

Acceptance date: 31/01/2025

DISEÑO Y ANALISIS DE LA ESTRUCTURA DE UN INVERNADERO PARA LA ZONA NORTE DE MÉXICO

Alfonso Sierra Chacón

Tecnológico Nacional de México campus
Tecnológico de Cd. Juárez
Departamento de Metal Mecánica
Ciudad Juárez Chihuahua

José Heriberto Simental Vázquez

Tecnológico Nacional de México campus
Tecnológico
de Cd. Juárez
Departamento de Metal Mecánica
Ciudad Juárez Chihuahua

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: Este artículo presenta un estudio detallado sobre el diseño y análisis estructural de invernaderos, específicamente orientado a la Zona 3 de México. Se aborda la importancia de estas estructuras en la producción agrícola, especialmente en climas adversos, y se discuten los desafíos asociados, como la alta inversión inicial y la necesidad de especialización técnica. Se establece el objetivo de desarrollar un diseño que minimice costos sin comprometer la funcionalidad. Se analiza el uso de materiales contemporáneos y técnicas innovadoras para optimizar la producción y garantizar condiciones ambientales favorables para el cultivo. Este trabajo busca contribuir a una agricultura más sostenible y eficiente en la región.

Palabras clave: Invernaderos, diseño estructural, agricultura sostenible, Zona Norte de México, producción agrícola, costos de inversión.

INTRODUCCIÓN

Los invernaderos son estructuras que permiten crear condiciones ambientales controladas para el cultivo de plantas durante períodos no óptimos. Desde su evolución en el siglo XIX, estos sistemas han demostrado ser cruciales para mejorar la productividad agrícola en diversas regiones. En México, particularmente en la Zona 3, el uso de invernaderos se ha incrementado debido a su capacidad para proteger cultivos de factores climáticos adversos y plagas. Sin embargo, su implementación enfrenta retos significativos, como los altos costos iniciales y la necesidad de capacitación especializada para los agricultores.

Este artículo explora el diseño y análisis estructural de un invernadero adaptado a las condiciones específicas de esta zona. Se examinan los materiales más adecuados y las configuraciones estructurales que pueden optimizar tanto la inversión como el rendimiento agrícola. La investigación se fundamenta en un enfoque práctico que busca ofrecer soluciones viables a los agricultores locales, promoviendo así una agricultura más resiliente y productiva.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una estructura alternativa para un invernadero, la cual cuente con componentes estandarizados y requiera menos material para construirse y al mismo tiempo, resista las fuerzas que provocan los vientos de la región sobre este tipo de estructuras.

HIPÓTESIS

H0: Los valores de las cargas mecánicas obtenidos, son iguales al límite elástico del acero A36 que es de 250MPa.

H1: Los valores de las cargas mecánicas obtenidos, son menores al límite elástico del acero A36 que es de 250MPa.

H0: $\mu_1 = \mu_2$

H1: $\mu_1 < \mu_2$

MATERIALES Y MÉTODO

El método que se ha utilizado para el desarrollo del proyecto es el método de ingeniería, el cual fue dividido en 5 etapas básica, que se mencionan a continuación: a) Definiendo el problema u oportunidad detectada, b) Desarrollo del concepto, c) Construcción de un prototipo, d) Implementación del prototipo y e) Validación.

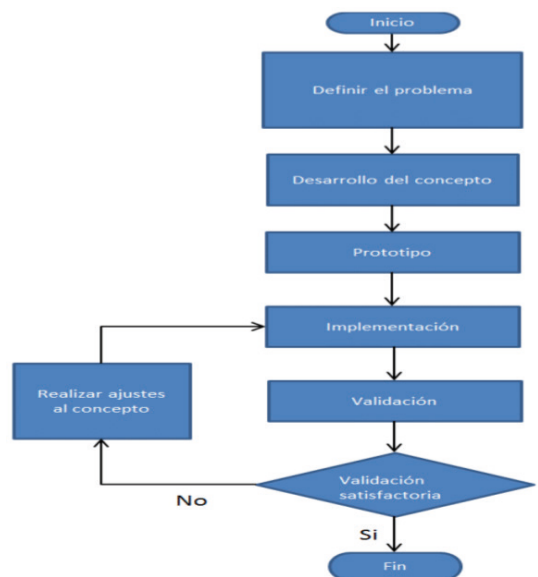


Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología utilizada

Identificar el problema

Reducción de costos, disminuyendo la cantidad de material utilizado en la construcción del invernadero. Es decir, el modelo tiene una estructura alternativa, la cual además de reducir el costo de construcción resiste los vientos e inclemencias del clima de la región. A la par se logran mantener las dimensiones necesarias para cubrir un área de 1080 m, es decir 30 m de ancho X 36 m de largo. Teniendo una altura máxima de 4 m en la sección media de la estructura mientras que en los costados Siendo la altura máxima y la altura máxima en la parte central del invernadero es de 4 m mientras que a los lados la altura alcanza los 3 m. Al ser consistente en estas medidas se logran mantener los niveles de producción en relación al volumen de la estructura.

La determinación del problema se realizó por medio de varias mesas redondas en la cual participaron agricultores de la región, aportando los que se puede aprovechar en la zona, pero sobre todo haciendo énfasis en los daños que provoca en las cosechas el clima extremo del territorio. También mencionaron que los precios de construcción de un invernadero son altos, por lo cual la idea de un invernadero de bajo costo les resulta interesante.

Desarrollo del concepto

Una vez definido el problema a resolver, se investiga sobre los diferentes tipos de invernaderos utilizados globalmente y en México. Se analizan sus características y se estudian los materiales comúnmente empleados, así como sus costos y propiedades mecánicas. Esta investigación permite identificar los materiales adecuados para la construcción del invernadero. Se consideran diversas formas estructurales, como techos planos simétricos, asimétricos, arcos redondeados y arcos en punta con diferentes configuraciones de paredes. Además, se identifican los cinco tipos de invernaderos más comunes en México se-

gún la Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos (AMCI): macro túnel, casa sombra, invernadero para climas tropicales, templados y para cualquier clima. Se decide utilizar una estructura similar a la casa sombra, con techos planos simétricos por su simplicidad geométrica y capacidad para resistir vientos locales.

