

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DISEÑO ESTRUCTURAL DE INVERNADEROS
EN LA ZONA CENTRO DE MÉXICO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL
DEL AGUA

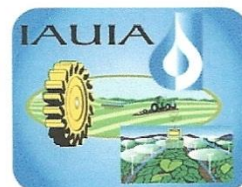
PRESENTA:

RABELO MIRANDA JOSÉ MANUEL



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Chapingo, Estado de México, febrero de 2013



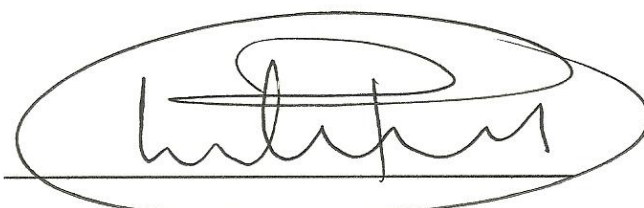
DISEÑO ESTRUCTURAL DE INVERNADEROS EN LA ZONA CENTRO DE MÉXICO

Tesis realizada por José Manuel Rabelo Miranda bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

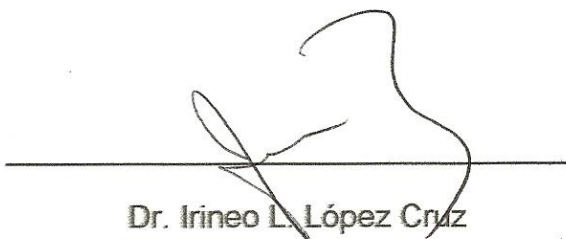
ORIENTACIÓN: BIOSISTEMAS

DIRECTOR:

A handwritten signature in black ink, enclosed within a large, hand-drawn oval. The signature is stylized and appears to read 'C. Villaseñor'.

Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

ASESOR:

A handwritten signature in black ink, positioned above a horizontal line. The signature is stylized and appears to read 'I. López Cruz'.

Dr. Irineo L. López Cruz

ASESOR:

A handwritten signature in black ink, positioned above a horizontal line. The signature is stylized and appears to read 'M. Carrillo García'.

Dr. Mauricio Carrillo García

DEDICATORIAS

A mis padres, quien con tanto esfuerzo y han luchado por salir adelante y apoyarme con todo lo necesario para hacer de mí una persona de bien, por ser los pilares de mi existencia y han sido un ejemplo de vida.

A mis amigos, a todos aquellos que me han brindado su amistad sin intentar recibir nada a cambio, con los que he pasado momentos buenos y difíciles.

Al ingeniero Ramón Lobato Silva que ha sido un ejemplo a seguir, además de ser un referente en mi formación profesional.

Por último, este trabajo está dedicado también a todos los que colaboraron en cualquier medida en mi formación académica, en especial a los profesores del DIMA e IAUIA

AGRADECIMIENTOS

Antes de partir y concluir con una de las etapas más importantes de mi vida, me tomaré el atrevimiento de aprovechar este espacio y su difusión para agradecer a todas a aquellas personas e instituciones que estuvieron presentes de diversas formas y que sin duda jugaron un papel importante en este lapso.

A los profesores del Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), que gracias a su paciencia, consejos, confianza y conocimientos brindados durante los últimos años, que gracias a eso han formado de mí una persona preparada para afrontar retos venideros.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado mediante la beca para la realización de este posgrado.

A todos los que han confiado en mí y me han apoyado en todo en este tiempo.

DATOS BIOGRÁFICOS

José Manuel Rabelo Miranda nace en Durango, Dgo. un 29 de noviembre de 1985, realizó sus estudios de primaria en la escuela Francisco Zarco, continuando con sus estudios en la Escuela Secundaria Técnica No. 29 y posteriormente en el Centro de Bachillerato Tecnológico agropecuario No.172, todo esto en el municipio de Rodeo, Dgo. En el año 2004, ingresa a la Universidad Autónoma Chapingo realizando un año propedéutico en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA), ya para el año 2005 ingresa a la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola de la misma Universidad, egresando en el año de 2009. E el año 2010 se postula para ingresar a la maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, donde es aceptado e inicia sus trabajos de investigación en el diseño estructural de invernaderos en la zona centro de México.

DISEÑO ESTRUCTURAL DE INVERNADEROS EN LA ZONA CENTRO DE MÉXICO

STRUCTURAL DESIGN OF GREENHOUSES IN THE CENTER ZONE OF MEXICO

José Manuel Rabelo Miranda, Carlos Alberto Villaseñor Perea
Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Desde 1999 a la fecha la cantidad de hectáreas de invernaderos en México ha aumentado en un seiscientos por ciento, pero la mayoría de estos invernaderos han sido construidos sin un fundamento de cálculo estructural, es decir, de manera empírica. En la presente investigación se desarrolla una metodología práctica para el diseño de invernaderos desde una perspectiva estructural. Se inicia con la presentación de las bases para determinar las dimensiones globales del invernadero en las diferentes formas estructurales y condiciones funcionales existentes. Se continúa con el proceso de modelación de las cargas a las que está sometida la estructura, posteriormente se emplea el software *SAP2000*, como herramienta de diseño y análisis estructural y se seleccionan las secciones transversales óptimas de los diferentes elementos estructurales que forman parte del sistema. La metodología de diseño propuesta permite obtener estructuras de bajo peso y por lo tanto bajo costo.

PALABRAS-CLAVE: cálculo, metodología, análisis estructural, elementos y *secciones transversales*.

Since 1999 to date, the number of greenhouse hectares in Mexico has increased six hundred percent, but the majority of these greenhouses have been built without a true structurally calculated basis. In other words, they have been mass built. The present study develops a practical methodology for designing greenhouses from a structural stand point. It begins with the presentation of the bases for determining the overall greenhouse dimensions considering the different structural formats and current functional conditions. It continues with the process of configuring according to the loads the structure is submitted to. For this, *SAP2000* software is used as a design and structural analysis tool by selecting the optimal cross-sections of the different structural elements that are part of the system. The offered design methodology allows to obtain lightweight structures reducing the overall cost

KEY-WORDS: calculated, methodology, elements, structural analysis and cross-sections.

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	VI
ÍNDICE DE CUADROS.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. ASPECTOS GENERALES SOBRE LOS INVERNADEROS.	3
2.1.1. El concepto de agricultura protegida.	3
2.1.2. Definición y concepto de invernadero.	5
2.2. DISEÑO DE INVERNADEROS.....	11
2.2.1. Aspectos a considerar en el diseño de invernaderos.....	11
2.2.2. Metodología general para el proceso de diseño de invernaderos.....	12
2.2.3 Metodología para proyectos y diseño de invernaderos.....	13
2.3. DISEÑO ESTRUCTURAL.....	17
2.4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	19
2.4.1. Métodos de Análisis Estructural.....	24
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1. Caracterización estructural de los invernaderos	31
3.1.1. Dimensiones globales.....	32
3.1.2. Superficie cubierta (S_c)	32
3.1.3. Forma	33
3.1.4. Dimensiones de la sección transversal de los materiales utilizados en la estructura.....	33
3.1.5. Peso de la estructura por unidad de superficie.....	34
3.2. Diseño estructural de invernaderos.	37
3.2.1. Estructuración.....	39
3.2.2. Modelación	46
3.2.2.1. Modelación geométrica.....	46
3.2.2.2. Modelo de los materiales de construcción	47
3.2.2.3. Modelación de las condiciones de apoyo	48
3.2.2.4. Modelación de las cargas o acciones.	49

3.2.3. Acciones o cargas	50
3.2.3.1 Identificación de las acciones o cargas de diseño	50
3.2.3.2 Clasificación de las acciones o cargas de diseño.	50
3.2.3.3. Cálculo de las acciones o cargas.....	52
3.2.3.4. Combinación de las acciones o cargas.....	56
3.2.4. Dimensionamiento de elementos estructurales	57
3.2.4.1. Cimentaciones	57
3.2.4.2. Elementos a tensión.	59
3.2.4.3. Elementos a compresión (columnas).....	59
3.2.4.4. Elementos a flexión y cortante.	60
3.2.5. Análisis estructural basado en el software SAP2000.....	64
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
5. CONCLUSIONES	83
6. BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXOS.....	88

