube, 2017)

3.6.3 Wintess

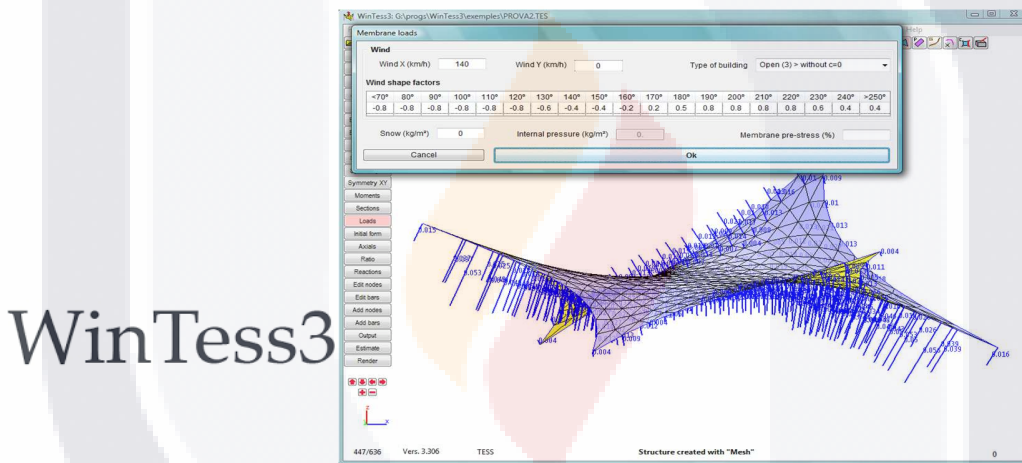
Software creado por el arquitecto Ramón Sastre a causa de su tesis doctoral donde trata tres etapas de suma importancia como la búsqueda de forma, el cálculo

estructural y los patrones finales de corte. El ejecutar estas tres fases en un mismo software, hace de él uno de gran utilidad y ventaja ante otros.

Analiza la estructura a partir de considerarla con una discretización en base a barras descomponiendo la membrana en una malla realizando el cálculo en base a la relajación dinámica, o la densidad de fuerza o bien por métodos matriciales.

El software puede resultar de gran utilidad ya que además de tener la búsqueda de forma de la estructura puede hacer el cálculo estático de fuerzas y denotar presiones de viento sobre la estructura, finalmente presentando un posible patronaje de corte para la estructura final tensada.

Figura 35: Ejemplo de presiones de viento aplicadas en un área expuesta de una tensoestructura



Fuente: tecnologia.upc.edu

3.6.4 Maple

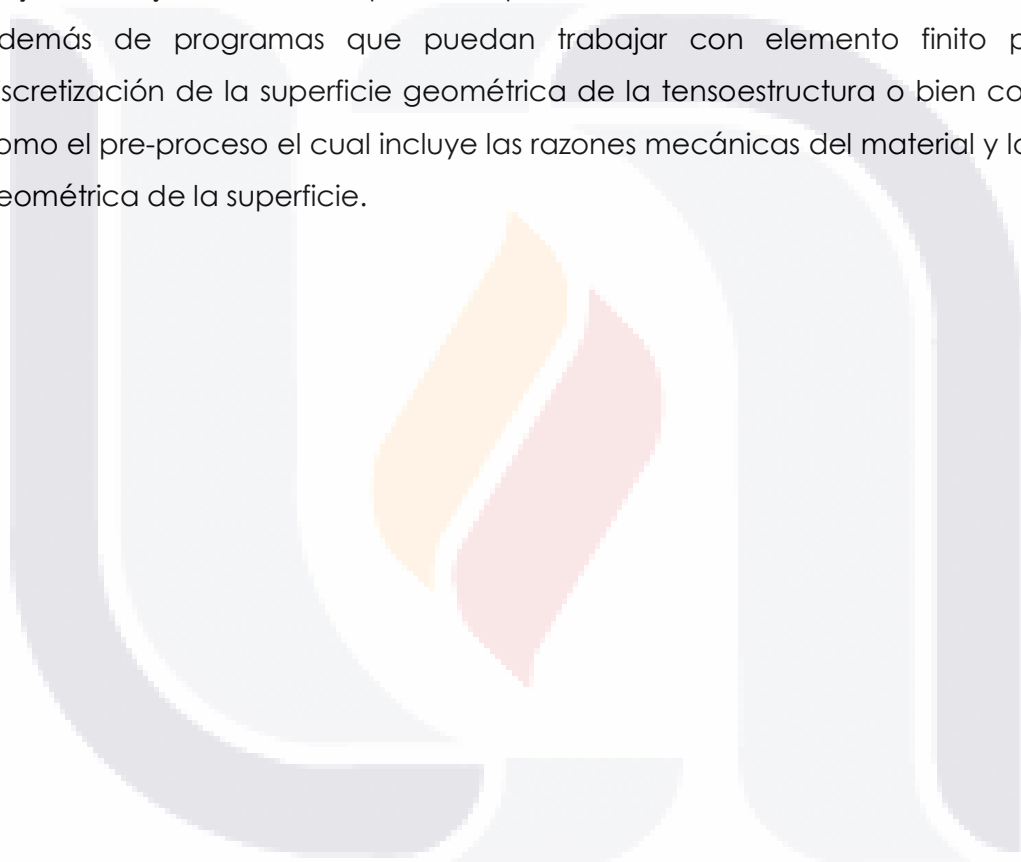
Machado (2014) describe que Maple es un programa de calculo que puede ayudar para la computación y parametrización de curvas mediante las expresiones algebraicas que las describan, teniendo la ventaja de que puede ser exportada mediante al plug-in Enlace_Maple_Rhinoceros.rhp.

Maple permite resolver grandes sistemas y dibujar las curvas o superficies con alto grado de dificultad permitiendo compartir dichas curvas a Grasshopper y con

parámetros. Versiones recientes denotan un menú completo para aplicar el método de densidad de fuerza.

3.6.5 Otros

Programas como Abaqus CAE® o Ansys® pueden ayudar en el tratamiento de un análisis detallado en esfuerzos y desplazamientos en la estructura así como denotar mejores franjas de diseño para las presiones de viento en la tensoestructura. Además de programas que puedan trabajar con elemento finito para la discretización de la superficie geométrica de la tensoestructura o bien conocido como el pre-proceso el cual incluye las razones mecánicas del material y la forma geométrica de la superficie.



CAPÍTULO IV METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Enfoque de la investigación

Hernández Sampieri define que existen tres enfoques principales en una investigación donde el primero de ellos, el cualitativo, hace referencia a las cualidades de los datos extrayendo un significado de ellos además de contextualizar el fenómeno analizando la realidad subjetivamente, en este caso, el estudio parte de las cualidades del trabajo estructural de una tensoestructura aplicada en la cubierta de un invernadero, las cualidades hacen gran referencia al material que sostenga dicha cubierta ya que con ellas debe satisfacer los requerimientos de la planta para efectuar su alimentación básicamente a partir de otros factores como la cantidad de radiación solar y soleamiento del lugar, es decir condiciones ideales o cercanas a lo ideal para su buen desarrollo.

Hernández también hace referencia a un segundo enfoque, el cual lo llama cuantitativo, en el cual se utilizan estadísticas, se mide el fenómeno y se tiene control sobre él, la realidad se analiza objetivamente y tiene una secuencia de trabajo, esta última parte aplica directamente en la generación de una metodología de diseño para este tipo de estructuras y básicamente del tratamiento de la cubierta que en este caso debido al tipo de material que utilizan los invernaderos pasa a ser de carácter ligero. Al analizar cuantitativamente los resultados implica el análisis y diseño estructural de la estructura, la resistencia en base a esfuerzos y deformaciones de la cubierta y como todo esto influya cualitativamente en beneficio de la planta.

Por último Hernández menciona un tercer enfoque, el cual lo denomina mixto, en donde se mezclan características de ambos enfoques que en el caso de esta investigación y trabajo aplica perfectamente, cualidades del material aplicadas en la cubierta, la cual cuantitativamente es estudiada para su análisis y diseño como una tensoestructura, denotando el producto esperado de este trabajo, una metodología de diseño. Por lo que el enfoque de esta investigación es de carácter mixto.

4.2 Alcances (limitaciones y delimitaciones).

En base al texto y presentación de Montiel (2013), el alcance de la investigación que se pretende es de carácter mixto donde se busca explorar e implementar ideas de diseño estructural para un invernadero (estudio exploratorio); describiendo características ambientales de la planta y correlacionando esto con la cubierta de la estructura, la cual afecta el esqueleto y la temperatura de diseño; y finalmente emitir explicaciones y conclusiones, con ello emitir ayudas para el diseño y análisis de invernaderos estructurándolo en la metodología de diseño deseada (estudio explicativo).

4.3 Hipótesis de investigación

La metodología de diseño resultante al ser aplicada en una estructura de tipo invernadero mostrará el recinto con mejores condiciones estructurales (el cual trabaje con el principio estructural de una tensoestructura, es decir a tensión) y ambientales para que el cultivo que sea albergado tenga un buen desarrollo y crecimiento

4.4 Procedimiento a seguir

Se decide de acuerdo a la investigación, considerar 3 grupos de variables básicas para trabajar la hipótesis descrita:

- A. Grupo y parte del diseño y análisis estructural para la membrana y la estructura
- B. Grupo y parte de resistencia y comportamiento de posibles materiales a utilizar en la cubierta tomando en cuenta consideraciones ambientales y de beneficio para el desarrollo del cultivo.
- C. Grupo y parte de variables ambientales para el cultivo.

La metodología a seguir para esta investigación se divide y relaciona en los siguientes pasos, que también son descritos por un mapa conceptual en la figura

36. Denotando que el análisis y diseño de una tensoestructura básicamente resume tres pasos, la búsqueda de forma, revisión de esfuerzos, deformaciones y tensiones de diseño, por último el patronaje de corte en el material a utilizar.

1. Primero en base a la exploración del estado del arte de acuerdo a variables de carácter estructural y ambiental, se determinará el tipo de invernadero ideal para ser portador de una tensoestructura en su cubierta.
2. El primer paso a refinar es cerciorarse que la cubierta trabaje como una tensoestructura, esto indica que debe hacerse la búsqueda de forma ideal (formfinding), por lo que será necesario describir la geometría de la sección a partir de la parametrización con ecuaciones, en base a ello se refina una primer malla de acuerdo a la geometría de control, donde puede ser situada cualquier coordenada en la superficie.
3. A partir de una primera geometría aproximada puede hacerse un análisis de la forma en base al peso propio unitario de la cubierta y con ello hacer primeras refinaciones sobre las condiciones de borde o bien de las estructuras auxiliares como cables o tensores de acuerdo a deflexiones geométricas o bien por conveniencia de diseño.
4. De acuerdo a esta malla geométrica y el análisis por peso propio, pueden incluirse el primer acercamiento de los agentes externos, que en el caso de las cubiertas ligeras el viento es el de mayor peso. Determinando la dirección del viento dominante y la velocidad de diseño pertinente puede elaborarse un análisis posterior para conocer la repercusión del viento sobre la cubierta.
5. Con ello y revisando las reacciones emitidas y deformaciones, pueden ser desarrollados y determinados los valores para coeficiente de presiones en la cubierta.

6. Bien situado el efecto de los agentes externos en la cubierta puede elegirse el material a trabajar en la cubierta y revisar tensiones máximas para hacer un rediseño de acuerdo a esfuerzos internos en el material. Para incluir el material y su contribución en el análisis, de acuerdo a la complejidad de la cubierta puede hacerse un segundo mallado que además de contemplar la geometría ahora contemplará las propiedades mecánicas; el mallado será con elemento finito.
7. A partir de tener la incidencia de la geometría, condiciones de borde, agentes externos de carga y propiedades mecánicas del material en la malla de control, puede aplicarse con la finalidad de la búsqueda de forma definitiva el método de mejor adaptación y resolución por el proyectista (mínimos cuadrados, relajación dinámica, etc.) que en este caso será el que se basa en la densidad de fuerza.
8. Como ha sido descrito en el marco conceptual de la tesis, el gran punto a resolver en el análisis de una tensoestructura es la búsqueda de forma, al tener refinado este punto, lo consecuente es cuidar mediante a los análisis posteriores que el material y la deformaciones siempre trabajen con la idealización de una tensoestructura, es decir a tensión.
9. En base a estos análisis cerciorándose el siempre trabajo a tensión de todas las áreas en la cubierta puede refinarse la forma de acuerdo a las condiciones de borde y el grado de pretensión más propicio y observar con nuevas iteraciones la afectación del sistema, sino es así, podría decirse que la búsqueda de forma ha concluido y el análisis de deformaciones y tensiones también. Obteniendo la tensión mecánica última de diseño.

10. Efectuada la búsqueda de forma, el análisis de deformaciones y esfuerzos puede hacerse el patronaje de corte según sea lo más conveniente.

11. Asegurada la forma y distribución del invernadero estructuralmente debe atenderse la parte ambiental y su incidencia en la estructura y la cubierta

4.4.1 Iteraciones mínimas para una tensoestructura

En base a la literatura, algunos autores hablan que para la concepción de la forma definitiva de una tensoestructura pueden ser efectuadas al menos 8 iteraciones en función de métodos como la relajación dinámica o densidad de fuerzas.

Evidentemente el número de iteraciones está en función de la complejidad geométrica de la superficie a analizar, ya que la parametrización y mallado queda en función de tramos en el plano, lo cual implica mayor variación y curvatura, que uno que solo denota una o dos curvaturas en su superficie. Sin embargo hablando de manera general, el número de iteraciones se debe a:

- 1) Parametrización y comportamiento de la geometría y condiciones de borde propuestos, efectuando un análisis en función del peso unitario
- 2) Acercamiento del viento dominante y la velocidad de diseño de viento aplicándola uniformemente en la estructura. Revisando deformaciones y condiciones de borde para la geometría.
- 3) Al determinar los coeficientes de presiones de viento (de acuerdo a la geometría puede o no implementarse franjas de diseño, ambos están en función del área expuesta). Puede hacerse una iteración más.

Eligiendo el material a utilizar puede hacerse otra iteración y refinar pasos previos o bien continuar. Si la figura es compleja puede agregarse una malla por elemento finito, lo cual agregaría una iteración más para su inclusión en el tratamiento matricial.

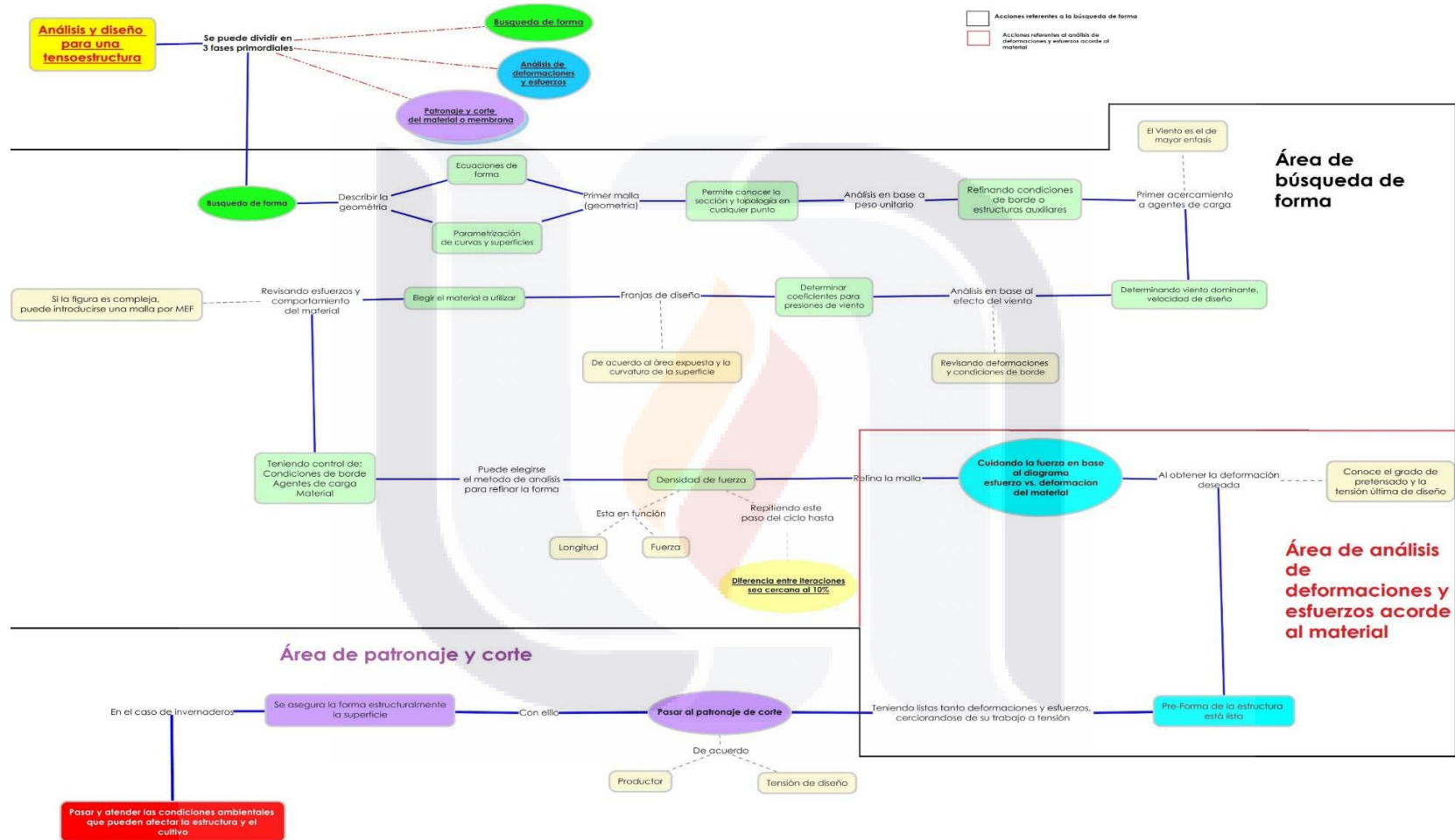
- 4) Teniendo control de posibles deformaciones y esfuerzos en el material, elegir el método de análisis para refinar las fuerzas actuantes, en este caso por densidad de fuerzas y efectuando un análisis en base a los

coeficientes y presiones de viento en los nodos y puntos de borde selectos refinando la malla de control

- 5) Cerciorándose el comportamiento del material y cuidando que el comportamiento sea a tensión, puede darse el grado de pretensado necesario en cada iteración de acuerdo al diagrama esfuerzo deformación del mismo material. Aquí el número de iteraciones pueden ser el número que sean necesarias
- 6) Refinando condiciones de borde y anclaje de la membrana, revisando nuevamente deformaciones y se obtiene una pre-forma de la superficie, la cual puede decirse que esta lista cuando existe una diferencia de 10% entre una iteración y otra.
- 7) A partir del patronaje de corte de acuerdo al fabricante o a la tensión del diseño podría refinarse nuevamente la malla de control y analizar una vez más la cubierta, obteniendo el grado de pretensado final.
- 8) Se asegura estructuralmente la superficie y se obtiene la forma que soportara las cargas consideradas sin pasar a deformaciones que el sistema no pueda controlar.

4.4.2 Mapa de metodología general para el análisis de una tensoestructura

El mapa de la figura 36 se encuentra también en el apartado de anexos para una mejor resolución (anexo B).



CAPÍTULO V APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO Y EJEMPLO DE APLICACIÓN A UNA TENSOESTRUCTURA GENERAL

5.1 Conceptos básicos y consideraciones de diseño

Retomando del capítulo cuatro el procedimiento a seguir, puede denotarse que la primer gran consideración es conformar la geometría preliminar a analizar y cual pueda ser el punto de partida para obtener las cargas aplicadas en la misma consideradas por reglamento tanto gravitacionales y accidentales como lluvia, nieve o viento, que en nuestro caso la última será la de mayor peso en el análisis. Sin embargo la primera forma a analizar gira en torno al valor del peso propio de la membrana en la tensoestructura y su concepción espacial va conforme a los puntos de anclaje y borde seleccionados, claro teniendo en cuenta que en este tipo de estructuras solo hablamos de estados tensionales.

Entonces tiene que quedar claro que este estado tensional final se dividirá si así se requiere en dos tensiones, la debida a los agentes externos de carga aplicados y otra conforme al pretensado que se aplica para contrarrestar la magnitud de los primeros en la superficie y con ello denotar la forma ideal para las tensiones aplicadas, es decir realizar la búsqueda de forma referente a la primer parte de la metodología recalcando que el pretensado no puede conocerse hasta análisis previos y la correcta determinación de las cargas de viento aplicadas en la estructura. La segunda y tercera parte en la metodología referentes al análisis de deformaciones y tensiones de acuerdo a la resistencia de materiales y el patronaje y corte de la membrana podrán mostrar que no llevan el mayor peso comparadas con la primera parte (búsqueda de forma) de la concepción de una tensoestructura.

Sin embargo queda claro que con un ejemplo paso a paso será de mejor ayuda para explicar particularidades y consideraciones de diseño más detalladas que las ya descritas, por lo que en siguientes puntos será lo primordial a mostrar.

5.2 Descripción de pasos a seguir en ejemplo general a realizar

Inicialmente definir el claro a cubrir y las condiciones arquitectónicas o de uso de la estructura a considerar, con esto tener en cuenta posibles puntos de anclaje, los cuales pueden estar en función de la estructura portadora o bien a favor del posible pretensado resultante después de algunas iteraciones por el método matricial elegido para obtener la forma tensional.

5.2.1 Puntos de anclaje y forma

Para el ejemplo se ha decidido tomar una forma de cubierta en base a 3 arcos guías en el sentido transversal, donde los arcos de los extremos en el punto central tienen una altura de 2 m, mientras que el central es de 5 m. El largo de la sección es de 12 m y el ancho de 10 m, todo esto se describe en la figura 37

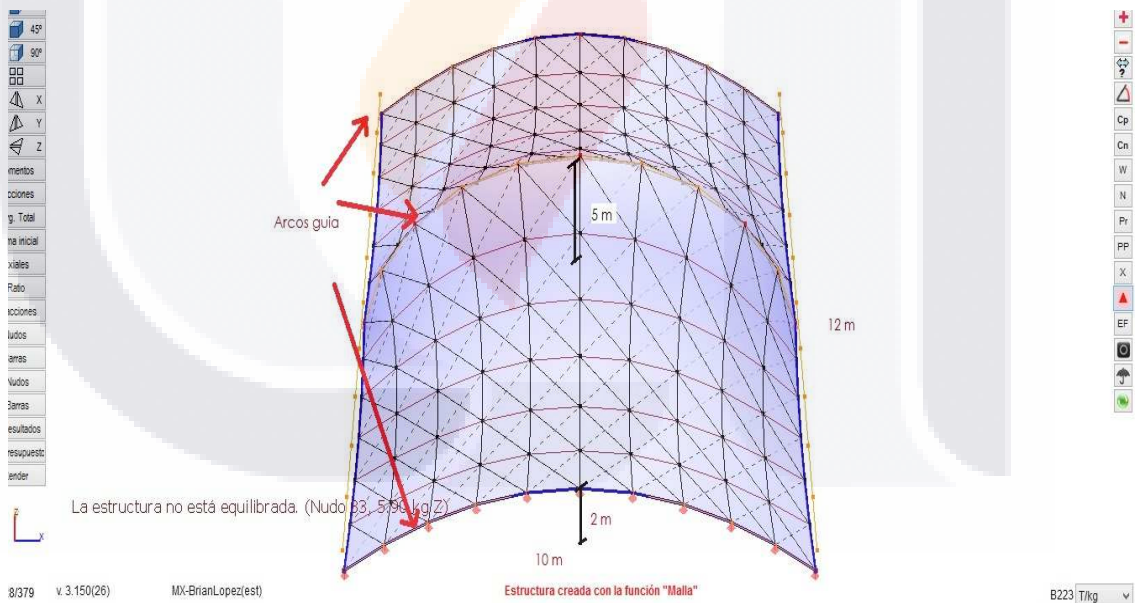


Figura 37: Configuración geométrica de la estructura a evaluar

Claramente en la figura se presenta una estructura con cierto estado tensional debido al peso propio y con cierto grado de mallado en la cubierta, que por

condiciones y comodidad es a cada metro, dicho mallado servirá para cuestiones explicadas más adelante. Cabe mencionar que para tener el control de las coordenadas en el mallado es mediante el programa Wintess, el cual está enfocado para las estructuras tensadas.

Sin embargo analíticamente que sucede dentro de los pasos a realizar, en este punto ya habríamos realizado algunas iteraciones mediante el método matricial de densidad de fuerzas para obtener una forma preliminar de análisis.

5.2.1.1 Método de densidad de fuerzas, formulación matricial

Para explicar los fundamentos del método y desglosarlo un poco más a detalle haremos un paréntesis con una figura de menores dimensiones pero con significado para los fundamentos tomando como base el artículo de Southern (2011).

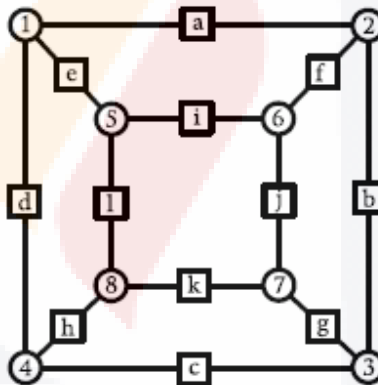


Figura 38: Estructura para ejemplificar la formulación de la matriz del método de densidad de fuerzas

En este caso contamos con una figura con 12 barras y 8 nodos, las barras comúnmente se asignan con letras y los nodos con números. El método matricial se encarga en convertir en un sistema lineal con resolución de mayor facilidad para encontrar la forma tensional. El método matricial engloba las ecuaciones que ya describimos pero ahora retomamos:

$$(C^T * Q * C)X = R$$

Donde C es la matriz de conectividad, Q es la densidad de fuerzas para cada elemento que se define como la relación de la fuerza entre la longitud del elemento y final, X denota la posición en los nudos y el equilibrio de deformaciones, finalmente R hace referencia al vector de cargas.

Entonces la matriz de conectividad, la cual es parte fundamental de la convergencia del método se rellena con valores de 1 y -1, donde el primero denota el inicio de la barra en análisis y -1 el fin de la misma. La matriz tiene una dimensión de M x N, donde M es el número de barras y N el número de nodos. Siempre es de mayor conveniencia empezar de izquierda a derecha tomando como referencia de abajo hacia arriba, es decir como si estuviéramos en el primer cuadrante de un plano cartesiano. También es útil aclarar que la matriz puede dividirse en zonas de acuerdo a la posición de las barras como en la figura 39 se denota Cf y C.

	C_f				C			
	1	2	3	4	5	6	7	8
a	1	.	.	-1	.	.	.	.
b	.	1	-1	.	.	.	.	.
c	.	.	1	-1	.	.	.	.
d	1	.	.	-1	.	.	.	.
e	1	.	.	.	-1	.	.	.
f	.	1	.	.	.	-1	.	.
g	.	.	1	.	.	.	-1	.
h	.	.	.	1	.	.	.	-1
i	.	.	.	.	1	-1	.	.
j	.	.	.	.	.	1	-1	.
k	.	.	.	.	.	.	1	-1
l	.	.	.	.	1	.	.	-1

Figura 39: Matriz de conectividad ejemplificada para densidad de fuerzas

Por su parte la matriz Q referente a la densidad de fuerzas, la cual se evalúa como el cociente de F (fuerza) entre la longitud del elemento, dependerá mucho de la malla propuesta para el análisis, para una primer iteración será el peso propio entre la longitud de la zona de análisis, la longitud seguramente debido a la naturaleza de la geometría de una tensoestructura tendrá que ser evaluada integrando la longitud de arco del tramo de análisis, posiblemente seccionando las ecuaciones que describen la geometría de acuerdo a los cambios de dirección en la curvatura. La matriz Q es de una dimensión igual al número de nudos y es de carácter diagonal.

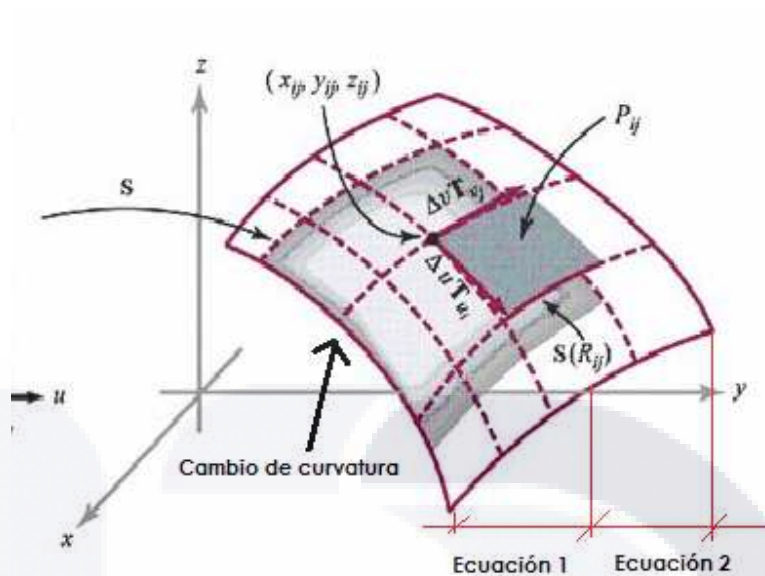


Figura 40: Ejemplo de cambios de curvatura en una superficie, número de ecuaciones para evaluar el comportamiento geométrico y así calcular la longitud de curva del elemento

La ecuación de la longitud de curva se muestra como

$$L = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)^2} dx$$

Donde los límites a y b son las coordenadas de los puntos donde se desea evaluar la longitud y $f'(x)$ es la derivada de la función que describe ese tramo de la curva, dicha ecuación puede sacarse aplicando mínimos cuadrados de al menos segundo orden en ese tramo de la curva.

Retomando la ecuación del método de densidad de fuerzas, la parte del componente que en este caso es X que es referente a los desplazamientos resultantes de acuerdo a la dirección de análisis, que bien podría ser Y o Z. Finalmente R es el vector de cargas, que en una primer iteración y donde solo se considera el peso propio de la estructura solo podemos conocer las cargas aplicadas en los nudos fijos que se relacionan con los puntos de anclaje o que coinciden o tienen referencia con la estructura portadora de la tensoestructura y dichas cargas provienen del análisis estructural de la misma.

Después de realizar el método matricial, se expresara un vector de desplazamientos de acuerdo al mallado en el sentido de análisis X, Y o Z, cabe aclarar que una vez conocida la posición de los nodos de acuerdo al mallado propuesto y de acuerdo a la estructura portadora y sus puntos de anclaje se pueden conocer las longitudes de cada barra para la densidad de fuerzas pudiendo evaluar dicha longitud como se ha descrito anteriormente; sin embargo surge la duda sobre el proceso iterativo del método cuando es que tiene fin, o hasta cuando es necesario efectuarlo, ¿Cómo es que puedo conocer la geometría ideal?-

5.2.1.2 Corrección del método de acuerdo a la tensión o de acuerdo a la fuerza

Al asignar en el método el cociente de la relación de la fuerza y la longitud de cada elemento tomando como referencia el mallado de la sección, donde queda claro que el valor de la fuerza con mayor complejidad a evaluar es dentro de los nodos interiores, debido a que estos dependen íntimamente de la malla seleccionada y no en su totalidad de la estructura portadora como si es el caso de los nodos de borde que pueden tomar una parte de la componente de la reacción por el análisis estructural de la estructura portadora de la tensoestructura.

Una vez efectuada una primera iteración puede realizarse la corrección de fuerza. Para que exista equilibrio los componentes de fuerza interna para un mismo nodo en una misma dirección debería ser el mismo, sin embargo dicha fuerza queda en términos de la longitud del elemento donde para un mismo nodo cada fuerza que converge en él no necesariamente puede tener la misma longitud, por lo que a misma fuerza el cociente no será el mismo.

En la tesis de Javier Sánchez (2006) se expone una pequeña ecuación para la corrección de fuerza, definida como:

$$q_{i+1} = q_i * f_i$$

Donde f_i es el cociente de corrección de la fuerza obtenida para cada elemento, dicho cociente es la fuerza resultante entre la fuerza deseada.

La fuerza deseada puede tomarse a partir del diagrama esfuerzo-deformación del material con el que se esté trabajando, tomando en cuenta una tensión razonablemente correcta o segura para la estructura, donde en algunos casos podrá ser antes del punto de fluencia del material o bien un poco después del mismo, todo queda en función del tipo de material y sus características para deformarse.

Dicho cociente queda como:

$$f_i = \frac{F_i}{F}$$

El cual multiplicará el valor q de la iteración anterior.

$$q_{i+1} = q_i * \frac{F_i}{F}$$

Con este ajuste se permite reducir el número de iteraciones en las fuerzas internas de la tela y una convergencia del método más rápida.

5.2.2 Determinación de fuerzas reales en la estructura

Ahora retomando el ejemplo de aplicación y una vez explicada las primeras iteraciones para la densidad de fuerzas y con ello obtener una forma preliminar de análisis, pueden determinarse las diferentes cargas reales (además de la debida al peso propio) en la estructura, que en este caso la de mayor énfasis es la provocada por el viento.

Cualquiera que sea la estructura que esté sometida a los efectos del viento en su superficie en la mayoría de los reglamentos y normas referentes al efecto del viento llegan a la determinación de la velocidad de diseño para el viento. El procedimiento y los factores para la determinación de la misma cambiaran de acuerdo al código que se estudie, sin embargo dicha velocidad es el fundamento para conocer la verdadera presión que se efectuará sobre la estructura, sea cual sea su geometría. Además que la mayoría de programas especializados en el análisis de viento toman como valor base y fundamental esta velocidad.

5.2.2.1 Determinación de velocidad básica de diseño

En nuestro caso enfocándolo a los códigos más cercanos para México, siendo sin duda dos como referencia, las normas técnicas complementarias de diseño por viento y las diferentes versiones del manual CFE en sus distintos apartados para el diseño por viento. Eligiendo por la segunda, se procede a determinar la velocidad de diseño, mencionando también la existencia de las normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, las cuales se basan en el manual de CFE para diseño por viento, por lo que si son mencionadas en estos puntos, indirectamente se habla del manual CFE pero con una información más concreta.

Según CFE en su apartado de viento la velocidad se define como:

$$V_D = F_T F_a V_R$$

Donde F_T corresponde al factor correctivo por la topografía y rugosidad del terreno y alrededores del sitio de desplante, el cual es adimensional.

F_a hace referencia al efecto combinado de las características locales, el tamaño de la estructura y la variación de la velocidad con la altura; también es adimensional.

V_R describe la velocidad regional del sitio donde se construirá, expresada en km/h.

Para determinar dichos parámetros es necesario clasificar el tipo de estructura y la categoría de terreno donde es desplantada, de acuerdo a la figura 41 de las normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, la estructura del ejemplo se clasifica en la clase A, debido a que cualquiera de las tres dimensiones de análisis son menores de 20 m, altura de 5 m en el arco central, largo de 12 m y ancho de 10 m.

Figura 41 Clase de estructura según su tamaño

CLASE	DESCRIPCIÓN
A	Todo elemento de recubrimiento de fachadas, de ventanerías y de techumbres y sus respectivos sujetadores. Todo elemento estructural aislado, expuesto directamente a la acción del viento. Asimismo, todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, sea menor que 20 metros.

Fuente: Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, apartado de viento

El tipo de terreno de acuerdo a la tabla 6.1 de la fuente "Categoría del terreno según su rugosidad", se determina como "3" para un terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas, considerando que se sitúa en un área urbana o suburbana.

Determinadas estas dos consideraciones, se procede a conocer la velocidad de diseño.

La primer parte de la ecuación VR se elige de la tabla 6.3 de la norma para velocidades regionales de las ciudades en México, teniendo la consideración que para elegir el valor correcto el tipo de estructura afecta la selección. Los grupos A se asocian para un periodo de retorno de 200 años, en B a 50 años y en C a 10 años. El sitio de desplante es la ciudad de Aguascalientes, por lo que a partir de la tabla, el valor de un periodo de retorno de acuerdo a una estructura tipo A es de 162 km/h, como se muestra en la figura 42, la cual es extracción de la tabla 6.3 de las normas.