El Mapa conceptual ayuda a la selección de la estructura más apta de acuerdo a los factores que resultan de mayor importancia para poder cumplir con los objetivos del proyecto. Los invernaderos que se analizaron son los 5 tipos mencionados en los antecedentes, que de acuerdo a la AMCI son los más utilizados en México. Se tomaron en cuenta para las características de material, cimentación requerida, velocidad máxima de los vientos que resiste el invernadero, precio, etc. De acuerdo al costo bajo de cimentación, resistencia de la estructura, y forma simple de armarse se optó basar el diseño en los invernaderos tipo sombra como se muestra en la figura 2 a). Finalmente, se realizan bosquejos que representan las posibles mejoras en la estructura del invernadero figura 2b)

Construcción de un Prototipo

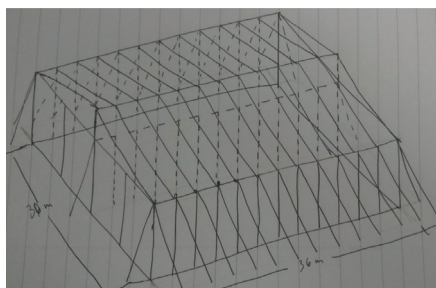
Habiendo determinado la forma que tomara el invernadero, en base al análisis y a los bosquejos realizados, se continúa con la creación de más bosquejos, pero ahora de una forma un poco más detallada, de cada uno de los componentes del invernadero, que son:

- I) PTR (pilar)
- II) Canal en U
- III) Tornillo de ojo métrico
- IV) Cable acerado de 3/8
- V) Escantillón lateral
- VI) Escantillón Central
- VII) Polietileno de baja densidad (hule)

Ver las posibles mejoras a los diseños que existen actualmente

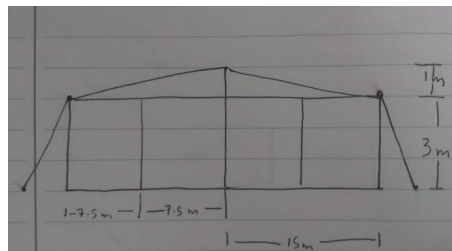
Una vez que se determinó que el principal objetivo es el de hacer una estructura alterna, en la cual la cantidad de material sea menor a la utilizada en un invernadero ordinario y de ver cuáles son los diseños que hay actualmente en el mercado se procede a ver de qué manera mejorar el diseño. La forma estructural del invernadero ya fue decidida, es una de techos planos simétrico, como la que se muestra en la figura 2. Ahora se prosigue, lograr hacer una estructura que sea estandarizada, esto con el objetivo de que la cimentación y armado de la misma requiera menos tiempo al ser realizada. Al utilizar menos material para levantar el invernadero y al lograr reducir los tiempos de armado, se afecta el costo logrando una reducción del mismo.

La parte baja de la estructura del invernadero, es decir los PTRs que son los soportes principales, ubicados a 3 metros de distancia entre tubo por la parte larga del invernadero, seguirán siendo similares a los utilizados en los invernaderos existentes, el enfoque en la reducción de material ataca a la parte alta del invernadero, se elimina la tubería que sostiene el hule del techo, y este material es remplazado por cable acerado de 3/8 de pulgada que es tirado sobre la estructura del invernadero por la parte transversal a una distancia de 3 metros y a lo largo de la estructura sobre las 3 columnas, las dos laterales y la central, esto es con el objetivo de reducir material. Como se muestra en la figura 3 el bosquejo de la estructura del invernadero propuesto.



a)

Figura 3 a) Bosquejo a mano alzada de una vista isométrica de la estructura del invernadero



b)

Figura 3 b) Bosquejo a mano alzada de la vista frontal de la estructura.

Búsqueda de las partes ya existentes en el mercado para utilizar el diseño y realización del bosquejo de las mismas

En el mercado hay partes ya existentes que facilitan la construcción de los invernaderos, que resultan de gran utilidad. El PTR puede ser considerado como una de ellas. Para este nuevo diseño se utilizan los canales en U, canales de aluminio que sirven para dar tensión al hule que es tirado por encima de la estructura base. Los perfiles de aluminio que auxilian a tensionar y dar forma a las paredes frontal y lateral. La forma, dimensiones básicas y algunas propiedades mecánicas se hayan en el folleto de FarmTek (compañía que se encarga de la venta de invernaderos o partes para la construcción del mismo).

Los tornillos por los cuales es pasado el cable para que la tensión vaya sobre estos y no directamente en el hule, previniendo el desgarrar del hule, son llamados tornillos de ojo métrico, tornillos que de los cuales las medidas son obtenidas de búsquedas en internet, también se pueden encontrar propiedades mecánicas de estos. Se procede a realizar los bosquejos para tener algo visual en lo que se basan los diseños del modelo por computadora.

Determinar los materiales y propiedades mecánicas que tienen los componentes que forman la estructura del invernadero

Primero que todo en esta etapa, ya que se tienen las piezas y dado que algunas de ellas existen en el mercado, se determinan los materiales de acuerdo a estas piezas ya existentes, es en base a esto que se hace una búsqueda en internet de las propiedades de los materiales utilizados. Esta lista de materiales se resume a cuatro, ya que de estos es de lo que están hechos los componentes de la estructura. Los materiales son: Acero A36, Acero inoxidable, Polietileno de baja densidad y Aluminio.

Se hace un vaciado en una tabla de Excel en la tabla 1 de la información recopilada. Estos datos resultan útiles para realizar el análisis de elementos finitos y el análisis de fluidos, ya que al hacer las simulaciones en SolidWorks, estos serán requeridos por el programa.