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1. Elementos que forman la estructura del invernadero.....	34
Cuadro 3.2. Pesos del acero galvanizado ZCM de sección transversal cuadrada.	35
Cuadro 3.3. Otros materiales utilizados en los invernaderos.	35
Cuadro 3.4. Peso de cada uno de los elementos estructurales y peso total de la estructura.....	36
Cuadro 3.5. Propiedades mecánicas de acero galvanizado.....	48
Cuadro 3.6. Valores del coeficiente de presión interna.....	54
Cuadro 3.7. Valores del coeficiente de presión externa.....	55
Cuadro 4.1. Caracterización estructural.....	74
Cuadro 4.2. Características estructurales del invernadero.....	76
Cuadro 4.3. Detalle del material a utilizar en la construcción del invernadero	80
Cuadro A.1. Ejemplo de dimensiones y propiedades del perfil tubo cuadrado (OR).....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida.....	5
Figura 2.2. Distintos tipos de invernaderos.....	7
Figura 2.3. Etapas para el proceso de diseño.....	13
Figura 2.4. Aspectos a tomar en cuenta en la realización de proyectos..	14
Figura 2.5. Metodología para proyectos y diseño de invernaderos.....	16
Figura 2.6. Procedimiento del análisis por el método de los desplazamientos	29
Figura 3.1. Diferentes vistas del invernadero, a) sección transversal cabecera, b) sección transversal interior y c) vista de planta. Acotaciones en m.....	32
Figura 3.2. Metodología para el diseño estructural de invernaderos.....	38
Figura 3.3. Ejemplo de la disposición de los pasillos en un invernadero.....	41
Figura 3.4. Ejemplos de tensores.....	43
Figura 3.5. a) Columna empotrada sometida a compresión simple, b) Columna empotrada sometida a compresión y flexión.....	43
Figura 3.6. Viga simplemente apoyada y cargada por la fuerza distribuida q (Hibbeler, 2011).....	44
Figura 3.7. Armaduras típicas empleadas o adecuadas para su empleo en invernaderos.....	44
Figura 3.8. Arco donde se muestran las cargas de compresión generadas en sus extremos empotrados A y B	45

Figura 3.9. Forma geométrica de un marco (a) y un pórtico (b).	46
Figura 3.10. Modelo geométrico de una sección interior, acotaciones en m...	46
Figura 3.11. Modelación geométrica de un invernadero en el espacio.....	47
Figura 3.12. Comportamiento del material de construcción (Hibbeler,2011) ..	48
Figura 3.13. Modelación de los apoyos de un marco estructural	49
Figura 3.14. Modelación de las cargas P y w	49
Figura 3.15. Dirección del sistema de fuerzas por viento (CFE, 1981)	55
Figura 3.16. Tipos de cimentaciones.	58
Figura 3.17. Comportamiento de una viga sometida a flexión	61
Figura 3.18. Parámetros geométricos para aplicar la fórmula del cortante	63
Figura 3.19. Elección de unidades en el software SAP2000	64
Figura 3.20. Elección de un nuevo modelo de trabajo	64
Figura 3.21. Especificación del número de líneas en cada eje	65
Figura 3.22. Elección del comando line y trazo en un grid	65
Figura 3.23. Edición de una línea curva	66
Figura 3.24. Datos para editar una línea curva	66
Figura 3.25. Definición de un nuevo material	67
Figura 3.26. Asignación de las propiedades del material	67
Figura 3.27. Agregar las propiedades de la sección transversal de un material	68
Figura 3.28. Selección de la sección transversal.....	68
Figura 3.29. Definición de características de cada sección transversal de PTR	69

Figura 3.30. Ejemplo de modelo geométrico en 3D de un invernadero.	69
Figura 3.31. Asignación de carga sobre la viga de tutoreo.....	70
Figura 3.32. Carga ejercida por peso de cultivo en vigas internas.	71
Figura 3.33. Carga ejercida por la presión del viento en el área rectangular..	71
Figura 3.34. Inicio del análisis estructural	72
Figura 3.35. Selección de cargas para el análisis estructural	72
Figura 4.1. Ubicación de ventilas cenitales.....	77
Figura 4.2. Modelación de invernadero en SAP2000.....	78
Figura 4.3. Ejemplo del resultado de una corrida en la vista interior de un invernadero tipo diente de sierra.....	79
Figura 4.4. Resultados de la última corrida en software SAP2000.....	79

1. INTRODUCCIÓN

Desde una perspectiva amplia, los invernaderos son biosistemas, es decir, la integración de componentes físicos (estructuras, equipos y factores ambientales) y biológicos (plantas). Para conseguir un invernadero con características idóneas de funcionalidad y, además, compatible con las restricciones económicas y de seguridad estructural, se requiere que su diseño sea integral, es decir, basado en el conocimiento de los principios relativos a la naturaleza de los factores ambientales; en la comprensión cabal de las características intrínsecas, respuestas y requerimientos de las plantas ante cada uno de los factores ambientales o a sus combinaciones; en el entendimiento de las propiedades y comportamiento de los materiales de construcción y elementos estructurales que componen a las estructuras, bajo la acción de cargas y parámetros ambientales; y en la apreciación de las interacciones recíprocas entre todos estos subsistemas. Los aspectos a considerar en el diseño de invernaderos son: funcionalidad, control ambiental, seguridad estructural, sistemas auxiliares, mecanización y automatización (ASAE; 2005).

Según Johnson y Salmon (1990), el diseño estructural puede ser definido como una mezcla de arte y ciencia, combinando la experiencia de los ingenieros en cuanto al comportamiento de una estructura con un sólido conocimiento de

estática, dinámica, mecánica de materiales y análisis estructural, para producir una estructura segura y económica, la cual servirá para un determinado propósito.

En la segunda mitad del siglo XX la agricultura protegida, y en especial los invernaderos, ha tenido un enorme crecimiento, la extensión de área cubierta por invernaderos se ha aumentado en un seiscientos porciento, no obstante hasta en la actualidad en México no se cuenta con una metodología amplia del diseño estructural de un invernadero, que se fundamente en bases agronómicas propias del país y de análisis estructural, construyendo invernaderos casi de manera empírica o realizando modelos similares a los encontrados en países de alto desarrollo tecnológico (Rico; 2008).

Por lo anterior, el presente trabajo tiene por objetivo desarrollar una metodología de diseño estructural de invernaderos basada en el software SAP2000, mostrando las fases de diseño, caracterización y análisis de estructuras de invernaderos. Para realizar lo anterior previamente se tiene que hacer el cálculo de las cargas a las que estará sometida la estructura, para posteriormente hacer el diseño y análisis estructural de las secciones transversales óptimas de los elementos estructurales mediante el software SAP2000.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS GENERALES SOBRE LOS INVERNADEROS.

2.1.1. El concepto de agricultura protegida.

La agricultura protegida se realiza bajo estructuras construidas por el hombre con la finalidad de evitar las restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas cultivadas. Así, mediante el empleo de dichas estructuras se reducen al mínimo las condiciones restrictivas del clima sobre los vegetales. Al respecto, en las últimas décadas se han desarrollado varios tipos de elementos protectores que plantean diferentes alternativas para recrear condiciones ambientales óptimas para el desarrollo de los cultivos, de acuerdo a los requerimientos climáticos de cada especie y en concordancia con los factores climáticos de cada región (Bastida y Ramírez, 2002).

Para evitar las pérdidas atribuidas a los factores climáticos adversos al desarrollo de los cultivos han surgido una serie de elementos para proteger a las plantas, dando origen al desarrollo de la agricultura protegida (Hannan, 1998).