Figura 42: Velocidad regional para la ciudad de Aguascalientes en Km/h

CIUDADES	PERIODOS DE RETORNO				
	V10	V50	V100	V200 (*)	V2000
Acapulco, Gro.	129	162	172	181	209
Aguascalientes, Ags	118	141	151	160	189
Campeche, Camp.	98	132	146	159	195

Fuente: Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, apartado de viento

El segundo elemento para determinar la velocidad de diseño es el factor de exposición, el cual es el producto del factor tamaño F_c y el factor que establece la variación del viento con la altura Z , F_{rz} .

El factor de tamaño se determina a partir de la figura 43 de la forma, que de acuerdo a una estructura tipo A es de 1.

Figura 43: Factor de tamaño F_c

CLASE DE ESTRUCTURA	F_c
A	1.00
B	0.95
C	0.90

Fuente: Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, apartado de viento

Por su parte el factor de rugosidad y altura, ya que la altura máxima al tratarse de una altura menor a 10 m se calcula con la ecuación:

$$F_{rz} = 1.56 \left(\frac{10}{\delta} \right)^\alpha \quad \text{si } Z \leq 10$$

Donde alpha es el exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura y gama es la altura medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y se puede considerar constante, conocida como altura gradiente. Ambos valores pueden determinarse a partir de la tabla 6.5 de la norma en la figura 44.

Figura 44 Valores de α y δ

CATEGORÍA DEL TERRENO	α			δ (m)
	A	B	C	
1	0.099	0.101	0.105	245
2	0.128	0.131	0.138	315
3	0.156	0.160	0.171	390
4	0.170	0.177	0.193	455

Fuente: Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, apartado de viento

Que en este caso al tratarse de una categoría de terreno 3 y una clase de estructura A, los valores son 0.156 y 390 respectivamente, los cuales al sustituirlos y calcular el factor Frz queda:

$$Frz = 1.56(10/390)^{0.156}$$

$$Frz = 0.881$$

Retomando que Fc es 1, por lo que el factor de exposición será:

$$F_{\alpha} = F_c Frz$$

$$F_{\alpha} = (1 * 0.881) = 0.881$$

Por último la tercer parte de la ecuación hace referencia a FT, es decir al factor de topografía que se determina a partir de la tabla 6.6 de la norma en la figura 45.

Figura 45: Factor de topografía local FT

SITIOS	TIPO	TOPOGRAFÍA	FT
Protegidos	T1	Base de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.8
	T2	Valles cerrados	0.9
Normales	T3	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores que 5%	1.0

Fuente: Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, apartado de viento

Que para un terreno tipo 3, se trata de 1.

Con ello quedan determinados los 3 elementos de la ecuación y la velocidad de diseño se calcula.

$$V_D = V_R F_T F_{\alpha}$$

$$V_D = (160 * 1 * 0.881) = 140.96 \text{ km/h}$$

El siguiente punto es determinar la presión dinámica base que genera dicha velocidad en la estructura, por lo que de acuerdo al manual de CFE de viento la ecuación es:

$$q_z = 0.0048GVD^2$$

Donde G es el factor de corrección por temperatura y por altura sobre el nivel del mar del punto de estudio, el cual se calcula como:

$$G = \frac{0.392\omega}{273 + T}$$

ω es la presión barométrica en mm de Hg y T es la temperatura promedio ambiental en °C

Por lo que la temperatura media y la altura sobre el nivel del mar para la ciudad de Aguascalientes es de 17.4 °C y 1888 metros según el gobierno del estado de Aguascalientes y el INEGI; la presión barométrica se calcula a partir de la tabla 7.1 de la norma puesta en la figura 46, que en este caso para una altura de 1888 m es necesario interpolar entre 1500 y 2000 m.

Figura 46: Relación entre la altitud y la presión barométrica

ALTITUD (msnm) hm	PRESIÓN BAROMÉTRICA (mm de Hg) Ω
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

Fuente: Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones, apartado de viento

Después de interpolar entre dichos valores, la cantidad para ω es de una presión barométrica de 609.1 en mm de Hg. Sustituyendo estos valores y calculando el valor G:

$$G = \frac{0.392 * 609.1}{273 + 17.4}$$

$$G = 0.822$$

Por lo que la presión dinámica base es:

$$q_z = 0.0048 * 0.822 * 140.96^2$$

$$q_z = 78.42 \text{ kg/m}^2$$

5.2.2.2 Presión actuante sobre la construcción

Determinada la presión dinámica base, tiene que aplicarse en la construcción, este efecto recibe el nombre de presión actuante y queda primordialmente en parámetros de la geometría de la construcción, su ecuación es:

$$P_z = C_p q_z$$

P_z define la presión actuante, q_z es la presión dinámica base y C_p es el coeficiente de presión de viento y es adimensional. Los diferentes valores de C_p de muchas formas estructurales comunes se especifican en anexos de los códigos de construcción y análisis para viento, sin embargo para una tensoestructura debido a su compleja configuración geométrica difícilmente se encuentre recomendaciones para evaluar esta parte de la ecuación, los diferentes códigos en unanimidad y reincidentemente recomiendan que para formas de cierta complejidad y anormalidad lo ideal sería utilizar pruebas de túnel de viento en una geometría a escala del modelo a evaluar, sin embargo algunas veces será difícil realizar dicha prueba en el modelo por disponibilidad de software y herramienta de un túnel de viento a la mano, otra manera sencilla de evaluar la distribución de presiones en la geometría es mediante software capaz de evaluar los efectos de viento en un modelo, habiendo algunos que pueden realizar esta tarea como Ansys, Wintess, Autodesk flow design, Rhinoceros en extensión con Grasshopper, Robot Structural, etc.

5.3 Determinación, complejidad y descripción de presiones de viento en una geometría inusual

Como se ha mencionado la obtención de la carga de presión final actuante en una estructura está directamente ligada con la distribución geométrica de la

misma, que en el caso de una cubierta ligera o una tensoestructura el encontrar recomendaciones en los distintos códigos de análisis por el viento en el mundo será complicado, no porque el campo no sea de estudio común sino por la complejidad de evaluar el segundo efecto del viento, siendo el primero la presión y al que se hace referencia como la succión.

5.3.1 Vector normal y su relación con un coeficiente de presión de viento

Es evidente que para poder evaluar la máxima incidencia de una carga sobre una superficie es mediante a la resultante de la misma carga en dos (X y Y) o tres direcciones (X, Y, Z) según sea el caso sobre el área, dicho vector es conocido como el vector normal y también está ligado en base a la descripción geométrica de la superficie que queda determinada bien a partir de la parametrización de la curva o superficie o mediante su ecuación de forma y curva, seccionando la geometría de acuerdo a su inclinación en el plano.

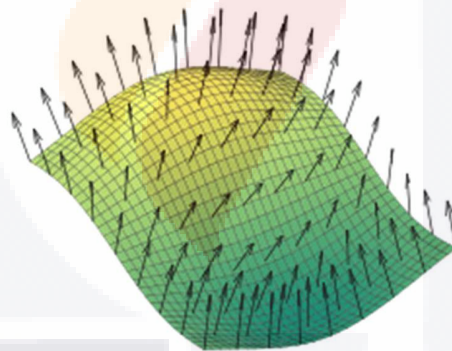


Figura 47: Vector normal para una superficie de acuerdo a secciones

En el caso de una tensoestructura debido a la idealización del trabajo como cable de la misma y el seccionado de la superficie a partir del mallado propuesto en el método matricial para describir la geometría, coincidirá con el seccionamiento para obtener los vectores normales de una determinada zona o bien de la superficie entera. Cada punto o nodo en el mallado presentará una fuerza y vector normal.

La comparación de dicho vector normal en cada porción de área en la superficie con el vector a partir del ángulo de ataque del viento donde primordialmente los máximos valores en una situación aislada de la estructura se describen en favor a la dirección ortogonal y la dirección paralela de la misma es decir a 90° o 0° si se ve a partir del plano cartesiano desde planta.

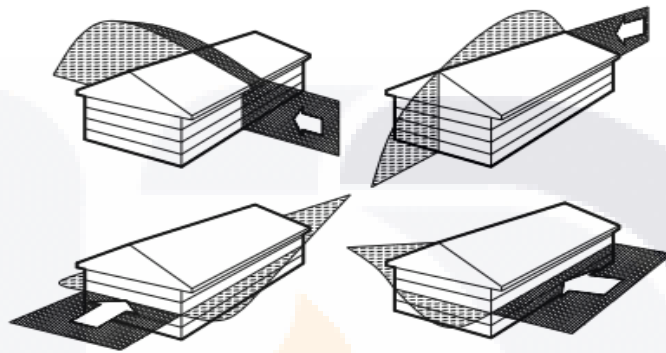


Figura 48.: Angulo de ataque del viento a partir de 0 o 90 grados.

Medir la incidencia del viento en un ángulo de ataque diferente a estos dos tendrá una mayor complejidad ya que los vectores normales estarán desfasados de dicha fuerza, aunque no necesariamente en una dirección ortogonal o paralela deberán estar alineados, ya que ellos están ligados a la geometría de la superficie y no al vector aplicado por el viento, en fin para fines prácticos deberían ser rotados y hacerse coincidir en el mismo plano de incidencia del vector debido al viento.

Para una impresión rápida y muy general de un coeficiente de presión de viento, será el cociente del vector normal a una porción de superficie entre la fuerza aplicada ortogonalmente o paralelamente a dicha superficie, en nuestro caso la presión que actúa en el área tendría que ser dividida por la presión dinámica base, esa relación general describirá el coeficiente de presión en el pequeño diferencial de área referenciado al mallado.

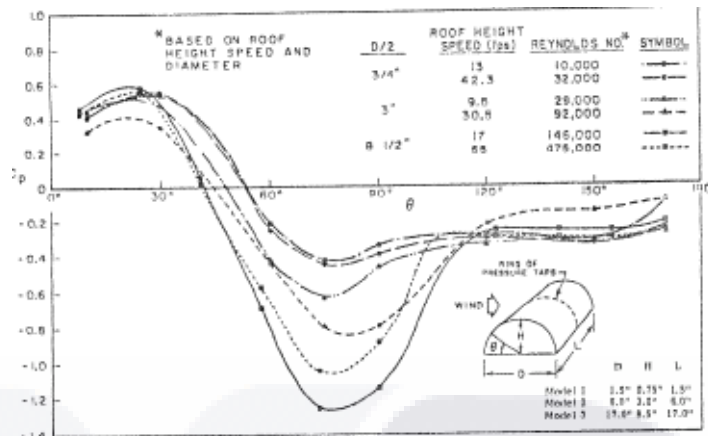
5.3.2 Vector normal y evaluación a succión

En base a la previa definición general de un coeficiente de viento de acuerdo y en base puramente de la fuerza aplicada, el vector normal dictará de manera

correcta la relación de la presión sobre el área y la presión dinámica base hasta el punto donde se aplica una fuerza desde la misma orientación que la del viento que vista desde el plano de la fuerza será de derecha a izquierda o viceversa, sin embargo esta relación solo aplica para una fuerza, la presión; queda en disyuntiva ¿Qué es lo que sucede con la succión? y ¿Desde qué punto comienza a evaluarse?, una vez más las grandes preguntas son: ¿En qué punto puede saberse el cambio del efecto del viento de presión a succión? Y ¿En base a qué velocidad de diseño puede evaluarse el efecto de la succión?

Primero definiendo que es la succión, de acuerdo al diccionario de arquitectura y construcción (2017), se describe como la presión negativa que se ejerce en las superficies verticales a sotavento; queda claro que esta definición solo toma como referencia un edificio en forma rectangular parado; comúnmente se tiene la idea de que la succión comienzan desde la mitad hacia atrás de una edificación o bien la parte trasera de la misma haciendo analogía “sotavento igual a succión” y sí comúnmente la parte de sotavento tiene valores de succiones, sin embargo en superficies curvas como en el caso de una figura de una tensoestructura la succión o arrastre también puede presentarse desde antes de la mitad o visto en grados desde antes de los 90° en referencia con la horizontal de la estructura, esto puede ser comprobable en el artículo de Jhonson, Surry y Ng (S.A.), en el cual evalúan un arco sencillo para 3 diferentes modelos de cubierta y denotan que presiones negativas pueden comenzar desde aproximadamente 55 a 60 grados del arco midiéndolo desde la horizontal, es decir denotan que no necesariamente en estructuras curvas las succiones comienzan a partir de 90° medidos desde la horizontal, por lo que comienza la disyuntiva de “¿Como evaluar la succión sino se tiene un arco en la geometría, además no se tiene referencia de acuerdo a los códigos de viento, desde donde empezar a evaluar la succión y mucho menos se cuenta con un túnel de viento a la mano para hacer pruebas en un modelo a escala?

Figura 49: Análisis con túnel de viento para distintos, valores de coeficientes de presiones de viento en función del ángulo de ataque

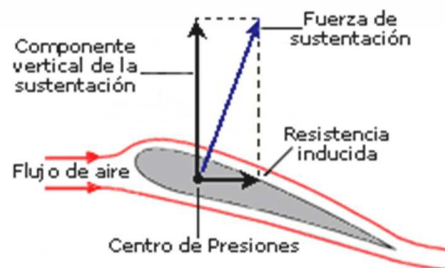


Fuente Jhonson, Surry y Ng (S.A.)

5.3.3 La mecánica de fluidos y su aplicación para evaluar la succión

La succión de un cuerpo puede ser medido mediante el arrastre del mismo ante un fluido que en este caso es el viento, para nosotros como ingenieros civiles el interés está centrado en evaluar la fuerza, empuje o arrastre en un punto de la estructura y con ello determinar el vector de cargas que según sea el método matricial en nuestro caso pueda ser rellenado con dichos valores. La resistencia o arrastre del cuerpo queda medida de acuerdo a si el cuerpo está sumergido en la capa laminar o turbulenta en base a la velocidad del fluido con el que está en contacto la superficie, la cual en función a la inclinación del cuerpo se dividirá en dos fuerzas tanto tangencial como normal, llamadas arrastre y sustentación; ambas de acuerdo a la resultante de la suma de vectores mostrarán la fuerza resultante aplicada en esa porción de superficie o área.

Figura 50: Fuerzas inducidas e acuerdo al flujo



Fuente: Sotelo (1997)

El arrastre puede ser dividido en arrastre por fricción y arrastre por presión (Sotelo, 1997) y la suma de ambos describen el arrastre total, que en el caso de edificios o superficies como las que se trabajan en la ingeniería civil predomina el debido a la presión. La ecuación que define el arrastre y simplificando las fórmulas para ambos arrastres es:

$$D = C_d \rho V_o^2 A * \frac{1}{2}$$

Donde V_o es la velocidad del fluido, A es el área transversal del cuerpo y normal a V_o , mientras que ρ describe la densidad del fluido, finalmente C_d es el coeficiente de arrastre, el cual es adimensional y queda determinado experimentalmente de acuerdo a la forma del cuerpo.

La otra componente de la fuerza, la sustentación queda definida por una ecuación prácticamente similar, solo variando un coeficiente de sustentación C_l que también está en función de la experimentación de acuerdo a la geometría.

$$L = C_l \rho V_o^2 A * \frac{1}{2}$$

Nuevamente una parte de ambas ecuaciones empuja a la experimentación en túnel de viento, comúnmente se tienen graficas que pueden medir dichos coeficientes y están en función de evaluar el número de Reynolds, el cual se basa en la velocidad del flujo; o bien en función del ángulo de ataque del flujo.

Por lo regular dichas graficas existen para geometrías muy regulares o usuales en el campo de la aerodinámica y de la mecánica de fluidos como lo son los cilindros tanto cuadrados, circulares, semitubulares, triangulares o cuerpos aerodinámicos medidos desde un eje paralelo o normal al flujo. En muchos casos las gráficas presentan el coeficiente de arrastre total y no subdividen sus dos componentes que para términos prácticos es mejor.

Sin embargo tanto para el arrastre englobado o subdividido en sus dos componentes, es complejo medir su incidencia, de entre todas las geometrías comúnmente evaluadas, la que mayor semejanza tiene con la superficie de una

tensoestructura es la de una placa plana (si es que la superficie se divide en un número considerable de segmentos rectos que describan la curvatura) donde comúnmente se presentan valores para una placa en posición normal o paralela al flujo, como se muestra en la figura 51.

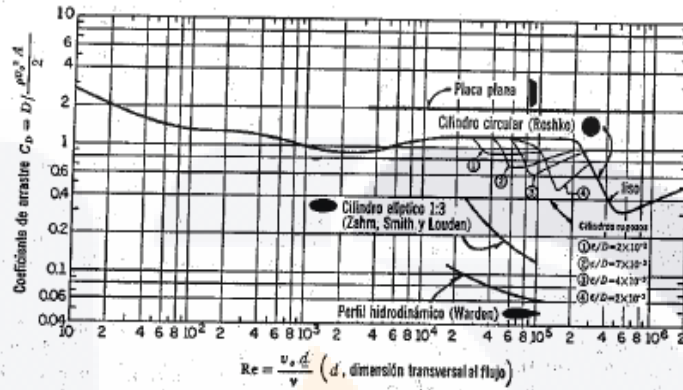


Figura 51: Arrastre total en cuerpos bidireccionales

Donde la limitante de poder utilizar dichas ayudas y evitar el túnel de viento es que están evaluadas para una placa plana paralela al flujo.

5.3.4 Placa inclinada y analogía para una geometría como una tensoestructura

Para poder medir el arrastre y con ello conocer que parte de la succión toca para cada elemento en una geometría de condiciones no normales o usuales, tomando como base la mecánica de fluidos y los coeficientes tanto de arrastre como sustentación con la aeronáutica, con lo cual queda una última disyuntiva de cómo hacer análogo esto a la geometría que se estudia o cualquiera en sí y así estar del lado de la seguridad que desde un ángulo 0 hasta uno de 180, se mide y se toma en cuenta la succión del viento aplicado paralelamente a la horizontal.

Por ejemplo se toma un arco que es semejante a la geometría del problema inicial de aplicación.

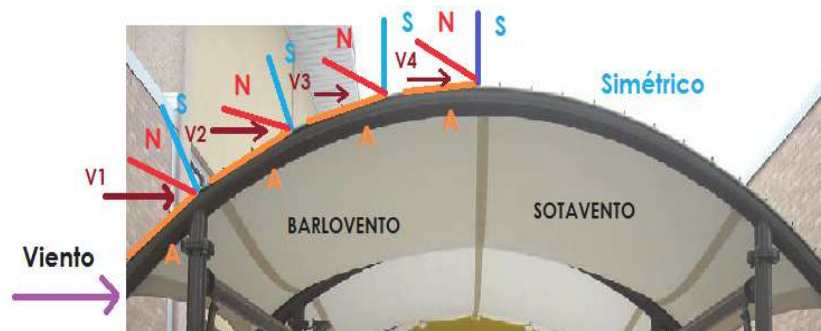
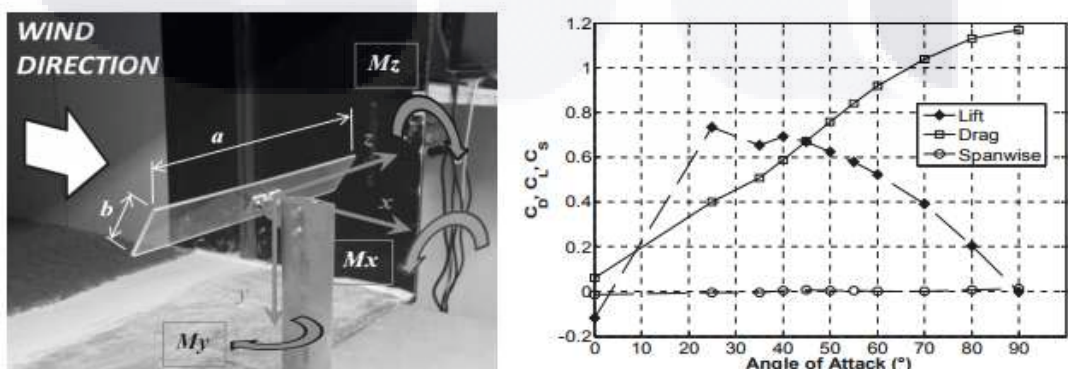


Figura 52: Segmentación en un arco buscando los vectores normales en cada parte

Por lo que cada porción de área tendrá tanto su vector normal igual al punto de aplicación de la fuerza resultante y su vector de sustentación como de arrastre, si se toma como base el mallado propuesto para la figura, se puede conocer la porción de área y con la parametrización previa de las curvas o superficie que la describen puede conocerse la longitud de cada segmento. Sin embargo para cada placa existe una inclinación y se tiene que hacer la adecuación tanto para los coeficientes de arrastre y sustentación de esta consideración.

En el artículo de Ortiz, Rival y Wood (2015) exponen una serie de pruebas para una placa inclinada mostrando que el coeficiente de sustentación y arrastre sostienen el mismo valor para un ángulo de ataque de 45 grados.

Figura 53: Prueba de túnel de viento para una placa inclinada



Fuente: Ortiz, Rival y Wood (2015)

Dejando en función de la relación ancho largo el cálculo de esta ecuación obtienen valores muy parecidos con las pruebas en la placa inclinada para distintos ángulos de ataque, dicha ecuación es:

$$Cd = 1.11 + (0.02)\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right)$$

En el mismo artículo exponen diferentes gráficas para el ángulo de ataque y ambos coeficientes, sin embargo debido a la ecuación y sus resultados bastante semejantes a la pruebas, se tomará como base del cálculo del arrastre.

Por lo que si en una porción de la superficie de la tensoestructura se conoce el ancho y largo de la longitud, puede conocerse la relación AR (relación lado largo y lado corto) con ello conocer el arrastre de la figura, elaborar la suma de vectores para conocer la resultante (vector normal coincidentemente) de cada punto y ser comparado con la velocidad de diseño o bien la presión dinámica base, con esto conocer el verdadero valor del coeficiente presión de viento teniendo en cuenta el arrastre en la superficie en cualquier punto.

Sin embargo una vez más para el lado de barlovento este procedimiento quedaría correctamente aplicado en función y parámetros de la velocidad de diseño, ahora queda por responder ¿Qué velocidad se toma para el lado de sotavento?

5.3.5 Velocidad de aplicación en lado de sotavento

Para que sea aplicable la analogía de la experimentación efectuada por Ortiz, Rival y Wood (2015) la velocidad de viento aplicada es aquella en un instante antes de tener contacto con la superficie por lo que para el lado de sotavento, la velocidad queda en función del obstáculo que la misma tenga, por lo que donde esta no presenta obstáculo alguno para esta parte es en el punto más alto de la estructura, dicha velocidad puede ser calculada en nuestro caso y referencia con las NTC por viento o bien el manual de obras civiles de CFE, es claro que este punto y recalando que está en función de altura, al determinar la velocidad de diseño, el factor que toma en cuenta dicho efecto es el factor de rugosidad y altura Fr_z

que queda embebido con el factor de tamaño F_c y ambos forman el factor de exposición.

El factor de rugosidad y altura tiene tres variantes, las cuales son:

$$F_{rz} = 1.56 \left(\frac{10}{\delta} \right)^\alpha \quad \text{si } Z \leq 10$$

$$F_{rz} = 1.56 \left(\frac{Z}{\delta} \right)^\alpha \quad \text{si } 10 < Z < \delta$$

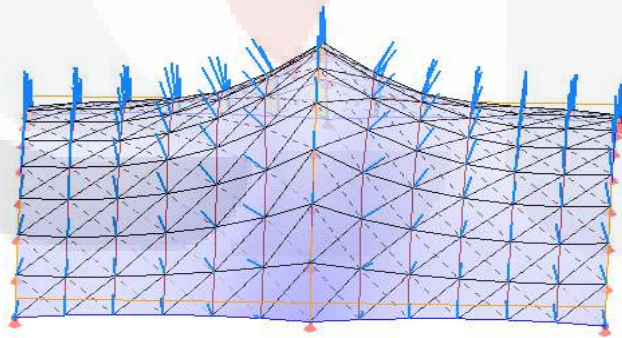
$$F_{rz} = 1.56 \quad \text{si } Z \geq \delta$$

Donde γ y α se determinan de la tabla 6.5 de la norma de viento NTC

Por lo que la altura Z cambia y determina la velocidad en ese punto, la cual es la que se aplica para evaluar el arrastre.

5.3.5 Determinación de coeficientes de presión de viento en problema general de aplicación

Retomando el problema de aplicación y mostrando los vectores normales de la figura con la ayuda del software Wintess, que son la base de la evaluación de las fuerzas actuantes definitivas con el área de contacto (figura 54).



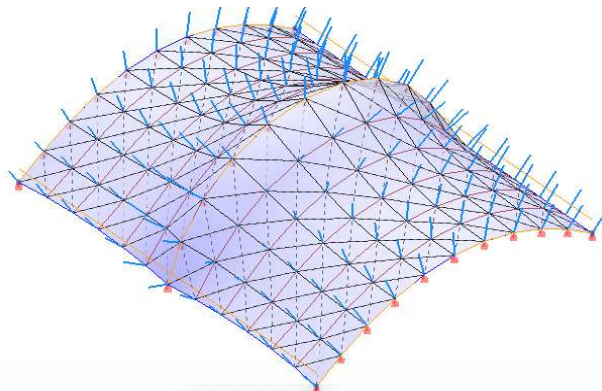


Figura 54: Vectores normales para la superficie estudiada

Recordando que esta superficie está en equilibrio solo con el peso propio de la estructura por lo que ya descrito como es que se puede obtener la carga de succión o presión para cada nodo o punto de la malla.

Comúnmente los software de análisis se basan en introducir la geometría y un valor de velocidad para evaluar la distribución de presiones, para este caso se evalúa en dos, Wintess3 y Autodesk flow design. Recordando que la velocidad de diseño es de 140.98 km/h se calcula en el primero, Wintess3.

Cargas superficiales

Viento

Velocidad real Viento X (km/h) W = 95.8 kg/m² Cp manual

Velocidad básica Viento Y (km/h)

Viento (total) = 141.0 km/h = 39.2 m/s Tipo de edificio (Cp)

Ce en función de la altura Tipo de terreno (Ce)

Efecto borde Velocidad equivalente = 162 km/h (Ce = 1.34)

Cp = Coeficientes eólicos (-)presión (+)succión (Ángulo entre la normal a la superficie y la dirección del viento)

180°	170°	160°	150°	140°	130°	120°	110°	100°	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°
-0.8	-0.8	-0.75	-0.7	-0.65	-0.55	-0.4	0.25	0.45	0.45	0.4	0.45	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

Nieve (kg/m²) Presión interna (kg/m²) Pretensado de la membrana (%)

Figura 55: Velocidad de diseño y valores de presiones en Wintess3

Introduciendo la velocidad básica, la cual genera presiones y carga nueva en la superficie, por lo que la estructura queda en desequilibrio y es necesario realizar la densidad de fuerzas una vez más hasta lograr el equilibrio. Después de este proceso la estructura denota su forma casi final.

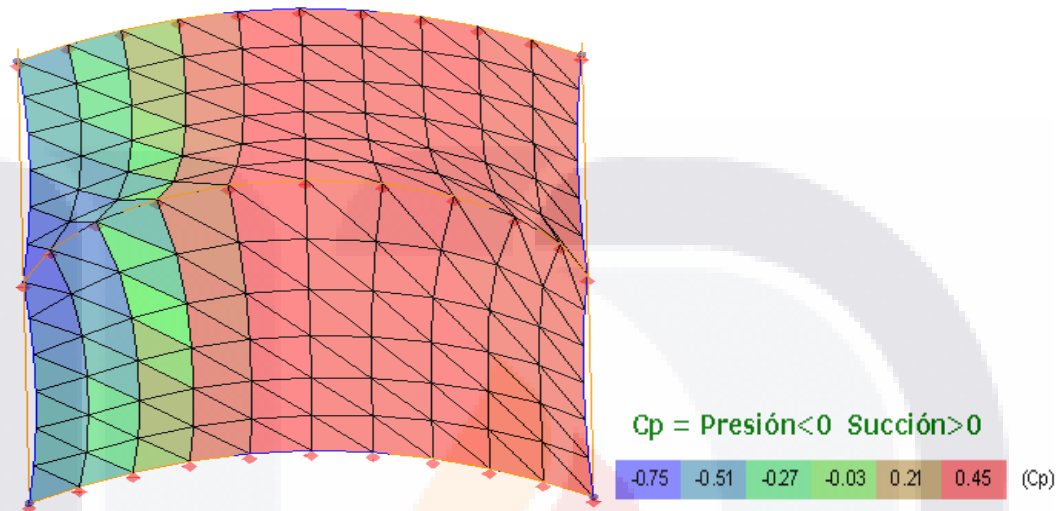


Figura 56: Distribución de presiones en la superficie en Wintess3

Por su parte Autodesk flow design de igual manera solicita un valor para la velocidad pero en cambio de Wintess, solo evalúa la distribución del fluido en la superficie y no métodos matriciales de equilibrio, es decir solo es de ayuda para obtener presiones de viento para el vector de cargas.

Por lo que con la ayuda de Rhinoceros y Grasshopper se puede “cocer” la malla que describe la geometría y convertirla en una superficie sólida que pueda ser evaluada en Flow Design.

Después de cocer y convertir la malla en superficie, se introduce en el programa e ingresando la velocidad de diseño en m/s que en la conversión es 39.16 m/s y se presenta la siguiente distribución de presiones.

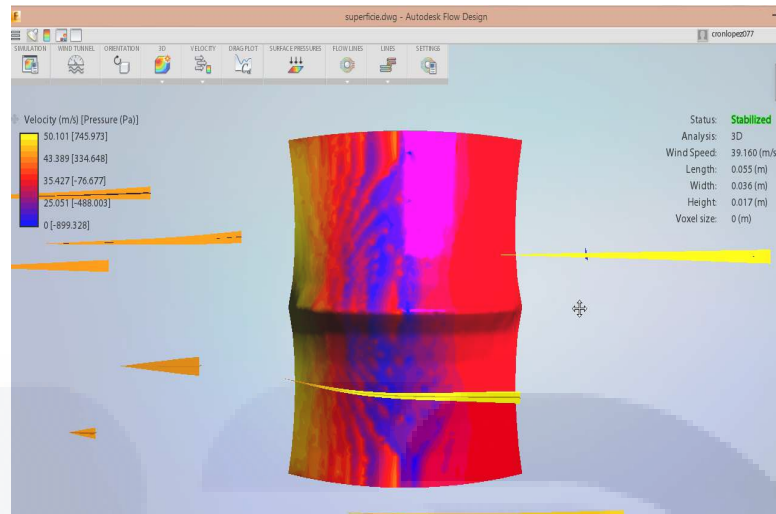


Figura 57: Distribución de presiones en Flow Design

Para obtener los valores de presión en la conversión es necesario convertir los valores de Pascales a Kg/m², es decir dividirlos entre 9.81, dichos valores deben ser comparados con una unidad de referencia que en este caso es la presión dinámica base aunque en ella queda embebido el factor G de corrección por temperatura y altura; y teniendo en cuenta que en el programa no se ingresa esta consideración, la presión dinámica base de referencia tendría que ser sin este factor. Por lo que efectuando esta división, la presión a comparar es de 95.37 kg/m², con este valor se divide cada punto de referencia y se obtienen los coeficientes de presión de viento en la superficie. Los valores de presiones para cada programa se presentan en las figuras 58 y 59 y también por mejor resolución en los anexos C y D.

0.49	0.4	0.12	-0.25	-0.45	-0.42	-0.43	-0.44	-0.40	-0.40
0.43	0.27	0.12	-0.37	-0.45	-0.43	-0.45	-0.42	-0.41	-0.40
0.43	0.33	0.12	-0.37	-0.45	-0.43	-0.43	-0.43	-0.41	-0.4
0.57	0.49	0.21	-0.31	-0.45	-0.42	-0.42	-0.42	-0.42	-0.4
0.67	0.58	0.4	-0.35	-0.45	-0.43	-0.43	-0.42	-0.4	-0.4
0.75	0.64	0.43	-0.35	-0.45	-0.45	-0.43	-0.42	-0.4	-0.4
0.75	0.64	0.43	-0.25	-0.45	-0.45	-0.43	-0.42	-0.4	-0.4
0.67	0.58	0.4	-0.35	-0.45	-0.43	-0.43	-0.42	-0.4	-0.4
0.43	0.33	0.12	-0.37	-0.45	-0.43	-0.43	-0.43	-0.41	-0.4
0.43	0.33	0.12	-0.37	-0.45	-0.43	-0.43	-0.42	-0.41	-0.4
0.43	0.27	0.12	-0.37	-0.45	-0.43	-0.45	-0.42	-0.41	-0.40
0.49	0.4	0.12	-0.35	-0.45	-0.43	-0.43	-0.44	-0.40	-0.40

WINTESS 3

Figura 58: Valores de coeficientes de presión de viento en Wintess 3 para la geometría estudiada

0.4	0.35	0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35	-0.35	-0.32	-0.32
0.5	0.35	0.15	-0.25	-0.4	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.6	0.35	0.15	-0.35	-0.5	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.25
0.6	0.45	0.2	-0.4	-0.52	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.25
0.65	0.6	0.25	-0.45	-0.55	-0.5	-0.4	-0.38	-0.35	-0.35
0.79	0.6	0.3	-0.4	-0.55	-0.55	-0.38	-0.38	-0.35	-0.35
0.79	0.6	0.3	-0.4	-0.55	-0.55	-0.38	-0.38	-0.35	-0.35
0.65	0.6	0.25	-0.45	-0.55	-0.5	-0.4	-0.38	-0.35	-0.35
0.6	0.45	0.2	-0.4	-0.52	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.6	0.35	0.15	-0.35	-0.5	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.5	0.35	0.15	-0.25	-0.4	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.4	0.35	0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35	-0.35	-0.32	-0.22

AUTODESK FLOW DESIGN

Figura 59: Distribución de coeficientes de presión de viento para Autodesk Flow Design

Puede observarse en ambas figuras (mayor resolución de las mismas en anexos) los coeficientes de presión de viento son muy parecidos exceptuando pequeñas

zonas donde existe una variación de 10 o 15%, la variación más notable es en el cambio de presión a succión.

Como ya se mencionó cada coeficiente sería multiplicado por la presión dinámica base y esta es la carga de viento aplicada para cada nodo de la superficie, la cual es rellena en el vector de cargas y se hace la corrección de fuerza en la densidad de fuerzas, después se tiene que iterar el método matricial hasta obtener el equilibrio.

Al término del equilibrio la mayor tensión registrada es de 4.268 toneladas en un elemento con 1.004 metros, por lo que la tensión final es de 4.25 ton/m.

5.4 Tensión máxima de diseño y selección de membrana

La selección de la membrana es evidente que se efectúa desde el inicio de todo el proceso debido a que se necesita el dato del peso propio para determinar la primera densidad de fuerzas donde la carga en cada nodo solo es esta misma, o bien adoptando una carga unitaria en el peso propio, es posible hacer la selección hasta el final proceso, entendiendo que dicha carga unitaria debe ser mayor de cualquier baraja de opciones de materiales a utilizar, donde al final cualquier análisis este del lado de la seguridad y equilibrio estático

La membrana elegida como base es Ferrari-Fluotop-T2-702 la cual tiene una resistencia de 60 KN/m (6.12 ton/m) y un peso de 750 gr/m².

Tomando la tensión máxima del análisis estructural y multiplicándola por 1.1 por ser carga accidental de viento para obtener la tensión última de diseño y resultando 4.68 ton/m, la cual es menor a la resistencia a la tensión de la membrana, es decir que el material si soporta la tensión solicitada para la superficie de estudio.

$$T_u = FC * T_a \leq T_r$$

Donde:

T_u = tensión última

Ta = Tensión máxima del análisis estructural

Tr = resistencia a la tensión del material

FC = Factor de carga

$$Tu = (1.1) * (4.25 \frac{Ton}{m})$$

$$Tu = 4.68 \frac{Ton}{m} < 6.12 \frac{Ton}{m}$$



CAPÍTULO VI METODOLOGÍA APLICADA EN EJEMPLO Y DISEÑO DE LA CUBIERTA DE UN INVERNADERO

Introducción

Una vez descrito el proceso matricial, tanto para la forma final de análisis y las cargas debido al viento impuesto en alguna geometría inusual, se tiene que encaminar el problema al enfoque de la tesis, que son las estructuras de tipo invernadero.