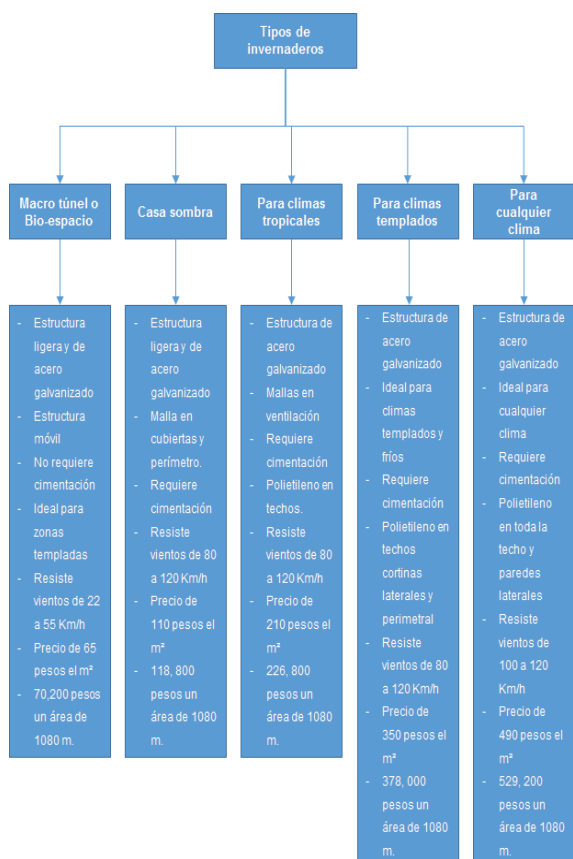


Tabla 1 Lista de componentes, su respectivo material y propiedades mecánicas.

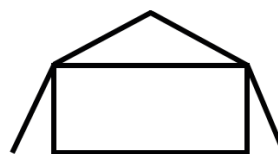


Figura 2 a) Mapa conceptual para evaluar las cualidades de cada invernadero b) Estructura de invernadero tipo casa sombra

Dibujo de componentes del invernadero

Se procede a utilizarlos bosquejos de base para tener algo visual en lo que se basan los diseños del modelo por computadora. La estructura del invernadero después de ensamblar los componentes y sub ensamblajes, como se muestra en la figura 4 el isométrico de la estructura del invernadero

Ya se tienen todos los componentes que conformaran el invernadero al igual que los bosquejos y las medidas que debe tener cada uno de ellos. Con esta información y con ayuda del programa de diseño de SolidWorks se hacen los dibujos de todas las partes, como se muestra en la figura 5. Los componentes han sido diseñados, así que con ayuda del mismo programa de diseño por computadora se realizan los sub ensamblajes que básicamente están constituidos de los PTRs y los escantillones, sin olvidar los sub ensamblajes de los canales en U y sus respectivos tornillos de ojo métrico.

Componente	Material	Módulo elástico	Poisson	Densidad	Resistencia a la tracción			
					Psi		MPa	
PTR	Acero A36	200 GPa	0.26	---	Min	Max	Min	Max
					58000	80000	400	500
					Puro		Aleado	
Perfil	Aluminio	69 GPa	0.5	2.7 g/cm ³	160-200 N/m ²		1400-6000 N/m ²	
					Psi		MPa	
Escantillones	Acero A36	200 GPa	0.26	---	Min	Max	Min	Max
					58000	80000	400	500
					Puro		Aleado	
Canal en U	Aluminio	69 GPa	0.5	2.7 g/cm ³	160-200 N/m ²		1400-6000 N/m ²	
					Psi		MPa	
Cable 3/8	Acero inoxidable	180 GPa	0.305	7.48-8 g/cm ³	---			
Hule	Polietileno de baja densidad	1.04 MPa	---	0.92-94 g/cm ³	250 MPa			

Tabla 1 Lista de componentes, sus respectivos material y propiedades mecánicas

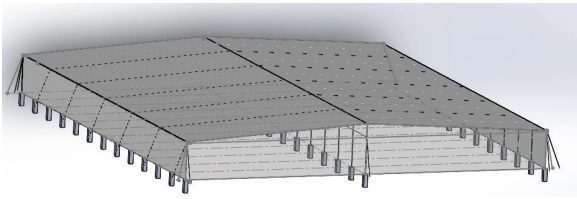


Figura 4 Vista isométrica del invernadero

Una vez realizados todos los componentes de la estructura, se procedió a realizar 3 sub ensambles, esto con el propósito de facilitar el armado de la estructura. Los sub ensambles realizados son los siguientes: a) sub ensamble lateral, sub ensamble central y sub ensamble canal U. figura 6 y 7.

Ya que fueron armados los sub ensambles, se prosigue con la realización de la estructura del invernadero, la cual está conformada por: El procedimiento es el siguiente, se colocan los 39 sub ensambles que llevan a los PTRs en su estructura, esto por medio de matrices de ensambles lo cual permite realizar una distribución en menos tiempo. Luego se coloca la 58 estructura que conforma la carpa y por último posicionan los cables que darán tensión y ayudarán al soporte de la estructura figura 7. Basado en los costos unitarios de la Tabla 2 se obtiene un costo total de material de 82860 pesos.

Con ayuda de SolidWorks, se realiza el modelo a escala 1.5:100 figura 8, que tiene como dimensiones 40 cm de ancho X 45 cm de largo X 6 cm de alto. Dado que el modelo es de estas dimensiones, se realiza un diseño robusto de cada uno de los componentes para que de esta manera sea lo más fiel posible al momento de imprimirla.

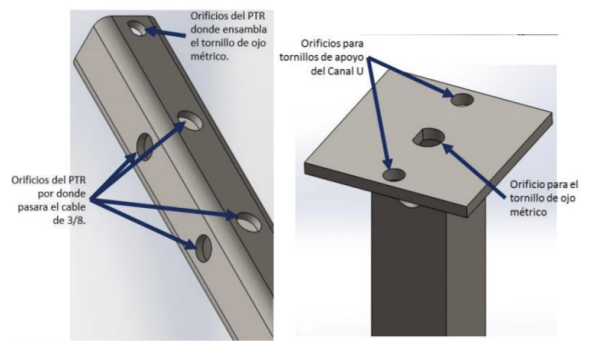


Figura 5 a) Vista isométrica del PTR. b) Vista isométrica del escantillón lateral