Así, las modificaciones ambientales logradas con cada tipo de estructura permiten ofrecer un medio más favorable para que las plantas desarrollen su

potencial productivo sin las restricciones ambientales a que están sometidas cuando se desarrollan a campo abierto (Hannan, 1998).

Entre los principales factores ambientales que impiden el desarrollo del potencial genético de los cultivos están: la baja fertilidad de los suelos, las plagas y enfermedades, la competencia con otras plantas, condiciones climáticas poco favorables, entre ellas baja precipitación y bajas o altas temperaturas, así como métodos y técnicas inadecuadas de cultivo. Factores todos ellos que inciden sobre los cultivos cuando se desarrollan a campo abierto o al aire libre, dando como resultado bajos rendimientos.

Los elementos enfocados a proteger los cultivos son diversos (figura 2.1), desde los acolchados y las cubiertas flotantes, que se emplean para los terrenos agrícolas o los cultivos; las cubiertas de mallas para disminuir luminosidad y evitar el daño de insectos y granizadas; pasando por los mini-invernaderos o micro- túneles; hasta los modernos invernaderos dotados de dispositivos mecánicos y equipos apropiados para el control de los principales factores climáticos. En todos los casos, el efecto de las estructuras protectoras se debe complementar con sistemas eficientes de riego, así como con cuidados y prácticas de cultivo apropiadas a cada especie (Bastida y Ramírez, 2002).



Figura 2.1. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida.

De esta forma, las estructuras principales empleadas para proteger cultivos se pueden agrupar en: 1) cubiertas flotantes, 2) cubiertas de plástico, 3) casas sombra, 4) mini-invernaderos y 5) invernaderos de distintos tipos (Bastida y Ramírez, 2002).

2.1.2. Definición y concepto de invernadero.

Los invernaderos son estructuras de diversos materiales, provistas con una cubierta relativamente transparente a la energía solar (figura 2.2), y se emplean

en la protección de cultivos para evitar el efecto negativo de los factores climáticos. En ellos se reproducen, controlan y mejoran las condiciones ambientales para el crecimiento de los cultivos fuera de temporada o de su distribución geográfica natural, al permitir recrear las condiciones necesarias para el desarrollo de todas las especies vegetales lo cual deriva en el aumento de los rendimientos en la producción (Bastida, 2006).

La eficiencia y la funcionalidad son las dos características principales que deben tener los invernaderos. Por eficiencia se entiende la idoneidad para condicionar alguno de los principales elementos del clima, no de una manera estática e incontrolable, sino entre límites bien determinados de acuerdo con las exigencias fisiológicas del cultivo. La funcionalidad es el conjunto de requisitos que permiten la mejor utilización del invernadero, tanto desde el punto de vista técnico como económico (Matallana y Montero, 2002).

La Real Academia Española (2013) define invernadero como: “sitio a propósito para pasar el invierno, y destinado a este fin”; aunque otra definición expresa: “recinto en el que se mantienen constantes la temperatura, la humedad y otros factores ambientales para favorecer el cultivo de plantas”. Esta última definición es más adecuada desde el punto de vista agronómico.



a) Tipo capilla



b) Tipo túnel



c) Tipo dientes de sierra



d) Tipo elíptico

Figura 2.2. Distintos tipos de invernaderos.

Sánchez y Rebolledo (2005) plantean: el invernadero es una construcción agrícola, que tiene una cubierta translúcida cuyo objetivo es reproducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas de cultivo establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior.

La Norma Mexicana: Invernaderos-Diseño y Construcción-Especificaciones (NMX-E-255-CNCP-2008) señala que el invernadero: “es una construcción

agrícola de estructura metálica, usada para el cultivo y/o protección de plantas, con cubierta de película plástica traslúcida que no permite el paso de la lluvia al interior y que tiene por objetivo reproducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en el interior. Los invernaderos pueden contar con un cerramiento total de plástico o plástico en la parte superior y mallas en los laterales”.

Desde nuestro punto de vista esta última es la definición más acertada; sin embargo, es necesario ampliar que los materiales de construcción de los invernaderos son de muy diversos tipos.

2.1.3. Beneficios de los invernaderos.

En cuanto a los beneficios que presenta el crecimiento de plantas cultivadas bajo invernaderos, respecto al cultivo de las mismas a campo abierto, a continuación se señalan algunos de los más relevantes (Bastida, 2006):

- Intensificación de la producción.
- Posibilidad de cultivar todo el año.
- Obtención de productos fuera de temporada.
- Obtención de productos en regiones con condiciones restrictivas.

- Aumento de los rendimientos por unidad de superficie.
- Obtención de productos de alta calidad.
- Menor riesgo en la producción.
- Uso más eficiente del agua e insumos.
- Mayor control de plagas, malezas y enfermedades.
- Mayor comodidad y seguridad para realizar el trabajo.
- Condiciones idóneas para la experimentación e investigación.

2.1.4. Requerimientos de los invernaderos.

Entre los requerimientos más importantes que representa la producción en invernaderos, se deben tener presentes los siguientes, para así estar preparados para enfrentar y minimizar sus efectos negativos (Bastida, 2006):

- Elevado costo de inversión inicial.
- Desconocimiento de la estructura más apropiada para un uso determinado en función de las condiciones climáticas y los requerimientos ambientales de los cultivos.
- Alto nivel de especialización y capacitación.
- Altos costos de producción.
- Condiciones óptimas para el ataque de agentes patógenos.
- Dependencia del mercado.

2.1.5. Situación actual de la horticultura protegida en México

El sector de la horticultura protegida mexicana experimenta un fuerte desarrollo a todos los niveles. La horticultura protegida se encuentra ampliamente extendida por todo el país y abarca una gran diversidad de cultivos. El 60% del área de horticultura protegida se concentra en 5 estados principales: Sinaloa, Baja California, Baja California Sur, Jalisco y Estado de México. El mayor ritmo de crecimiento se da en Sinaloa, Jalisco, Guanajuato y Michoacán. Querétaro es importante porque alberga el primer “Agroparque”. El cultivo más importante es el tomate, al cual está dedicada la mitad de la superficie de cultivo bajo protección. El cultivo del pepino, el pimiento y la berenjena gana terreno rápidamente. El Estado de México y Morelos son los estados más importantes en lo que respecta al cultivo de flores y planta ornamental respectivamente, aunque pueden encontrarse ornamentales por todo el país (Nieves, *et al.*, 2012).

Los cultivos protegidos iniciaron en México entre 1990 y 1995 en el siglo XX. Debido a las ventajas de la agricultura protegida, se dio un crecimiento de 750 ha en 1999 a 12,000 ha en 2007 (Nieves, *et al.*, 2012).

Fuentes oficiales indican una superficie bajo cultivos protegidos de 11759 ha en 2010, mientras que lo estimado por organizaciones profesionales menciona una superficie bajo cultivos protegidos que se acerca a las 30,000 ha. Como resultado de la promoción gubernamental y del crecimiento dinámico y competitivo, la superficie dedicada a la horticultura protegida ha tenido un

crecimiento explosivo, que podría alcanzar las 1,200 ha por año predominantemente de baja tecnología (Nieves, *et al.*, 2012).

2.2. DISEÑO DE INVERNADEROS

El diseño es un proceso ordenado e iterativo que - a través de un conjunto de suposiciones, especificaciones y cálculos- da como resultado la definición de las características detalladas del sistema.

2.2.1. Aspectos a considerar en el diseño de invernaderos

Para conseguir un invernadero con características idóneas de funcionalidad y, además, compatible con las restricciones económicas y de seguridad estructural, se requiere que su diseño sea integral, es decir, basado en el conocimiento de los principios relativos a la naturaleza de los factores ambientales; en la comprensión cabal de las características intrínsecas, respuestas y requerimientos de las plantas ante cada uno de los factores ambientales o a sus combinaciones; en el entendimiento de las propiedades y comportamiento de los materiales de construcción y elementos estructurales que componen a las estructuras, bajo la acción de cargas y parámetros ambientales; y en la apreciación de las interacciones recíprocas entre todos estos subsistemas. Por lo que, es necesario considerar los siguientes aspectos en el diseño de invernaderos:

- **Funcionalidad.** Es el conjunto de requisitos que permiten la mejor utilización del invernadero, tanto desde el punto de vista técnico como económico.
- **Control ambiental.** Es el conjunto de cálculos y selección de equipos para lograr que en el interior del invernadero prevalezcan unas condiciones climáticas específicas.