Como ya se ha descrito en capítulos anteriores, un invernadero tiene diversas configuraciones geométricas y variaciones en su cubierta, como pueden ser túnel, capilla a dos aguas, diente de sierra, capilla modificada, tipo Parral, tipo Holandés, entre otros más; sin embargo para condiciones aerodinámicas y de ventilación los que sostienen una relación curvilínea en su techo tendrán mejor comportamiento ante las cargas de viento aunque su complejidad de análisis estructural crezca un poco como se ha descrito en el capítulo tercero de este documento.

Afortunadamente la mayoría de códigos para análisis y diseño por viento tocan en sus apartados relaciones para techos con distribución en forma de arco, claro techos con solo un arco y no combinación de varios arcos, en fin inicialmente para dar ejemplo a esto se prosigue a describir un arco sencillo denotando las diferencias y semejanzas para las distintas normas.



Figura 60 Invernadero tipo capilla, la cual es la forma más semejante a un arco

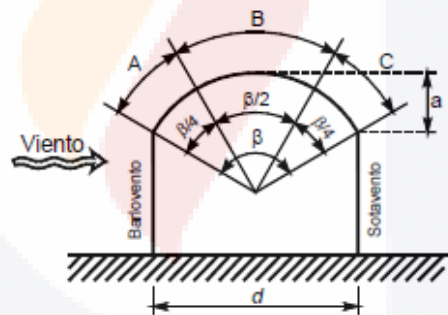
6.1 Cubiertas tipo arco, normativa de este tipo de geometría ante la acción del viento

Después de consultar varias normas y códigos de diseño por viento se han elegido 4 representativas que a criterio pueden resolver de buena manera la distribución de presiones para un arco, como lo son la norma mexicana por ser local, real decreto español, código ASCE de Estados Unidos y el código de Nueva Zelanda para acciones por viento.

6.1.1 Normativa mexicana

Para México tanto las NTC por viento y el manual de obras civiles tocan este tipo de estructuras en sus apartados. La primera hace referencia a una tabla donde es necesario obtener una relación “r” proveniente del arco de análisis, dicho valor de r es el cociente a/d, donde a es la altura solo del arco y d es su ancho longitudinal.

Figura 61 Cubiertas en arco



Fuente: NTC 2004 Viento

Los valores para esta relación para cada una de las 3 partes del arco se muestran en la tabla 3.5 de la misma Norma (tabla 2 en esta tesis).

Tabla 2: Coeficientes de presión C_p para cubiertas en arco

Relación $r=a/d$	A	B	C
$r < 0.2$	-0.9	-	-
$0.2 < r < 0.3$	$3r - 1$	$-0.7 - r$	-0.5
$r > 0.3$	$1.42 r$	-	-

Fuente: NTC 2004 Viento

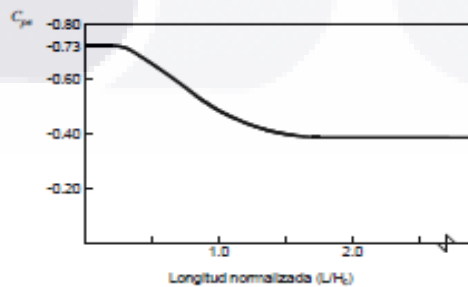
Por su parte el manual de obras civiles para diseño por viento de CFE en la versión 2008 limita a una relación λ_c que es el mismo cociente de la altura del arco entre la base del mismo (H_c/b) cuando se considera viento normal a la generatriz, mientras que cuando el viento es paralelo a la generatriz muestra una gráfica que se fundamenta en la misma relación λ_c .

Tabla 3: Coeficientes de presión exterior para construcciones con cubierta de arco circular donde el viento actúa normal a la generatriz

Relación altura-claro $\lambda_c=H_o/b$	Zonas localizadas a lo largo de la nave	Coeficiente de presión exterior		
		Barlovento (B)	Zona central (C)	Sotavento (S)
$0.20 < \lambda_c < 0.35$	Extrema	0.33	-0.67	-0.42
	Intermedia	0.33	-0.38	-0.31
$0.35 < \lambda_c < 0.6$	Extrema	0.4	-0.54	-0.42
	Intermedia	0.4	-0.46	-0.35

Fuente: Manual de obras civiles CFE 2008 Viento

Figura 62 Coeficiente de presión para construcciones de arco circular con viento paralelo a la generatriz

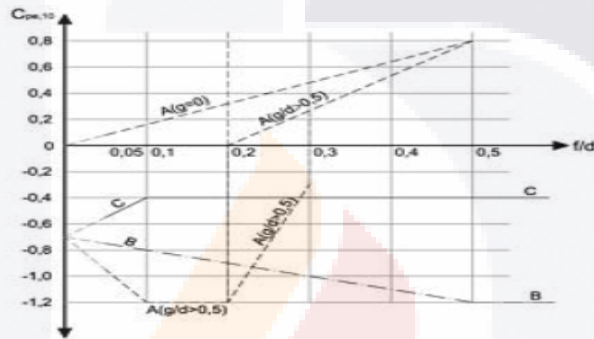


Fuente: Manual de obras civiles CFE 2008 Viento

6.1.2 Real decreto español

Por otra parte la norma española de viento en su apartado para cubiertas cilíndricas expone una gráfica que se basa a partir de la misma relación: altura del arco entre su base (f/d) intersectando rectas que se basan entre la relación de la altura libre sin el arco entre la misma base “ d ”, dividiendo en arco en tres secciones denotan los valores de presiones positivas o negativas.

Figura 63: Valores de coeficientes de presión para un arco según decreto español



Fuente: Real decreto español 2006 Viento

Para valores de g/d entre 0 y 0,5, el coeficiente que se supone para el área A se obtiene mediante interpolación lineal, mientras que para relaciones f/d entre 0,2 y 0,3 y g/d mayores a 0,5 se adopta el valor más desfavorable de los dos posibles valores para la misma zona A.

6.1.3 Código de Nueva Zelanda

Nueva Zelanda presenta otra tabla para el análisis de superficies en arco en su código para una relación r/d , siendo r la altura del arco y d su longitud en la base, los valores varían de acuerdo a una relación h/r donde h es medida hasta la altura media del arco desde el desplante más inferior de la estructura.

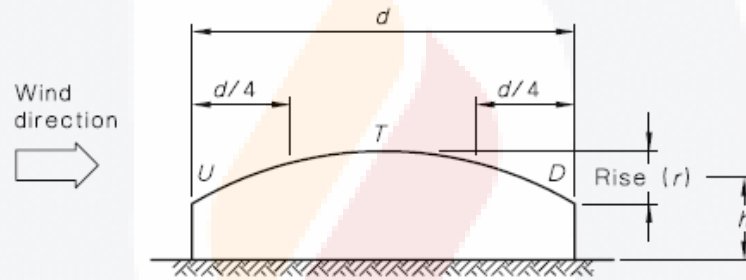
Tabla 4: Coeficientes de presión de viento para cubiertas curvas con relaciones $h/r < 2$ según el código de viento de Nueva Zelanda

Rise to span ratio (r/d)	Windward quarter (U)	Center half (T)	Leeward quart (D)
0.05	$-(0.2 + 0.4 h/r)$ or 0.6		$-(0.4 + 0.2 h/r)$ or 0.0
0.2	$(0.3 - 0.4 h/r)$ or 0.0	$-(0.55 + 0.2 h/r)$ or 0.0	$-(0.25 + 0.2 h/r)$ or 0.0
0.5	$(0.5 - 0.4 h/r)$ or 0.0		$-(0.1 + 0.2 h/r)$ or 0.0

Fuente: AS/NZS 1170.2:2002 Structural design actions - Wind actions

Para valores intermedios de r/d se permite la interpolación lineal. La nomenclatura para la geometría se muestra en la figura 64

Figura 64: Nomenclatura para la geometría de arco y así obtener valores de coeficientes de presión de viento



Fuente: AS/NZS 1170.2:2002 Structural design actions - Wind actions

6.1.4 Código ASCE (Estados Unidos)

Estados Unidos por medio del código ASCE recomienda los siguientes valores:

Tabla 5: Valores para C_p de un arco según el ASCE

Conditions	Rise to span ratio r	C_p		
		Windward quarter	Center half	Leeward quarter
Roof on elevated structure	$0 < r < 0.2$	-0.9	$-0.7 - r$	-0.5
	$0.2 < r < 0.3$	$1.5r - 0.3$	$-0.7 - r$	-0.5
	$0.3 < r < 0.6$	$2.75r - 0.7$	$-0.7 - r$	-0.5
Roof springing from ground level	$0 < r < 0.6$	$1.4r$	$-0.7 - r$	-0.5

Fuente: Código ASCE Wind loads

Cuando la relación r se encuentra entre 0.2 y 0.3 el ASCE da la opción que el coeficiente para la zona A (windward quarter) pueden estar dados por $6r - 2.1$ o bien el valor ya especificado en la tabla 6.4.

6.1.4 Comparación del valor de C_p para diferentes códigos en un arco

Eligiendo un arco con geometría sencilla como se muestra en la figura n, denotando que en los 4 códigos se recomienda dividir las áreas de distribución para la presión por viento en tres.

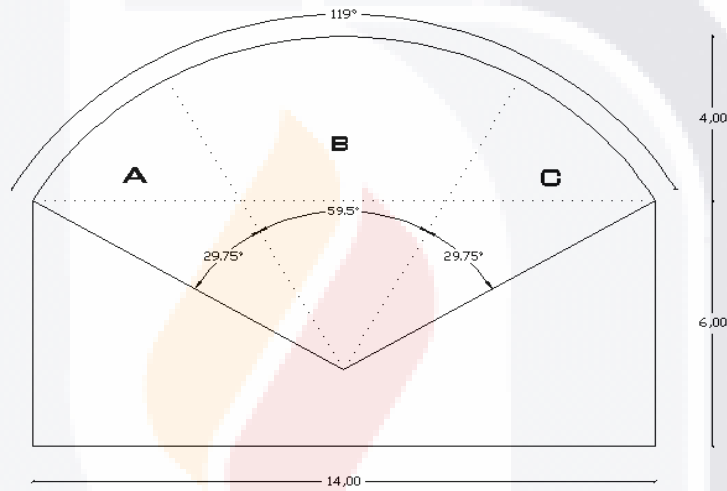


Figura 65: Arco estándar de prueba para comparación de valores C_p

Los resultados para cada código o norma se presentan en la tabla 6 para los diferentes valores de C_p según las tres zonas en el arco. Agregando la experimentación de Jhonson et al (S.A) en túnel de viento para un arco.

Tabla 6: Comparación de diferentes códigos para análisis de acciones por viento en cubiertas de tipo arco

País	Código	Valor de Cp para zona		
		A	B	C
España	Real decreto	0.7	-1.1	-0.4
Estados Unidos	ASCE	0.12	-0.98	-0.5
Inglaterra	Johnson et al.	0.55	-1.3	-0.6
México	NTC 2004	0.39	-0.98	-0.5
	CFE 2008	0.33	-0.67	-0.42
Nueva Zelanda	AS/NZS 1170.2:2002	0.52	-1.1	-0.71

6.1.5 Diseño como fluido y comparación con códigos de viento

Como ya se ha tocado el tema, el arrastre y sustentación de una placa inclinada en función de la resultante de sus fuerzas que a su vez coincide con el vector normal de la porción de la placa, puede demostrar valores cercanos a la presión resultante en cada una de las 3 porciones que en este caso es el arco.

Discretizando el arco como se hace el ejemplo en una imagen de un arco en la figura para entender que entre más se divida el arco, mejor información y resultados se tendrán. Es evidente que el lado a sotavento se evalúa con las mismas componentes en cada tramo pero contra la velocidad máxima en la altura máxima que en la figura es V4. El lado a barlovento se calcula conforme a la velocidad en cada punto, V1 para el primer tramo, V2 para el segundo, etc.

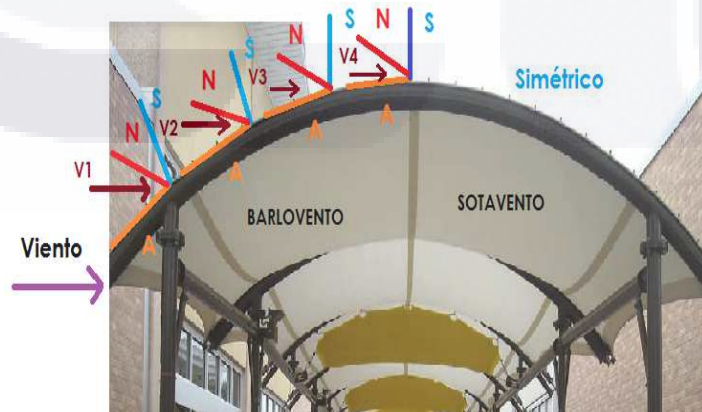


Figura 66: Ejemplo de como discretizar el arco para evaluar su vector normal

En la figura A es para arrastre y S para sustentación, N es vector normal; el lado de sotavento tiene la misma distribución.

Para utilizar las ecuaciones antes mencionadas para el arrastre y la sustentación es necesario evaluar los coeficientes de cada fuerza con la ayuda de la fórmula expuesta por Ortiz, Rival y Wood (2015) también ya mencionada atrás.

$$Cd = 1.11 + (0.02)\left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a}\right)$$

Donde a y b dependen de la forma y longitud de la placa, en nuestro caso se le da un ancho unitario a "b" para solo hacer variar la parte "a" con la longitud de cada tramo del arco.

El coeficiente de presión surge al comparar el valor de la fuerza normal con la velocidad de viento o presión base sobre el arco, es entonces cuando se conoce la relación o múltiplo.

Para el caso de nuestro arco, tomando como referencia los ángulos de cada una de las 3 partes que piden los diferentes códigos que se divida, dentro de cada zona se promedió el valor de los diferentes tramos en esa zona. En la siguiente tabla se agrega el valor de la evaluación como fluido.

Tabla 7: Comparación de valores Cp para un arco mediante distintos códigos en el mundo y un análisis como fluido

País	Código	Valor de Cp para zona		
		A	B	C
España	Real decreto	0.7	-1.1	-0.4
USA	ASCE	0.12	-0.98	-0.5
México	NTC 2004	0.39	-0.98	-0.5
	CFE 2008	0.33	-0.67	-0.42
Nueva Zelanda	AS/NZ 1170.2:2 002	0.52	-1.1	-0.71
Inglaterra	Jhonson et al.	0.55	-1.3	-0.6
Fluido	-	0.64	-1.16	-0.66

Conforme a la tabla y de acuerdo a la evaluación del arco como fluido se muestra que da valores cercanos a lo impuestos por los diferentes códigos pero señalando directamente con los estudios de Jhonson en túnel de viento que se podría decir son los apegados a la realidad del verdadero comportamiento del arco ante la acción del viento, la evaluación como fluido no dista mucho de estos valores, así que para un arco esta metodología es bastante valida.

6.2 Diseño de un invernadero, ejemplo de aplicación

El diseño de una estructura especial como un invernadero a diferencia de otras radica principalmente en el servicio al usuario a quien está dirigido que en este caso son los cultivos que habitan dentro del mismo; por su parte la diferencia en el diseño estructural es condicionarlo a responder primeramente de manera adecuada la parte ambiental y de desarrollo de la planta antes de diseñar ciertos miembros estructurales como marcos o columnas, es decir los elementos mecánicos y de diseño para los diferentes agentes de carga se determinan hasta tener la seguridad del buen desarrollo del cultivo, además de tener la flexibilidad de adaptar la estructura a diferentes cultivos.

Para desarrollar a detalle y activar todas estas variables es de prudencia realizar un ejemplo de aplicación situando el invernadero en un lugar de desplante y análisis como se denota en los siguientes puntos.

6.2.1 Selección geográfica para el invernadero y análisis de variables ambientales

Por logística y conocimiento de la posible veracidad de los datos en las variables ambientales y condiciones de la velocidad del viento la selección del lugar a desplantar es el municipio de Rincón de Romos situado en Aguascalientes. Una vez situado el lugar se puede hablar de análisis de variables como la temperatura máxima, mínima y media ambiental, la velocidad media y máxima de viento y su dirección de acuerdo a su azimut entre otros datos de interés analizando de acuerdo a cada mes en el año calendario. Los datos son tomados y promediados

en algunos casos mensualmente por parte del INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias) para la estación acorde al lugar de análisis etiquetada como Los Pinos en Rincón de Romos con latitud $22^{\circ} 19' 13.2''$ y longitud $102^{\circ} 13' 30.6''$ respectivamente.

Los valores proporcionados por la plataforma va desde el año 2002 al 2018, pudiéndose consultar hasta el día actual y en tiempo real, por cuestiones de cerrar a una medida equitativa para el análisis por meses se analiza hasta Diciembre del año 2017. La elección de estos datos, los cuales contienen una población de alguna forma pequeña de alrededor 15 años sobre datos proporcionados de algún organismo como la CONAGUA que contienen un espacio más amplio de décadas, es debido que los datos proporcionados por la CONAGUA se cortan en años como los 90 o principios del milenio y solo se limitan a valores de precipitaciones y temperatura, en cambio el INIFAP brinda datos actuales para estos parámetros y datos relacionados con la velocidad promedio del viento y de la ráfaga, ambos datos son de interés ya que se está analizando la cubierta del posible invernadero y las presiones que la misma desarrolla debido al viento.

Los datos después de acomodarse para ser analizados mensualmente y tener mejor manipulación de los mismos, se presentan en las siguientes tablas teniendo como fin dar a conocer su comportamiento histórico dentro de cada mes descrito por el promedio del valor, siendo en puntos posteriores la explicación del uso y por qué la recolección de los mismos.

En las siguientes tablas la humedad relativa es representada en porcentaje, las velocidades de viento tanto la promedio diaria mensual y la máxima mensual (ráfaga) se representan en metros sobre segundo, la dirección del viento se mide de acuerdo al azimut en grados y finalmente las temperaturas en grados centígrados.

Tablas 8: Velocidad de viento mensual promedio y Tabla 9: Velocidad de ráfaga máxima por mes

Velocidad Viento promedio (m/s)	
Mes	Promedio
Enero	3.40
Febrero	3.88
Marzo	4.40
Abril	4.28
Mayo	3.96
Junio	3.97
Julio	3.06
Agosto	2.69
Septiembre	2.53
Octubre	2.65
Noviembre	2.78
Diciembre	2.87

Velocidad ráfaga (m/s)	
Mes	Promedio
Enero	24.17
Febrero	24.88
Marzo	28.14
Abril	25.98
Mayo	29.18
Junio	25.70
Julio	25.07
Agosto	21.15
Septiembre	17.53
Octubre	20.35
Noviembre	20.93
Diciembre	23.45

Tabla 10: Dirección del viento mensual promedio y Tabla 11: Dirección de ráfaga máxima mensual

Dirección de viento promedio		
Mes	Promedio	Dirección
Enero	206.55	SO
Febrero	206.23	SO
Marzo	208.21	SO
Abril	209.57	SO
Mayo	207.25	SO
Junio	186.55	SO
Julio	160.74	SE
Agosto	230.06	O
Septiembre	204.54	SO
Octubre	190.50	SO
Noviembre	219.36	SO
Diciembre	218.50	SO
Promedio	204.00	SO

Dirección de ráfaga máxima		
Mes	Promedio	Dirección
Enero	302.49	O
Febrero	300.98	O
Marzo	298.93	O
Abril	296.94	O
Mayo	294.41	O
Junio	291.82	O
Julio	289.30	O
Agosto	287.07	O
Septiembre	284.77	O
Octubre	282.60	O
Noviembre	280.74	O
Diciembre	279.65	O

Tabla 12: Distribución de valores de temperatura para la estación de análisis

Temperaturas			
Mes	Tmax	Tmin	Tmed
Enero	21.09	1.20	10.87
Febrero	23.16	2.21	12.74
Marzo	25.46	4.18	15.25
Abril	28.46	6.77	18.44
Mayo	29.58	10.07	20.38
Junio	28.32	12.91	20.51
Julio	26.20	12.79	18.96
Agosto	26.41	12.51	19.06
Septiembre	25.21	12.27	18.15
Octubre	24.90	8.28	16.40
Noviembre	23.13	3.72	13.12
Diciembre	21.72	1.37	11.11
Max temp	29.58	Mayo	
Min temp	1.20	Enero	
Med max	20.51	Junio	

Tabla 13: Humedad relativa de acuerdo a la estación climática

Humedad relativa (%)	
Mes	Promedio
Enero	54.64
Febrero	48.55
Marzo	40.51
Abril	36.04
Mayo	42.23
Junio	57.34
Julio	68.28
Agosto	67.86
Septiembre	72.42
Octubre	65.49
Noviembre	60.08
Diciembre	56.13

6.2.2 Selección del cultivo

La selección del cultivo en este caso es del tomate donde las operaciones protegidas (invernadero) se concentran principalmente en estados como Sinaloa, Baja California, Y Jalisco, en menor medida en Colima, México, Hidalgo,

Michoacán, Querétaro, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas (parte sur del estado, frontera con Aguascalientes).

Es evidente que en el estado de Aguascalientes tanto a cielo abierto como en una estructura protegida no se desarrolla prioritariamente el cultivo del tomate exceptuando una pequeña parte al norte del estado, esto es debido a condiciones de humedad relativa y temperatura media, es decir a cielo abierto difícilmente se cumplen las condiciones que exige la planta para su desarrollo que varían de un 60 a 80 % de humedad relativa y por su parte la temperatura mayor a 27°C hace difícil el pensar que la planta puede desarrollarse, por su parte si se combaten estas limitantes con el uso de un invernadero, para este tipo de cultivo la estructura necesitara un proceso de ventilación forzada o climatización mediante maquinas, lo cual pudiese resultar un mayor costo para el productor. En afán que el invernadero propuesto solo tenga una de las dos formas de ventilación, mecánica y forzada, siendo la primera la que se busca ya que es en base a la ventilación debido al viento mediante aberturas cenitales y ventanas debido al menor costo de operación.

Tomando como referencia la tabla 13 los valores para los meses de Julio hasta Noviembre son aquellos que cumplen la humedad relativa que ocupa el tomate para desarrollarse correctamente, en cambio el ciclo de crecimiento del tomate se promueve en un rango de 3 a 4 meses. La selección de meses para trabajar es de Julio a Octubre, los 4 meses cumplen el requisito de la humedad relativa; por su parte la temperatura óptima del tomate de acuerdo a sus etapas se desarrolla como se muestra en la tabla 14 (Escalona et. Al, 2009):

Tabla 14: Temperaturas críticas en el tomate

Temperaturas críticas del tomate		
Germinación óptima		25-30 °C
Desarrollo	Diurna	23-26 °C
	Nocturna	13-16 °C
Floración	Diurna	23-26 °C
	Nocturna	15-18 °C
Maduración		15-22 °C

Fuente: Escalona et Al

A partir de comparar la tabla 12 referente a las temperaturas en el lugar y la tabla 14 acorde a las temperaturas críticas en el tomate puede verse que para los meses de Julio a Octubre la temperatura máxima ronda en los 26 grados, lo cual cumple de manera justa para la máxima en los procesos de desarrollo y floración de la planta, por su parte las temperaturas mínimas rondan en los 12-13 grados, por lo que cumplen para la menor temperatura demandada que es de 13 grados en la etapa de desarrollo; por su parte la temperatura media en los 4 meses ronda de 17 a 20 grados siendo solo el mes de Octubre presentando mínimas de 8 grados donde debería tenerse cuidado de cerrar el invernadero totalmente y cumplir la temperatura mínima con la suma de un delta de temperatura provocada justamente por el invernadero, el cual será explicado en siguientes puntos, por lo que podría decirse que en función de la temperatura la planta tiene condiciones para desarrollarse además de cumplir los requerimientos de humedad relativa ya mencionados.

6.2.3 Selección del invernadero a utilizar e implementación de dimensiones

La selección de la forma del invernadero a utilizar para ejemplificar la teoría previa para el análisis de presión de viento de un arco en puntos previos es de un invernadero tipo capilla.

De acuerdo a Marín (2013), la altura recomendable para un invernadero es aquella que permite alcanzar 3 metros cúbicos por cada metro cuadrado de superficie ya que en estas condiciones se logra un mejor desarrollo de cultivos altos como tomates; por su parte Arnaiz (2001) en su tesis aumenta veracidad a esta teoría ya que describe que en las dimensiones de un invernadero se recomienda para una mayor estabilidad térmica y de humedad una relación de 2.5 o 3 m³ por cada m² de superficie cubierta además de recomendar que el invernadero no debería ser muy alto porque a mayor altura, mayor será la resistencia que este tenga al viento.

Para justificar este requisito se seleccionó un invernadero tipo del catálogo de un proveedor llamado apr greenhouses & technology para un invernadero multicapilla con la siguiente información:

- Anchura de 9.6 m
- Altura debajo del canal de 4 m
- Altura hasta el cenit de 6 m
- Distancia entre pilares de 5 m interiormente y de 2.5 m en el exterior

Estas medidas se ejemplifican de mejor manera en la siguiente figura proporcionada por el catalogo.

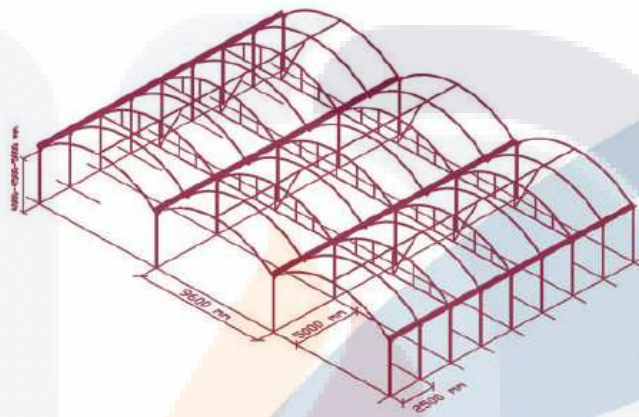


Figura 67: Dimensiones para un invernadero multicapilla

El invernadero seleccionado tiene 30 m de longitud mientras que una distribución frontal como se muestra en la figura 68.

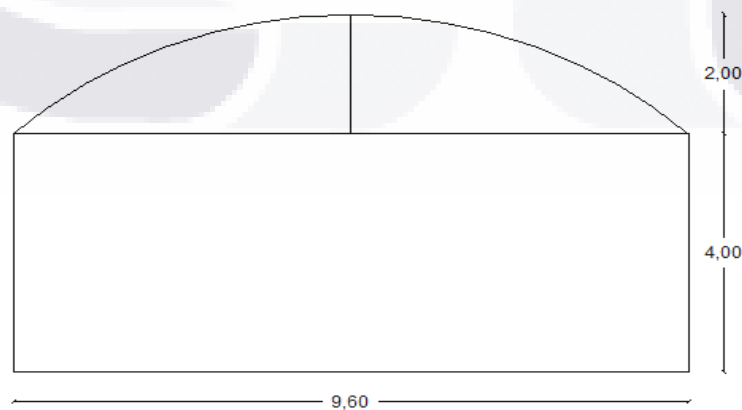


Figura 68: Dimensiones del invernadero

Para calcular la relación volumen superficie se calcula como sigue:

$$\text{Área del semicirculo} = 13.23 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen del semicirculo} = 13.23 \times 30 = 396.9 \text{ m}^3$$

La parte de rectángulo inferior solo se limita a 1.7 m ya que es la altura libre que permite el tomate, el cual ocupa de 2 a 2.3 m de altura para su desarrollo.

$$\text{Área del rectangulo} = 1.7 \times 9.6 = 16.32 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen del semicirculo} = 16.32 \times 30 = 489.6 \text{ m}^3$$

Por lo que el volumen total es la suma de las dos partes:

$$\text{Volumen total} = 886.5 \text{ m}^3$$

Y la superficie total cubierta es de:

$$\text{Superficie cubierta} = 9.6 \times 30 = 288 \text{ m}^2$$

Efectuando la división y así sacar la tasa requerida

$$\text{Taza} = \frac{886.5 \text{ m}^3}{288 \text{ m}^2} = 3.07 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}$$

El resultado es cercano a los 3 m³/m² requeridos por lo que se puede decir que las dimensiones del invernadero son correctas y cumpliría las condiciones para mantener la humedad correcta dentro del invernadero.

Esta tasa se describe por una unidad de invernadero, en nuestro caso y con la finalidad de ver una distribución de viento distinta a la de un arco sencillo, se opta por un invernadero en batería constituido por 3 capillas.

6.2.4 Posicionamiento del invernadero de acuerdo a la iluminación y dirección del viento

De acuerdo a la literatura y manuales de orientación para un invernadero la mejor manera de orientarlo es de manera paralela a la dirección del viento diaria por condiciones de ventilación, es decir el lado largo del invernadero paralelo a esta

dirección, en este caso y de acuerdo a la tabla 6.8 la dirección del viento promedio de acuerdo a todo el año es de 204° medidos desde el azimut.

Ahora surge la duda si esta es la mejor posición para orientar el invernadero, es claro que también debe compararse y describir si esta posición también es correcta de acuerdo a condiciones de una buena iluminación, ya que una buena posición de acuerdo a la iluminación natural puede redituar beneficios económicos en menor gasto de luz artificial.

Para elaborar el análisis de la mejor posición de acuerdo a la iluminación, se ha utilizado el programa Ecotect, el cual puede mostrar la mejor posición solar de acuerdo a las coordenadas tanto de longitud como de latitud de la estructura.

Sin embargo el problema pide registros previos de la zona a analizar, registros disponibles en el sitio web de energy plus, <https://energyplus.net/weather>; para el caso de México solo se tienen registros para 3 ciudades (Acapulco, México y Veracruz), lo cual deja en un dilema el uso de esta herramienta ya que no se tienen registros de la ciudad de Aguascalientes y mucho menos del municipio de Rincón de Romos.

Para resolver este problema y sabiendo que la iluminación y radiación dependen de la latitud del lugar en cuestión en el planeta, por lo que teniendo en cuenta que las coordenadas para su latitud de la estación de análisis Los Pinos es de $22^\circ 19' 13.2''$, por lo que el buscar una ciudad que tenga una coordenada parecida a la de la estación resolvería el problema y con ello se podría usar el programa para sacar la mejor posición de acuerdo a la luz solar.

Después de buscar y comparar coordenadas, se elige la estación desplantada de acuerdo a energy plus para la ciudad de La Habana en Cuba, ya que sus coordenadas conforme a su latitud son de $23^\circ 07' 58''$, las cuales son muy semejantes a las coordenadas de la estación de los Pinos, teniendo alrededor de medio grado como margen de error (figura 6.9).

Una vez cargados los datos de la estación de análisis en el programa y la superficie del invernadero dimensionada con la ayuda del programa Rhinoceros,

se calcula la mejor posición solar del recinto a partir de Ecotect como se muestra en las figuras:

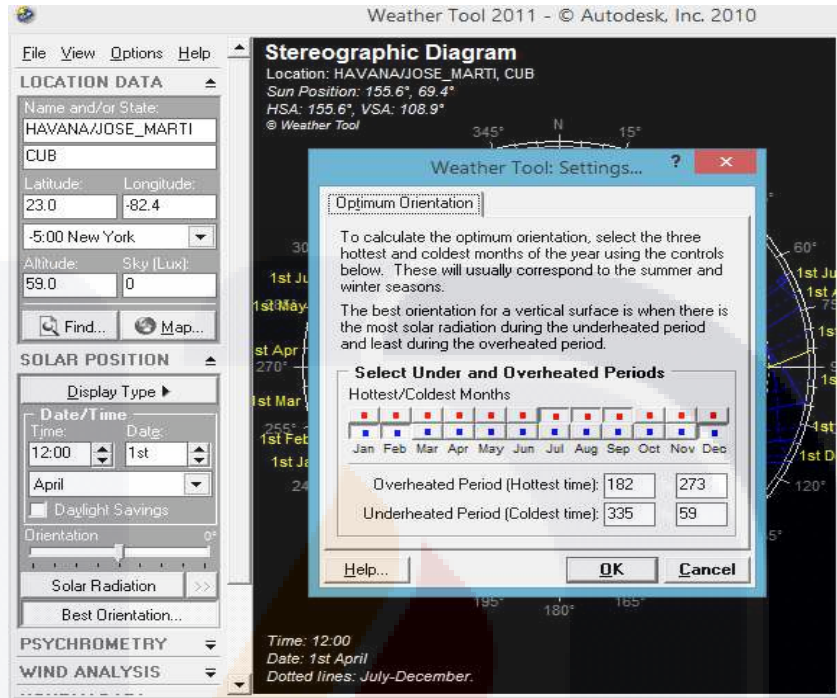


Figura 69: Calculo de mejor orientacion solar con el programa Ecotect

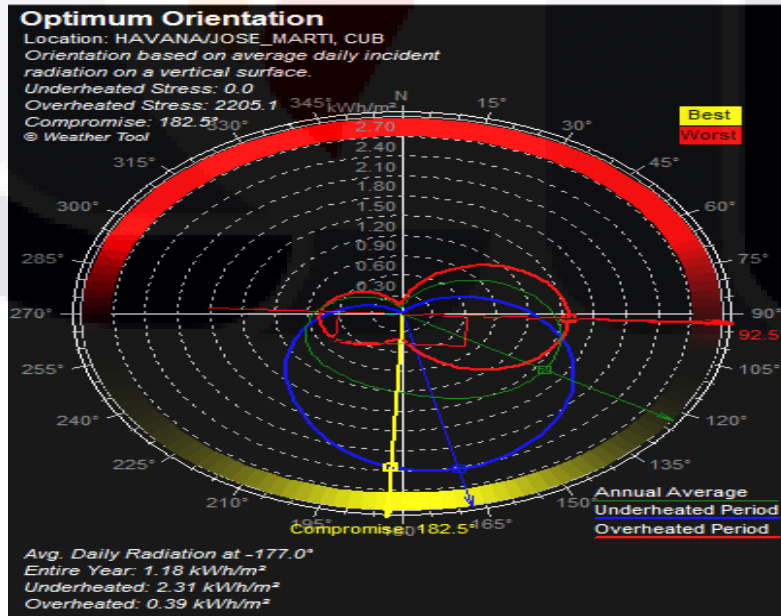


Figura 70: Valor para la mejor orientación del recinto

El valor obtenido es de 182.5° para la mejor orientación solar medido desde el azimut. Este valor se asemeja o es muy cercano al valor de 204° obtenido por la dirección del viento, lo cual resulta favorable ya que como se ha comentado la orientación del invernadero para una buena ventilación es totalmente paralela a la dirección del viento, en este caso se toma como mejor valor de orientación el definido por viento, teniendo la seguridad que el recinto tiene una buena iluminación natural ya que el valor de 182.5° es muy parecido.

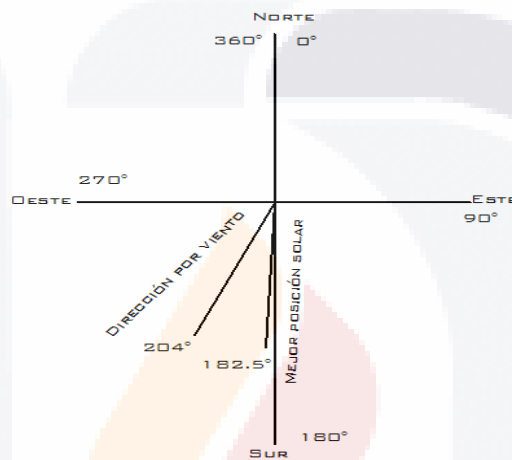


Figura 71: Esquema de direcciones del viento dominante y mejor posición solar

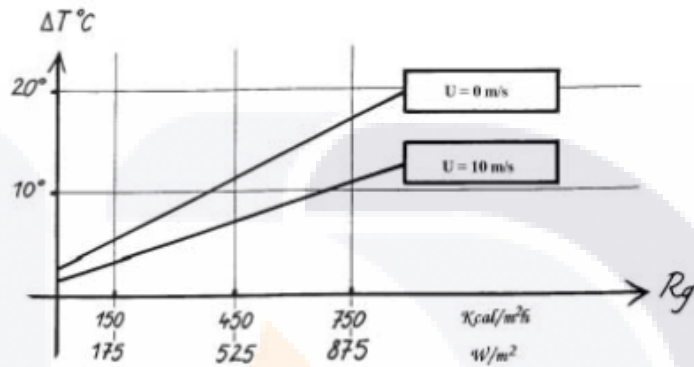
6.2.5 Determinación de salto térmico inicial y tasa de ventilación requerida en el invernadero

La ventilación en un invernadero puede deducirse a sustituir la masa de aire caliente interna por otra masa de otro más frío procedente de afuera. Para ello se toman dos sistemas de ventilación, el natural y el mecánico, queda claro que el tipo de ventilación depende del tipo de cultivo y la forma de la estructura.