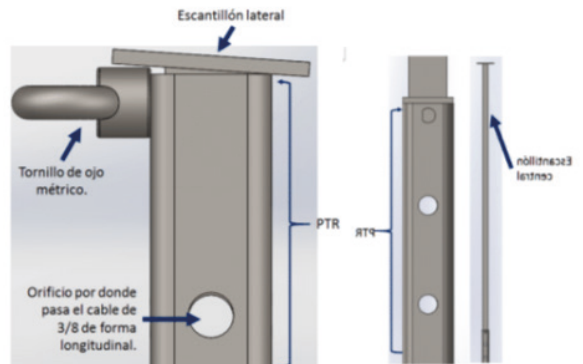


Figura 5 c) sub ensamble lateral d) sub ensamble central

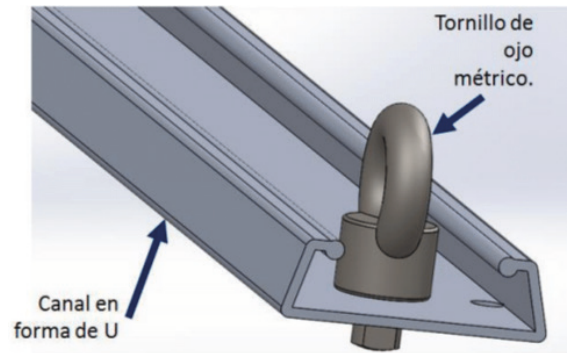


Figura 6 sub ensamble canal U

Cantidad	Componentes	Precio unitario en pesos	Unidad
39	PTR 10 X 10 ESP 3/16 A 12.20 MTS (254 X 254 mm)	766.98	pieza
13	Escantillón central	301.86	pieza
26	Escantillón lateral	196.21	pieza
108	Canal U	44.94	m
704	Cable	32.45	m
39	Tornillo	24.02	pieza
49	Perfil	60.84	m
32	Tenazas	12.696	pieza
106	Hule (cubre 18.288m)	112.262	m lineal

Tabla 2 Costos de materiales.

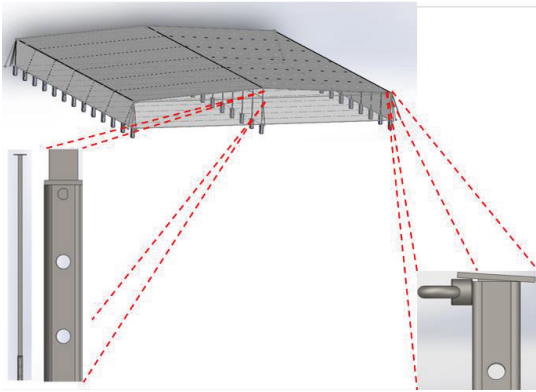


Figura 7 Modelo a escala considerando detalles de materiales de la estructura

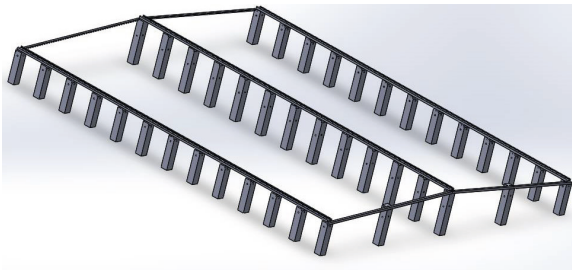


Figura 8 Modelo a escala 1.5: 100

Se determina el valor de la densidad del aire en la ciudad, de igual manera que la velocidad, ésta es un valor que se usa en las simulaciones. La forma de obtener este valor es de la siguiente manera:

Densidad = peso/volumen

Unidades

Sistema Ingles lb/pie³

Sistema Métrico kg/m³

Conversión

1 lb/pie³ = 16.018 kg/m³

Para un cálculo práctico de densidad, son tomados en cuenta solamente la altitud y la temperatura de la ciudad o región que se evaluará. Se utilizan unidades del sistema inglés y los datos recolectados se sustituyen en la siguiente formula:

$$d = 0.075 \times (P_{bar} / 29.92) \times (530 / (460+t))$$

Fórmula 5.10.1 Densidad del fluido

Dónde:

d = Densidad – lb/pie³

P_{bar} = Presión barométrica – plg c. HG

t = Temperatura – °F

El valor de la de la presión atmosférica en Ciudad Juárez es de 26.09 y las temperaturas que se sustituyen en la fórmula, junto con la presión barométrica recién mencionada son: la temperatura media obtenida de los históricos del año 2013 al 2023. Observe en la tabla 3 de temperatura y densidad de aire en ciudad Juárez, Chihuahua.

	Temperatura C	Temperatura F	Temperatura K	Densidad del aire en ciudad Juárez lb/ft ³	Densidad del aire en ciudad Juárez Kg/m ³
Media	21.2	70.16	294.25	0.0654	1.0472
Max	45	113	318.15	0.0605	0.969
Min	-21	-5.8	252.15	0.0763	1.2224

Tabla 3 Temperaturas en Ciudad Juárez y densidades del aire

Determinar el tamaño del modelo a escala para estudiar en el túnel de viento.

Las dimensiones del área son: 305 mm X 305 mm X 600 mm, se consultó esta información y el volumen utilizable de la cámara de pruebas, de acuerdo a los encargados del laboratorio, es de 305 mm X 305 mm X 200 mm, realizar un modelo a escala con estas dimensiones es el equivalente a trabajar con una escala de .75 : 100, es decir, una estructura con dimensiones de aproximadamente 300 mm X 300 mm X 20 mm, debido a esta limitante, surge la alternativa de trabajar con el viento que es desechado por el ventilador del túnel como se muestra en la figura 9.

El diámetro de la escotilla es de aproximadamente 65cm figura 10, esto permite aumentar casi al doble las dimensiones del volumen del área de prueba. Basado en esto, se decide trabajar en una escala 1.5: 100. Por lo tanto, en base a esta escala se determina un área de trabajo de 400 mm X 450 mm.