- Seguridad estructural.
- Sistemas auxiliares. Es el conjunto de equipos que logran que en el interior del invernadero prevalezcan las condiciones climáticas deseadas.
- Mecanización. Conjunto de operaciones mecánicas necesarias para realizar distintas labores en el proceso de producción en los invernaderos.
- Automatización. Conjunto de operaciones semiautomáticas o automáticas en su totalidad necesarias para realizar distintas labores en el proceso de producción en los invernaderos.
- Optimización. Conjunto de operaciones que sirven para realizar de la mejor manera ciertas labores en el proceso de producción.

2.2.2. Metodología general para el proceso de diseño de invernaderos

Según García y Sánchez (2012), en principio la metodología para el diseño de un invernadero es la misma que se sigue para el diseño de una estructura o máquina, a saber:

1. Identificación y definición previa del problema que se debe resolver.
2. Recopilación, análisis y complementación de la información básica.
3. Planteamiento de las distintas posibilidades de solución factibles.

4. Selección de la mejor posibilidad de solución, de acuerdo con sus características técnicas, económicas y, en su caso, sociales y ecológicas.
5. Formulación del diseño definitivo.
6. Formulación de las especificaciones para la construcción.
7. Construcción y control de calidad.
8. Puesta en servicio u operación.

Estos ocho pasos frecuentemente se agrupan en cuatro etapas:

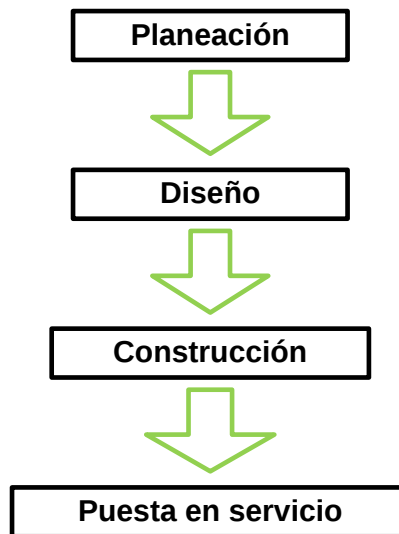


Figura 2.3. Etapas para el proceso de diseño.

2.2.3 Metodología para proyectos y diseño de invernaderos

El establecimiento de un invernadero es un proceso que demanda una planeación previa a la construcción del mismo, debe realizarse paso a paso y de manera ordenada. Para dicho fin, a continuación se presenta la metodología que señala los aspectos de mayor importancia que deben ser abordados durante la elaboración de un proyecto.

La metodología que debe seguirse al realizar el proyecto, y diseño de un invernadero, comprende seis aspectos, a saber:

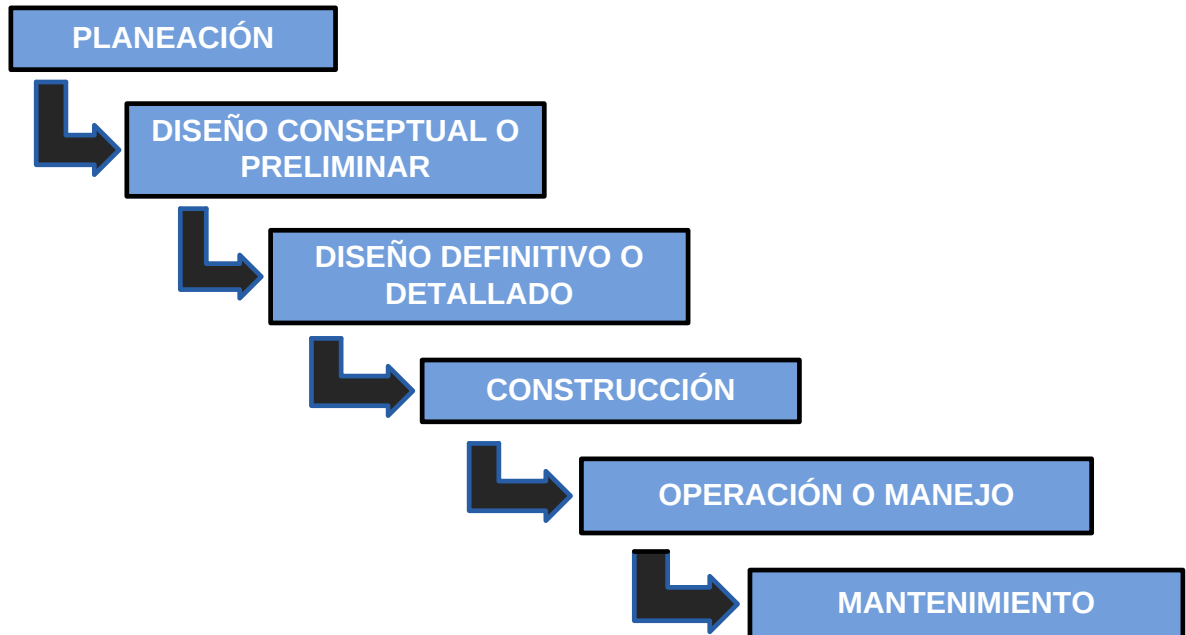


Figura 2.4. Aspectos a tomar en cuenta en la realización de proyectos.

La planeación: Es el primer y más importante paso en el proceso de diseño de invernaderos. El propósito de la planeación es prever todas las circunstancias o factores que tendrán una influencia sobre la unidad de producción y, así, evitar errores cuya corrección posterior resultaría costosa.

Diseño conceptual o preliminar: La solución física de un proyecto de invernadero no es única, ya que siempre existen diversas posibilidades, a saber: a) de las dimensiones globales del invernadero (largo, ancho y altura), b) la forma geométrica del invernadero y el tipo de elementos estructurales elegidos, c) los materiales estructurales y de cubierta seleccionados, d) el grado de control ambiental que se quiera tener en el interior (ventilación, calefacción, enfriamiento e iluminación), e) el nivel de mecanización y automatización que se quiera llevar a cabo.

Diseño definitivo o detallado: Cuando ya se tiene una propuesta factible de invernadero, se definirá, el conjunto de parámetros y variables que intervienen en el diseño. Se deben elegir dimensiones globales, arreglo agronómico para el cultivo, requerimientos del invernadero, especificaciones de construcción, materiales, planos, etc.

Construcción: Con base en los resultados del diseño detallado o definitivo, expresados en los diferentes planos, se elige un procedimiento de construcción del invernadero. Este procedimiento dependerá de la magnitud del proyecto y de las condiciones legales o administrativas, pudiendo elegirse entre un procedimiento por administración directa o uno basado en un procedimiento de licitación. En todos los casos es muy importante vigilar que se cumplan los requerimientos del diseño agronómico, funcional, estructural y de control ambiental, con énfasis en la supervisión de la calidad. Esto incluye la instalación de los sistemas auxiliares.

Operación y manejo: Esta fase es la puesta en servicio del invernadero, misma que debe basarse en la elaboración de un plan o programa de producción y de manejo, un programa de mantenimiento y un sistema de control o evaluación.

Cada uno de estos seis aspectos está compuesto por una serie de consideraciones que deben tomarse en cuenta durante el proceso de elaboración del proyecto, tales consideraciones se muestra en la figura 2.5.