Sin tomar en cuenta el posible sombreado de la cubierta, el salto térmico inicial puede ser calculado en función de la velocidad del viento y la radiación dentro del invernadero. Los datos para la velocidad media de viento se muestran para cada mes en la tabla 6.6 mientras que los datos referentes para la radiación máxima dentro del invernadero pueden ser calculados en el programa Ecotect.

Una vez obtenidos estos datos, el salto térmico puede determinarse con la ayuda del grafico obtenido a partir del libro de Baudoin (2002) mostrado en la figura 6.12.

Figura 72: Aumento de temperatura en un invernadero cerrado y abundantemente regado en relación con la intensidad de la radiación solar y la velocidad del viento



Fuente: Baudoin (2002)

A partir de la figura ya que se tiene los valores de velocidad de viento y solo faltando calcular los valores de radiación para cada mes pudiera conocerse el salto térmico para cada mes elaborando una interpolación lineal entre las dos rectas de viento, sin embargo el crecimiento de la planta el cual afecta directamente la radiación directa en el recinto no necesariamente se divide en partes iguales para estos 4 meses, es decir en un mes.

Cada tipo de cultivo tiene un ciclo vegetativo de acuerdo a su periodo de crecimiento y 4 etapas de desarrollo desde la siembra hasta la cosecha, en el caso del tomate. La primera etapa se fija hasta el 25% del ciclo vegetativo, la segunda hasta el 50%, la tercera finaliza en el 80% y la última se manifiesta en este último 20% del 100% del ciclo.

Por lo que en base a estos porcentajes debe dividirse los 4 meses y así obtener el tiempo determinado de cada fase en días, con ello calcular la radiación para ese lapso.

Tabla 15: División de días para cada etapa de cálculo de radiación

Ciclo vegetativo	% límites	Días por etapa	Días	Días acumulado	Inicio	Final	Inicio (sol)	Fin (sol)
A-B	25	30.75	31	31	01/07/2018	31/07/2018	07:10	20:37
B-C	50	30.75	31	62	01/08/2018	31/08/2018	07:22	20:30
C-D	80	36.9	37	99	01/09/2018	07/10/2018	07:33	20:07
D-E	100	24.6	24	123	08/10/2018	31/10/2018	07:44	19:32

Los valores para el horario del sol en cada etapa se obtuvieron con ayuda del sitio web <https://salidaypuestadelsol.com>, tomando el horario para el día con mayor cantidad de horas luz en cada etapa.

Para calcular la radiación en cada etapa se ingresaron los valores de fechas para cada etapa así como la duración en horas, tomando en cuenta que el invernadero está orientado para aprovechar la máxima ventilación, es decir a 204° medidos desde el azimut, además de implementar en el programa un análisis grid en base a una malla a nivel del suelo y con ello obtener los resultados de radiación que la planta está recibiendo además de cómo es la distribución en todo el invernadero en cada etapa como se muestra en las figuras 73 y 74 como ejemplo. Para cada mes posterior se presentan las imágenes en anexos P a Q de esta tesis.

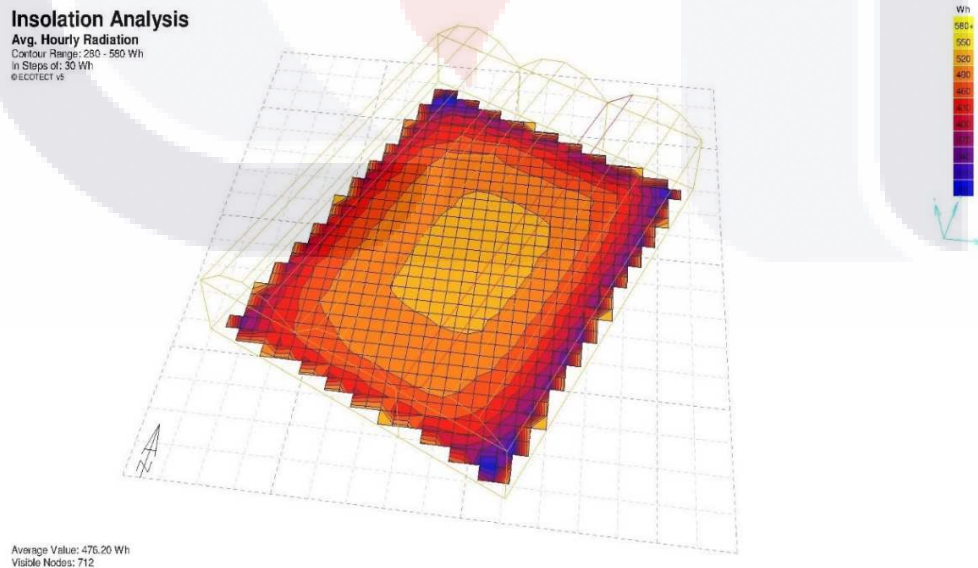


Figura 73: Análisis de radiación diaria para el invernadero en el mes de Julio como ejemplo e implementación de la malla de análisis en el nivel del suelo

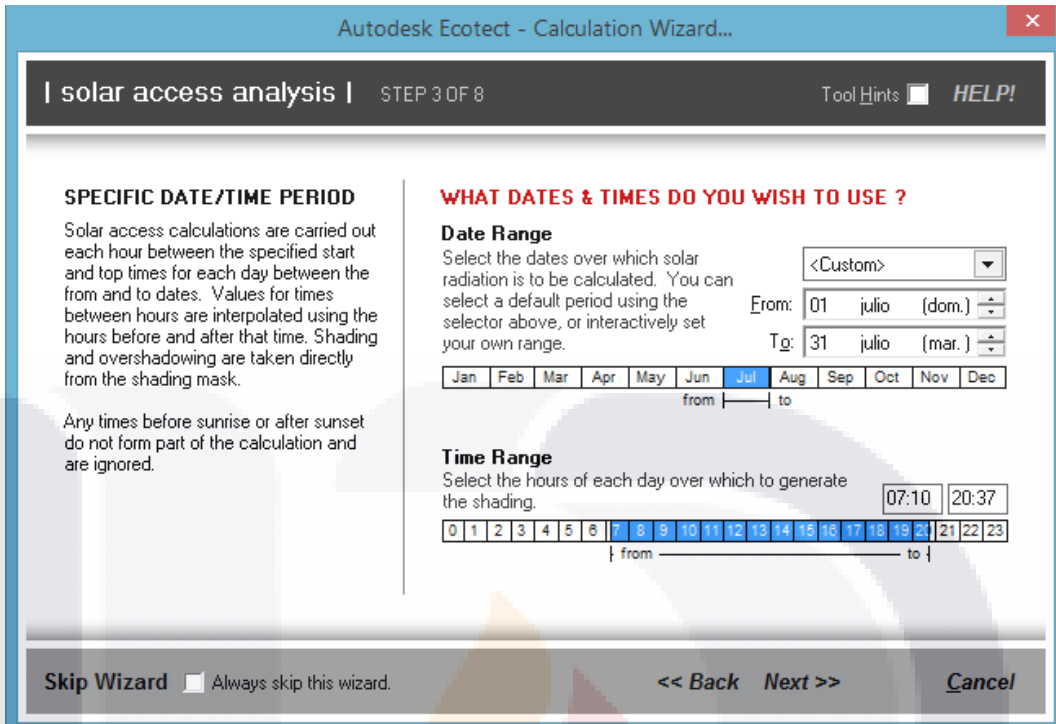


Figura 74: Calculo de radiacion a partir del programa Ecotect

Las radiaciones máximas para cada etapa en el piso del invernadero se presentan en la tabla 16

Tabla 16: Radiación máxima para cada ciclo vegetativo del cultivo a nivel piso, además de salto térmico para cada etapa

Etapa	Radiación máx. (W/m ²)	DT (°C)
A-B	540.18	10.28
B-C	550.19	10.6
C-D	494.41	9.82
D-E	476.46	9.49

Con estos datos y con la velocidad de viento se conocen los diferentes saltos de temperatura para cada etapa interpolando a partir del gráfico de la figura y que también se presentan en la tabla 16.

La determinación del salto de temperatura es importante ya que es una suma a la temperatura exterior del invernadero, esto nos da a conocer cuando el

invernadero tiene temperaturas superiores que pudiesen afectar el desarrollo de la planta, esto nos obliga a regular la temperatura dentro a base de una adecuada ventilación y un riego oportuno. Por la parte estructural de la cubierta nos dicta un valor que puede ser de ayuda para saber cuándo deben abrirse las ventanas cenitales aunque no dicta cuanta es la inclinación que debe darse para una correcta ventilación. Cabe mencionar que cuando la ventana es abierta, la distribución de presiones en la cubierta cambia, aquí la importancia del salto térmico en la parte de la estructura puntualmente en la cubierta. En puntos siguientes se explica cuanta es la inclinación necesaria para una ventilación adecuada.

6.2.6 La tasa de ventilación y su afectación en la determinación de la presión de viento en la cubierta

Como ya se ha comentado, existen dos posibilidades de ventilación dentro del recinto, la natural a base de ventanas o la forzada a base de ventiladores. Para poder tener la seguridad que la ventilación sea efectiva, los procesos de ventilación deben tener un flujo de aire suficientemente bueno para regular el gradiente de temperatura.

Otro punto que se toca en bastantes libros comúnmente relacionados con el tema de la ventilación aunando a sitios web de proveedores de estructuras de invernaderos es que para tener una ventilación adecuada el área total de las ventanas debe ser de entre un 15 y 25 % del total del área del suelo cubierta.

Los sistemas de ventilación en estudios recientes establecen que un valor de diseño adecuado es de $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ S}$ dentro de un invernadero, esto deduce que en un invernadero lleno de cultivos bien regados, esta tasa solo eleva de 2 a 3°C el gradiente de temperatura (Baeza et Al. , 2014).

En el manual de Baeza et Al también exponen diferentes formas de calcular dicha tasa, uno de ellos en base a la velocidad del viento en el invernadero. En base al gráfico proporcionado en el manual y las velocidades de viento calculadas anteriormente, la tasa de ventilación para cada etapa se muestra en la tabla 17

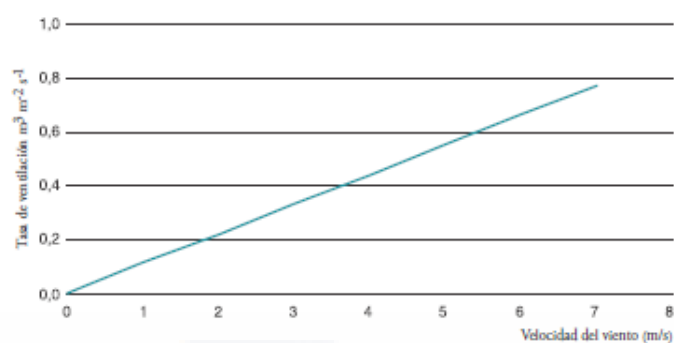


Figura 75: Tasa de ventilación por superficie media de ventana en función de la velocidad del viento en el invernadero

Tabla 17: Tasa de ventilación a partir del gradiente térmico para cada etapa

Etapa	Vel. Viento (m/s)	Tasa de ventilación m^3/m^2s
A-B	3.06	0.35
B-C	2.69	0.3
C-D	2.53	0.28
D-E	2.65	0.29

Estudiando estos resultados puede decirse que con estas velocidades de viento es posible cumplir con la tasa de ventilación de diseño que se busca de 0.04 m^3/m^2s . Las tasas de ventilación presentadas en la tabla 17 no tienen en cuenta cual es la verdadera tasa que entra al invernadero, mucho menos toman en cuenta que tipo de ventana o invernadero se está estudiando, solo denotan una tasa en función del viento, el siguiente paso es el diseño de la ventana y cuál es la tasa que la misma proporciona, que en nuestro caso será cenital por la razones de presión de viento previamente mencionadas.

La ventilación se diseña en función de la velocidad del viento promedio y por lo tanto también en función de la dirección de esa misma velocidad y cómo afecta a las ventanas situadas tanto del lado de barlovento como sotavento; el invernadero es orientado de manera paralela a ella para aprovechar en sentido largo la máxima cantidad del viento por lo que distinguir que lado es barlovento y

cual es sotavento, entonces surge la duda ¿Cómo puedo diseñar mi ventana y cómo puedo determinar su orientación a barlovento o sotavento?

Para responder la primera pregunta y definir qué lado es barlovento y cual es sotavento puede relacionarse en función de la dirección de la ráfaga de viento que es 290° desde el azimut, por lo que por cuestiones de cuidado en la estructura y prevenir desastres es mejor tomar la ráfaga con cero aberturas en el lado de barlovento ya que una abertura además de generar mayores presiones en el primer arco puede traer problemas en el crecimiento de las plantas, por lo que la ventilación se toma desde el punto de vista de la ráfaga en el lado de sotavento pero la ventana se diseña como ventana a barlovento porque el viento que la alimenta es paralelo al invernadero. Una vez más intentado aclarar esto, en el invernadero se abre la ventana desde el lado de sotavento para la ráfaga y con ello generar menores elementos mecánicos en la estructura pero la ventilación (la cual es paralela al invernadero) se diseña desde el punto de vista como una ventana a barlovento.

6.2.7 Diseño de la inclinación y ángulo de apertura de la ventana

A partir del manual de Baeza en donde presenta un gráfico (figura 76) para calcular el ángulo de apertura para una ventana se puede determinar que para nuestro caso un ángulo de apertura de 20° es suficiente para obtener una tasa con un valor alrededor de 0.042 en el diseño de una ventana orientada a barlovento, lo cual supera a los 0.04 m^3/m^2s que se sugiere como un valor ideal anteriormente.

Gráfico 6. Tasa de ventilación ($m^3 s^{-1} m^{-2}$) en función del ángulo de apertura ($^\circ$) de la ventana

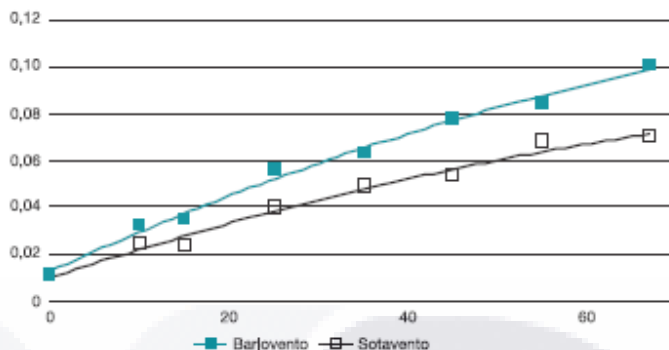


Figura 76: Tasa de ventilación m^3/m^2s en función del ángulo de apertura de la ventana

Por lo que la otra parte es cerciorar que la tasa que entra en la ventana es suficiente o mayor a 0.04 para la velocidad de viento en los meses de análisis. El mes de análisis con menor velocidad de viento es Septiembre con 2.53 m/s por lo que en función de la figura la tasa de ventilación es de 0.08 m^3/m^2s , el cual es un valor que supera los 0.04 de diseño, con ello se comprueba que la ventana abierta a 20° y con la velocidad de 2.53 m/s cumple el requisito de la tasa mínima requerida.



Figura 77: Tasa de ventilación m^3/m^2s en función de la velocidad del viento (m/s) en invernaderos con ventana de tipo enrollable

El manual de Baeza también presenta un gráfico (figura) para calcular la ventilación puramente cenital por unidad de superficie, tal y como es nuestro caso, que se muestra en el grafico que para cumplir una tasa de 0.04 en una ventana a barlovento la superficie abierta es de 0.6 m; el último paso es comparar si la

ventana abierta a los 20 grados tiene una superficie abierta mayor a 0.6 m y si es mayor entonces la tasa de ventilación a partir de una ventana cenital en el invernadero es correcta, para ello se comparan las medidas y cotas para la ventana abierta a 20 grados en una ventana con una superficie abierta de 0.6 m en la figura 78.

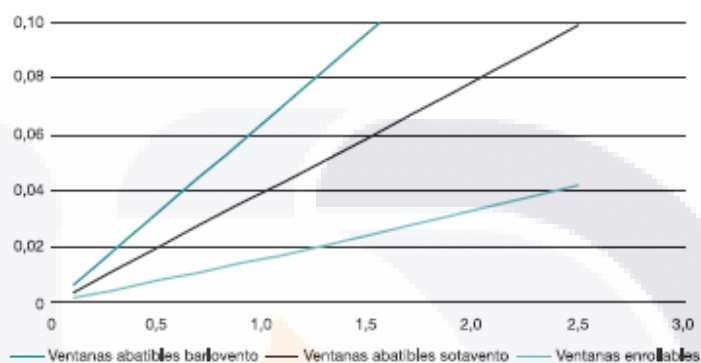


Figura 78: Tasa de ventilación por unidad de superficie de suelo

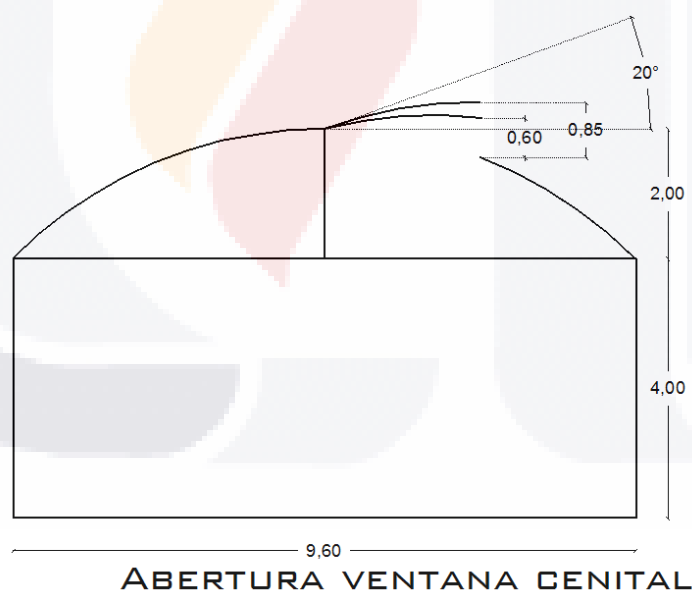


Figura 79: Cotas para abertura en la ventana cenital a 20 grados (0.85 m) y una ventana solo abierta en 0.6 m

Como puede verse en la figura para la ventana abierta a 20 grados la apertura de la superficie es de 0.85 m, el cual es un valor mayor a los 0.6 m requeridos para una tasa de 0.04 m³/m²s, por lo que en función de la superficie también la ventana propuesta a 20 grados cumple con el requisito.

De acuerdo a la experimentación y medida de variables ya mencionadas en el manual de Bazan entre otra literatura, cuando la tasa de ventilación es cercana al 0.04 m³/m²s el diferencial de temperatura dentro del invernadero Δt puede estimarse con un valor de 3 °C , con ello se puede denotar que el diferencial de temperatura calculado para el invernadero en las diferentes etapas de crecimiento en el cultivo en la tabla 6.13 puede reducirse de los 10°C aproximadamente en el que ronda para etapa hasta 3°C en función de una correcta ventilación, por lo que el diferencial de temperatura calculado en base a la radiación en el invernadero puede ser afectado y cambiado por una correcta orientación de la estructura conforme a la dirección de la velocidad promedio de viento aprovechando la mayor cantidad de radiación posible en la cubierta en base a la mejor posición solar ya antes mencionada

6.2.8 La renovación del aire y la ventilación

Una vez asegurado que el gradiente de temperatura calculado en función a la radiación puede ser reducido en base a la ventilación en el invernadero, claro esto se embebe en la velocidad del viento y la acción del mismo en el invernadero, sin embargo no es posible asegurar que siempre se emitirá sobre el invernadero esta cantidad de viento por lo que es prudente también tener una opción B para bajar el gradiente de temperatura y con ello cuidar el proceso y crecimiento del cultivo.

Otra opción es cuidar esta renovación de aire en función de la variable principal que lo hace crecer, es decir la radiación directa. En el libro de Baduoin se toca el punto de la ventilación y el gradiente de temperatura en función de la radiación donde se muestra un gráfico para calcular el gradiente de temperatura en un invernadero en base a la renovación del aire y la radiación, dicho grafico se muestra en la figura 80

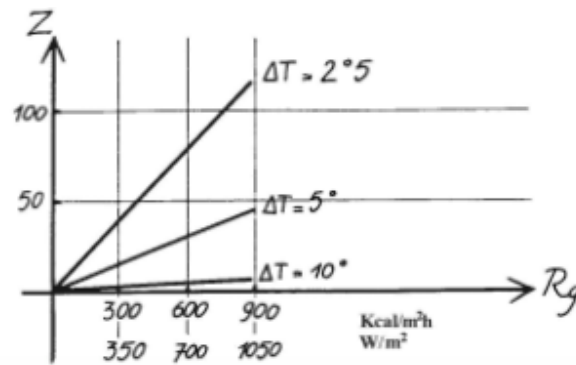


Figura 80: Estimación del volumen de aire renovado por hora Z en un invernadero correctamente regado para mantener la temperatura del aire en un valor dado Δt en relación a la intensidad de la radiación solar

A partir de la figura 80 y en base a la tabla 6.13 en la cual se obtiene la radiación máxima para cada etapa donde denota que el mes el valor máximo es Agosto (que tiene relación con la segunda etapa de crecimiento) con 550.19 W/m².

Con esta radiación y entrando al gráfico del libro de Baduoin, para obtener un diferencial de temperatura de 2.5 °C se necesita alrededor de un volumen de aire renovado de 70 si es que se quiere seguir trabajando con el valor de radiación de 550, lo cual es complicado cumplirlo con nuestras condiciones, por su parte para un diferencial de temperatura de 5°C parece ser más razonable conseguirlo con un volumen de aire renovado de alrededor de 30, sin embargo el gradiente de temperatura que se calculó inicialmente en relación de la velocidad de viento para cada etapa ronda en los 10°C entonces observando el gráfico y analizando con este valor y con el de la radiación de 550, el volumen de aire renovado es muy bajo.

La variable de volumen de aire renovado queda directamente ligada a la velocidad del viento promedio y como ya se ha comentado el viento es la variable de menor control posible de las que se analizan y sería un error analizar con un valor mayor al valor promedio mínimo dentro de los meses de análisis ya que no se estaría en el lado de la seguridad para el cultivo, por lo que lo único que queda es afectar la radiación directa en la cubierta y reducirla, la ventaja de hacer esto es que los

valores de gradiente de temperatura como se puede ver en las figuras tienen un valor que crece linealmente, por lo que al reducir el gradiente solo bastará multiplicar por el porcentaje que se ha reducido también la radiación en el directo para obtener la cifra correcta.

La alternativa más común de reducir la radiación directa en el invernadero es que dentro de la selección del material en la cubierta, éste tenga un porcentaje de sombreo a partir del valor que el mismo tenga ante el paso de la radiación solar.

Por lo que la selección del material puede efectuarse después del análisis del gradiente de temperatura o bien para sacar un gradiente de temperatura deseado ya teniendo gran conocimiento de las variables ambientales del lugar donde se quiere plantar el invernadero.

6.2.9 Selección del material en la cubierta, afectación en variables ambientales y de presión de viento

Comúnmente en un invernadero la selección del material en la cubierta ronda de 3 opciones básicas y muy generales como lo son el vidrio, los plásticos rígidos y los plásticos a partir de láminas muy flexibles (films). A partir de estas 3 opciones se desprenden sub- opciones de cada una como por ejemplo cristal de vidrio impreso (para el vidrio); poliéster y policarbonato (para el plástico rígido); y el polietileno, copolímeros y plásticos multicapa (para los films plásticos).

Como ya se mencionó en el apartado interior la selección del material en la cubierta si lo enfocamos desde el punto de vista del crecimiento de la planta, depende del gradiente de temperatura directamente, el cual a su vez depende de las temperaturas críticas e ideales para la planta, es decir la selección del cultivo al comienzo de todo este análisis nos brinda toda esta información. El punto es que la suma de este gradiente de temperatura a la temperatura media del lugar no ponga en riesgo el peligro de la planta si es que no podemos reducir y mantener dicho gradiente con la ventilación en el invernadero, tener la seguridad de

mantenerlo reduciendo la radiación en el invernadero se hace con el sombreado del material de la cubierta.

La selección del material tiene que estar en función de la radiación que este permita dar paso y de las posibilidades ante el sombreado, otro punto importante es el tiempo de vida en el material, el mantenimiento que deba efectuarse sobre el mientras este en la cubierta y los requerimientos para el montaje en la estructura.

Dada la situación de la forma del invernadero propuesta, es decir curva, por condiciones de presión de viento y forma aerodinámica que permita rebajar valores de succión o presión descartar materiales rígidos por la complejidad del montaje es ideal, por lo que hacer la elección del material en la cubierta entre los plásticos flexibles es lo de mayor prudencia.

Desde el punto de vista de vida útil en tabla 18 se muestra para diferentes tipos de plásticos flexibles para invernaderos. Tabla presentada por Serrano (1994).

Tabla 18: Duración de plásticos normalizados para invernaderos

Tipo de plástico	Espesor (micras)	Duración
Polietileno "normal" (sin aditivos)	150	6-8 meses
Polietileno "larga duración"	180	2 años
Polietileno "Térmico larga duración"	200	2 años
Copolímero EVA (12% AV)	200	2 años
Copolímero EVA (6% AV)	100	1 año

Fuente: Serrano (1994)

Como se observa a partir de la información en la tabla es evidente que la duración de un material plástico flexible es corta, por lo que para un invernadero el cambio de la cubierta es frecuente. Para el manejo y mantenimiento de los plásticos se tienen que tener en cuenta algunos factores:

- 1) La radiación ultravioleta en el plástico, cuanto mayor sea la luz sobre él menor será su duración

- 2) La manera de tensar el plástico sobre la cubierta, una excesiva tensión puede provocar rasgaduras.
- 3) La calidad de la lámina
- 4) La temperatura a la que está sometida la lámina y su capacidad de no reaccionar ante otros componentes químicos como residuos de pesticidas, azufre o halógenos.

6.2.10 Material ETFE

Una vez mencionada la información anterior relacionada a la duración del plástico seleccionado en la cubierta, el buscar un material que tenga fortalezas y aptitudes o que al menos tenga un comportamiento favorable es una prioridad, para ello el material que se elige es el ETFE, el cual en los siguientes puntos se intenta describir las fortalezas y aptitudes que tiene para sobrellevar los requisitos antes mencionados.

El etileno tetrafluoretileno con siglas ETFE es un Co-polímero resistente y totalmente transparente, autolimpiable y reciclable, el cual puede ser impreso para limitar el paso de la luz.

Puede utilizarse como una hoja o lámina sencilla (figura), o en múltiples capas para la creación de cojines (presurizados) rellenos de aire (Lecuyer, 2008).



Figura 81: Lámina ETFE instalada en monocapa en el estadio Allianz Rivera



Figura 82: Lámina ETFE instalada en sistema multicapa a base de cojines presurizados en el centro acuático nacional de Beijing-China

De acuerdo con Casas (2012) quien describe que estos fluoropolímeros se encuentran entre los polímeros químicamente más inertes y conservan su estabilidad para casi todos los entornos químicos, son altamente resistentes a los productos químicos y no se disuelven con la mayoría de los solventes.

Esta familia de fluoroplásticos son caracterizados por gran resistencia eléctrica y química, estabilidad sobresaliente a altas temperaturas aunque su resistencia mecánica es de moderada a baja y su costo es un poco alto.

Su transparencia ronda entre el 94 al 97% del rango de luz visible y una transparencia a la radiación y rayos UV del 83 al 88%, estas características lo convierten en un material ideal para recintos que requieren la mayor cantidad de espectro de luz natural donde se ocupa mejorar los ambientes naturales.

Por su parte el control solar del material puede tratarse en función de las necesidades del espacio donde se va trabajar y a partir del acabado e impresión del material puede dominarse la cantidad de luz que atraviesa en cada sector de la cubierta como se ve en la figura 83.

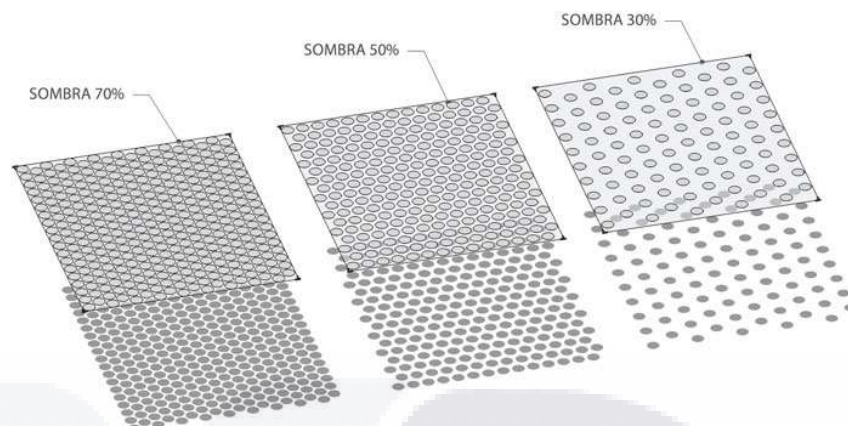


Figura 83: Sombramiento parcial en una lámina ETFE

La lamina ETFE es 100% reciclable y el peso del material es 10 veces menor que el vidrio, esto puede dar una cubierta más ligera debido al peso propio, por lo tanto un ahorro en la estructura portadora.

Finalmente su comportamiento ante temperaturas extremas es bueno, tanto para “frio” como para “calor”. Si existe la posibilidad de fuego, la lámina es poco flamable y si llegase a prender se auto extingue, provocando una falla local en un tramo de lámina y no total de la cubierta.

Resistencia mecánica

Ansell (1985) en la universidad de Bath probó 300 láminas con anchos de muestra de 12.5 mm realizándoles pruebas uniaxiales a una determinada temperatura, los resultados rondan en tensiones promedio de 17.59 y 16.56 MPa en las direcciones longitudinal y transversal respectivamente. En la tabla 19 se muestra esta información.

Tabla 19: Tensiones máximas en láminas ETFE a diferentes temperaturas de ensayo

Muestra	Temperatura (°C)	Tensión máxima (Mpa)	Comentarios
1	21	18.63	
2	21	18.57	Fluyó
3	37	14.6	
4	37	14.37	

Por otro lado se realizaron pruebas uniaxiales a tracción en láminas sometidas a radiación UV durante 51 días, valor de potencia para 1000 W/m². En la tabla 20 se muestra los resultados de tensión máxima promedio, las láminas son de 300 micras de espesor donde se denota que la radiación no tiene ningún efecto en la resistencia a tensión de la lámina.

Tabla 20: Efectos de la radiación en la tensión máxima de una lámina ETFE

Muestra	Tensión máxima (Mpa)	Tensión máx. promedio
UV1	19.06	
UV2	20.73	
UV3	19.06	19.43
UV4	19.34	
UV55	18.95	

Durabilidad

Finalmente otro dato que hace atractivo al ETFE ante otros materiales plásticos y el mismo vidrio es su durabilidad, la cual ronda en los 25 años ya que ni los rayos UV, ni la polución atmosférica afectan su rendimiento, además de ser químicamente inerte y poder limpiarse por sí solo ante la acción de la lluvia, Su mantenimiento ronda en acciones de 5 o 10 veces más largas ante un mantenimiento en el vidrio.

Recapitulando, todas las características generales pueden englobarse a estas generales (Master Builder, 2012):

- Soportar 400 veces su peso propio
- Bajo peso propio (175 g/m²)
- Alta transparencia (95% luz visible y 85% luz ultravioleta) transmitiendo más luz que el vidrio
- Excelente comportamiento ante el fuego
- Permite impresión de pintura, diferentes acabados y sombreado.
- Impermeable y auto limpiable con agua de lluvia
- Mínimo mantenimiento y vida útil de 25 años

- Absolutamente reciclable y no se decolora ni oscurece con la radiación ni con el tiempo

Por estas ventajas como el poder sombrearse a la cantidad deseada (afectando directamente el gradiente de temperatura), la flexibilidad del material a la deformación (haciéndolo apto para las superficies curvas pudiendo reducir el número de marcos o largueros en la estructura), químicamente inerte (denotando y elevando su vida ante agentes como pesticidas), autolimpiable con la lluvia además de una vida útil de al menos 25 años y con ello elevando la vida de cualquier otro material utilizado en la cubierta de al menos 2 años, por estas y más razones es la selección del material, sabiendo de su mayor costo pero por su bajo peso propio puede aligerar la estructura y potenciar las variables ambientales para que la planta crezca lo más cercanamente posible a una manera ideal, es decir el subir el costo de la cubierta puede potenciar la producción y bajar el costo de la estructura de acero.

En puntos posteriores se hablara de su afectación en las distintas variables y la manera de hacerlo.

6.2.11 La radiación y la evapotranspiración en el invernadero

Otro punto de interés a calcular dentro de un invernadero es la evapotranspiración del cultivo, la cual suele calcularse en función de la radiación y temperatura que afectan a la planta.

Es importante conocer la evapotranspiración ya que es parte del agua que la planta pierde y para hacer una planificación correcta del riego se tiene que tomar en cuenta este déficit, dicha perdida se divide en dos procesos distintos, la evaporación del agua contenida en el suelo y la transpiración contenida en el planta. Determinarla es complicada y medirla directamente aún más, puede determinarse con la ayuda de lisímetros, con estas mediciones que por lo regular son parte de investigaciones científicas se realizan correlaciones para en base a

métodos indirectos se determine ET, es decir en base a ecuaciones modeladas (Allen et al., 2006).

Cuando ET decide calcularse a partir de alguna ecuación, comúnmente el proceso es calcular este parámetro en base de datos climatológicos, ya obtenido el valor es llamado evapotranspiración de referencia y para calcular el verdadero valor de evapotranspiración es suficiente multiplicar dicho valor por un coeficiente Kc el cual relaciona la afectación del cultivo en la evapotranspiración final, existen diferentes valores de Kc para cada cultivo y para cada etapa de su crecimiento, evidentemente propuestos en la literatura resultado de una cantidad considerable de pruebas y regresiones en la experimentación con el cultivo.

Para nuestro caso, los valores Kc del tomate se muestran en la tabla 21 en función de cada etapa de crecimiento en la planta.

Tabla 21: Valores para Kc en el tomate de acuerdo al ciclo vegetativo

Ciclo vegetativo	% Limites	Días	Kc
A-B	25	31	0.3
B-C	50	31	1.1
C-D	80	37	1.1
D-E	100	24	0.65

Los valores de Kc para cualquier cultivo dentro de las diferentes etapas de su ciclo vegetativo suelen representarse en un gráfico como el de la figura 84, donde la etapa A-B es un valor constante, el valor de B-C es creciente, la etapa C-D contiene el mayor valor posible además de ser constante y D-E hace una descarga y disminución del valor.