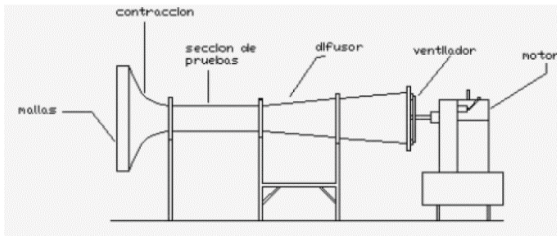


Figura 9 Partes básicas que conforman un túnel de viento.



Figura 10 Área donde se realizaba la prueba aerodinámica.

Análisis de fluidos a la estructura del invernadero y análisis de elementos finitos a los componentes

En la estructura final, después de realizar el apropiado ensamble de todos los componentes, se procede a realizar un par de análisis. El análisis de fluidos, que ayuda a determinar las cargas máximas que generara el aire en la estructura. Después estas cargas se convierten a Newton y es en base a estas fuerzas generadas que se puede realizar el segundo análisis, que es el de elementos finitos, el cual ayuda a obtener la reacción que tendrá cada uno de los componentes a esta carga recién obtenida en el análisis de fluidos.

La simulación de análisis de fluidos requiere los parámetros de Tasa de flujo de masa y Tasa de flujo del volumen, estos parámetros son obtenidos por medio de las fórmulas que se describen a continuación.

$$\text{Tasa del flujo de la masa} = d \times V \times A$$

Fórmula 5.14.1 Tasa del flujo de la masa

Dónde:

d = densidad del aire en Kg/m^3

66

V = Velocidad del fluido en m/s

A = Área de fluido

Tasa de flujo de volumen = Área del fluido x Velocidad del fluido

Por lo tanto, se realizan tres experimentos, en ellos se considera una velocidad máxima de 120 km/h o 33.33 m/s. Los parámetros que cambian son la densidad y por lo tanto la tasa de flujo de masa. La tasa de flujo de volumen permanece constante.

Temperatura °C	Temperatura °K	Velocidad Km/h	Velocidad m/s	Densidad Kg/m3	Tasa de flujo de masa	Tasa de flujo de volumen
21.2	294.25	120	33.33	1.0472	13456.91951	12850.3815
45	318.15	120	33.33	0.969	12452.01967	12850.3815
-21	252.15	120	33.33	1.2224	15708.30635	12850.3815

Tabla 4 Diferentes valores de densidad, tasa del flujo de la masa y tasa del flujo del volumen.

Se realiza el primer experimento determinando una velocidad del viento de 33.33 m/s y temperatura ambiental de 294.25°K que es la temperatura media de Ciudad Juárez.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el primer experimento, se tiene que la velocidad máxima resultante sobre la estructura del invernadero es de aproximadamente 26 m/s o 97 Km/h que fue el mas alto de tres experimentos

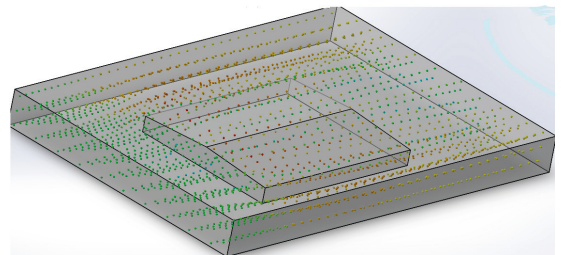


Figura 11 Vista isométrica del primer experimento

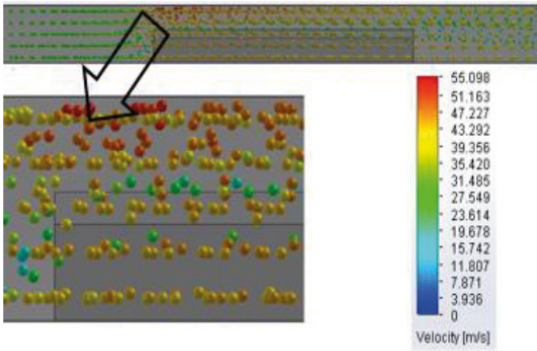


Figura 12 Vista lateral del primer experimento y acercamiento realizado al área donde se ven los flujos de mayor valor

Nuevamente se ve que las velocidades del fluido con bajas, pero para mayor seguridad se analiza la vista frontal de la simulación y se puede observar que los el valor máximo del fluido sobre la estructura es de aproximadamente 23 m/s u 83 Km/h.

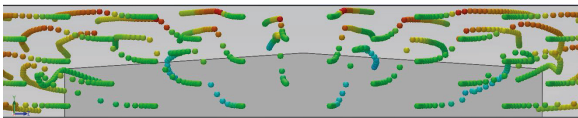


Figura 13 Vista frontal del segundo experimento

Como se acaba de mencionar, los valores obtenidos de los 3 experimentos son: 26, 25 y 23 m/s. De estos, se toma el mayor, es decir 26 m/s y se realiza un análisis de elementos finitos en cada elemento o componente del invernadero por separado y es con ayuda de este estudio que se determina si los componentes, y por ende la estructura en general, soportaran la fuerza que el viento generará en el invernadero obteniendo una media en la tabla 5.

Componente	Área m ²	Fuerza N
PTR	0.0762	45.012864
Escantillón Central	0.0254	15.004288
Escantillón lateral	0.00001995	0.01178486

Tabla 5 Componentes a los que se les realiza un análisis de elementos finitos y sus respectivos valores necesarios para poder determinar las Fuerzas

Se comienza el análisis con las partes más pequeñas, siendo esta el escantillón lateral. La parte del sub ensamblaje de la figura 14 resaltada en rojo, es la parte a la cual se le realizara el análisis de elementos finitos. Esto es debido a que el resto del sub ensamblaje es en gran parte el PTR.

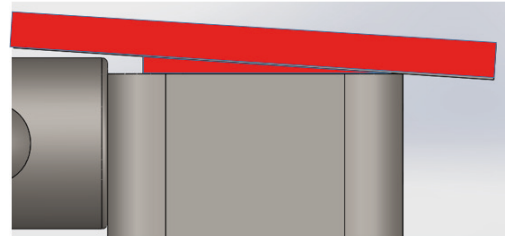


Figura 14 Sección del escantillón lateral a la que se le realiza el análisis de elementos finitos.