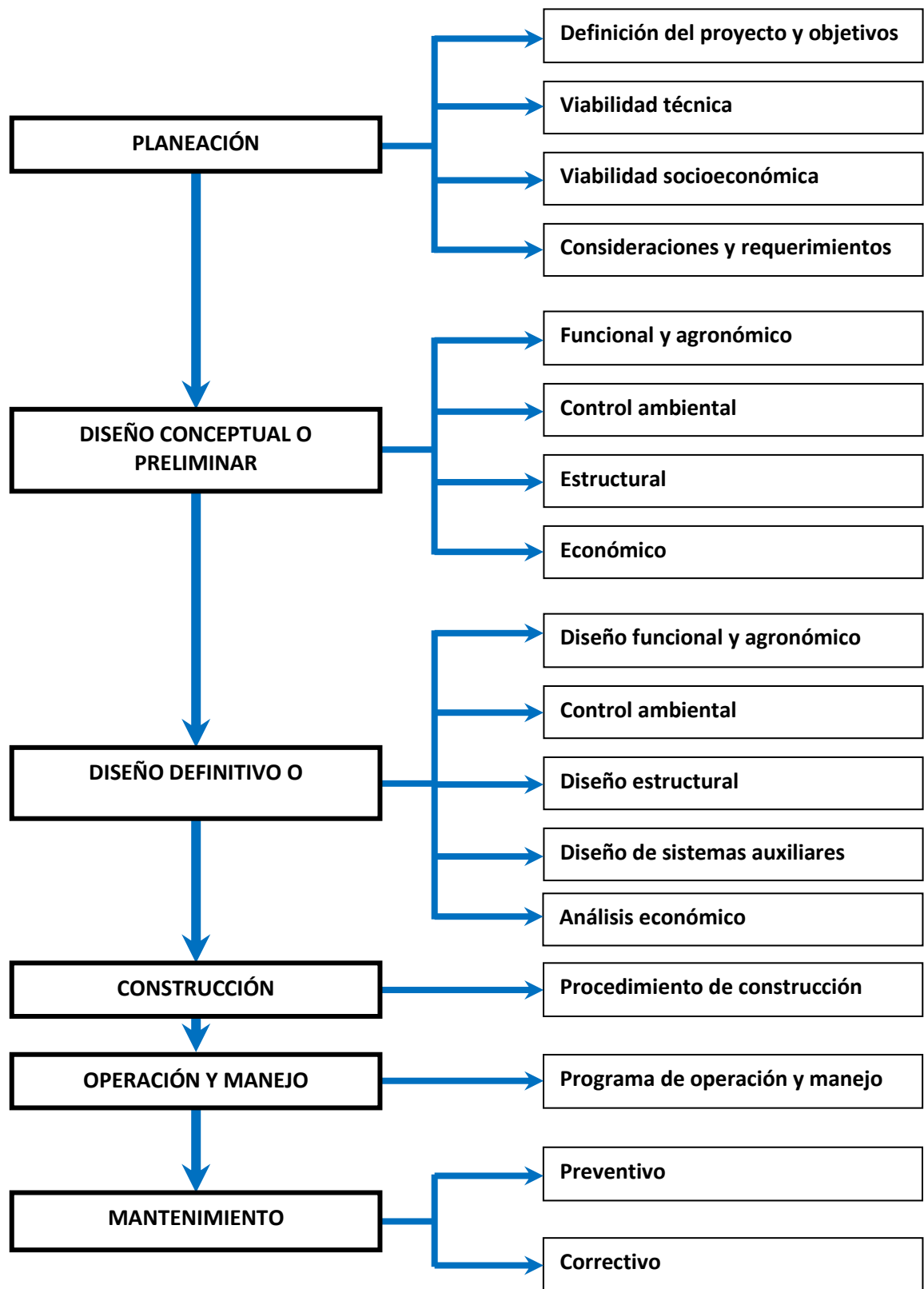


Figura 2.5. Metodología para proyectos y diseño de invernaderos

2.3. DISEÑO ESTRUCTURAL

Como lo menciona McCormac (1999), los ingenieros estructurales distribuyen y dimensionan las estructuras y las partes de éstas para que soporten satisfactoriamente las cargas a que quedarán sometidas. Sus funciones son: el trazo general de la estructura, el estudio de las formas estructurales posibles, la consideración de las condiciones de carga, el análisis de esfuerzos y deflexiones, el diseño de los elementos y la preparación de los planos. Más precisamente, el concepto diseño estructural se refiere al dimensionamiento de las partes de una estructura después de que se han calculado las fuerzas.

El ingeniero estructural debe aprender a distribuir y proporcionar las partes de las estructuras de manera que puedan montarse prácticamente, que tengan resistencia suficiente y que sean económicas (McCormac, 1999).

Siempre se debe tener en mente la posibilidad de abatir los costos de la construcción sin sacrificar la resistencia. Algunos aspectos de construcción que pueden ayudar a reducir los costos son: uso de miembros estructurales estándar, uso de conexiones y detalles simples y el uso de elementos y materiales que no requieren un mantenimiento excesivo a través de los años.

El diseño de un miembro estructural implica mucho más que el cálculo de las propiedades requeridas para resistir las cargas y la selección del perfil más ligero que tenga tales propiedades. Aunque a primera vista este procedimiento parece que presenta los diseños más económicos, deben considerarse muchos otros factores (McCormac, 1999).

Según McCormac (1999) algunos de estos factores son los siguientes:

1. El ingeniero necesita seleccionar los tamaños en que se fabrican los perfiles laminados. Vigas, placas y barras de tamaños poco comunes serán difíciles de conseguir en periodos de mucha actividad constructiva y resultarán caros en cualquier época. Un poco de estudio le permitirá al proyectista aprender a evitar tales perfiles. Los fabricantes de acero reciben constantemente información de las empresas constructoras acerca de los tamaños de perfiles. Esta información incluye los tamaños así como las longitudes de los perfiles en existencia.
2. En ciertos casos puede ser un error suponer que el perfil más ligero es el más barato. Una estructura diseñada según el criterio de la “sección más ligera” constituirá en un gran número de perfiles de formas y tamaños diferentes. Tratar de conectar y adaptar todos esos perfiles será bastante complicado y el costo del acero empleado probablemente será muy alto. Un procedimiento más razonable sería uniformar el mayor número posible de perfiles en cuanto al tamaño y forma aunque algunos sean de mayor tamaño.
3. Las vigas escogidas para los pisos de edificios son las de mayor peralte, ya que esas secciones, para un mismo peso, tienen los mayores momentos de inercia y momentos resistentes. Conforme aumenta la altura de los edificios, resulta económico modificar este criterio; consideremos por ejemplo un edificio de 20 pisos en el cual cada piso debe tener una altura libre mínima, si los peraltes de las vigas de los

pisos se reducen 15 centímetros, las vigas costarán más, pero la altura del edificio se reducirá $20 \times 15 \text{ cm} = 300 \text{ cm}$ ó 3 m con el consiguiente ahorro en muros, pozos de elevadores, alturas de columnas, plomería, cableado y cimentaciones.

4. Deben escogerse secciones que sean fáciles de montar y mantener. Por ejemplo, los elementos estructurales de un puente deben tener sus superficies expuestas de manera que puedan pintarse periódicamente (a menos que se utilice un acero especial resistente a la corrosión).

2.4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El principal problema que se trata de resolver con el análisis estructural, es la determinación del estado de deformaciones y esfuerzos que se producen en el interior de la estructura, a consecuencia de todas las acciones actuantes sobre ella. Como consecuencia también se determinan las reacciones que aparecen en los apoyos de la estructura (Celigüeta, 1998).