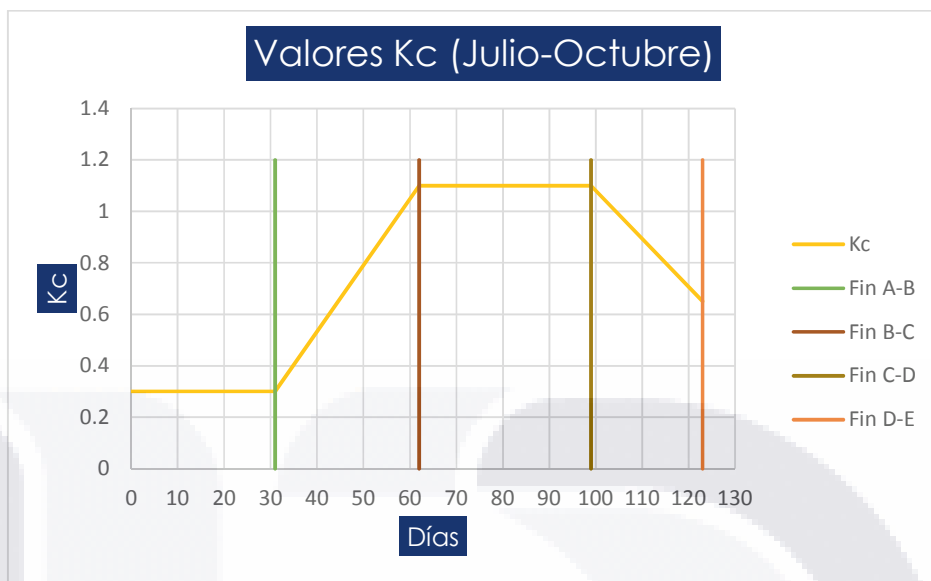


Figura 84: Mapa de distribución de valores Kc para el cultivo de acuerdo a las etapas vegetativas

La ecuación seleccionada para calcular el valor de Et de referencia después de comparar los valores de distintas ecuaciones ante los valores medidos de un evaporímetro y teniendo la certeza de que dicha ecuación es la más cercana a mostrar valores similares.

$$ET_0 = 0.0023(t_{med} + 17.78)R_0(t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

ET_0 = Evapotranspiración potencial diaria mm/día

R_0 = Radiación solar extraterrestre mm/día

T_{max} = Temperatura diaria máxima °C

T_{med} = Temperatura media diaria °C

T_{min} = Temperatura diaria mínima °C

Los valores de temperatura para los 4 meses de análisis se toman de la tabla 12, mientras que los valores de radiación se calcularon mediante el programa Ecotect

y se toman de la tabla 16. Para mayor comodidad se presentan en la tabla 22 mostrando su valor de evapotranspiración calculado.

Tabla 22: Evapotranspiración máxima para cada etapa

Ciclo	Días	Kc	Radiación max (W/m2)	DT (°C)	Temp Max	Temp Min	Temp Media	Eto max (mm/dia)	Et *kc (mm/dia)
A-B	31	0.3	540.18	10.28	36.48	23.07	29.24	4.22	1.266
B-C	31	1.1	550.19	10.6	37.01	23.11	29.66	4.32	4.752
C-D	37	1.1	494.41	9.82	35.03	22.09	27.97	3.46	3.806
D-E	24	0.7	476.46	9.49	34.39	17.77	25.89	3.38	2.197

Es evidente que la distribución de evapotranspiración para nuestro caso tiene que ser más fuerte en el cambio de la etapa B-C y C-D ya que en la segunda etapa se embeben valores de temperatura mayores y la radiación sobre el recinto también es la mayor de las medidas, como en la ecuación estos valores son los que interviene con mayor fuerza en su resolución. Otra cosa que es digna de mencionar es que se calcula a partir de una temperatura modificada donde se suma el gradiente de temperatura calculado inicialmente donde también es evidente que estas temperaturas son letales para el crecimiento del cultivo en cuestión, solo se ejemplifican valores de una evapotranspiración inicial calculada para saber el orden en el que los valores se encuentran y que este valor de evapotranspiración no es el mismo para toda la distribución espacial del invernadero porque la cantidad de radiación no es el mismo en toda la superficie, esta fue una de las razones principales para usar el programa Ecotect ya que se buscaba una distribución de valores lo más apegada a la realidad y con la ayuda de un análisis grid en el suelo pudo realizarse. Los valores de la evapotranspiración real y como se distribuye en el invernadero se muestran en los anexos, ya que la parte de riego no es un objeto de estudio prioritario en la investigación, caso contrario de la presión de viento.

6.2.12 La evapotranspiración y su relación con los coeficientes de presión de viento

Lo interesante de calcular la evapotranspiración dentro es que finalmente se convierte en un gas que puede ser tratado como fluido, quien emite una presión interior, la cual puede agregarse a la presión exterior debida al viento y denotar valores modificados, cosa que difícilmente se hace o estudie en la cubierta.

Como ya se mencionó las temperaturas modificadas para calcular esa evapotranspiración son mayores a la temperatura letal en el crecimiento de la planta, si se evalúa con la temperatura media todas tienen un orden de casi 30 °C por lo que buscar bajarlas al menos 5 o 6 °C debe ser prioridad ya que las temperaturas máximas recomendadas para un tomate rondan entre los 25 °C.

El gradiente de temperatura con la ayuda del diseño de una correcta ventilación para una tasa de 0.04 m³/m²s es de 3 a 4 °C por lo que si comparamos los 10 °C que ya se tienen estos ya se rebajarían 7°C y eso bastaría para tener controlado un gradiente seguro para el crecimiento de la planta, sin embargo como ya se ha dicho que a pesar de que esto se evaluó para la velocidad de viento menor de los 4 meses, no existe la seguridad de que esta velocidad de viento siempre esté disponible, por lo que la otra manera de asegurar el gradiente es en base al sombreado del material y para ello se seleccionó el material ETFE por su facilidad a esta acción, su mayor estabilidad química y comportamiento a la deformación mecánica, además de su vida útil.

Entonces si se baja la radiación en el recinto, el cual está orientado para tener la mayor luminosidad posible, la evapotranspiración se reduce (con ello paralelamente el requerimiento de agua de la planta se reduce y se ahorra agua) y si la evapotranspiración se reduce los valores de presión interior también y a su vez los elementos mecánicos para la estructura que sostiene la cubierta.

6.2.13 El gradiente de temperatura por sombreado

Si se fija la atención en los gradientes de temperatura calculados inicialmente en función del viento y la radiación emitida sobre el invernadero, gradientes que

como ya se mencionó son de crecimiento lineal siempre y cuando la velocidad de viento sea fija, por ello inicialmente bastaría multiplicar el gradiente de temperatura calculado por el porcentaje deseado que se quiere rebajar y que ello cumpla con los requisitos de la planta para los límites en las temperaturas de crecimiento, el trabajo en las temperaturas en la planta se hace en base a la temperatura media, claro teniendo cuidado paralelamente de los valores extremos de las temperaturas máximas y mínimas. En la tabla 23 se extrapolan datos de la tabla 22 para seguir hablando de este punto.

Tabla 23: Extrapolación de gradiente de temperatura y temperaturas necesarias para el crecimiento óptimo

Ciclo	Temp media (°C)	DT (°C)	Temp Media + DT (°C)	Temp. Requerida (°C)	Deficit (°C)	DT 2 (Ventilación) °C	Temp media + DT2
A-B	18.96	10.28	29.24	25-30	No hay	3.00	21.96
B-C	19.06	10.6	29.66	13-26	3.66	3.00	22.06
C-D	18.15	9.82	27.97	15-26	1.97	3.00	21.15
D-E	16.40	9.49	25.89	15-26	No hay	3.00	19.40

En la tabla se denota que de acuerdo a la temperatura media y la temperatura requerida del cultivo solo en los procesos y etapas 2 y 3 se tiene problema por el gradiente inicial calculado en el invernadero solo con la velocidad del viento (claro sin enfocarlo al posicionamiento paralelo del invernadero con dicha velocidad ni la abertura de las ventanas) y sin sombreado mostrando un sobrepaso de 3.66 °C y 1.97 °C, sacando una relación de porcentaje con el valor más alto de ΔT de 10.6 °C que es de 35% por lo sombreado la lámina con al menos este valor bastará para cumplir la temperatura necesaria en el buen desarrollo.

Calcular el ΔT_3 que se llamará así por el sombreado de la cubierta y el cual para ser calculado basta con restar al ΔT_1 el porcentaje del déficit de lo que se ha excedido con las temperaturas de crecimiento.

Por ejemplo si se opta por sombrear la lámina en un 50% tomando la precaución de que si alguna vez no se cumple el valor de velocidad de viento mínima en el lugar con la que se han calculado los gradientes de 2.53 m/s;

entonces los gradientes de acuerdo al sombreado y los demás casos se muestran en la tabla 24.

Tabla 24: Gradientes de temperatura, $\Delta T1$ debido a velocidad de viento sin sombreado ni diseño de ventanas, $\Delta T2$ por ventilación, $\Delta T3$ sombreado

Ciclo	DT 1 (°C)	DT 2 Ventilación (°C)	DT3 sombreado (°C)
A-B	10.28	3.00	5.30
B-C	10.6	3.00	5.30
C-D	9.82	3.00	5.30
D-E	9.49	3.00	5.30

6.2.14 La composición del material en la cubierta y el gradiente de temperatura final

Hasta cierto punto se tendría de manera correcta y segura el gradiente final de la temperatura sin embargo en ningún momento se ha tomado en cuenta como el material (cualquiera que sea) afecta por su simple composición la transferencia de calor además de ya estar afectando con el sombreado la temperatura. Lo ideal es calcular la transferencia de calor debido a la radiación en la cubierta y restar la radiación que este finalmente deja pasar. Para ello existe la ley de Stefan la cual establece la rapidez a la cual se libera la energía se llama potencia de radiación y que un cuerpo emite energía radiante pero a su vez absorbe radiación, la energía neta ganada o perdida por segundo como resultado de la radiación se resume a la siguiente ecuación:

$$H_{\text{neto}} = \epsilon \sigma AT^4$$

H_{neto} es la potencia de radiación neta debido al material, ϵ es una propiedad radiativa de la superficie que se llama emisividad y sus valores varían en un rango de 0 a 1, T es la temperatura a la que se encuentra el cuerpo que se analiza, A hace referencia al área de la superficie y σ es la constante de Stefan-Boltzmann con valor igual a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$. La constante del material ETFE es de $0.24 \text{ W}/\text{m K}$.

Para poder comparar los valores de radiación neta que el material afecta es necesario representarlos en W/m² ya que la radiación que se obtuvo en cada ciclo vegetativo está en esas unidades, para ello basta con despejar A de la ecuación y tener en cuenta que los resultados son unitarios por cada metro cuadrado.

$$\frac{H_{neta}}{A} = \epsilon\sigma T^4$$

En la tabla 25 se presenta el cálculo de la H emitida por el material la cual se resta a la radiación máxima del recinto para así obtener la radiación neta, con dicha radiación neta se recalcula el gradiente de temperatura debido a la radiación y a la velocidad de viento como se hizo con el primer gradiente DT1 y se llamará DT4 el cual hace intervenir el material ETFE.

Tabla 25: Cálculo de Radiación neta en el invernadero con ETFE en la cubierta

Ciclo	TM + DT1 (°C)	TM +DT1 (°K)	Radiación max (W/m2)	Hemitida (W/m2)	Radiación neta (W/m2)	Vel. Viento (m/s)	DT 4 (°C)
A-B	29.24	302.24	540.18	113.55	426.63	3.06	8.57
B-C	29.66	302.66	550.19	114.18	436.01	2.69	8.86
C-D	27.97	300.97	494.41	111.66	382.75	2.53	8.10
D-E	25.89	298.89	476.46	108.60	367.86	2.65	7.83

El cálculo se realizó con la temperatura media más el primer gradiente, el cual no hacia intervenir el sombreado, esto se hace teniendo en cuenta que por la simple participación del material la radiación puede disminuir y con ello buscar la reducción del sombreado del 50 % que se propuso anteriormente.

Para ello sacando los nuevos déficit de temperatura y comparados con la temperatura requerida por el cultivo para sacar el nuevo porcentaje de sombreado como se muestra en la tabla 26

Tabla 26: Calculo de déficit con el gradiente de temperatura 4 para sacar porcentaje de sombreo en la cubierta

Ciclo	Temp media (°C)	DT 4 (°C)	Temp Media + DT 4 (°C)	Temp. Requerida (°C)	Deficit (°C)
A-B	18.96	8.57	27.53	25-30	No hay
B-C	19.06	8.86	27.92	13-26	1.92
C-D	18.15	8.1	26.25	15-26	0.25
D-E	16.40	7.83	24.23	15-26	No hay

Ahora el déficit de temperatura mayor es de 1.92 °C, el cual comparado con su gradiente respectivo de 8.86 °C consiste en el 21.7 %, por lo que con sombrear esta cantidad en la lámina bastaría para cumplir el requerimiento de la temperatura por la planta.

Sin embargo recordando el gradiente calculado por ventilación oscila entre 3 y 4 °C, sería prudente buscar que el debido al sombreo tenga un valor parecido. Haciendo esto se opta por rebajar 4 °C el gradiente mayor de 8.86 (casi 9 °C) es decir que sea muy cercano a los 5°C, está claro que se puede buscar que el gradiente sea exactamente al de ventilación pero el costo por sombreo de la lámina sería mayor. Para obtener 5°C es necesario sombrear en 44% la lámina, se deja en 45 % (4.87 °C), este gradiente a su vez se multiplica por 0.85 ya que es el porcentaje que el material deja pasar de radiación, dato que se incluye en las características del material, por lo que DT5 es de 4.14 °C en el mayor de los casos de acuerdo a los meses de análisis.

Tabla 27: Gradientes de temperatura finales

Ciclo	DT 1 (°C)	DT 2 (°C)	DT3 (°C)	DT 4 (°C)	DT 5(°C)
A-B	10.28	3.00	5.30	8.57	4.14
B-C	10.6	3.00	5.30	8.86	4.14
C-D	9.82	3.00	5.30	8.1	4.14
D-E	9.49	3.00	5.30	7.83	4.14

DT1 tiene que ver con la radiación directa en la cubierta sin sombreo ni características de un material en específico, DT2 tiene que ver con el efecto de la ventilación y el diseño de las ventanas y aberturas, DT3 es calculado en función del

déficit de temperaturas con las que requiere la planta , DT4 es calculado con el efecto del material en este caso ETFE sobre la cubierta sobre la radiación neta en el invernadero y la velocidad de viento en cada mes y finalmente DT5 es el porcentaje de sombreado en función de DT4 y aplicando el 85% que es lo que deja pasar el material ante la radiación.

Finalmente los gradiente de temperatura trabajando es el 2 y el 5, uno por ventilación y el otro por sombreado, ambos cumplen con las temperaturas para el buen desarrollo de la planta.

Tabla 28: Temperaturas finales con gradiente de temperatura comparadas con las temperaturas requeridas por el cultivo

Ciclo	DT 2 (°C)	DT 5 (°C)	Temp media (°C)	TM + DT2	TM + DT5	Temp. Requerida (°C)	Deficit (°C)
A-B	3.00	4.14	18.96	21.96	23.09	23-30	Cumplen
B-C	3.00	4.14	19.06	22.06	23.20	13-26	Cumplen
C-D	3.00	4.14	18.15	21.15	22.29	15-26	Cumplen
D-E	3.00	4.14	16.40	19.40	20.54	15-26	Cumplen

6.2.15 Valores de presión interiores

A partir de los dos gradientes definitivos y tomando en cuenta el de mayor valor debido al sombreado en la cubierta, puede calcularse los valores de evapotranspiración que finalmente serán convertidos en valores de presión para calcular los elementos mecánicos en la cubierta, claro también afectando los valores de la radiación calculados para cada uno restando la radiación emitida por el material en la cubierta y multiplicando por 0.85 que es el valor que deja pasar el material de la radiación total. Dichas tablas conforme al análisis de radiación limpio y directo con Ecotect ya afectado con el material se muestran en los anexos, por practicidad se toma la etapa que conforme al valor de Kc es la de mayor valor, es decir el brinco de B-C a C-D y el valor recto en C-D.

Tabla 29: Valores de presión máxima debido a la evapotranspiración y % de reducción de valores con el uso de ETFE en la cubierta

Ciclo	Kc	Evapotranspiración máx (mm)		% de reducción	Presiones máx (kg/m ²)	
		Sin material	Con material		Sin material	Con material
A-B	0.3	1.27	0.74	58.53%	1.27	0.74
B-C	1.1	4.75	2.76	58.10%	4.75	2.76
C-D	1.1	3.81	2.20	57.80%	3.81	2.20
D-E	0.65	2.20	1.27	57.69%	2.20	1.27

En la tabla 29 puede mostrarse una reducción en cada una de las etapas de casi el 60% en la evapotranspiración y por ende en la presión interior del invernadero, para efectos de presión puede desfavorecernos (enfocándose en la parte estructural) ya que el efecto interior no va a pintar de gran manera en la presión final cuando sea restada a la exterior provocada por viento a diferencia de cuando no se utilizaba el material que se hablaba de valores cercanos a 4.75 kg/m² en la presión de la segunda etapa del ciclo vegetativo. Sin embargo el rebajar la evapotranspiración confiere un ahorro de agua, el cual multiplicado por todas las veces que se riegue el invernadero puede significar ahorro de dinero.

Es verdad que en la tabla se muestran valores máximos y no es así como se distribuye sobre la superficie del invernadero ya que estos valores tienen que ver directamente con la radiación neta y como ya se demostró en puntos anteriores esta va cambiando de acuerdo a la zona del invernadero. Para ejemplificar ello y por practicidad se mostraran los mapas solo de las etapas con mayor valor de presión posible, es decir en total son 12 mapas (4 por presión interior, 4 por presión exterior y 4 combinando ambas presiones en cada etapa) y solo se mostraran 3 mapas de distribución de la presión en el invernadero, esto con la finalidad de buscar que el documento sea más concreto.

En base a la tabla 29 y como ya se dijo la etapa con mayor fuerza es la tercera (C-D) y el cambio en el día final de la etapa B-C a C-D, es decir el valor el 2.76 kg/m² llegará un momento que se estandarizara en 2.2 kg/m², para efectos prácticos se toma el 2.2 como constante en toda la tercer etapa y así poder tener

un mapa mensual que sea capaz de envolver todos los valores posibles en el mes de Septiembre donde el K_c es 1.1 constante, teniendo el 2.76 como un valor extraordinario del final de la segunda etapa.

En la figura 85 se muestra la distribución de presión interior en el invernadero para la etapa C-D con k_c de 1.1.

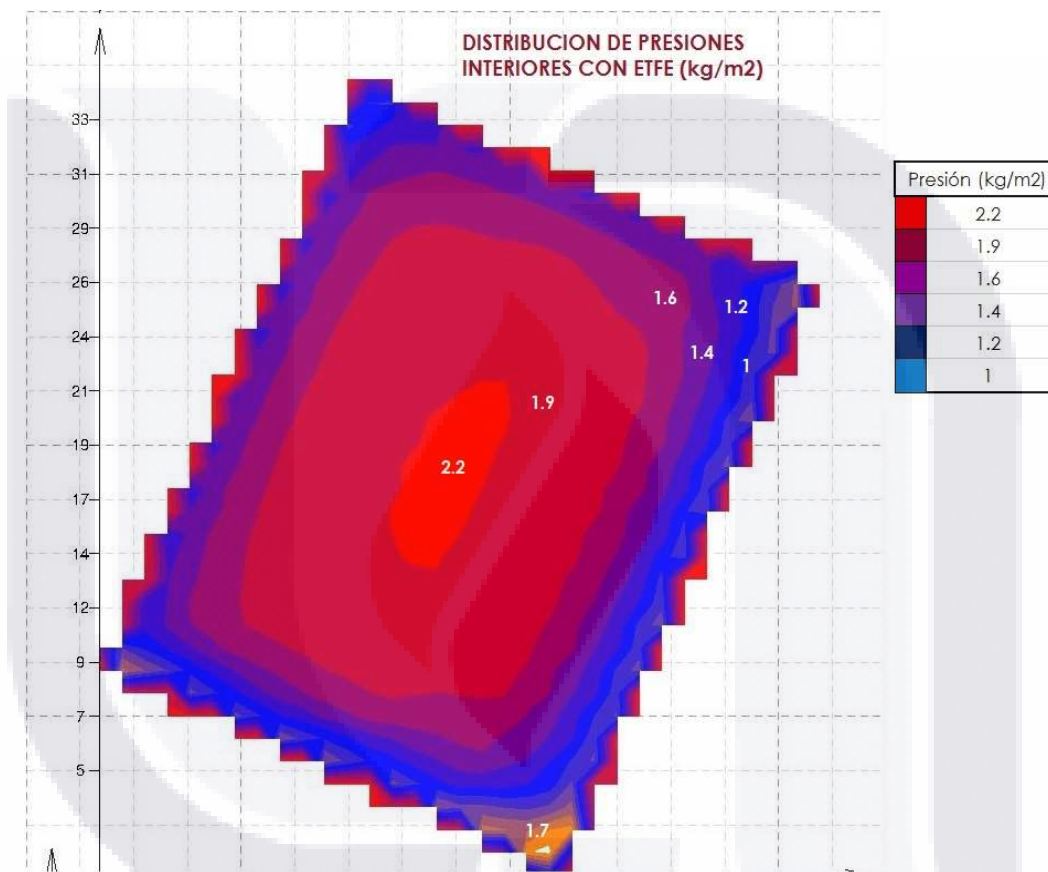


Figura 85: Distribución de presión interior en la cubierta debida a la evapotranspiración por el cultivo en la etapa C-D del ciclo vegetativo (anexo E)

En la figura se observa que la presión presenta valores máximos de 2.2 kg/m^2 en el centro y va decreciendo conforme se acerca al perímetro del invernadero hasta aproximadamente 1 kg/m^2 , denotando un valor de 1.7 en la esquina inferior derecha, esto a causa de la orientación y la afectación de la sombra en el invernadero por la luz natural. Por su parte finalmente para poder representar el

porcentaje de estos valores como presión de viento es necesario calcular y comparar contra la presión dinámica base producto del viento en el exterior.

En la figura 86 se muestra la distribución de presiones cuando no se utiliza el material ETFE y solo se plantea una cubierta sin propiedades ni características de algún material en específico.

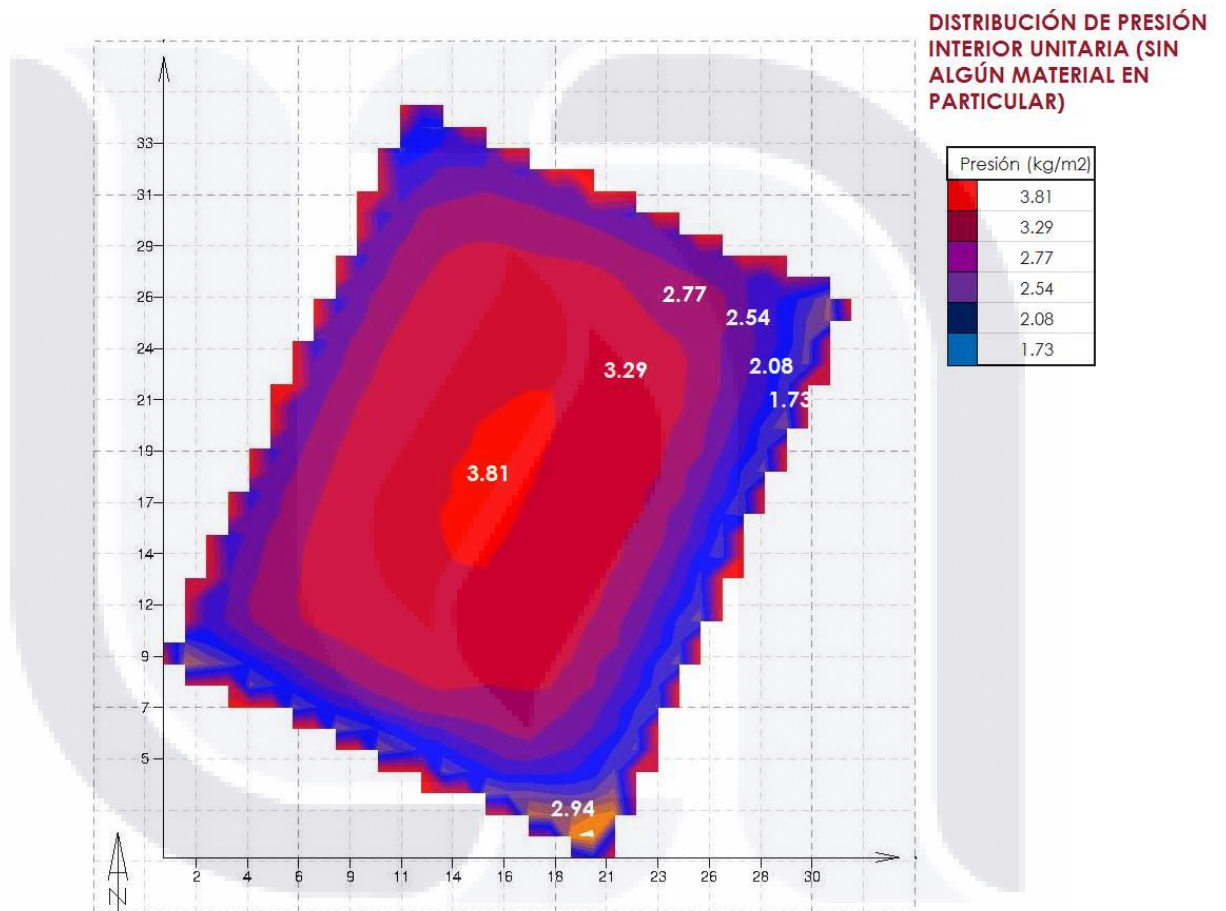


Figura 86: Distribución de presión interior debido a la evapotranspiración por el cultivo sin tener efecto de algún material en la cubierta (anexo F)

De ambos mapas, se concluye que con la participación del material se da una reducción hasta el 58-60 % en relación de los valores de evapotranspiración unitarios debido a la radiación directa, es decir si lo trasladamos es un ahorro de alrededor el 40% de agua para el riego del cultivo. La distribución de la presión

interior con ayuda del análisis grid de Ecotect para cada mes se presentan de los anexos L a O teniendo que cada casilla significa un m² de área. Los valores en cero representan las pequeñas orillas que no cubre la malla de la superficie total.

6.2.16 Determinación de presión de viento exterior, comparación normativa CFE y datos de sitio

Para determinar la presión de viento exterior en la cubierta que se distribuye en función de los coeficientes de presión, los cuales son proporcionales a la presión dinámica base quien lleva embebida en su cálculo una velocidad regional, velocidad que es tomada de acuerdo y regularmente en el mapa de estacas proporcionado por los manuales de diseño por viento, siendo el de mayor especialidad para nosotros el acorde a CFE en sus distintas versiones. En este apartado la finalidad es comparar la presión dinámica base debido a esa velocidad regional en el manual, la presión debida a la velocidad medida en el lugar mensualmente con la ayuda de los registros de INIFAP y finalmente con la ayuda de los software especializados para el análisis de viento ya utilizados.

Entonces realizando el procedimiento para sacar la presión dinámica base, el cual es determinar las componentes de la ecuación:

$$V_D = F_T F_\alpha V_R$$

1) Determinando V_R

Para ello la clasificación del terreno según su rugosidad es 1 debido a que se habla de terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones, cosa donde un invernadero puede clasificarse. Por otro lado la clase de la estructura según su tamaño es B ya que la mayor dimensión varía entre los 20 y 50 m (30 m el largo del invernadero)

La V_R conforme a una estructura B con un periodo de retorno de 50 para el manual de CFE ronde de 120 a 133 km/h, en cambio el manual por viento del INIFED (Instituto Nacional de la Infraestructura Educativa) da un valor de 141 km/h y

finalmente de acuerdo a los registros medidos en el lugar la velocidad de ráfaga mayor es de 105.05 km/h (29.18 m/s) correspondiente al mes de Mayo. Se tomaron como referencia las 3 para también efectuar un análisis comparativo de la presión final.

2) Determinando F_{α}

Para F_c (factor de tamaño) de acuerdo a la estructura tipo B es de 0.95

Por otro lado F_{RZ} ya que se trata de una construcción menor de 10 m se calcula y es de un valor de 1.13

La multiplicación de ambos denota el valor de F_{α} de 1.07

3) Determinando F_T

Tomando en cuenta un terreno prácticamente plano a campo abierto, el factor de topografía es de 1

Velocidad de diseño

Esto denota 3 velocidades de diseño de acuerdo a cada velocidad regional de cada caso. La primera de 142.31 km/h (39.53 m/s), la segunda de 150.89 km/h (41.90 m/s) y la ultima de 112.40 km/h (31.22 m/s).

Presión dinámica base

Por su parte la presión dinámica base también muestra 3 valores conforme a las velocidades de diseño analizadas y calculadas con la ecuación propuesta en el manual de CFE por viento

$$q_z = 0.0048 G V_D^2$$

Calculando el factor de corrección G :

$$G = \frac{0.392 \eta}{273 + T}$$

Rincón de Romos tiene una altura de 1940 msnm e interpolando entre 1500 y 200 para obtener el factor en el numerador debido a la presión barométrica de la ecuación es de 604.2 mm de Hg, por su parte para el denominador la temperatura media del lugar a partir del promedio de las temperaturas medias para cada mes es de 16.25 °C, y calculando el factor G es de 0.82.

Entonces la primera presión es conforme al manual de CFE, la segunda en relación al manual del INIFED y finalmente la tercera en razón a los datos medidos en el lugar por el INIFAP.

Tabla 30: Velocidades regional y de diseño, presión dinámica base para cada caso

Caso	Velocidad regional (km/h)	Velocidad de diseño (km/h- m/s)	Presión base (kg/m ²)
CFE	133	142.31 (39.53)	79.7
INIFED	141	150.89 (41.90)	89.6
Sitio	105.05	112.4 (31.22)	49.72

Comparando la velocidad medida máxima en el lugar en el mes de mayo de 105.05 km/h con las proporcionadas por los manuales, puede verse un aumento considerable de las segundas de alrededor 25 a 35%, entonces entra la discusión y es evidente que son elevadas con un margen de seguridad para los diseños en las estructuras pero al ver la presión dinámica base que provoca cada una comparada con la del sitio se está haciendo crecer a algo parecido al doble el valor real, claro está que este no es el valor aplicado en la cubierta ya que eso tiene que ver solo directamente con la forma y los valores Cp, sin embargo ver esta referencia habla de lo sobrado o seguro que puede ser el análisis ante el efecto del viento.

6.2.17 Distribución de valores de CP en el invernadero

Para este apartado y basándose en el capítulo 5 de la tesis en turno donde se comparaban los valores CP en Autodesk Flow Design y Wintess en una pequeña velaría, los mismos que tenían valores muy parecidos, se opta por realizar el análisis

de estos valores ahora para el caso del invernadero con Wintess, teniendo la seguridad de lo ya concluido en el capítulo anterior. Ante esto y solo reduciendo por comodidad a Autodesk Flow Design como una ayuda grafica de la distribución para la presión en la cubierta cerciorando resultados rápidamente.

Sabiendo de antemano con las conclusiones del capítulo sexto donde se habla que los valores de CP (coeficientes de presión) son un submúltiplo de la presión base y los cuales dan a conocer la presión definitiva, sin embargo los mismos para ser determinados no dependen de la magnitud de la fuerza sino de la geometría de la estructura en relación con esta fuerza, ya que son una relación del vector de fuerza normal en la cara de la superficie y el vector de esa fuerza de viento externa a la estructura (el cual siempre es tomado desde una componente totalmente paralela o bien ortogonal, 0 y 90° según sea el caso).

Recordando, el programa Wintess para representar el ángulo de ataque de la fuerza sobre la estructura lo descompone en sus dos componentes. Ellas se ingresan como en la figura 87.

Cargas superficiales

Viento

Velocidad real Viento X (km/h) W = 60.9 kg/m² Cp manual
 Velocidad básica Viento Y (km/h)
 Viento (total) = 112.4 km/h = 31.2 m/s Tipo de edificio (Cp)

Cp = Coeficientes eólicos (-)presión (+)succión (Ángulo entre la normal a la superficie y la dirección del viento)

180°	170°	160°	150°	140°	130°	120°	110°	100°	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°
-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.2	0.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.6	0.4	0.4

Figura 87: Ingreso de componentes en Wintess para la fuerza resultante en la estructura

De acuerdo a nuestro caso y que los resultados sean acorde a las consideraciones que se han hecho en la determinación de la presión base se elige valores de CP para un caso abierto (libre). Los valores de CP se representan en la figura 89.

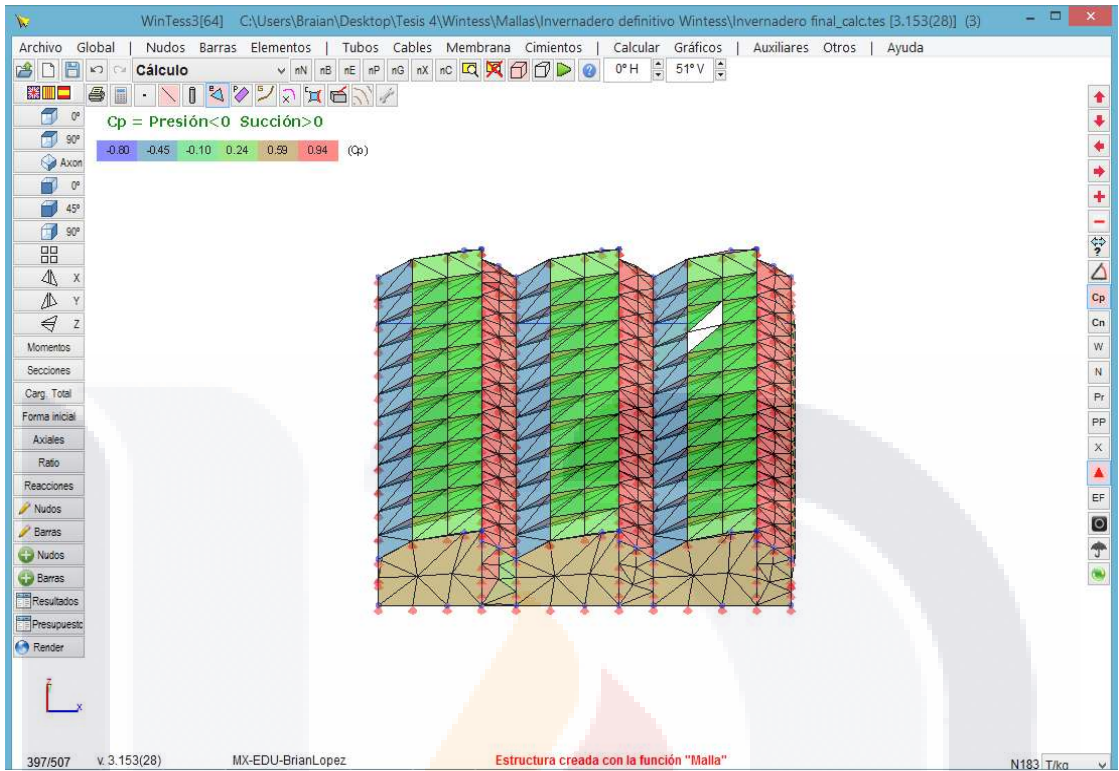


Figura 88: Distribución de presiones para el invernadero en Wintess

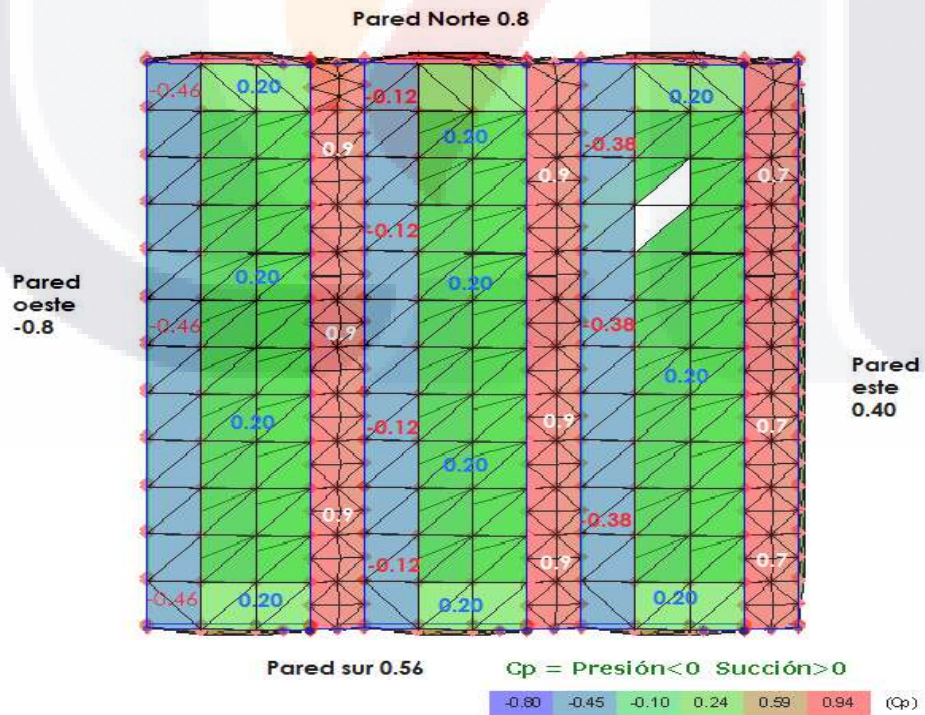


Figura 89: Valores de CP para el invernadero en batería (anexo G)

Analizando los resultados de coeficientes de presión de viento expuestos por el programa, se observa que a partir de la orientación de la ráfaga de viento a 290° y la orientación paralela del invernadero en función del viento diario a 204° , el ángulo de ataque de la posible ráfaga es de 86° , ángulo que casi representa el valor máximo posible (el cual se encuentra en la dirección ortogonal a 90°), por lo que el resultado de presión de viento y coeficientes pueden sensiblemente ser menores al máximo de los casos.