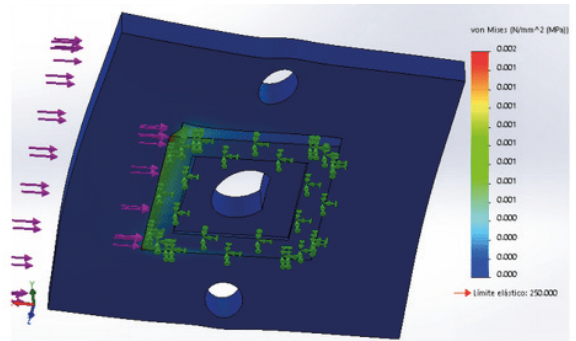


Figura 15 Análisis de elementos finitos a escantillón lateral. Esfuerzo de Von Mises

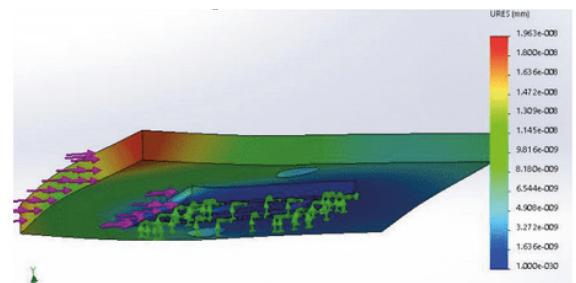


Figura 16 Resultado de deformación en el escantillón lateral

Realizado el análisis al escantillón lateral, se puede concluir que el esfuerzo máximo ejercido sobre el componente, no rebasa el límite elástico del material, por lo tanto, el componente no sufrirá una deformación permanente, figura 15 y 16.

El siguiente componente analizado, es el escantillón central al cual se le realiza el mismo análisis.

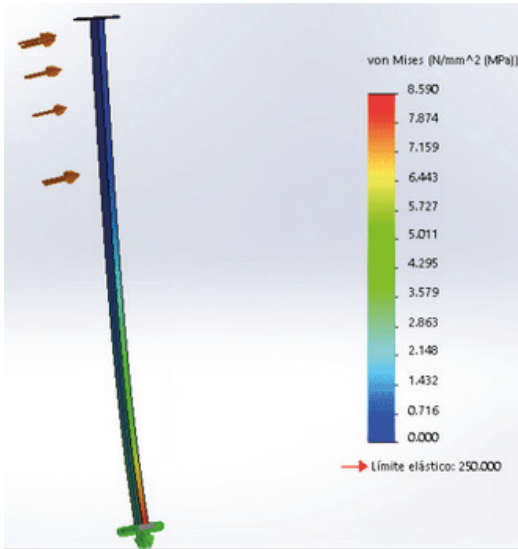


Figura 17 Análisis de elementos finitos a escantillón central. Esfuerzo de Von Mises.

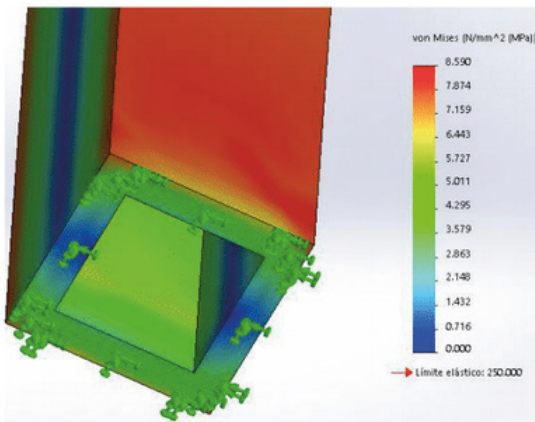


Figura 18 Acercamiento al análisis del escantillón central

Del análisis realizado al escantillón central, se puede concluir que el esfuerzo máximo ejercido sobre el componente, no rebasa el límite elástico del material, por lo tanto, el componente no sufrirá una deformación permanente, figura 17 y 18. Por último, se analiza el PTR.

Análisis realizado al PTR figura 19 y 20, se puede concluir que el esfuerzo máximo ejercido sobre el componente, no rebasa el límite elástico del material, por lo tanto, el componente no sufrirá una deformación permanente

Implementación del prototipo

Se imprimen un total de 50 piezas de las cuales 4 por su larga extensión se tuvieron que imprimir en 3 partes ya que el área de impresión de la maquina permite piezas de 17 cm de largo y el soporte en U mide 45 cm de largo: las piezas impresas y sus cantidades son las siguientes:

- I) Soportes derecho e izquierdo: 13 piezas c/u.
- II) Soporte medio derecho e izquierdo: 2 piezas c/u
- III) Soporte central: 13 piezas
- IV) Perfil: 4 piezas
- V) Canales en U: 3 piezas

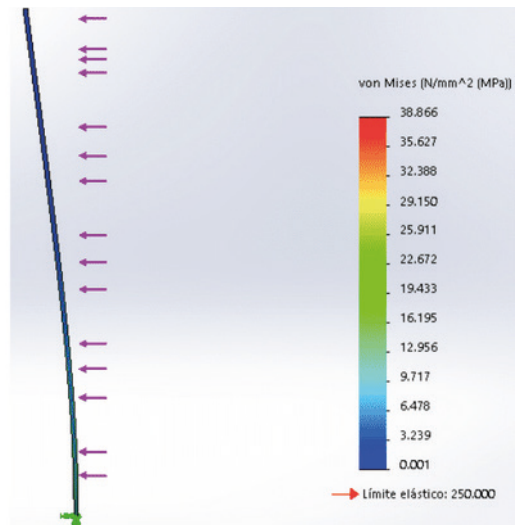


Figura 19 Análisis de elementos finitos al PTR. Esfuerzo de Von Mises

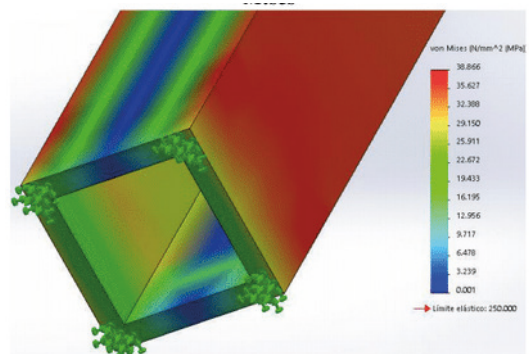


Figura 20 Resultados de deformación al PTR.