Para la concepción de una estructura, el ingeniero, tiene que seguir tres pasos fundamentales, que son:

1. Fase de planteamiento,
2. Fase de diseño, y
3. Fase de construcción.

En este caso la fase más importante es la de diseño, que es la que interesa para el análisis estructural, en esta fase se pueden distinguir las siguientes etapas:

- ✓ Determinación de la forma y dimensiones generales: Se eligen el tipo de estructura y la geometría de la misma, de acuerdo con su funcionalidad y la normativa aplicable. Se determinan asimismo los materiales principales a utilizar.
- ✓ Determinación de las cargas: Se determinan las fuerzas exteriores que actúan sobre la estructura, así como todos aquellos efectos que puedan afectar a su comportamiento (errores de forma y movimientos de apoyo).
- ✓ Análisis: Consiste en determinar los esfuerzos internos y las deformaciones que se originan en la estructura como consecuencia de las cargas actuantes. Para efectuar el análisis de una estructura es necesario proceder primero a su idealización, es decir asimilarla a un modelo cuyo cálculo sea posible efectuar. Esta idealización se hace básicamente introduciendo algunas suposiciones sobre el comportamiento de los elementos que forman la estructura, sobre la forma en que estos están unidos entre sí, y sobre la forma en que se sustenta. Una vez idealizada la estructura se procede a su análisis, calculando las deformaciones y esfuerzos que aparecen en ella, y utilizando para ello las técnicas propias del análisis estructural. Para este análisis siempre se dispone, como datos de partida, de los valores

de las acciones exteriores y las dimensiones de la estructura, determinadas en las fases anteriores. Hay casos muy especiales, en los cuales para el análisis de la estructura es necesario conocer las dimensiones transversales de los elementos que la componen, pero ocurre que estas dimensiones están básicamente determinadas por los esfuerzos internos y unas deformaciones que sean adecuadas a las dimensiones transversales de los elementos.

Para comenzar este proceso iterativo se deben imponer unos valores para las dimensiones transversales de los elementos, basándose en la experiencia, o en un pre dimensionamiento, que normalmente se basa en hipótesis simplificativas.

- ✓ Diseño de detalles: son propios de la tecnología en la construcción de la estructura: nudos de unión, aparatos de apoyo, armaduras de hormigón, etc. El análisis de estructuras no interviene en esta fase.

Tung – Au y Paul Christiano (1993) discuten ampliamente el procedimiento de análisis estructural, incluyendo los siguientes pasos:

1. Reconocer el problema real,
2. Formular la idealización del problema,
3. Resolver el problema idealizado, e
4. Interpretar la solución del problema idealizado cuidadosamente para sacar conclusiones sobre el problema real.

Aunque el primero y los últimos pasos dependen en gran medida en el juicio basado en la experiencia, se hace un esfuerzo de tiempo para enfatizar los factores importantes involucrados. Por ejemplo, la idealización de las estructuras se ilustra mediante la comparación de una estructura real y su contraparte idealizada.

Las consideraciones básicas en la formulación de estos problemas pueden resumirse como sigue:

1. Analizar las fuerzas y los condiciones de equilibrio
2. Estudiar las deformaciones y los requisitos de compatibilidad geométrica.
3. Establecer las relaciones de fuerza-deformación de las propiedades de los materiales.

Estos principios se pueden aplicar para formular un problema estructural de cualquier grado de complejidad, aunque a veces es preferible para hacer frente a problemas más complicados por medio de los principios de trabajo y energía.

Para ciertos sistemas simples, sin embargo, las reacciones y las fuerzas internas en el sistema, pueden ser analizadas completamente de las condiciones de equilibrio. Entonces, las deformaciones se pueden derivar de las fuerzas internas conocidas y los datos de deformación de carga características del material. Tales sistemas se clasifican como estructuras estáticamente determinadas. Existen otros sistemas, en los que las reacciones y las fuerzas internas no pueden ser determinadas a partir de las condiciones de la solución

completa de un problema. Estos últimos sistemas se denominan estructuras estáticamente indeterminadas.

Dado que los efectos sobre la dinámica de las estructuras de participación masiva, desplazamiento, velocidad, aceleración y la energía en el sistema, debemos basar nuestro análisis preliminar sobre una presunta estructura con características suficientemente similares a la estructura final. Mediante el uso de cargas estáticas equivalentes y otros conceptos simplificados, una estructura razonable puede ser seleccionada sin demasiadas complicaciones. Si esto se hace de forma inteligente, el análisis dinámico adicional será sólo un proceso de confirmación de la selección preliminar de la estructura. Por lo tanto, el análisis basado en cargas estáticas equivalentes tiene su lugar en el diseño estructural, pero también tiene sus limitaciones. Si no se es consciente de todos los factores importantes en una situación, no se puede prever adecuadamente la variación y la generalización de esos factores. Por esta razón, los conceptos de cargas estáticas equivalentes para problemas dinámicos deben utilizarse con prudencia.

La discusión anterior indica claramente la importancia de un conocimiento integrado de la ingeniería estructural con el fin de obtener la mejor solución posible a un problema estructural. En gran medida la ingeniería es un arte, no puede ser reemplazado por completo por una ciencia exacta. Los ingenieros han aprendido a confiar más y más en la metodología de la ciencia, pero no pueden prescindir por completo de la lógica. Paradójicamente, una buena

comprensión de los principios básicos del análisis estructural a menudo puede conducir a una mejor apreciación del comportamiento real de las estructuras de si el análisis matemático se mantiene en la perspectiva adecuada y la proporción. La percepción intuitiva de una idea es muy valiosa pero no infalible. Por lo tanto, el juicio basado en la experiencia debe ser acompañado por el análisis racional.

2.4.1. Métodos de Análisis Estructural.

Al analizar cualquier estructura indeterminada, es necesario que se cumplan los requisitos de equilibrio, compatibilidad y fuerza-desplazamiento. El equilibrio se satisface cuando las fuerzas reactivas mantienen a la estructura en reposo y la compatibilidad se satisface cuando los diversos segmentos de la estructura se ajustan entre sí sin roturas o traslapes. Los requisitos de fuerza-desplazamiento dependen de la forma en que el material responde; se supone que la respuesta es lineal-elástica. En general, hay dos maneras diferentes de satisfacer esos requisitos al analizar una estructura estáticamente determinada: el método de las fuerzas o método de las flexibilidades y el método de los desplazamientos o método de las rigideces.

✓ Método de las fuerzas.

Este método fue originalmente desarrollado por James Clerk Maxwell en 1864 y luego refinado por Otto Mohr y Heinrich Müller-Breslau. Este método fue uno de los primeros disponibles para el análisis de estructuras estáticamente indeterminadas. Como su nombre lo sugiere, el método de las fuerzas consiste

en escribir ecuaciones que satisfagan la compatibilidad y los requisitos de fuerza-desplazamiento en la estructura y contienen como incógnitas las fuerzas redundantes. Los coeficientes de esas incógnitas se llaman coeficientes de flexibilidad. Como la compatibilidad es la base de este método, se llaman a veces método de la compatibilidad o método de los desplazamientos consistentes. Una vez determinadas las fuerzas redundantes, las fuerzas reactivas restantes sobre la estructura se determinan satisfaciendo los requisitos de equilibrio en la estructura. Los principios fundamentales implicados en la aplicación de este método son fáciles de entender y desarrollar.

✓ **Método de los desplazamientos.**

El método de análisis de los desplazamientos consiste en escribir primero las relaciones de fuerza-desplazamiento para los miembros y luego satisfacer los requisitos de equilibrio en la estructura. En este caso, las incógnitas en las ecuaciones son desplazamientos y sus coeficientes se llaman coeficientes de rigidez. Una vez obtenidos los desplazamientos, se determinan las fuerzas con las ecuaciones de compatibilidad y de fuerza-desplazamiento (Hibbeler, 2006).

El procedimiento general que propone Hibbeler (2006) para el método de los desplazamientos, es el siguiente:

El método de análisis de las fuerzas, se basa en identificar las cargas redundantes desconocidas y luego satisfacer las ecuaciones de compatibilidad en la estructura. Como esas ecuaciones contienen los desplazamientos en puntos sobre la estructura, fue necesario usar las relaciones carga-

desplazamiento para expresar los desplazamientos en términos de las cargas conocidas y desconocidas. La solución de esas ecuaciones dio las reacciones redundantes. Una vez obtenidas éstas, las ecuaciones de equilibrio se usaron para determinar las reacciones restantes sobre la estructura.