En la figura 89 se puede ver que la pared Oeste está sumergida en un valor de 0.8 a presión y las partes iniciales de cada arco para cada invernadero también se embeben en la presión con valores de 0.46, 0.12 y 0.38 respectivamente; de otra manera las partes centrales de los invernaderos quedan expuestas en valores de succión relativamente bajos de 0.2; finalmente la parte posterior a la ventana cenital es evidente que quedaría sumergida en una succión fuerte por el obstáculo que genera la misma ventana al ser abierta, para los dos primeros invernaderos sostiene un valor de 0.9 y el último invernadero en 0.7.

Las paredes Norte, Sur y Este tienen valores de succión de 0.8, 0.56 y 0.4 respectivamente.

A partir de este mapa de presiones con los valores CP puede definirse la presión exterior en la cubierta según sea el caso de análisis del múltiplo de la presión dinámica base (CFE, INIFED o del sitio). Dicho mapa se realizó en dos tantos, el primero en función de la presión obtenida por CFE ya que es muy similar a la calculada por INIFED, y el segundo con relación a la presión base obtenida con la velocidad de la ráfaga de viento máxima medida en el sitio, todo con el objetivo de comparar la diferencia de presiones reales medidas y las expuestas por el manual CFE que es por el cual nos regimos comúnmente para análisis por viento en nuestras estructuras. La presión base por CFE es de 79.7 kg/m^2 y conforme al sitio de 49.72 kg/m^2

El primer mapa en relación a la presión base determinada por CFE se muestra en la figura 90.

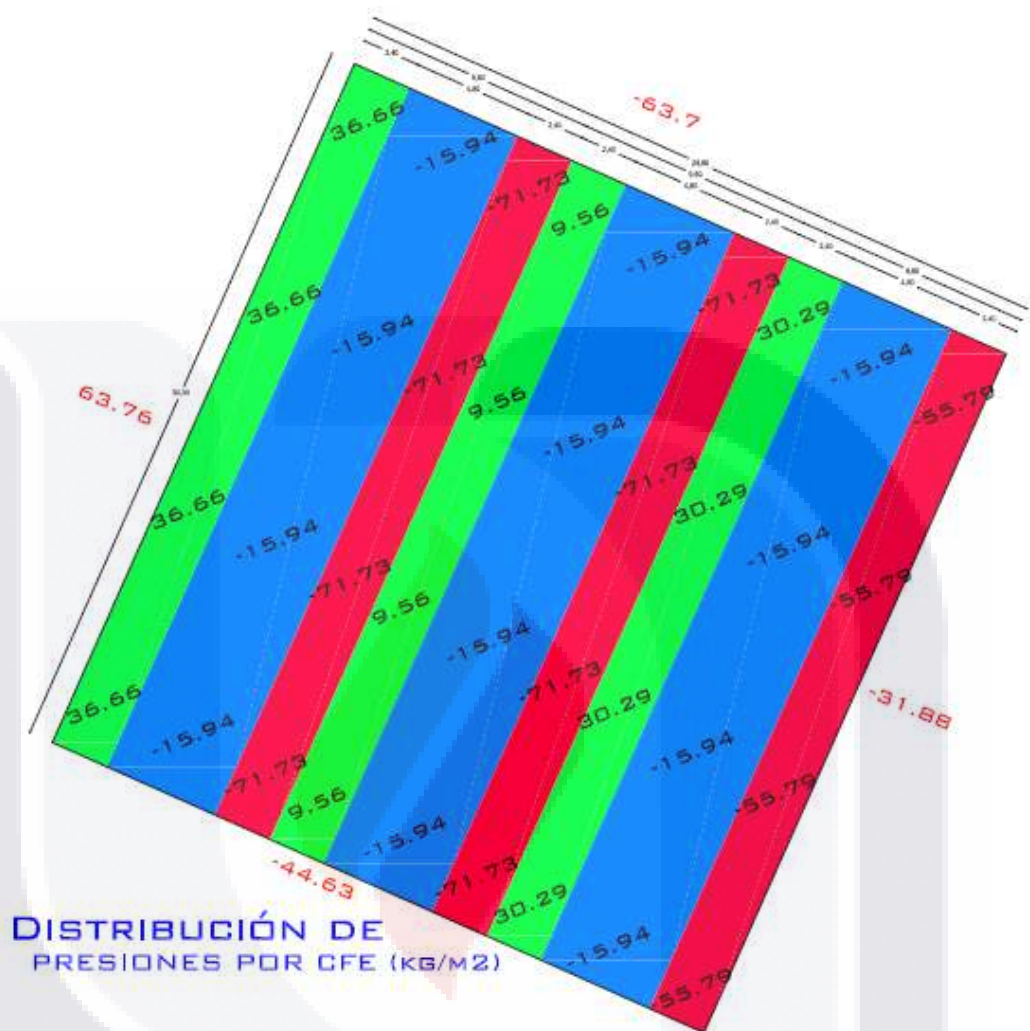


Figura 90: Distribución de presiones exteriores en el invernadero tomando como base CFE

En la figura 90, positivo hace razón a presión y negativo a succión, los valores rojos representan el comportamiento en esa pared.

El segundo mapa que se basa en la presión obtenida a partir de la velocidad en el sitio se muestra en la figura 91. Cabe mencionar que ambos mapas se encuentran en el apartado referente a anexos H y I para mejor resolución

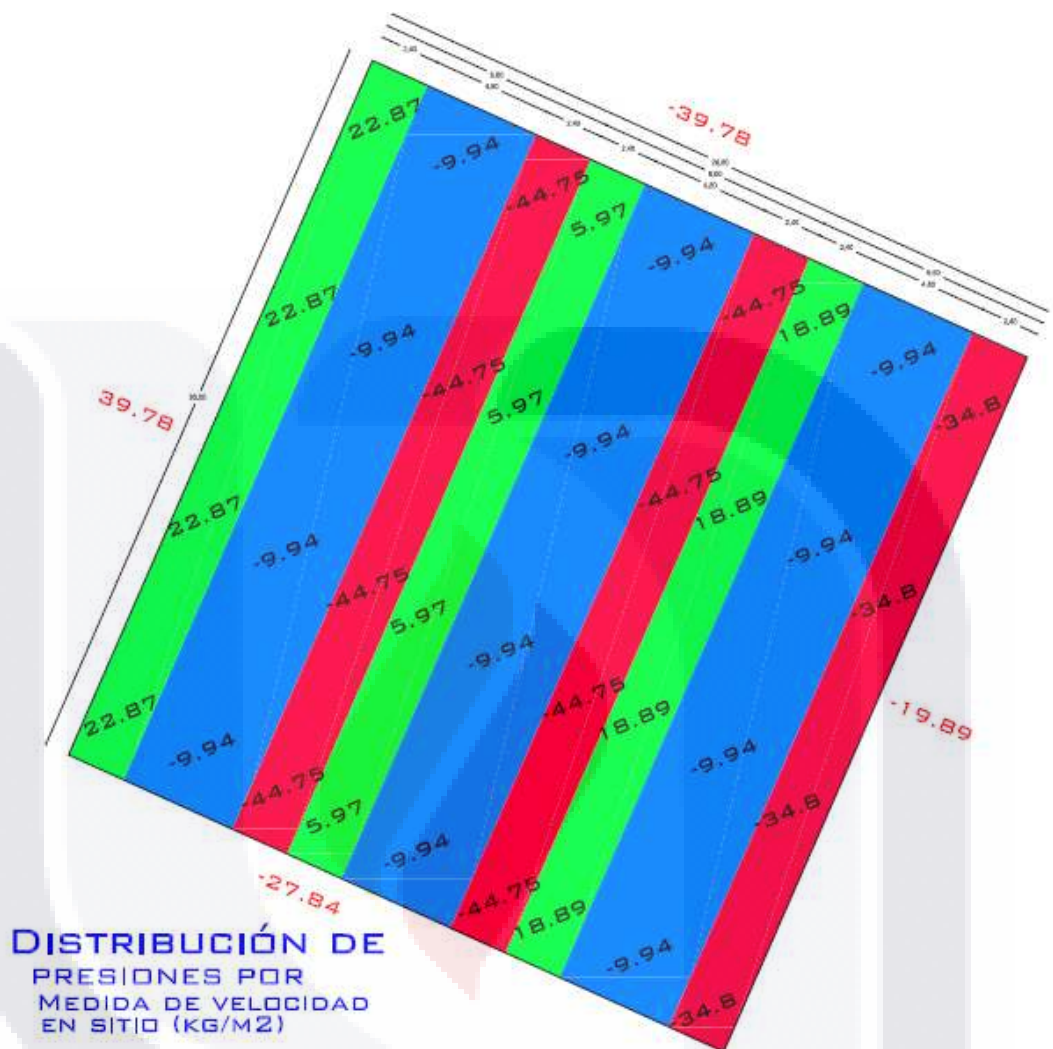


Figura 91: Distribución de presiones exteriores conforme a la velocidad de sitio

Evidentemente la distribución de presiones por parte de la velocidad en sitio debe ser menor, muestra valores un 37.6% menores. La comparación de estos dos valores de presión causará su verdadero efecto cuando se diseñe la membrana y especialmente en la estructura de acero ya que la presión repartida en la membrana bajará como cargas puntuales a la estructura, si la relación de esfuerzos de las secciones es cercana al límite sería mejor optar por los valores de presión cercanos a los medidos en el sitio, si la relación de esfuerzos y elementos mecánicos

actuantes con los resistentes dista mucho de los máximos permisibles del material es prudente tomar los valores de CFE ya que con ellos se tiene un margen de seguridad extra al ya de porci contenido en la definición de la presión base. Esto puede ser debatible ya que el manual de CFE en algunos casos se toma solo como una guía para el análisis de la estructura, claro está que en muchos otros se toma como normativa a seguir, si fuera el caso lo mejor es tomar los valores por CFE sin discutir teniendo en cuenta que si se cuenta con registros de viento del lugar, puede ser un buen parámetro para saber la veracidad de la presión de diseño que se saque de acuerdo a los diferentes programas de análisis. Todo este embrollo se torna a platica porque en este caso se tienen registros del lugar, sino estuvieran presentes, sin duda la presión base emitida por CFE en función de sus velocidades regionales es correcta desde el punto de vista de seguridad estructural al menos para la de Aguascalientes sí.

6.2.18 Presión de viento final en la cubierta

Con la intención de definir la presión de viento final en la cubierta resultante de la suma de la presión exterior e interior en el máximo de los casos posibles, que en esta vez se realiza para la ráfaga máxima del mes con mayor registro y el ciclo vegetativo de maduración o tercer ciclo en el crecimiento del cultivo que es quien genera el máximo valor de presión interior debido a su valor de KC en dicha etapa.

Es cierto que podría ser desarrollada con la velocidad de ráfaga para el mismo mes tratándose de que se trabaja con registros históricos, sin embargo el invernadero no se tiene en consideración como una estructura temporal sino una que estará durante todo el año en el lugar, es por ello que se evalúa con la máxima ráfaga anual. Para la presión interior en otra época puede ser diferente ya que depende del cultivo y con las condiciones climáticas probablemente este sea otro, es decir el mapa de la presión interior puede ser variable de la temporada y el cambio de cultivo, el de la presión exterior no, porque se evalúa con el máximo caso desfavorable de la ráfaga de viento.

La suma de la presión interior (etapa 3 o C-D con y sin ETFE en la cubierta) y la presión exterior (tanto para CFE como para la medida con valores de registro en el sitio por el INIFAP) se muestran en las siguientes figuras.

DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES (kg/m²)
Suma de presión interior (sin afectación de material en cubierta) y presión exterior por CFE

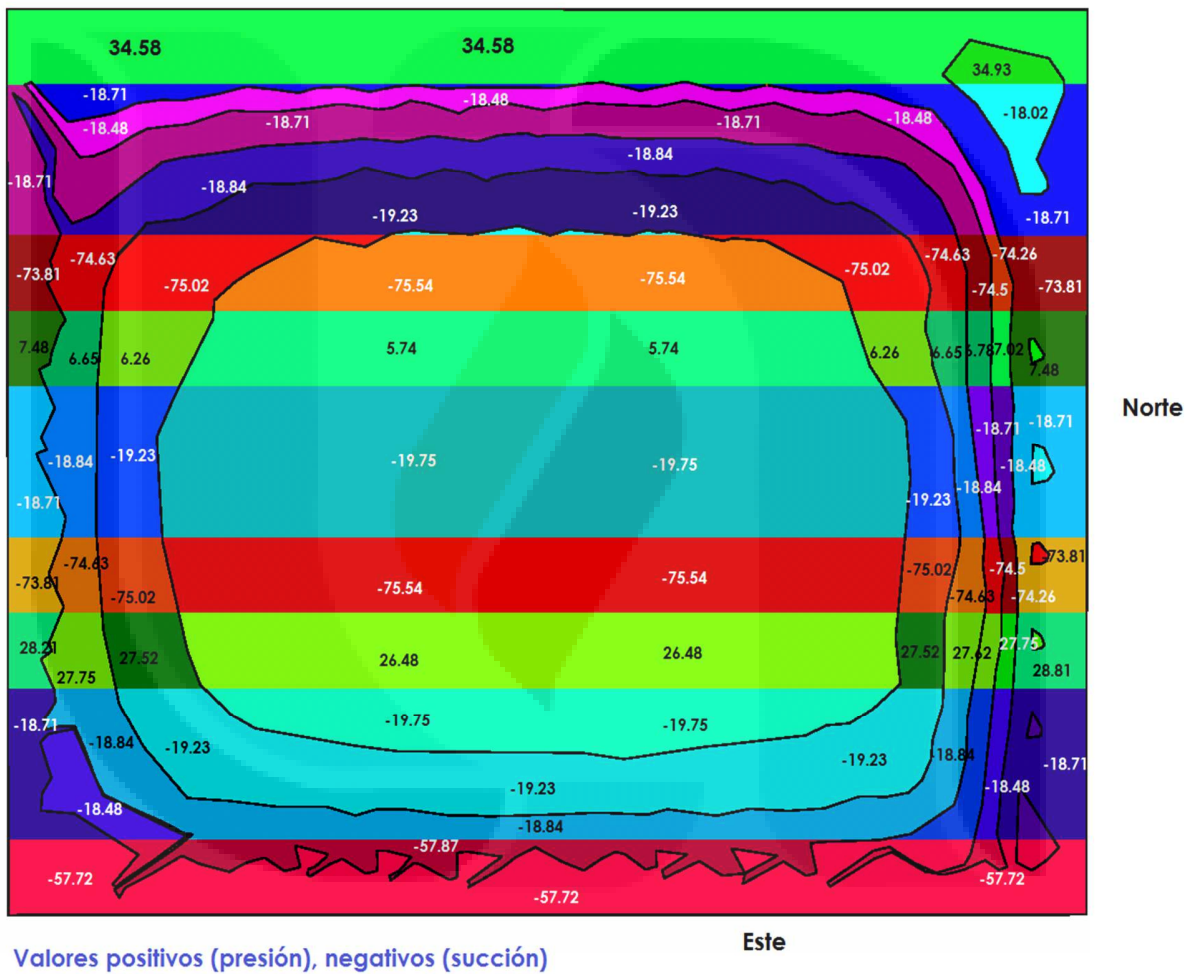


Figura 92: Distribución de presión fina en el invernadero, suma de presión interior sin ETFE y presión exterior por CFE

En la figura 92 a partir de los colores puede darse un vistazo rápido de la siguiente manera, colores rojos y naranjas evalúan las zonas de succión más altas es decir

después de las aberturas de las ventanas, las zonas de color azul evalúan las succiones de menor cantidad situadas antes de la apertura de las ventanas y finalmente las zonas en colores verde describen valores de presión.

La presión mostrada en esta figura muestra el caso que sería el más común, evaluar en función de la presión dinámica de CFE y una evapotranspiración interior sin la afectación de algún material en la presión.

En la siguiente figura 93 se muestra la combinación que se está planteando, la afectación de ETFE en la cubierta para la presión interior y la presión exterior en función de la medida de la ráfaga en sitio.

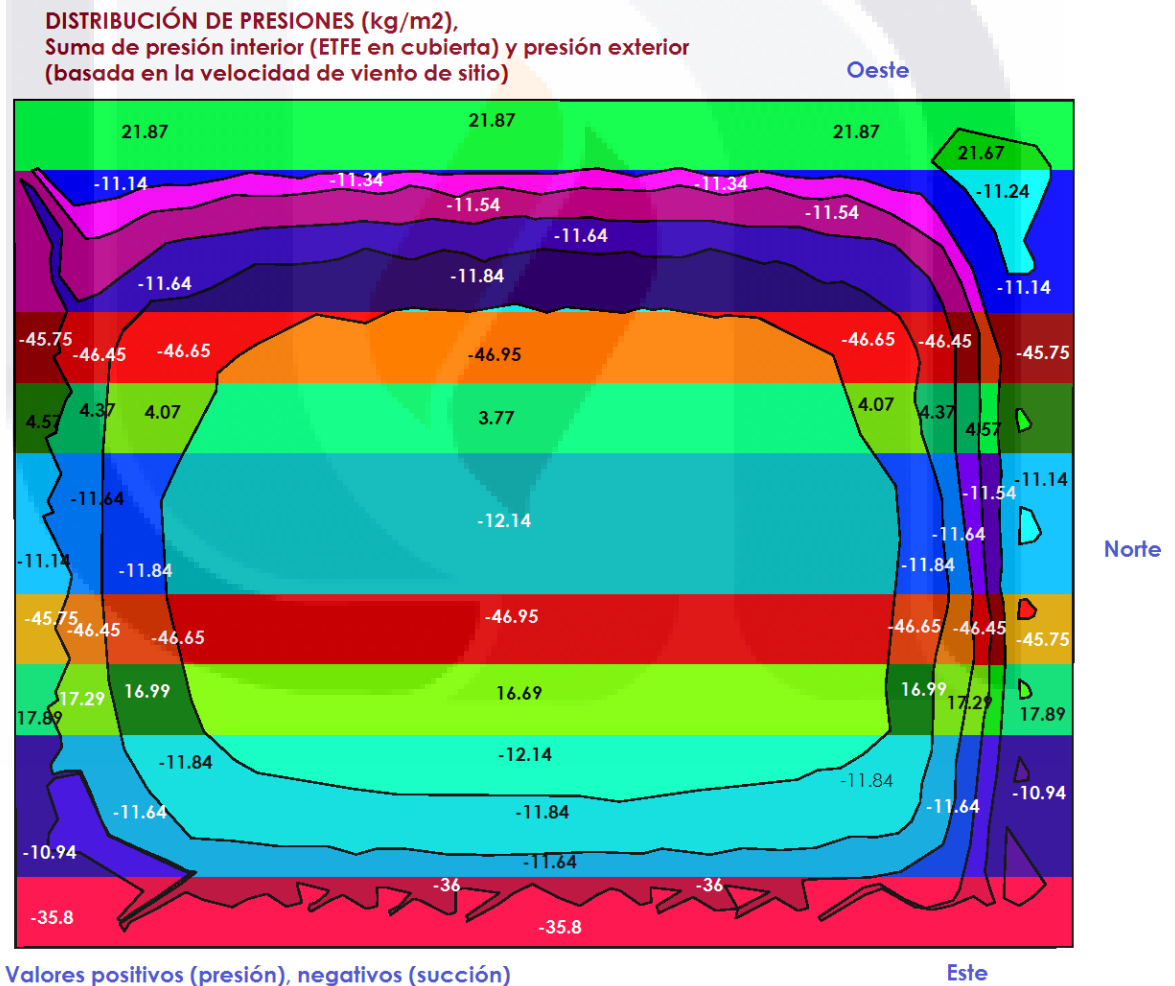


Figura 93: Distribución de presión final en el invernadero, suma de presión interior afectada con ETFE y presión exterior en base a la ráfaga de viento en sitio

De la condición normal en función de la presión de CFE y la interior sin la afectación de ningún material a la segunda que se está planteando con ETFE y con la ráfaga del sitio se nota que los valores de presión para la primera son poco menos que el doble de los valores de la segunda, lo cual desde el punto de vista de seguridad puede verse como correcto ya que da un margen mayor a eventos extraordinarios sin embargo con un costo más elevado. La ventaja de la segunda propuesta es que además de reducir la presión final (lo cual repercute en el costo de la estructura) se reduce la presión interior (evapotranspiración) que repercute directamente en la frecuencia de riego en la planta y con ello un ahorro el agua que se va utilizar.

Ambos mapas se encuentran en los anexos con el número J y K.

6.2.19 Tensión y relación de esfuerzo en la membrana

Para poder comparar los elementos de tensión en las barras ficticias que discretiza el programa la membrana y así realizar el método de densidad de fuerza, es necesario ingresar en el programa las componentes de las fuerzas de la velocidad de viento ya que esto simula el ángulo de ataque del viento en la estructura. En la tabla 31 se representan las componentes para cada caso de las 3 diferentes presiones base. Tomando como X el lado corto y Y el lado largo. Se resuelve con la velocidad menor conforme al sitio.

Tabla 31: Componentes para cada caso de velocidad de diseño

Caso	Vector de diseño de viento (km/h)	Componentes	
		X	Y
CFE	142.31	141.95	9.93
INIFED	150.89	150.52	10.53
Sitio	31.22	112.1	7.84

Realizando para el caso de la velocidad por sitio, la membrana presenta una relación de esfuerzos que excede la unidad con valores 1.01 a 1.25 solo en las paredes. Este fenómeno era algo de esperarse por la presión de viento que se concentra en estas partes de la estructura ya que se remite a valores de 0.8 y 0.9

de CP de la presión base total. Incluyendo el material ETFE en la membrana con espesor de 200 micras, una relación del módulo de elasticidad de 16 T/m, peso de 300 gr/m². Se muestra en la figura en el análisis de la distribución de la relación de esfuerzos a la tensión en la membrana.

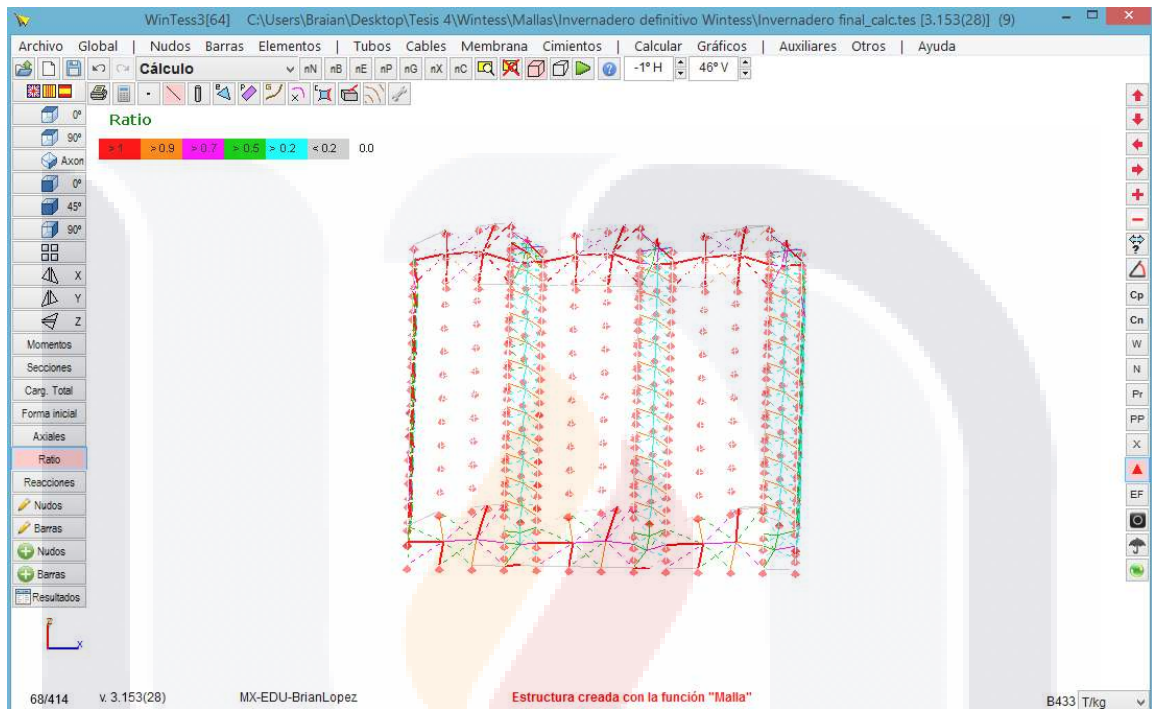


Figura 94: Distribución de relación de esfuerzos en la membrana de acuerdo a la velocidad en sitio

El problema en las paredes puede resolverse con algunas alternativas; la primera con solo poner mayor distribución de postes y estructura de acero con una menor separación y que ello ayude a la membrana comiéndose directamente la fuerza axial que genere el viento (cosa que plantean y es por qué los productores de estructuras para invernadero, dando una separación menor de los postes en las orillas que los postes del centro, en nuestro caso cada poste en la orilla está a 2.5 m y en el centro a 5 m), una posibilidad es dar una sección más gruesa a los postes de la orilla dejando la misma separación o mantener la misma sección en una menor separación entre los postes.

Otra posibilidad es pretensar la membrana aprovechando el comportamiento a la deformación del material (figura) y cambiar el ángulo de ataque del viento en las paredes inclinándolas para reducir la presión de viento un poco en la pared como se muestra en la figura 95.

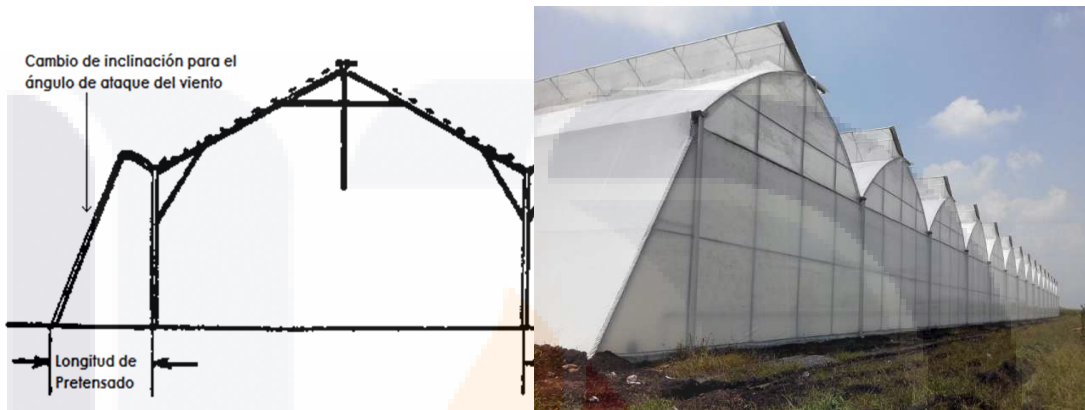


Figura 95: Pretensado de la membrana en la pared y cambio del ángulo de ataque del viento con la superficie

Otra opción es elevar el espesor de la membrana a 3 micras o bien como se comentó en la presentación e instalación del material en otras estructuras es ponerlo en la variabilidad de multicapa tensada, es decir elevar de 1 lamina a 2 o 3 láminas según se necesite lo que lleva la misma finalidad, elevar el área de la membrana.

Por otro lado el pequeño arco que estaba sumergido en un valor fuerte CP de 0.9 para succión sostiene una relación de esfuerzos de 0.8-0.84 en algunas partes, por seguridad puede aumentarse el área también o bien cambiar la configuración geométrica del arco pequeño a una placa recta vertical sin la curva del pequeño arco y con ello bajar el valor de succión en esa parte o bien por optar un invernadero con configuración geométrica llamada diente de sierra (figura) que se asemeja mucho a lo que se ha descrito. Muchos de los invernaderos de nueva generación sostienen dicha configuración geométrica y es por esta razón que se

genera una fuerte succión después de abrir las ventanas cenitales para la ventilación dentro del invernadero.



Figura 96: Invernadero tipo diente de sierra

6.2.20 Conclusiones particulares para el invernadero ejemplo

Para el invernadero en cuestión que se ha trabajado durante todo este documento se optó por una configuración curva para poder comparar de alguna forma el comportamiento con un arco que es lo parecido a lo que aparece en los diferentes códigos de análisis por viento de los reglamentos de construcción además de tener relación con la primer parte de la tesis referente al capítulo 5 y la dificultad del análisis de las superficies curvas ante la acción del viento debido a la sustentación y arrastre en la discretización de los elementos que describen la curva. Es claro que puede elegirse cualquier otra configuración recta, sin embargo en condiciones aerodinámicas es verdad que el valor de CP será el mismo en todo el área pero por cuestión de ventilación puede ser más difícil efectuarla, claro todo depende del cultivo, puede haber un cultivo que dentro del invernadero no necesite ventilación por que el gradiente térmico que se genera dentro no pone en peligro su crecimiento.

Para nuestra zona cercana a Aguascalientes donde se alcanzan temperaturas entre 20 y 30 °C frecuentemente gran parte del año y la velocidad del viento promedio es muy baja se optó por orientar el invernadero en función de

la dirección de este viento tratando de aprovecharlo lo más posible para reducir el gradiente de temperatura dentro y esto no afecte la planta. Se antepuso esta dirección a la de mejor orientación por la luz solar ya que ambas son muy similares. Sin embargo hacer esta orientación ha causado que el invernadero sea susceptible a la casi mayor distribución de presiones en la cubierta en el escenario de la perpendicularidad ante la ráfaga de viento, el ángulo de ataque fue de 86° que es muy cercano a los 90° de la ortogonalidad del vector ante el invernadero. Consecuencia que ha sido correcta asumir ya que en el orden de prioridades es el beneficio y buen desarrollo de la planta primero y después los elementos mecánicos de tensión en la cubierta y en la estructura, es decir es más fácil resolver un problema en la estructura que en la parte del crecimiento del cultivo.

La novedad a nuestro parecer es la definición de los valores de presión en la cubierta tanto de manera exterior con la ayuda de la velocidad de ráfaga en el sitio por datos del INIFAP para comparar ante la presión de CFE que se determina comúnmente en el análisis de estructuras especiales como un invernadero por viento y donde se demostró que tal vez la regionalización de CFE es un poco mayor en los valores de sus velocidades regionales, lo cual en nuestro punto de vista es referente a la seguridad estructural ya que difícilmente se puede contar con registros y el equipo que pueda registrar la ráfaga en sitio.

Por otro lado la presión interior que difícilmente es evaluada en un invernadero y de igual manera difícilmente se pueda presentar en cualquier otra estructura en el mundo, la naturaleza del invernadero hace que se presente este fenómeno por la evapotranspiración del cultivo. Lo interesante fue ver cómo repercute en la presión final en la cubierta que en nuestro caso fue poca ya que al utilizar las propiedades del material ETFE para determinarla fue reducida hasta un 40 % de la que se puede presentar con cualquier otro material, es decir en el ámbito estructural tal vez no pinte mucho pero en el ámbito hidráulico y del riego su efecto es grande.

CAPÍTULO VII CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones estructurales

Estructuralmente un invernadero no es tan complejo como determinar una tensoestructura debido a su configuración geométrica ya que el esqueleto de la estructura determina casi el 100 % de la curvatura de la membrana, la complejidad en un invernadero es determinar su correcto funcionamiento ante el desarrollo del cultivo y orientarlo conforme a ello, una vez realizado esto se puede hablar de la determinación de los elementos mecánicos en la estructura y de tensión en la cubierta. Entonces todo lo estructural depende directamente del comportamiento del cultivo y el gradiente de temperatura que el mismo necesite, ya que el mismo gradiente va afectar en la ventilación y ello en las aberturas de la geometría del invernadero, lo que a su vez repercute en la distribución de la presión en la cubierta y por ende en la estructura en total.

Por otro lado discretizar la membrana como lo pide el método de densidad de fuerzas y hacer el tratamiento estructural como una tensoestructura ofrece mayor información en el comportamiento de la cubierta ante las diferentes acciones sobre ella, siendo el viento la de mayor peso en este tipo de estructuras.

Como ya se ha tratado en el ejemplo de aplicación, la variabilidad de la presión final en la cubierta se torna interesante al haber una presión interior debido a la naturaleza de la estructura en relación a la evapotranspiración del cultivo, por ello la suma de la presión interior y exterior por el viento conforman la presión final.

Por su parte una tensoestructura es una estructura bastante especial ya que su configuración geométrica y su rigidez depende directamente del estado tensional de la misma, es decir no se conoce su geometría hasta que se hace una pequeña aproximación debido a su peso propio y esto denota tan solo un boceto para poder empezar a trabajar en la estructura, con ello poder aplicar las cargas de viento en la misma. Lo especial es que una vez realizadas las iteraciones necesarias para conocer una geometría satisfactoria es que ésta puede ser mejorada aprovechando la naturaleza de los materiales que la conforman a partir del pretensado, el cual su finalidad es reducir las deformaciones en la membrana.

En una tensoestructura el punto no es que existan o se reduzcan las deformaciones en la misma hasta hacerse nulas como en cualquier otro tipo de estructuras sino que existan deformaciones y que ellas sean inducidas de manera razonable para que el material se aproveche al máximo con el propósito de salvaguardar grandes claros ahorrando material en la estructura (comúnmente de acero) que la sostiene.

Otro punto de interés y particularidad en una tensoestructura mientras se fue desarrollando la investigación es el análisis dinámico en ellas, el cual determinarlo es bastante ambiguo y debatible ya que como se ha comentado, la configuración geométrica definitiva de una tensoestructura depende del estado tensional y gradualmente del pretensado, no antes de este de punto, por lo que situar desplazamientos relativos en función de la masa es bastante discutible ya que en el momento que se sitúa la matriz de masas para resolver y conocer dichos desplazamientos se hace en un instante de tiempo que no es válido, ya que cuando cambie de iteración en la búsqueda de forma, la red de puntos que se han situado para determinar la matriz de masas ya no es válida por el constante movimiento y desplazamientos propios de la búsqueda de forma en la estructura.

Otra cosa es que una vez que se conoce el pretensado y estado tensional definitivo en la membrana, cerciorándose que no existe un desplazamiento diferente al previsto en el cálculo para aprovechar las características del material en turno, ahora sí puede conocerse el periodo fundamental de la estructura y con ello sus características dinámicas situando el centro de masa en la geometría, cosa que se hace comúnmente para tal vez cuidar y observar la estructura con los elementos con quien esta interactuando en la sujeción y cimentación de la misma, claro teniendo el supuesto que la estructura es lo suficientemente rígida para no deformarse durante el movimiento, cosa que como se ha expuesto es diferente a la naturaleza y comportamiento de las tensoestructuras que es la deformación; entonces el análisis dinámico como pocos autores plantean para la resolución y obtención del proceso de búsqueda de forma de este tipo de estructuras en mi opinión es erróneo, lo mejor es situar la estructura en una red de cables en base a la densidad de fuerza de los mismos buscando la linealidad y posible resolución de

los sistemas matriciales de gran tamaño que se emiten en ese proceso que son más laboriosos pero de mayor exactitud en los resultados además de que el método por sí mismo pide un vector de cargas que está íntimamente lligado con la posición de la red de nodos donde se está aplicando las cargas en el sistema, cosa que puede irse modificando en cada iteración y poder ir agregando el pretensado de una vez, esto da una convergencia en el sistema de mayor rapidez, cosa que no se ve en los demás métodos que suelen hacerse para el tratamiento de estas estructuras como la rigidez transitoria o el método de relajación dinámica.