Es necesario separar las piezas para no cometer errores al momento de realizar el ensamble del modelo y evitar perder tiempo en quitar y poner piezas de nuevo, se utilizan algunos recipientes donde se acomodan las piezas dependiendo si son los soportes laterales, el soporte central, etc.

A continuación, consiste únicamente en colocar en posición los 4 perfiles y los 3 canales en U para después pegarlos.

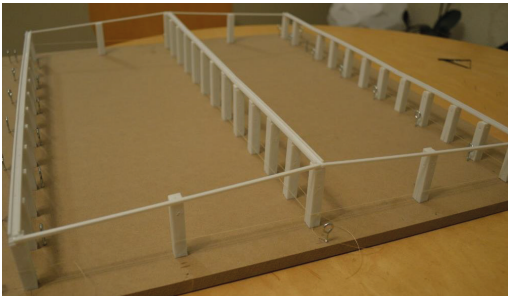


Figura 21 Tercera etapa del proceso de ensamblaje. Posicionamiento de perfiles y canales.

La última etapa, se coloca el hule de las caras delantera y trasera del modelo, después se instalan los cables que darán forma a la parte del techo de la estructura, los que van por debajo del hule, sobre estos se pone el polietileno, de una forma transversal, quedando listo el techo y en última instancia se sitúa el juego de cables, pasándolos por encima del techo figura 22. La estructura final queda de la siguiente manera, ya lista para realizar las pruebas aerodinámicas en el túnel de viento AF100.



Figura 22 Vista lateral estructura a escala terminada

Túnel de viento con nueva cámara de prueba acoplada

Debido a las limitaciones en cuanto a las medidas de la cámara de prueba, que ya fueron mencionadas con anterioridad, se tiene que realizar una cámara de prueba provisional. Esta cámara de prueba es posicionada en la salida del túnel de viento con el objetivo concentrar el aire desechado y aprovechar al máximo el flujo generado figura 23 y 24.

Se realiza un dibujo del túnel de viento, con ayuda de éste, se hace una simulación en SolidWorks para poder determinar cuál es la velocidad del viento en la cámara de prueba provisional.

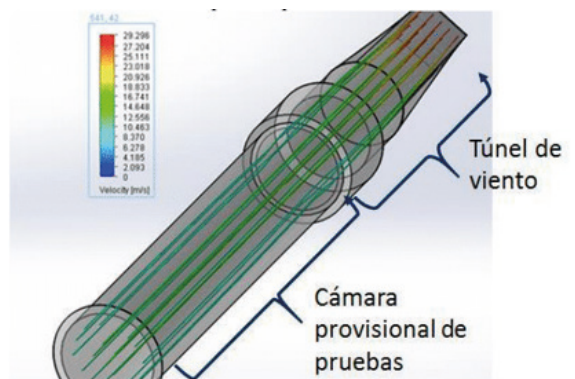


Figura 23 Simulación del túnel de viento con la cámara provisional empotrada

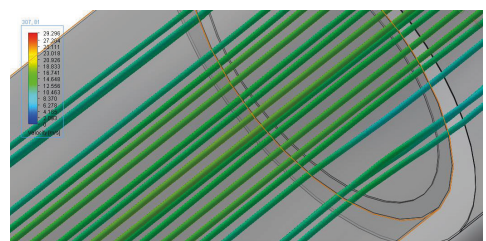


Figura 24 Acercamiento al área de entrada de la cámara provisional de pruebas.

De acuerdo a el análisis de fluidos realizado en la simulación del túnel de viento, la velocidad que se tiene en la entrada de la cámara de prueba provisional es de aproximadamente 20 m/s, es decir, unos 72 Km/h.

Acoplamiento de segunda cámara de prueba al túnel de viento y estudio aerodinámico en el modelo a escala

Después de realizar la simulación del túnel de viento con la segunda cámara provisional de prueba acoplada, se procede a someter el modelo a escala de la estructura al estudio aerodinámico. Los pasos seguidos son los siguientes:

1. Se realiza el acoplamiento, es decir se coloca la segunda cámara provisional en la salida del túnel de viento.
2. Para dar soporte a la estructura se utilizan dos bases, colocando cada una en las orillas de la cámara.
3. Ya que esta acomodada la cámara en la posición correcta, se realiza un sellado en la unión de la salida del túnel de viento y de la cámara de prueba provisional.
4. Se mete el modelo a escala dentro de la cámara y se atornilla la base a las paredes de la cámara, esto con el propósito de que la fuerza del viento no expulse el modelo fuera del área de prueba.
5. Se enciende el túnel de viento aumentando la velocidad paulatinamente. Una estela de aceite quemado ayuda a percibir la reacción del viento al chocar con la estructura.

La prueba se realizó 30 veces en la cara frontal y 30 veces en la cara lateral de la estructura. Después de terminada la prueba se observó que la estructura, tanto como los componentes de esta permanecieron sin sufrir daño alguno, y con eso se puede concluir que el resultado es satisfactorio figura 25, 26, 27, 28 y 29.

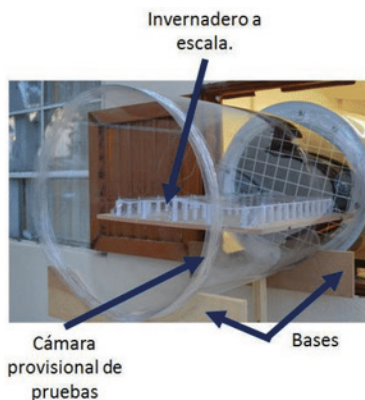


Figura 25 Acoplamiento de segunda cámara de prueba al túnel de viento para que se pueda analizar el modelo a escala.



Figura 26 Vista frontal de acoplamiento de segunda cámara de prueba al túnel de viento para que se pueda analizar el modelo a escala.



Figura 27 Vista frontal de acoplamiento de segunda cámara de prueba al túnel de viento para que se pueda analizar el modelo a escala.