El método de los desplazamientos funciona de manera opuesta, se requiere primero satisfacer las ecuaciones de equilibrio de la estructura. Los desplazamientos desconocidos se escriben en términos de las cargas usando las relaciones carga-desplazamiento. De esas ecuaciones se despejan entonces los desplazamientos desconocidos. Una vez obtenidos estos, las cargas incógnitas se determinan a partir de las relaciones carga-desplazamiento, que también satisfacen los requisitos de compatibilidad de la estructura. Todo método de desplazamientos sigue este procedimiento general. En el siguiente procedimiento se generalizara para encontrar las ecuaciones de pendiente-desviación.

También en el método de los desplazamientos, se incluye el método de distribución de momentos. Este método deja a un lado el cálculo de los desplazamientos y en su lugar aplica una serie de correcciones convergentes que permiten el cálculo directo de los momentos de extremo. Por otro lado el método de los desplazamientos incluye también el análisis matricial para su resolución, el cual está basado y se resuelve con ayuda de paquetes computacionales.

Grados de libertad

Cuando se carga una estructura, puntos específicos de ella, llamados nodos, sufrirán desplazamientos. A esos desplazamientos se les llama grados de libertad de la estructura; en el método de los desplazamientos es importante especificar esos grados de libertad ya que ellos son las incógnitas cuando se aplica el método.

Para determinar el número de grados libertad, podemos imaginar que la estructura consiste en una serie de miembros conectados a nodos localizados usualmente en nudos, soportes, en los extremos de un miembro o donde los miembros cambian su sección transversal bruscamente. En tres dimensiones, cada nodo de un marco rígido o viga puede tener cuando más tres desplazamientos lineales y tres desplazamientos rotacionales; en dos dimensiones, cada nodo puede tener cuando más dos desplazamientos lineales y un desplazamiento rotacional. Si la estructura es una armadura, los nodos están en los nudos y el desplazamiento rotacional de los nodos no se considera ya que los miembros no están sometidos a flexión. Además, los desplazamientos nodales pueden estar restringidos por los soportes o debido a suposiciones basadas en el comportamiento de la estructura. Por ejemplo, si la estructura es una viga sólo se consideran deformaciones por flexión, entonces no puede haber desplazamientos lineales a lo largo del eje de la viga ya que este desplazamiento es causado por una deformación causada por fuerza axial.

Para aclarar esos conceptos, consideraremos algunos ejemplos, comenzando con la viga en la figura 2.6a. Aquí, el nodo en A sólo puede girar (despreciando la deformación axial), mientras que el nodo B está completamente restringido en su movimiento. Por tanto, la viga tiene solo un grado de libertad θ_A . La viga en la figura 2.6b, tiene nodos en A , B y C y cuatro grados de libertad designados por los desplazamientos rotacionales θ_A , θ_B , θ_C y por el desplazamiento vertical ΔC . Considere ahora en el marco en la figura 2.6c. Nuevamente, si se desprecia la deformación axial de los miembros, la carga ocasionará que en los miembros B y C giren y que esos nodos se desplacen horizontalmente una misma distancia. Por tanto, el marco tiene tres grados de libertad, θ_A , θ_B y ΔB . En resumen, especificar el número de grados de libertad no restringidos en la estructura es un primer paso necesario para aplicar el método de análisis de los desplazamientos. Con ello se identifica el número de incógnitas en el problema, con base en las hipótesis hechas respecto al comportamiento por deformación de la estructura. Además, una vez conocidos esos desplazamientos, la deformación de la estructura puede especificarse completamente y obtenerse la carga dentro de los miembros (Hibbeler , 2006).

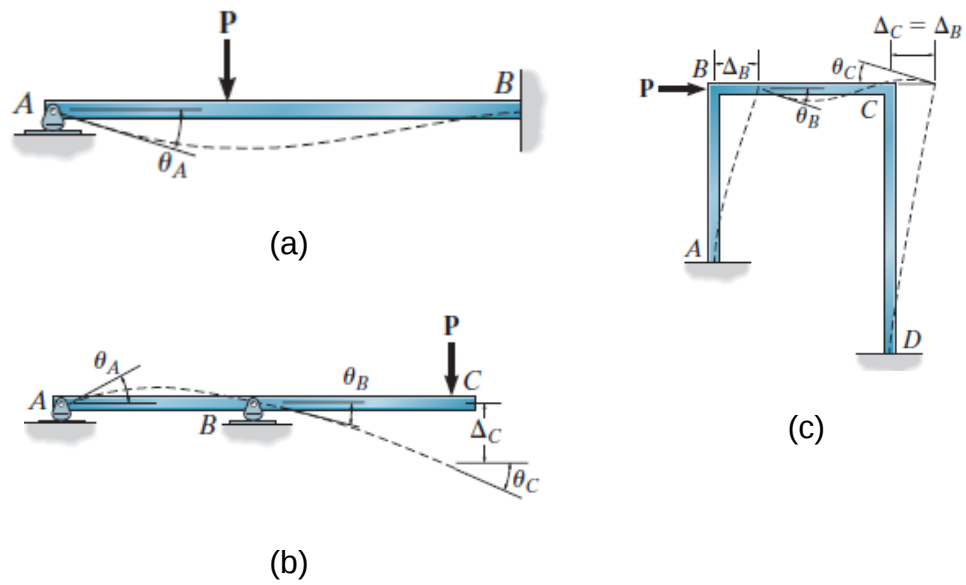


Figura 2.6. Procedimiento del análisis por el método de los desplazamientos
(Hibbeler, 2006).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La siguiente metodología fue llevada a cabo en los campos experimentales de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicada en el municipio de Texcoco, que se encuentra ubicado en la región oriente del Estado de México. Sus coordenadas geográficas son 19.30° N, 98.53° O. La altitud de la cabecera municipal es de 2250 msnm, su clima se considera templado semiseco, con una temperatura media anual de 15.9 °C y una precipitación media anual de 686 mm.

La caracterización de invernaderos realizada por Bastida (2002) tiene un enfoque meramente agronómico, por lo que se decidió realizar una caracterización de los invernaderos localizados en el Valle de México pero desde una perspectiva estructural, para lograr tener una idea de los diferentes tipos utilizados y el peso total de la estructura involucrado en cada uno de ellos, además de tener en cuenta algunas características estructurales como: dimensiones globales (largo, ancho y alto), forma y la dimensión de la sección transversal de los materiales utilizados en la construcción de estos invernaderos.

Se realizó una propuesta del dimensionamiento global apropiado. Posteriormente se realizó un completo y detallado diseño y análisis estructural de cada uno de los elementos (armaduras, marcos, arcos, vigas, columnas, tensores, etc) que conforman la estructura con un enfoque de optimización,

para luego hacer un análisis de cada uno de estos elementos por separado y después de toda la estructura, mediante el uso del software de análisis estructural SAP2000.

3.1. Caracterización estructural de los invernaderos

En una primera instancia se realizó una caracterización estructural de los invernaderos típicos ubicados en la zona centro de México, al ser una caracterización estructural, los parámetros más importantes a tomar en cuenta fueron:

- Las dimensiones globales (largo, ancho y alto) y separación entre columnas.
- La superficie cubierta.
- La forma.
- Las dimensiones de la sección transversal de los materiales utilizados en la estructura.
- Peso de la estructura por unidad de superficie.

Para esto, se llevó a cabo una fase de campo, donde se recabaron los datos anteriores. A continuación se presenta un ejemplo completo del proceso antes mencionado, desarrollado en el invernadero localizado en el campo agrícola San Ignacio de la Universidad Autónoma Chapingo.

3.1.1. Dimensiones globales

En la figura 2.1 se muestran las dimensiones globales del invernadero: el largo, el ancho y el alto, además se observa la separación entre columnas, que son características de suma importancia desde el punto de vista estructural.