Para concluir esa parte de la siguiente manera: es mejor plantear la analogía de un análisis estático durante la búsqueda de forma por el control del sistema y una resolución de menor complejidad a la ya deporci difícil parametrización geométrica la estructura.

Un punto de gran interés que se tocó durante el documento es como determinar los valores de coeficientes de presión de viento CP primero para cualquier configuración curva, tema que difícilmente se toca en cualquier reglamento del mundo, siendo solo el reglamento de Nueva Zelanda-Australia quien toca temas referentes a los paraboloides hiperbólicos muy básicos e ideales, La propuesta que se ha planteado durante la tesis es una vez conocida la configuración geométrica de cualquier estructura (iteración en cuestión de la geometría parcial en el caso de una tensoestructura) a partir de una parametrización geométrica mediante curvas puede conocerse la longitud de las mismas y dividirse en pequeñas áreas que denoten un vector normal a la superficie y el cual pueda ser comparado con el vector que provoca el viento desde la ortogonalidad.

Las componentes de este vector normal pueden hacerse análogos a los términos de aeronáutica llamados sustentación y arrastre, quienes en su vector resultante coincidentemente es igual al vector normal de la parametrización de la curva. Tanto la sustentación como el arrastre dependen de coeficientes que se remiten a la experimentación en túnel de viento, punto que las tablas en los diferentes libros solo presentan para figuras muy ideales como cilindros o placas

paralelas al flujo, ésta fue una disyuntiva y gran complicación durante la investigación contestar ¿Cómo definir la sustentación y arrastre en una placa inclinada sin la necesidad de un túnel de viento? Finalmente y con la ayuda de una gran investigación de Ortiz, Rival y Wood (2015) quienes exponen una fórmula para resolver y evaluar la sustentación y arrastre en una placa inclinada desde cualquier punto del vector de la fuerza de ataque en la misma, es como esta parte fue resuelta. Es claro que implementar la parametrización de la figura y aún más sacar los vectores normales para compararlos con los del viento es algo de gran complejidad que puede resolverse con la ayuda de un software de parametrización de curvas como Rhino, discretizando y sacando los ángulos de inclinación entonces puede conocerse la fuerza actuante en la placa inclinada que a su vez multiplicada por el área denota una presión, si esta presión se compara con la presión dinámica base puede conocerse el valor de CP para cualquier punto en cualquier estructura sea cual sea su geometría.

Es evidente que es difícil que alguien y más con el software que hay hoy en día se ponga a efectuar este laborioso trabajo, sin embargo durante la investigación y basándose en un arco se comprobó que la metodología da valores muy similares a los de arcos probados en un túnel de viento además de comparar con túneles de viento virtuales como Autodesk Flow Design y Wintess.

Por ultimo puede existir la pregunta ¿Qué software puede ayudar a la resolución de una tensoestructura o bien para evaluar la presión de viento en una geometría que no exista dentro de los reglamentos de construcción y manuales de diseño?

Respondiendo la primera parte, para una tensoestructura en su configuración geométrica y parametrización de los vectores normales sin duda Rhino puede hacerlo; en extensión con Grasshopper y bastantes toolbox como Bullant (puede resolver densidad de fuerza), Karamba (puede denotar relación de esfuerzos en la membrana), Lunchbox, (puede aplanar superficies), Weaverbird (puede ayudar en el suavizado del mallado en la membrana), Human UI (ayuda en la creación de mallas de gran densidad), Kangaroo (aplica simulación de

fuerzas como el viento en una estructura) y Rhinomembrane (enfoca la malla a un estado tensional donde pueden darse características del material en la membrana); o bien utilizar Formfinder para tensoestructuras de una configuración geométrica sencilla, por otro lado Wintess en una opinión personal es el programa más completo para la resolución de una tensoestructura ya que se basa en métodos matriciales y denota el comportamiento en toda la membrana, además puede realizar trabajos de gran complejidad exportando la geometría en extensión dxf.

Respondiendo la segunda parte, para conocer el efecto del viento y la posible distribución de presiones en una estructura de manera rápida, programas como Autodesk Flow Design, XFlow y algunos componentes de Ansys pueden ayudar con esta labor.

7.2 Conclusiones particulares para el diseño de un invernadero

Por su parte el diseño de un invernadero se sumerge a una estructura de mucha particularidad y bastante especial ya que posiblemente es la única quien emite una presión interior natural, esto debido a la evapotranspiración del cultivo, pocas veces en el diseño de un invernadero se antepone la afectación del cultivo en la estructura creyendo que no tiene relación, durante la tesis se ha demostrado como afecta tanto para la presión en la cubierta como en el dimensionamiento del invernadero. En gran peso y escala, la correcta determinación de la presión de viento es la clave del diseño, ya que análogamente es el análisis estructural en el elemento y quien denota que tipo de diseño en la estructura es el necesario para cubrirla, es por ello que el documento se enfocó de gran manera en la obtención de la presión en la cubierta y los valores CP de presión que en perspectiva es un área menos estudiada que el diseño y análisis de estructuras de acero o el material del que sea la estructura del invernadero.

Finalmente el punto de mayor relevancia en mi parecer que a pesar de resultar contraproducente para efectos de la investigación de presión en la cubierta ya que prácticamente nulifico la presión interior, es el material ETFE sobre ella ya que

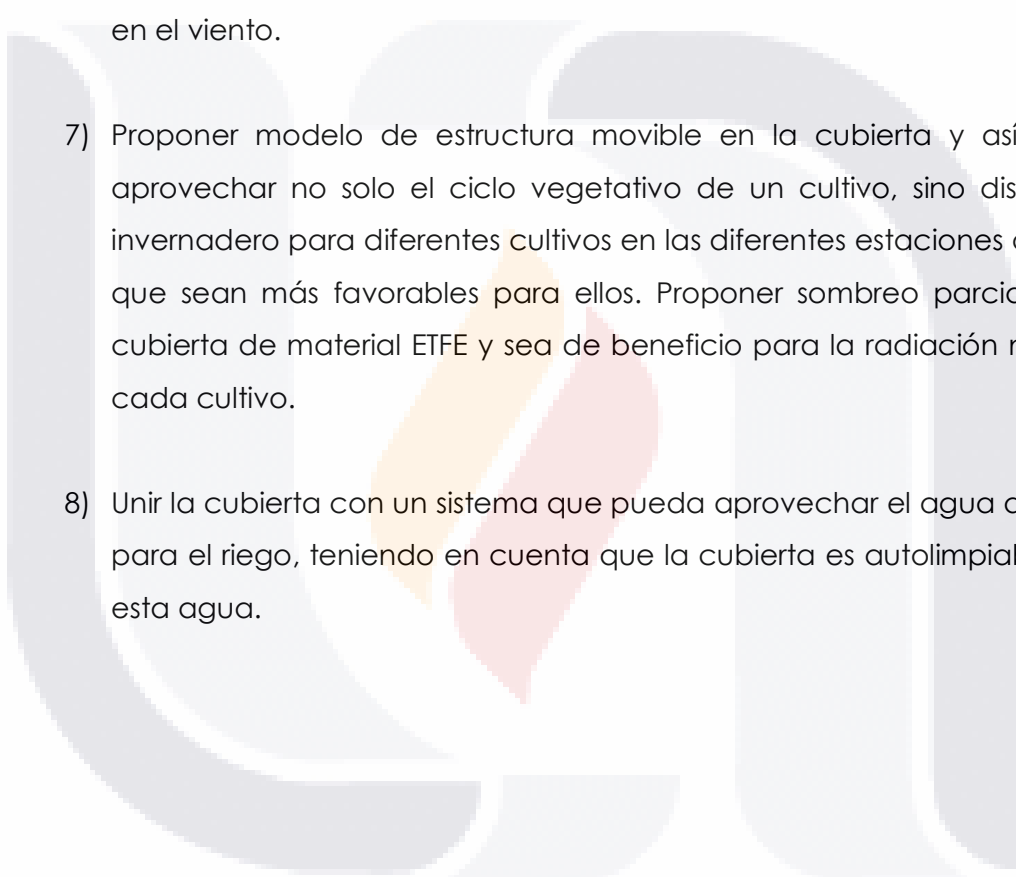
por otro lado denotó un ahorro de casi 40 % de agua por efecto de la evapotranspiración. Con ello el ahorro del agricultor y el cuidado del agua se ven beneficiados.

7.3 Posibles y futuras líneas de investigación

Conforme al desarrollo de este trabajo se tocaron algunos puntos que serían bueno profundizar en siguientes trabajos, tales como:

- 1) Profundizar en la determinación del arrastre y sustentación para poder evaluar una placa o geometría sumergida en el lado de barlovento de cualquier estructura sin la necesidad de túnel de viento implementando el modelo matemático que pueda realizar ello y que este pueda analizarse conforme a la velocidad de cada placa y su respectiva altura, no sumergiendo a todo el lado de barlovento con la velocidad más alta, claro desde el punto de vista de seguridad es correcto hacer ello pero desde el punto de vista de la investigación sería interesante observar el comportamiento de cualquier estructura en barlovento y como es la distribución de succiones.
- 2) Elaborar script que pueda leer y evaluar para cualquier configuración geométrica a partir del vector normal la sustentación y arrastre en cualquier punto
- 3) Estudiar la parte hidráulica a profundidad debido a la reducción de la evapotranspiración dentro de un Invernadero con ETFE programando y modificando los tiempos de riego buscando denotar y seleccionar el riego automático correcto (goteo o aspersión).
- 4) En relación a la radiación del invernadero probar las diferentes formas de sombreado en el material ETFE buscando la combinación de 1 o más cultivos durante el año para aumentar la producción a anual y no solo por temporada.

- 5) Elaborar tablas de presión interior para cada diferente cultivo con diferentes temperaturas y materiales como ayuda de diseño rápida.
- 6) Realizar figuras de distribución de presiones sobre un invernadero o en batería de distintas configuraciones en su geometría (dos aguas, diente de sierra, etc. como ayuda de diseño para distintos ángulos de ataque en el viento.
- 7) Proponer modelo de estructura movable en la cubierta y así poder aprovechar no solo el ciclo vegetativo de un cultivo, sino diseñar el invernadero para diferentes cultivos en las diferentes estaciones del año que sean más favorables para ellos. Proponer sombreado parcial en la cubierta de material ETFE y sea de beneficio para la radiación neta en cada cultivo.
- 8) Unir la cubierta con un sistema que pueda aprovechar el agua de lluvia para el riego, teniendo en cuenta que la cubierta es autolimpiable con esta agua.



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

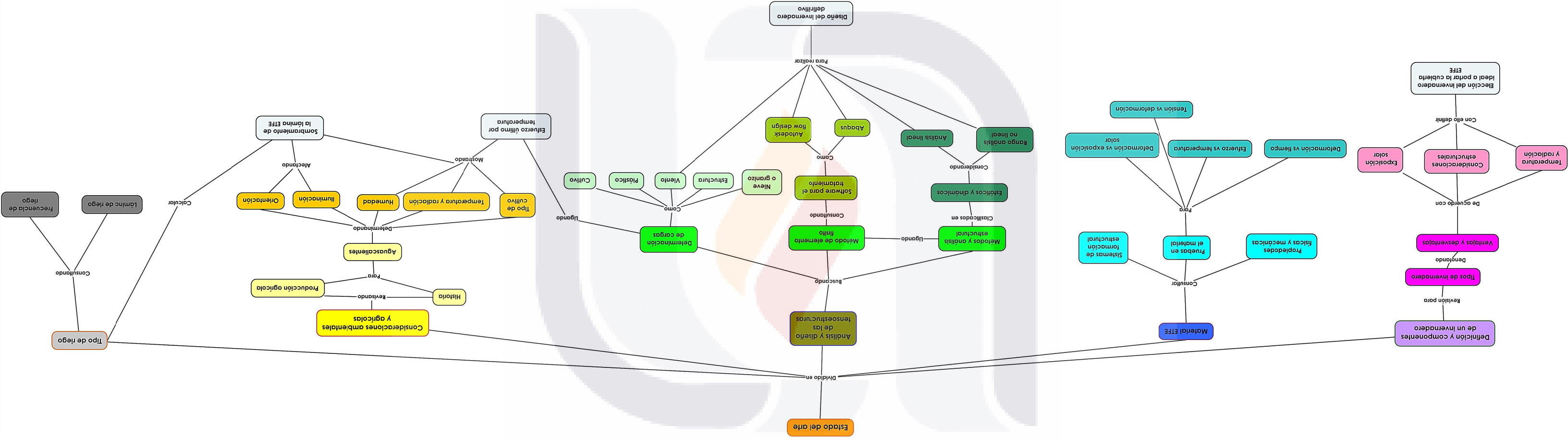
- Allen et al (2006), "*Evapotranspiración del cultivo*", Serie de riego y drenaje de la FAO, No. 56, Roma-Italia.
- Alva, Castañeda Yew (2011), "*Clasificación de los invernaderos*", en tesis de maestría: *Diseño conceptual de un invernadero automatizado para cultivos en hidroponía* (Cap. 3, pp. 16-50), UNAM, Facultad de Ingeniería, México, p.26-27
- Ansell, M.P. (1985), "*Acceptability of ET HOSTAFOLON film for use in buildings*", En reporte del programa de ensayos cuidados por la consultoria de ingenieros Buro Happold, Tesis de doctorado *ETFE-Folie als Tragelement*, Technische Universität München, Alemania.
- Arnaiz, Sofía (2001), "*¿Cómo calcular la relación de volumen con la superficie del invernadero?*", en tesis de licenciatura: *Manual de producción de hortalizas en invernadero para la IX Y X regiones de Chile, dirigido al consumo familiar*, Facultad de Ciencias Silvoagropecuarias, Escuela de Agronomía, Universidad Mayor, Chile, p.100
- Balling et. Al (2012), "*Mechanical Properties*", en tesis de maestria: *Structural design of flexible ETFE afrium enclosures using a cable-spring support system* (Cap. 2, pp.25-44), Department of civil and enviromental engineering, Brigham Young University, Utah-Estados Unidos, p. 32
- Basset, Luisa (S.A.). "*Tipos y materiales utilizados en las membranas*", En artículo: *Tensoestructuras*, Universitat Politècnica de Valencia, Escuela Técnica superior de Arquitectura, Valencia, España, pp. 5-6.
- Bernabeu-Larena, Alejandro (2007), "*Estrategias del diseño estructural*", en tesis para título de doctor: *Estrategias del diseño estructural en la arquitectura contemporánea*, Universidad Politécnica de Madrid, España, p. 20

- Blum et. Al (2009), "*Propiedades de los materiales y ensayos*", Guía europea de diseño de las estructuras superficiales tensadas, Arquitectura textil, Editorial Munillaleira, edición 2009, p. 185
- Bublik, Natalia (S.A), "*Estructuras Tensairitis*", en tesina: *Estudio de la fachada con membrana textil tensada como segunda piel*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona-España, p. 17
- Bublik, Natalia (S.A), "*Materia prima utilizada para textiles*", en tesina: *Estudio de la fachada con membrana textil tensada como segunda piel*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona-España, p. 32
- Bublik, Natalia (S.A), "*La fibra de vidrio*", en tesina: *Estudio de la fachada con membrana textil tensada como segunda piel*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona-España, p. 32
- Carranza, Tigo (2011), "*Tipos de superficies*", en tesis: *Cálculo y diseño estructural para la cubierta del mercado central de la parroquia Píntag en base a tenso-estructura con el uso de bambú gigante*, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí-Ecuador, pp. 24-30
- Casas, Sansó Rosana (2012), "*ETFE*", Master en proyecto de arquitectura y calidad, Materiales de última generación y eficiente, Universidad Autónoma de Chihuahua, México, pp. 2-6
- Castro (2010), "*Tenso estructuras*", Investigación, Facultad de arquitectura y urbanismo, Venezuela.
- Construmática (2017), "*Componentes del sistema estructural de una cubierta*", Cubiertas, recuperado en: <http://www.construmatica.com/construpedia/Cubiertas>, fecha de consulta: Abril-2017
- Construmática (2017), "*Descripción ampliada*", Cubierta flotante, recuperado en: http://www.construmatica.com/construpedia/Cubierta_Flotante fecha de consulta: Abril de 2017.

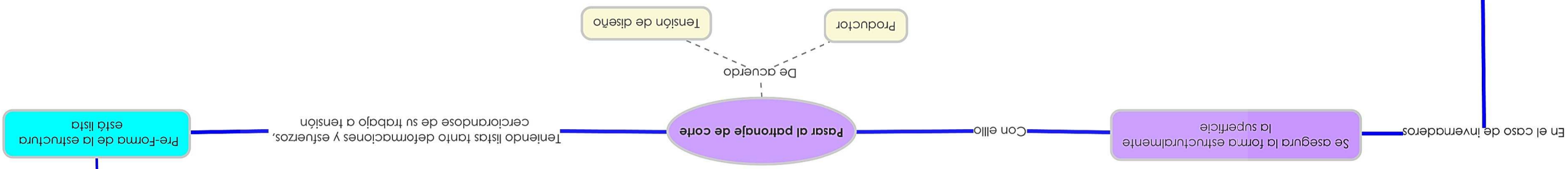
- De Olivera, R. (2011), *“Los detalles constructivos de las tensoestructuras”*, Escuela de Arquitectura de Barcelona, Barcelona-España.
- Detail (2009), *“Cubierta de EFTE”*, Cubiertas y Estructuras, IASO S.A. , Brasil, p. 107
- Duarte, Correa Francisco (2007), *“Geometría”*, en tesis de maestría: *Revisión estructural y propuesta de reforzamiento del invernadero C.U. ante cargas: muerta, viva y de viento* (Cap. 3 Estructuración, pp. 17-30). México: Universidad Autónoma de Querétaro/Facultad de Ingeniería, pp. 17-26.
- Eden Project (2012), *“The Biomes”*, recuperado en: <http://grimshaw-architects.com/project/the-edenproject-the-biomes>, Grimshaw, Reino Unido
- Escalona et Al (2009), *“Manual de cultivo de tomate”*, Innova Chile CORFO, Nodo Hortícola VI región, Facultad de ciencias agronómicas, Universidad de Chile, Chile, p. 13
- Fernández-García, María Soledad (2014), *Invernaderos*. En tesis doctoral: *Optimización estructural de invernaderos por algoritmos genéticos* (Cap. 1, pp. 3-9). España: Universidad de Extremadura/ Departamento de Ingeniería del Medio Agronómico y Forestal, pp. 7-8
- Gómez, V. (2007), *“Tensegridad”*, Estructuras tensegríticas en ciencia y arte, Universidad de Cantabria, Santander- España, p. 200
- Gutiérrez, Reyes Oziel (2012), *“Sistemas de invernadero”*, en tesis de licenciatura: *Automatización de un sistema invernadero con hidroponía* (Cap. 2, pp. 2-17), UNAM, Facultad de Ingeniería, México, p. 2
- LeCuyer, Annette (2008), *“Material Matters: ETFE”*, ETFE: Technology and Design (Cap. 3, pp 94-113), Basel: Birkhauser Verlag AG, Berlín- Alemania.
- Lewis, W. J. (2003), *“Modelling of tension membranes”*, Tension structures form and behaviour (Cap 7, pp. 143-176), University of Warwick, 1er. Edición, Londres-Inglaterra, p. 143

- Linkwitz. K. (1971), "*Einige Bemerkungen zur Berechnung von vorgespannten Seilnetzkonstruktionen*". Ingenieur-Archiv, Alemania, pp. 145-158
- Marín, Miriam (2013), "*Diseño de invernaderos*", Instrucciones técnicas, Marín Pons & Asociados, España, p. 3
- Marroquín, Luis (2012), "*Marco teórico*", Tensoestructuras: guía básica de diseño, primera edición, edición digital, Lima-Perú, p. 15
- Moya et. Al (S.A.), "*Cubiertas colgantes*", Cubiertas especiales, recuperado en: <https://processosped1415.files.wordpress.com/2015/01/cubiertas-especiales.pdf>, fecha de consulta: Abril-2017
- The Masterbuilder (2012), "*An insight into EFTE-history, application and future*", en MB Bureau Report, Fabric Architecture, Masterbuilder- August 2012, pp 2-10
- Montero I., Juan (2012), "*Desarrollo de estructuras para invernaderos*", Cuadernos de estudios agroalimentarios, ISSN2173-7566, España, pp. 48-65
- Pedroza et Al. (2015), "*Tipos y clasificaciones*", Tenso-estructuras de cubierta, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Programa de Ingeniería Civil, Culcyt-Estructuras Mayo-Agosto 2015, Año 12, No. 56, Chihuahua-México, p. 71
- RAE (2016), "*Invernadero*", Diccionario de la lengua española, edición de tricentenario, recuperado en: <http://dle.rae.es/?id=M3AhIMC>, España.
- Rainer, Blum (2009), "*Propiedades de los materiales y ensayos*", Guía europea de diseño de las estructuras superficiales tensadas, editorial Munillaleira, ed. 2009, p. 27.
- Robinson, L.A. (2005), "*Structural opportunities of ETFE (ethylene tetrafluoroethylene)*." En tesis de maestría en el instituto de tecnología de Massachusetts, Cambridge, Estados Unidos.
- Sánchez, María (2005), "*De las tiendas a las membranas pretensadas*", documento digital: La forma en las cubiertas de membranas, <http://www.herrera.unt.edu.ar/revistacet/anteriores/Nro26/PDF/p50-54.pdf>

- Santoso, K. (2004). *"Wide-Span Cable Structures"*. California: University of California.
- Seidel, Michael (2009), *"Tensile surface structures: a practical guide to cable and membrane construction"*, Design, assembly and erection, Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Alemania.
- Songel, Juan (2005), *"Biografía de Frei Otto"*, en tesis: *Frei Otto y el instituto de estructuras ligeras de Stuttgart: una experiencia de metodología, investigación y sistematización en la búsqueda de la forma resistente*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de composición arquitectónica, Valencia-España, 2005, p.63
- Tigo, F. (2011) *"Cálculo y diseño estructural para la cubierta del mercado central"*, Escuela Politécnica del Ejército, p. 365
- Torné, Luís (2008), *"Tensegriudad"*, artículo en línea, Revista IPP. Núm 1, Instituto de posturología y podoposturología, http://www.ub.edu/revistaipp/l_torne.html España
- Viracocha, Wilson (2013), *"La estructura"*, en tesis de licenciatura: *Estudio de la factibilidad para la implementación de un vivero permanente de plantas ornamentales en el cantón Mejía, provincia de Pichincha* (Cap. 4, pp. 6-31), Universidad Nacional de Loja, Ecuador, p. 10.



En el caso de inversores que pueden afectar las condiciones ambientales que pueden afectar la estructura y el cultivo



De acuerdo
Productor
Tensión de diseño

Teniendo listas tanto deformaciones y esfuerzos, cerciorándose de su trabajo a tensión, Pre-Forma de la estructura está lista

Conoce el grado de pretensado y la tensión última de diseño

Cuidando la fuerza en base al diagrama esfuerzo vs. deformación del material

Al obtener la deformación deseada

Diferencia entre iteraciones sea cercana al 10%

Longitud
Fuerza

Esta en función
Repetiendo este paso del ciclo hasta

Refina la malla

Puede elegirse el método de análisis para refinar la forma

Teniendo control de: Agentes de carga
Condiciones de borde
Material

Si la figura es compleja, puede introducirse una malla por MEF

Revisando esfuerzos y comportamiento del material

Elegir el material a utilizar

Franjas de diseño

De acuerdo al área expuesta y la curvatura de la superficie

Determinar coeficientes para presiones de viento

Revisando deformaciones y condiciones de borde

Analisis en base al efecto del viento

Determinando viento dominante, velocidad de diseño

Busqueda de forma

Describir la geometría

Parametrización de curvas y superficies

Ecuaciones de forma

Primer malla (geometría)

Permite conocer la sección y topología en cualquier punto

Analisis en base a peso unitario

Refinando condiciones de borde o estructuras auxiliares

Primer acercamiento a agentes de carga

El Viento es el de mayor énfasis

Análisis y diseño para una tensoestructura

Se puede dividir en 3 fases primordiales

Busqueda de forma

Análisis de deformaciones y esfuerzos

Patronaje y corte del material o membrana

ANEXO C

Presiones de viento a partir del programa Wintess para el problema de análisis en el capítulo 5. Anexo a la figura 58.

0.49	0.4	0.12	-0.35	-0.45	-0.43	-0.43	-0.44	-0.40	-0.40
0.43	0.27	0.12	-0.37	-0.45	-0.43	-0.45	-0.42	-0.41	-0.40
0.43	0.33	0.12	-0.27	-0.45	-0.43	-0.43	-0.43	-0.41	-0.4
0.57	0.49	0.21	-0.31	-0.45	-0.42	-0.42	-0.42	-0.42	-0.4
0.67	0.58	0.4	-0.35	-0.45	-0.43	-0.43	-0.42	-0.4	-0.4
0.75	0.64	0.43	-0.35	-0.45	-0.45	-0.43	-0.42	-0.4	-0.4
0.75	0.64	0.43	-0.35	-0.45	-0.45	-0.43	-0.42	-0.4	-0.4
0.67	0.58	0.4	-0.35	-0.45	-0.43	-0.43	-0.42	-0.4	-0.4
0.43	0.33	0.12	-0.37	-0.45	-0.43	-0.43	-0.43	-0.41	-0.4
0.43	0.33	0.12	-0.37	-0.45	-0.43	-0.43	-0.43	-0.41	-0.4
0.43	0.27	0.12	-0.37	-0.45	-0.43	-0.45	-0.42	-0.41	-0.40
0.49	0.4	0.12	-0.35	-0.45	-0.43	-0.43	-0.44	-0.40	-0.40

ANEXO D

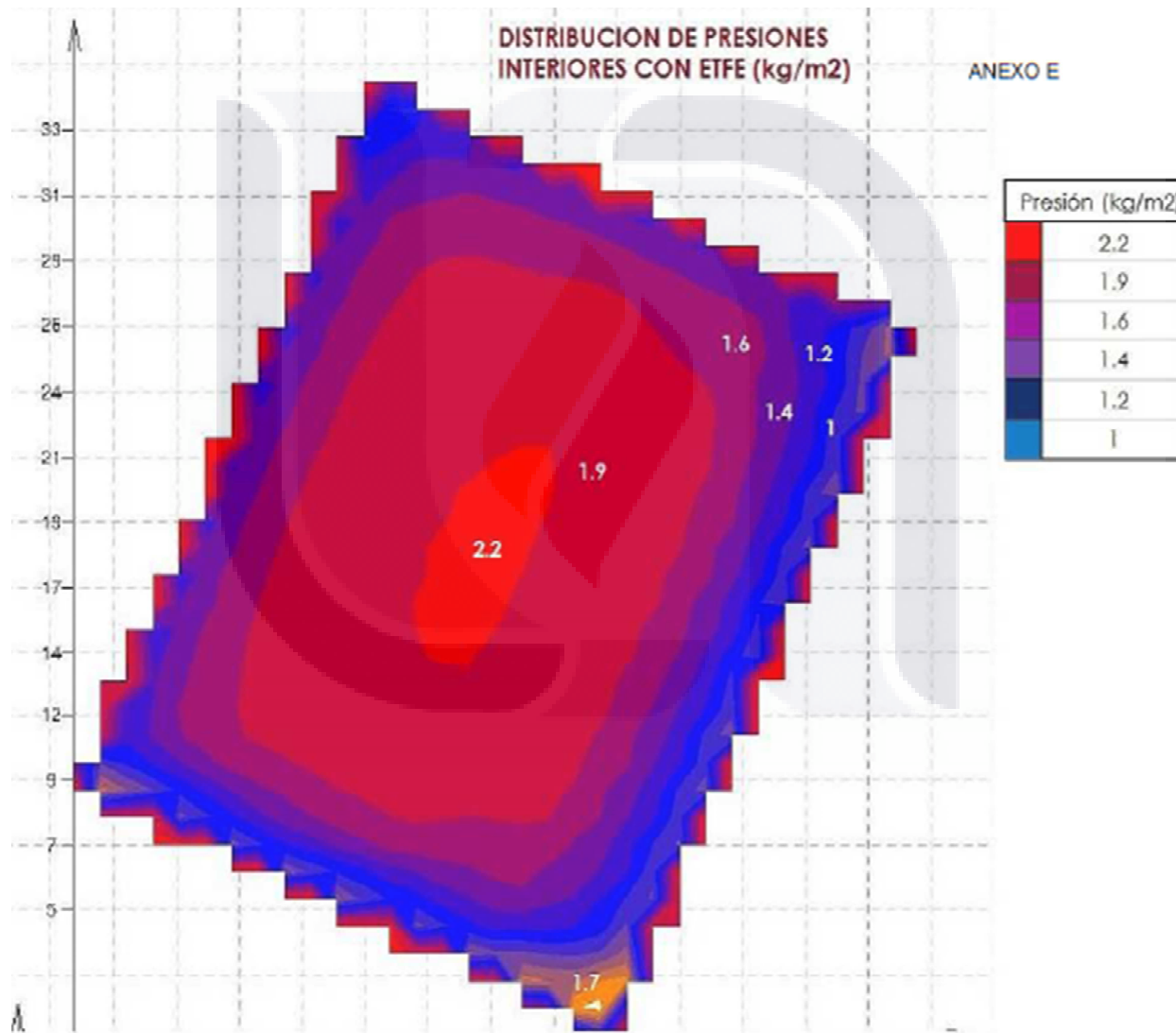
Presiones de viento a partir del programa Autodesk Flow Design para el problema de análisis del capítulo 5. Anexo a la figura 59.

0.4	0.35	0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35	-0.35	-0.32	-0.32
0.5	0.35	0.15	-0.25	-0.4	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.6	0.35	0.15	-0.35	-0.5	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.6	0.45	0.2	-0.4	-0.52	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.65	0.6	0.25	-0.45	-0.55	-0.5	-0.4	-0.38	-0.35	-0.35
0.79	0.6	0.3	-0.4	-0.55	-0.55	-0.38	-0.38	-0.35	-0.35
0.79	0.6	0.3	-0.4	-0.55	-0.55	-0.38	-0.38	-0.35	-0.35
0.65	0.6	0.25	-0.45	-0.55	-0.5	-0.4	-0.38	-0.35	-0.35
0.6	0.45	0.2	-0.4	-0.52	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.6	0.35	0.15	-0.35	-0.5	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.5	0.35	0.15	-0.25	-0.4	-0.45	-0.45	-0.38	-0.35	-0.35
0.4	0.35	0.15	-0.2	-0.25	-0.3	-0.35	-0.35	-0.32	-0.32

AUTODESK FLOW DESIGN

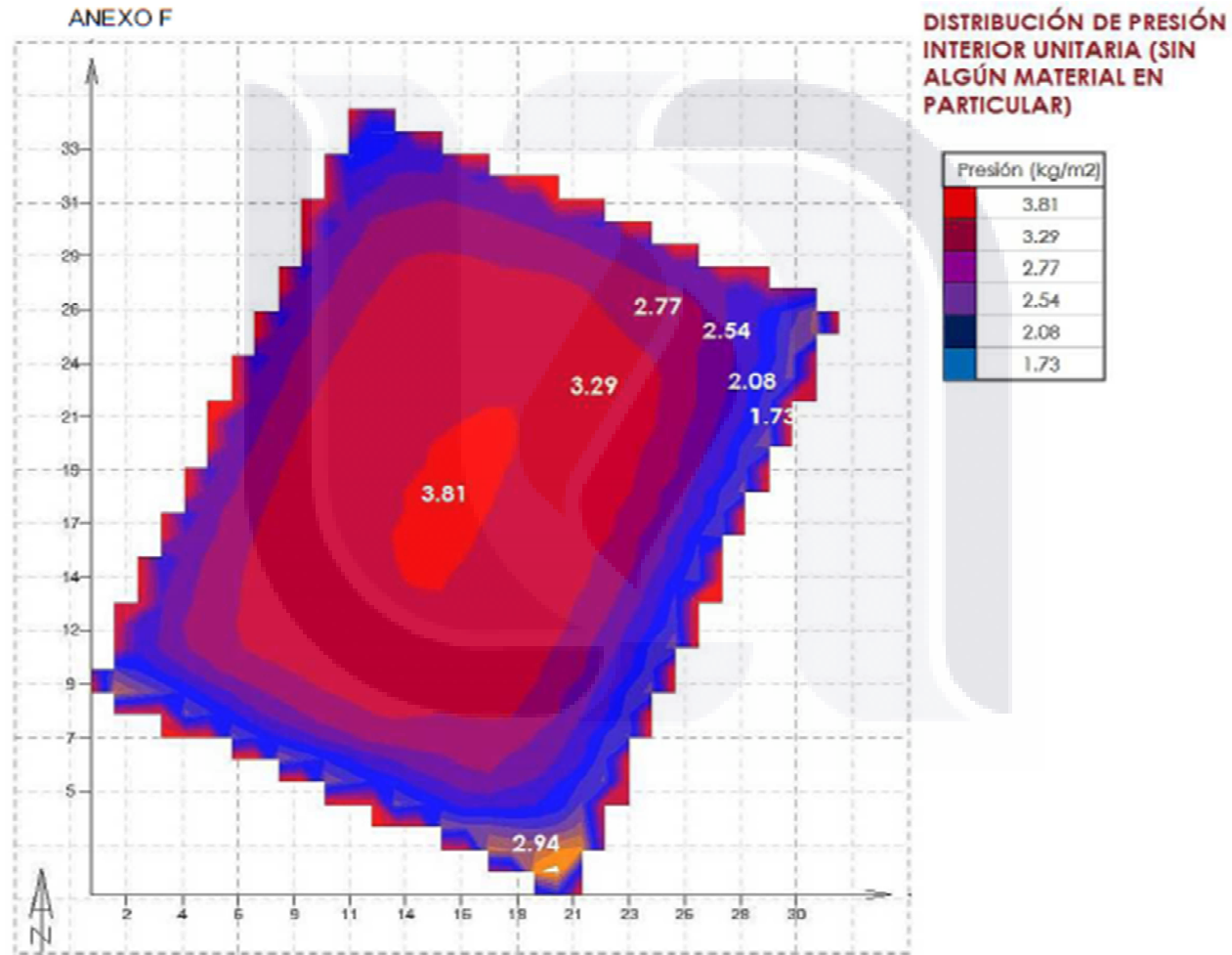
ANEXO E

Distribución de presión interior debido a la evapotranspiración del cultivo en la etapa más fuerte (C-D) en el ciclo vegetativo en combinación con la participación de la lámina ETFE en la cubierta. Anexo a la figura 85.