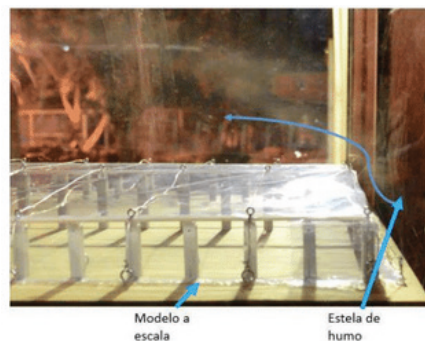


Figura 28 Estudio aerodinámico de la pared frontal del modelo a escala.

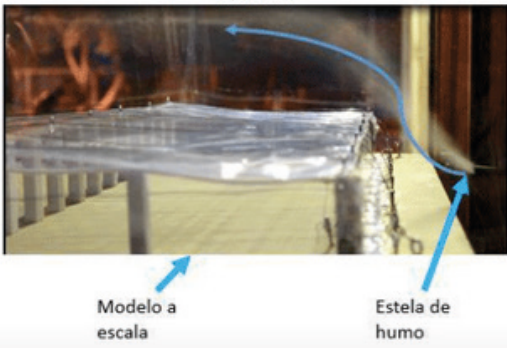


Figura 29 Estudio aerodinámico de la pared lateral del modelo a escala

Validación estadística

Se realizan varios experimentos con las siguientes variables a jugar, en los cuales se varían las velocidades entre 80 y 180 Km/h. La temperatura también se varía, siendo los parámetros: -21C, 45 C y 21.2 C. ver tabla 6. Esto con el objetivo de obtener las diferentes cargas mecánicas que actúan sobre la estructura.

Datos para el análisis del pilar o PTR a temperatura de 21.2 °C y velocidad del viento de 80 a 120 Km/v							
Velocidad en Km/h	Velocidad en m/s	Área de la superficie a analizar en m ²	Temp. °F	Densidad del aire en Kg/m ³	Presión dinámica Kg/ms ²	Carga en Newton	Carga resultante

Tabla 6 1 Experimentos de Cargas

Introduciendo la serie de datos obtenidos de este experimento, se realiza una prueba “t para una muestra” con el propósito de ver cuál es el comportamiento del PTR y del escantillón central, a las cargas mecánicas generadas por las diferentes velocidades y temperaturas.

El resultado de las pruebas es el siguiente:

1.- *Resultado de la prueba T para el pilar o PTR.*

Prueba t para una muestra: CARGA MPa

Prueba de $\mu = 250$ vs $\mu = 250$

Variable	N	Media	DesvStd	MediaSE	IC 95%	T	P
CARGA MPa	123	30.061	9.353	0.843	(28.392, 31.731)	-260.78	0.000

2.- Resultado de la prueba T para el escantillón central.

Prueba t para una muestra: CARGA MPa

Prueba de $\mu = 250$ vs $\mu = 250$

Variable	N	Media	DesvStd	MediaSE	IC 95%	T	P
CARGA MPa	123	4.940	1.494	0.135	(4.673, 5.207)	-1818.82	0.000

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a la comparación que se realiza con el costo obtenido de la tabla 2 y el costo de construcción del invernadero casa sombre que se muestra en la figura 2 a) y 2b). Se puede concluir que, utilizando la estructura alternativa propuesta en el proyecto, se logró una reducción del 30%.

Cumpliendo así con uno de los objetivos propuestos. los resultados obtenidos de la prueba t para una muestra, en la cual se compararon los resultados de las cargas dependiendo de la variación en la velocidad y la temperatura, ya que se obtiene un valor de $P = 0$, se puede rechazar la hipótesis nula. Es decir, no se rechaza la hipótesis alternativa, lo cual indica que, los valores de las cargas mecánicas obtenidas son menores al límite elástico del acero A36.

En base a estas dos conclusiones anteriores, ya que se demostró la resistencia de la estructura y la reducción en el costo, se recomienda realizar el invernadero a escala real para poder comparar con los datos obtenidos en este proyecto.

A su vez se recomienda complementar el proyecto con un estudio sobre las tecnologías de invernaderos para controlar el clima dentro de el con el objetivo de realizar un sistema de control ambiental eficiente y de bajo costo.

REFERENCIAS

1. Pacheco, A. J. (n.d.). *Diseño agronómico de los invernaderos: IX. Conclusiones*. Recuperado de <http://acea.com.mx/articulos-tecnicos/alex-j-pacheco/53-diseno-agronomico-de-los-invernaderos-ix-conclusiones>
2. Fondo de Infraestructura Rural (FIRCO). (2010). *Presentación rangos precios PROAP*. Recuperado de http://www.firco.gob.mx/proyectos/proap/documents/presentacion_rangos_precios_proap_2010.pdf
3. Wikipedia. (n.d.). *Ciudad Juárez*. Recuperado de http://es.wikipedia.org/wiki/Ciudad_Ju%C3%A1rez#Geograf.C3.ADa
4. Galvez, R. O. (1991). *Breve ensayo sobre diferentes materiales estructurales y de cobertura para la construcción de un invernadero* (p. 126).
5. Quadratin. (n.d.). *Retoman productores agricultura en invernaderos*. Recuperado de <http://www.quadratin.com.mx/economia/Retoman-productores-agricultura-en-invernaderos/>
6. Airtec TV. (n.d.). *Densidad del aire*. Recuperado de <http://www.airtecv.com/densidad-del-aire/>
7. Slideshare. (n.d.). *La agricultura protegida y los invernaderos*. Recuperado de <http://es.slideshare.net/olaxpiston/01-la-agricultura-protegida-y-los-invernaderos>
8. TP Agro. (n.d.). *Invernaderos*. Recuperado de <http://www.tpagro.com/espanol/invernaderos.htm>
9. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (n.d.). *Variadas estructuras*. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s05.htm>
10. U-Cursos. (n.d.). *Polietileno*. Recuperado de https://www.u-cursos.cl/usuario/c1f33623c53cd7f58fd77ef459693d6c/mi_blog/r/Polietileno.pdf