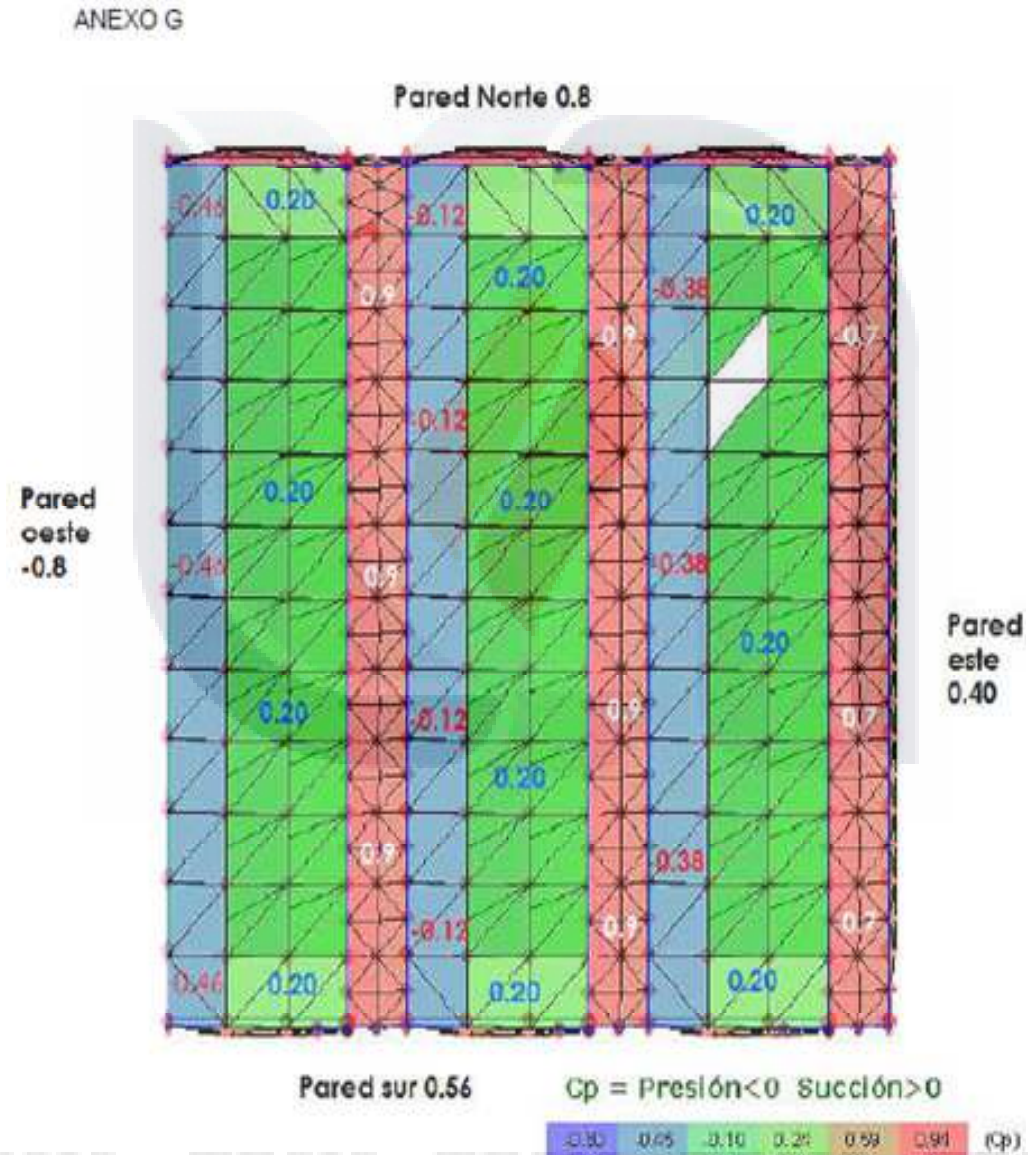
ANEXO F

Distribución de la presión original interior en el invernadero sin la presencia del material ETFE en su cubierta, anexo a la figura 86.



ANEXO G

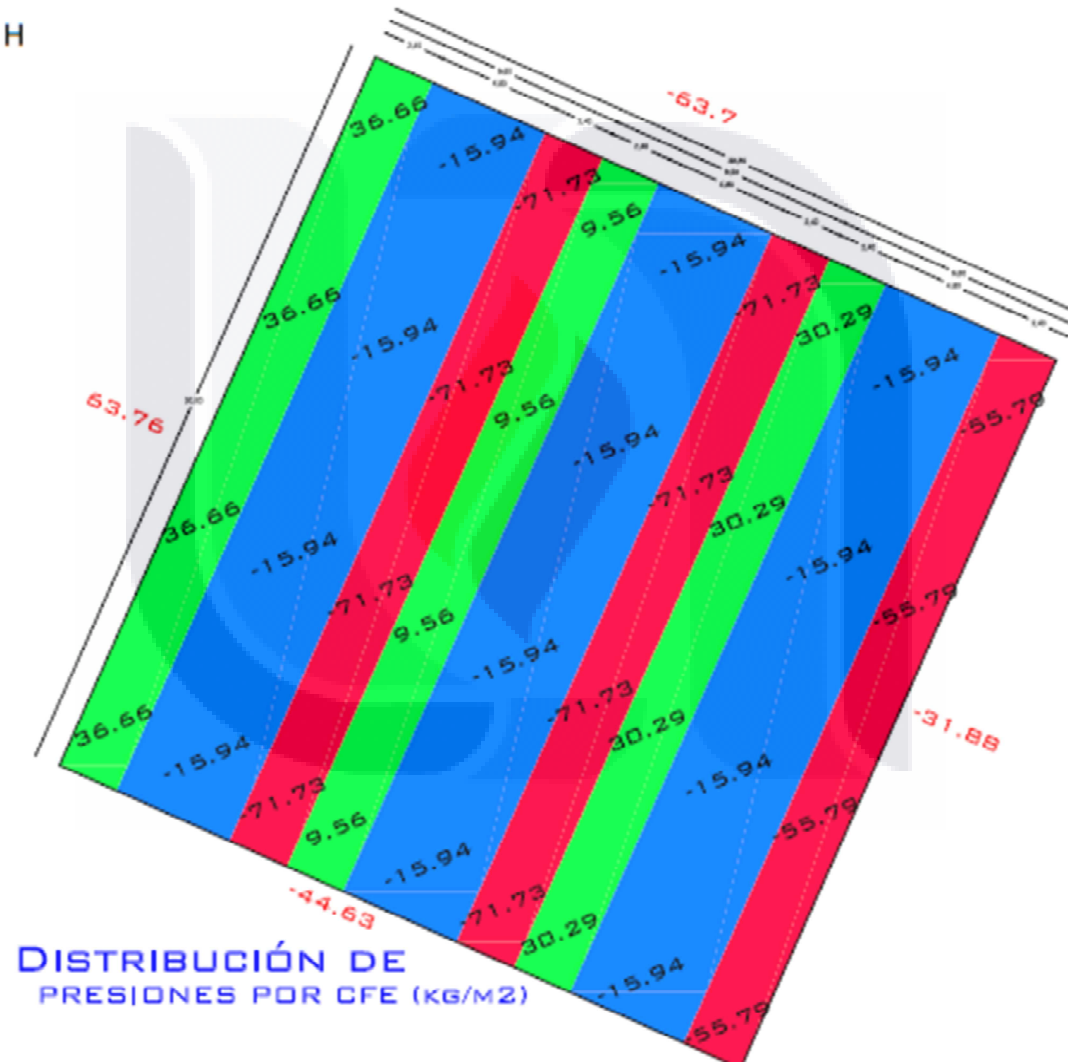
Distribución de valores de coeficientes de presión de viento exterior para el invernadero ejemplo. Anexo a la figura 89.



ANEXO H

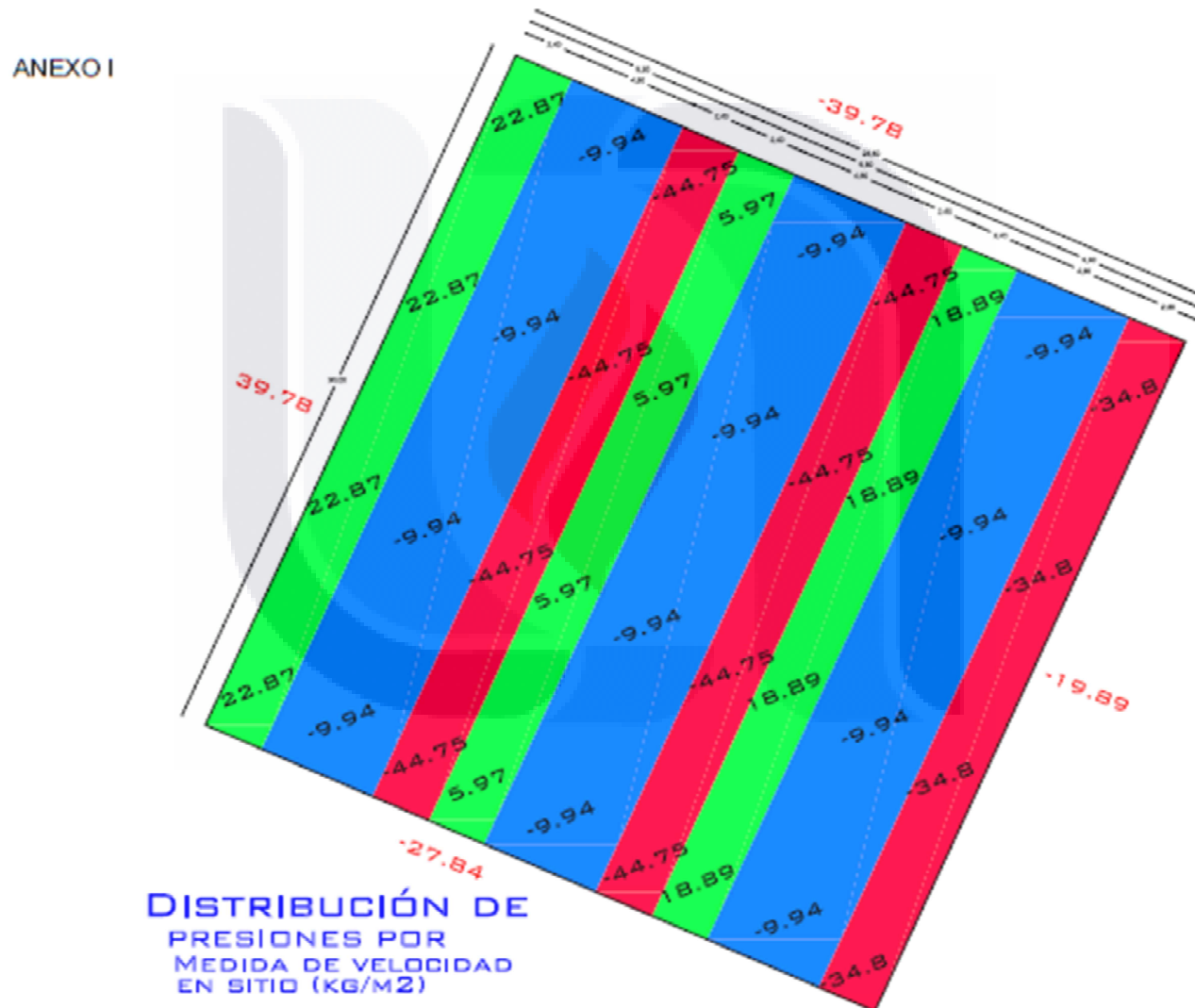
Distribución de presiones exteriores debido a la acción del viento conforme a la velocidad regional del manual de diseño por viento CFE. Anexo a la figura 90.

ANEXO H



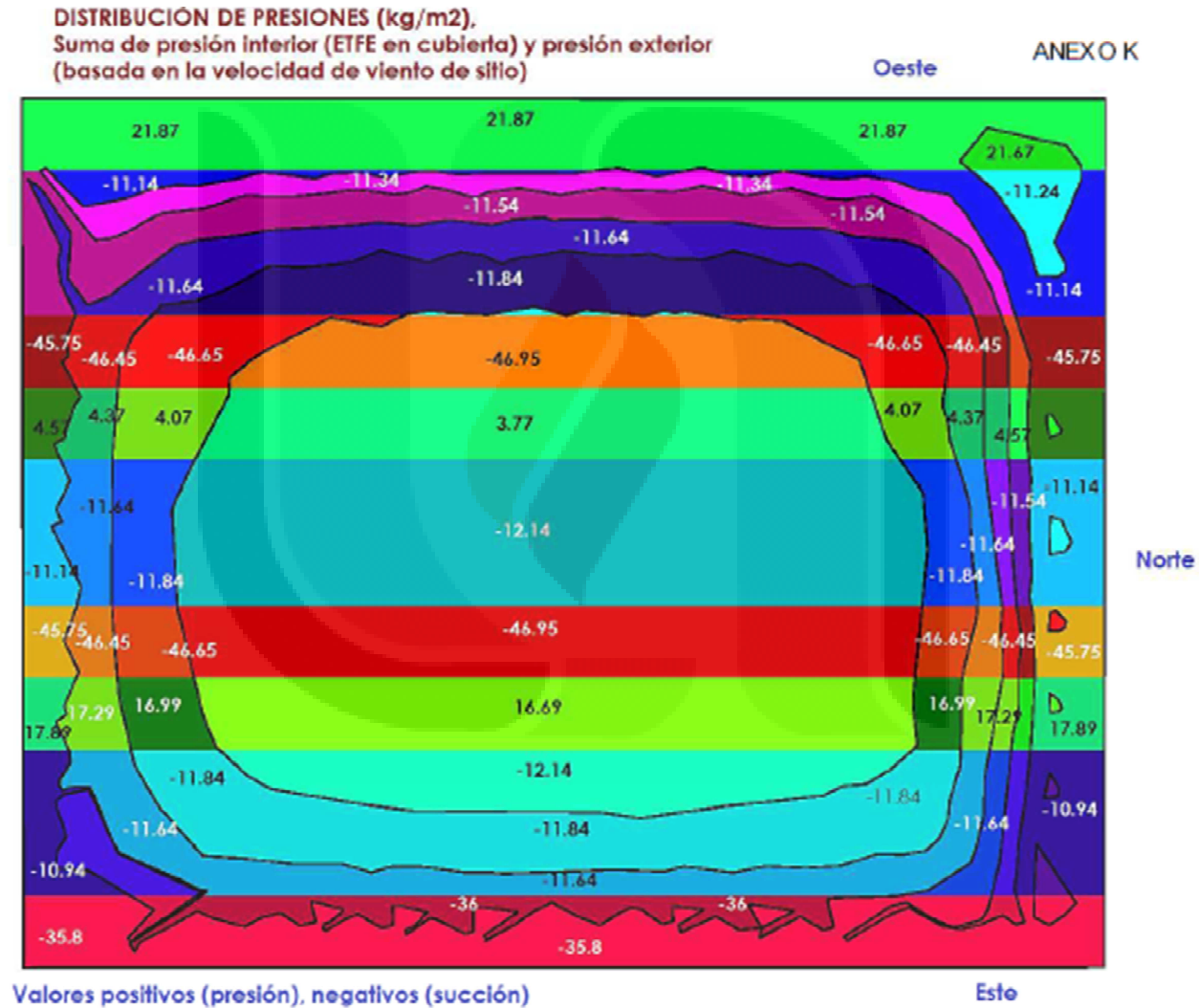
ANEXO I

Distribución de presiones exteriores debido a la acción del viento conforme a la velocidad regional en sitio de acuerdo a los registros del INIFAP. Anexo a la figura 91.



ANEXO K

Sumatoria de presión tanto interior como exterior para el invernadero analizado tomando en cuenta el material ETFE en la cubierta y la presión exterior emitida debido a la velocidad en sitio tomada de los registros del INIFAP . Anexo a la figura 93.



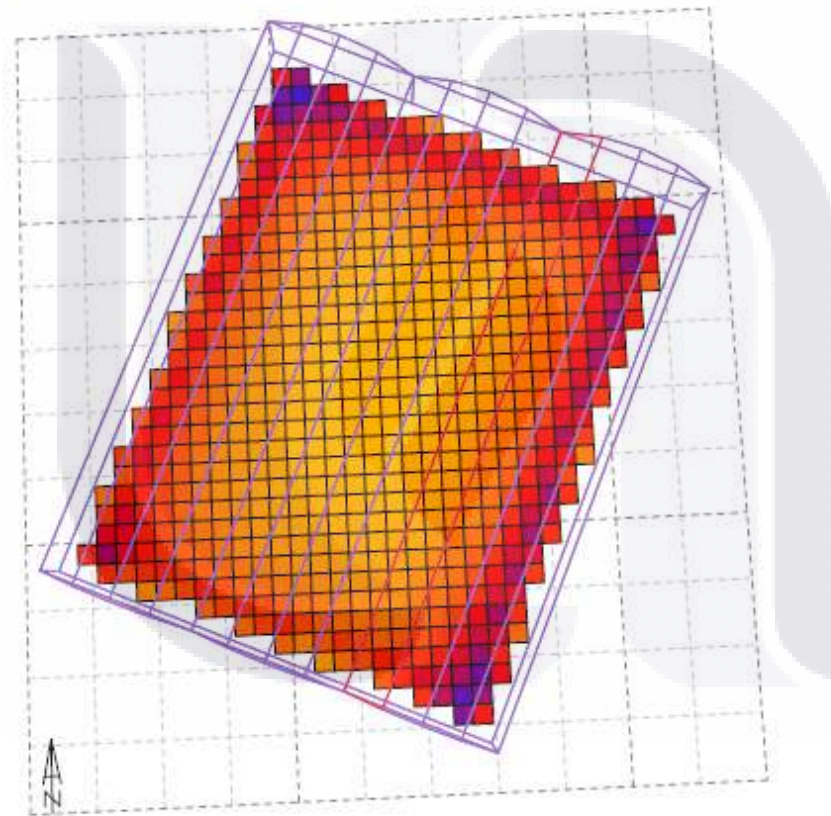
ANEXO P

Radiación dentro del invernadero para el primer ciclo vegetativo del mes de Julio conforme al programa Ecotect.

Insolation Analysis

Avg. Hourly Radiation
Value Range: 280 - 580 Wh
© ECOTECT v5

ANEXO P



Average Value: 476.20 Wh
Visible Nodes: 712

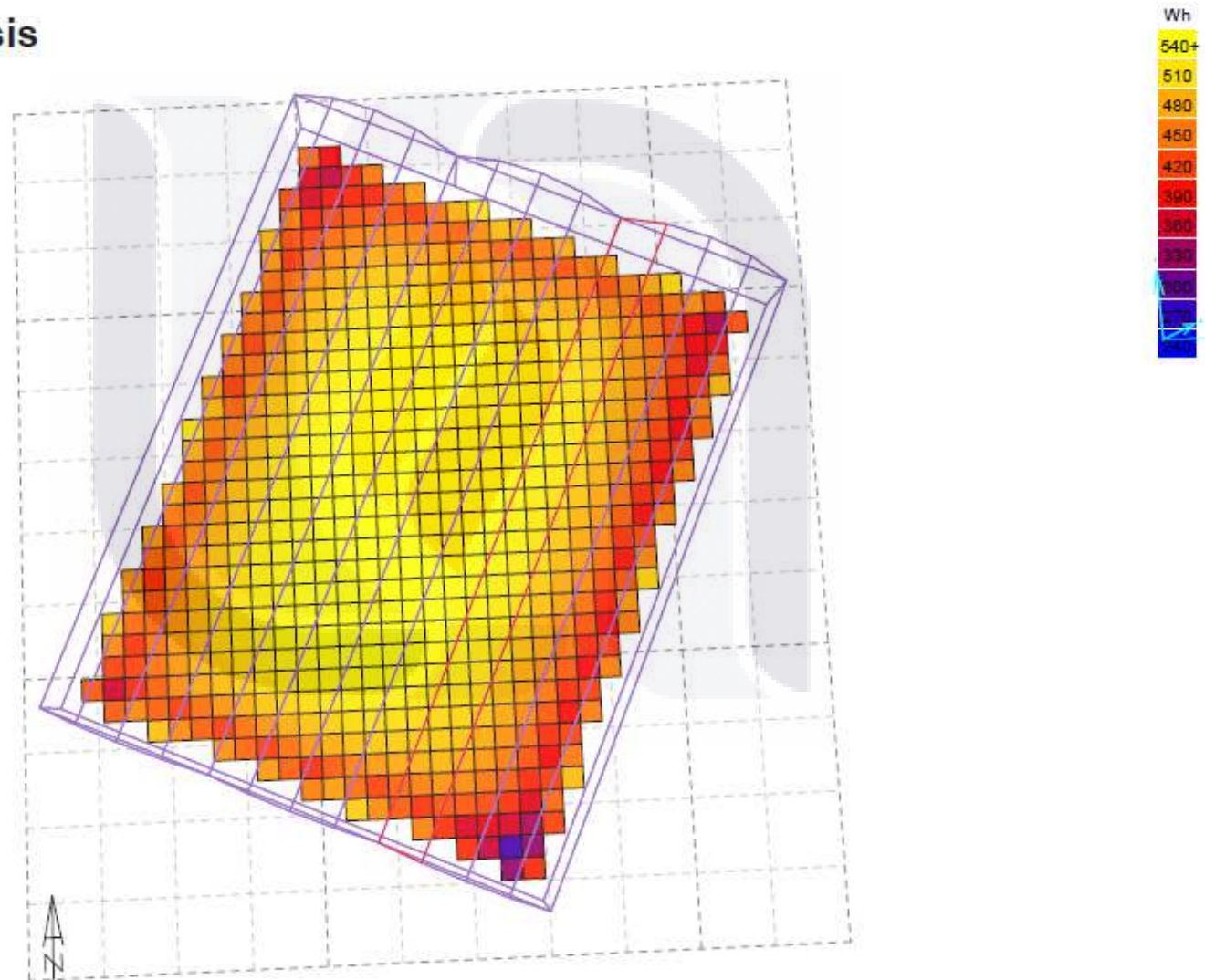
ANEXO Q

Radiación dentro del invernadero para el segundo ciclo vegetativo del mes de Agosto conforme al programa Ecotect.

Insolation Analysis

Avg. Hourly Radiation
Value Range: 240 - 540 Wh
© ECOTECT v5

ANEXO Q



Average Value: 482.80 Wh
Visible Nodes: 712

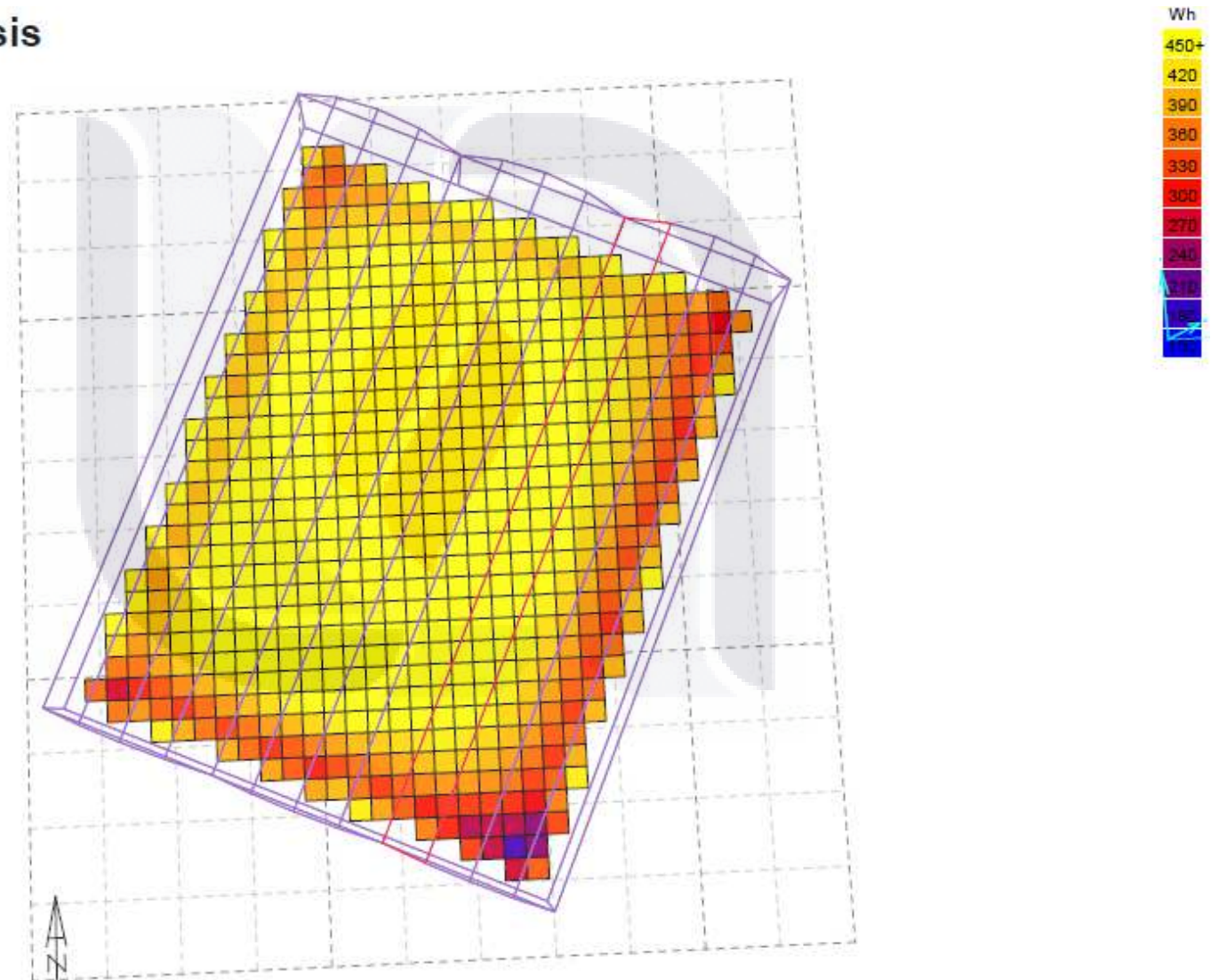
ANEXO R

Radiación dentro del invernadero para el tercer ciclo vegetativo del mes de Septiembre y principios de Octubre conforme al programa Ecotect.

Insolation Analysis

Avg. Hourly Radiation
Value Range: 150 - 450 Wh
© ECOTECT v5

ANEXO R



Average Value: 426.41 Wh
Visible Nodes: 712

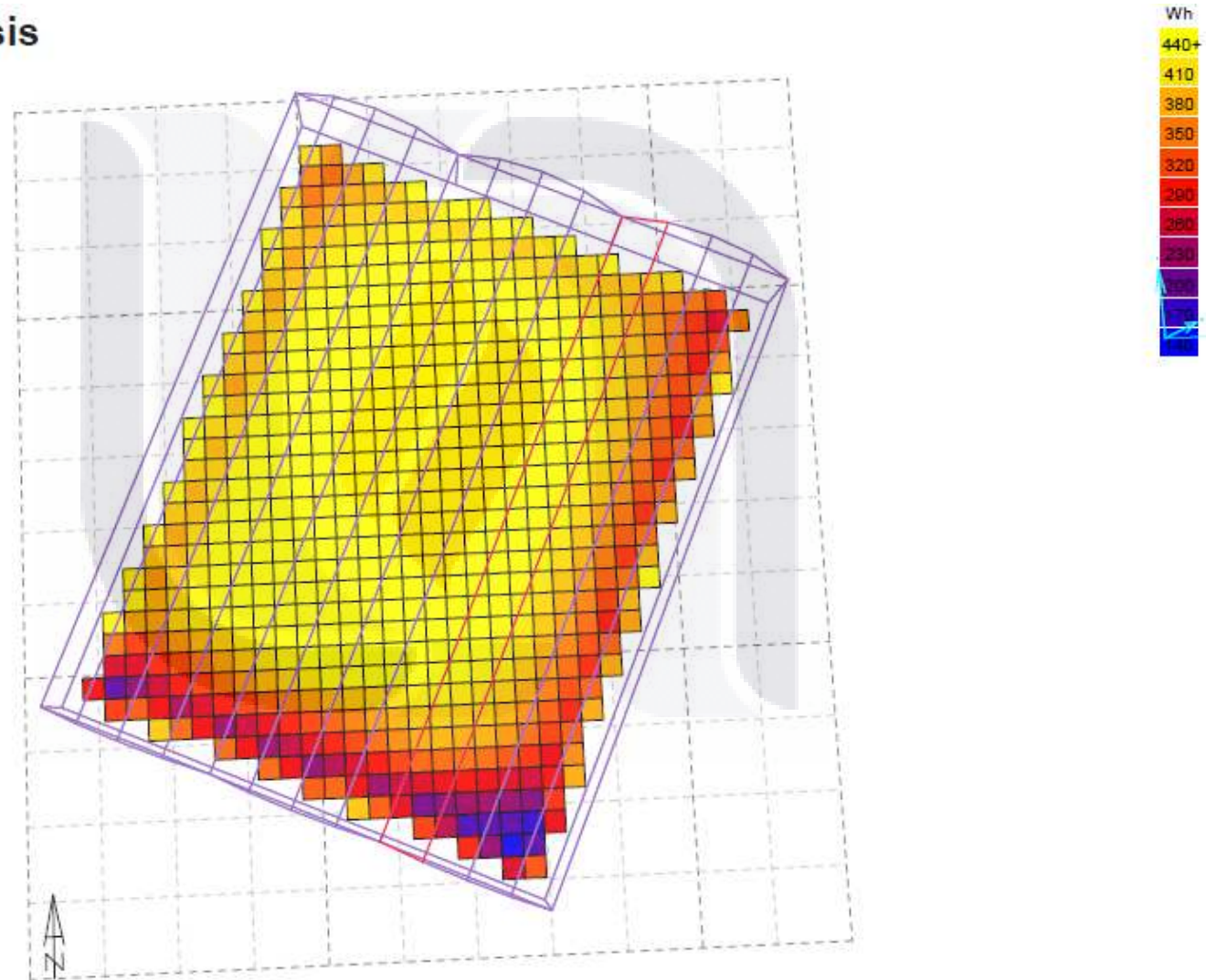
ANEXO S

Radiación dentro del invernadero para el cuarto ciclo vegetativo de lo que resta del mes de Octubre conforme al programa Ecotect.

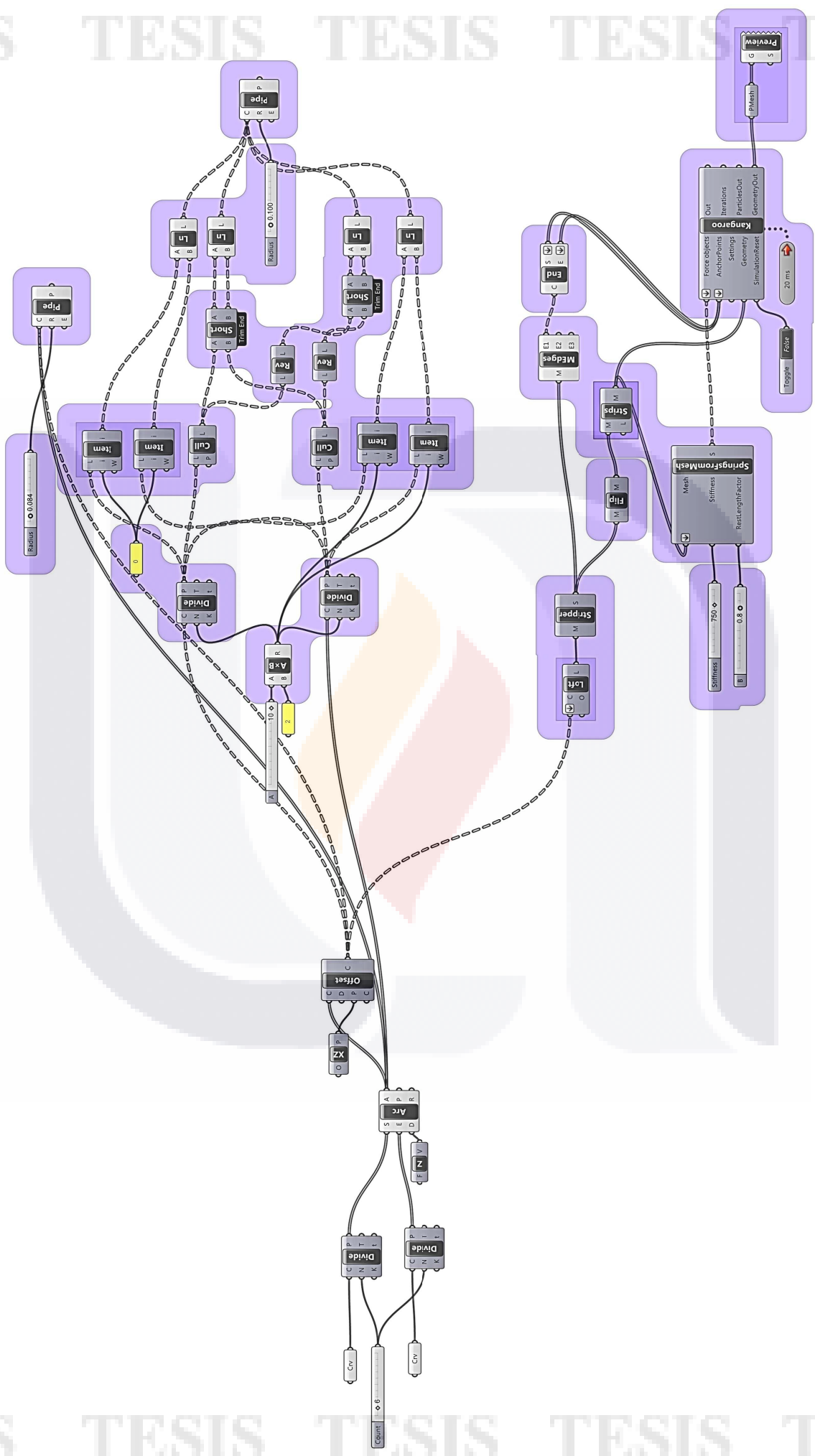
Insolation Analysis

Avg. Hourly Radiation
Value Range: 140 - 440 Wh
© ECOTECT v5

ANEXO S



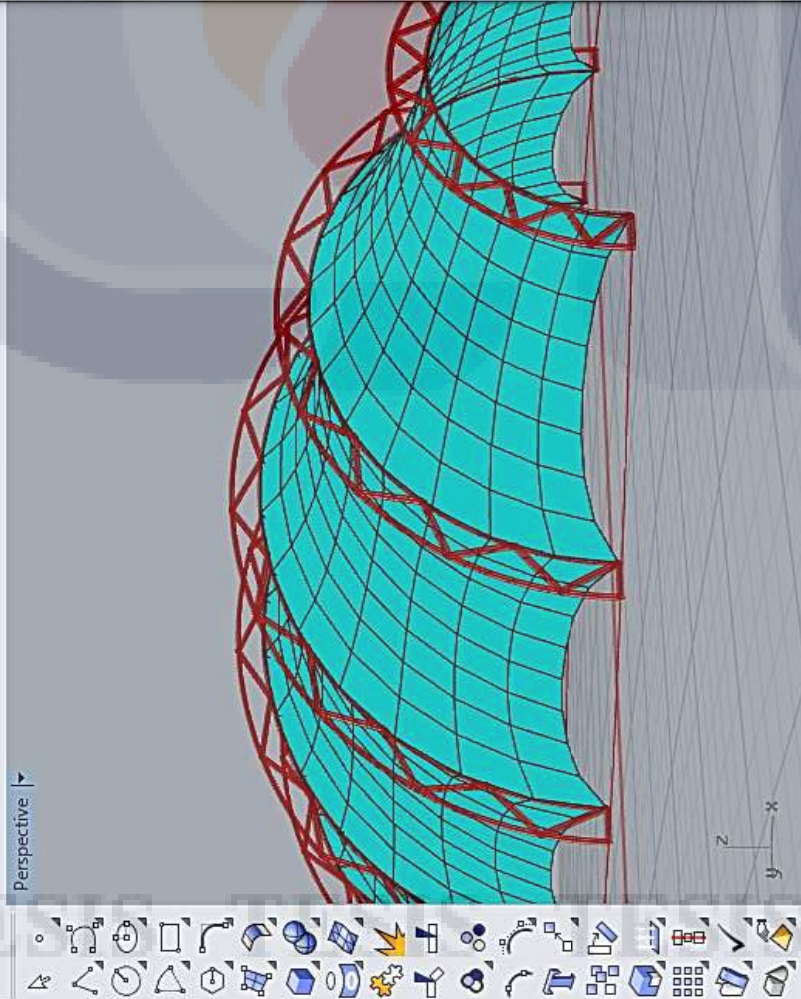
Average Value: 399.36 Wh
Visible Nodes: 712



File Edit View Curve Surface Solid Mesh Dimension Transform Tools Analyze Render Panels Help
 File successfully written as C:\Users\simio\Documents\WORK\Iam AT Iugraz\Workshop 2014\IGH tutorials\planar curves.3dm

Command: |

Standard CPlanes Set View Display Select Viewport Layout Visibility Transform Curve Tools Surface Tools
 Perspective |



Perspective Top Front Right Right +
 x 15.277 y -29.149 z 0.000
 CPlane Millimeters Default Grid Snap Ortho Planar Osnap SmartTrack Gumball Record History Filter Absolute tolerance: 0.001

Grasshopper - M&G Research Laboratory* MG Research Laboratory LunchBox
 File Edit View Display Solution Help
 Params Maths Sets Vector Curve Surface Mesh Intersect Transform Dis Wb Kangaroo LunchBox
 Forces Kangaroo Mesh Utility
 26% 0.9.0075 ...
 Save successfully completed... (100 seconds ago)