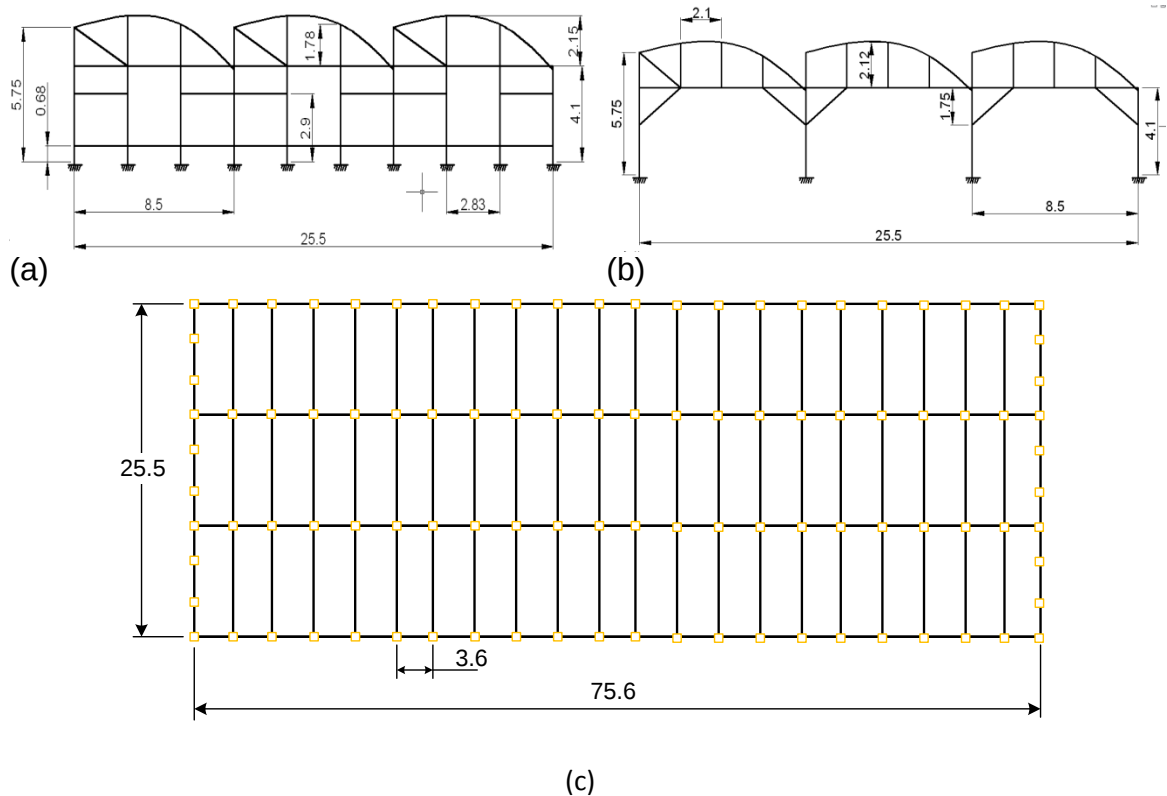


Figura 3.1. Diferentes vistas del invernadero, a) sección transversal cabecera, b) sección transversal interior y c) vista de planta. Acotaciones en m.

3.1.2. Superficie cubierta (S_c)

De las dimensiones globales largo y ancho, fácilmente se puede determinar la superficie cubierta, para el caso del invernadero en cuestión es de 1927.8 m^2 .

3.1.3. Forma

En las figuras 2.1 (a) y 2.1 (b) se puede observar que la forma adoptada por el invernadero es de diente de sierra con el techo curvo.

3.1.4. Dimensiones de la sección transversal de los materiales utilizados en la estructura

Todos los perfiles utilizados en los elementos estructurales del invernadero son de sección transversal cuadrada hueca calibre 14, es decir, son perfiles tubulares cuadrados.

Cuadro 3.1. Elementos que forman la estructura del invernadero

Elemento	Ancho de sección transversal [m]
Columnas laterales	0.0635
Columnas interiores centrales	0.0635
Columnas frontales largas	0.0508
Columnas frontales cortas	0.0508
Largueros laterales	0.0381
Largueros frontales	0.0381
Largueros de ventilas cenitales	0.0381
Corredera de ventilas cabeceras y laterales	0.0381
Tirantes de esquinas	0.0635
Tirantes en cruz en la 2 ^{da} columna	0.03175
Travesaños	0.03175
Tirantes diagonales de arcos	0.03175
Montantes largos de arcos	0.03175
Montantes cortos de arcos	0.03175
Refuerzo diagonal en el arco frontal	0.03175
Arco	0.0508
Refuerzos horizontales frontales	0.0381
Refuerzos horizontales diagonales frontales	0.0381
Correderas ventilas cenitales	0.0381
Soportes de canalones	0.03175
Canalones	Calibre 14
Tubos de cortinas paredes laterales	0.0254 (diámetro)
Tubos de cortinas paredes frontales	0.0254 (diámetro)
Tubos de cortinas ventilas cenitales	0.0254 (diámetro)
Caseta de entrada perfil	0.04445

3.1.5. Peso de la estructura por unidad de superficie.

Para llevar a cabo la caracterización desde el punto de vista estructural, se consideró un parámetro denominado peso de la estructura por unidad de superficie, para su cálculo es necesario tomar en cuenta las propiedades físicas del material con el que está fabricada la construcción del invernadero, así como el número de elementos que formarán parte de la estructura, dicha cantidad de elementos se encuentra en función de su arreglo y distribución.

Conociendo el número de piezas a utilizar se podrá aplicar la siguiente fórmula para calcular el peso de elementos del mismo tipo:

$$P_{elementos} = NE \cdot L \cdot P_e \quad (3.1)$$

Donde $P_{elementos}$ es el peso total de los elementos del mismo tipo medido en kgf; NE es número de elementos iguales; L es la longitud de cada elemento en m; y P_e es peso específico del material (dato del fabricante) en kg/m.

Cuadro 3.2. Pesos del acero galvanizado ZCM de sección transversal cuadrada.

Perfil	kgf/m
1" X 1"	1.447
1 1/4" X 1 1/4"	1.873
1 1/2" X 1 1/2"	2.234
1 3/4" X 1 3/4"	2.599
2" X 2"	2.961
2 1/2" X 2 1/2"	3.601

Fuente: Manual de construcción en acero, IMCA, A.C (1990).

Cuadro 3.3. Otros materiales utilizados en los invernaderos.

Material	kg/m
Tubo 1"	2.41
Canalón	4.200
Perfil de sujeción	0.5
Alambre de sujeción	0.050

Fuente: Manual de construcción en acero, IMCA, A.C (1990).

Cuadro 3.4. Peso de cada uno de los elementos estructurales y peso total de la estructura.

Piezas	Cant.	Dimens. (m)	Longitud Total (m)	Peso especifico del material [kgf/m]	Peso (kgf)
Columnas laterales 2.5"	44	4.1	180.4	3.601	649.62
Columnas interiores centrales 2.5"	44	5.75	253	3.601	911.05
Columnas frontales larga 2"	6	6.16	36.96	2.961	109.44
Columnas frontales corta 2"	6	5.75	34.5	2.961	102.15
Larguero lateral 1 1/2"	4	75.6	302.4	2.234	675.56
larguero frontal 1 1/2"	4	25.5	102	2.234	227.87
Larguero cenital 1 1/2"	3	75.6	226.8	2.234	506.67
Corredera ventila					
paredes frontal y lateral 1 1/2"	8	3.32	26.56	2.234	59.34
Refuerzo diagonales esquinas 2 1/2"	8	3.9	31.2	3.601	112.35
Refuerzo en cruz de 1 1/4"					
en 2da sección	16	4.5	72	1.873	134.86
Travesaños 1 1/4"	20	25.5	510	1.873	955.23
Tirante diagonal de arco 1 1/4"	140	2.75	385	1.873	721.10
Soporte largo de arco 1 ¼	120	2.1	252	1.873	472.00
Soporte corto de arco 1 ¼	60	1.43	85.8	1.873	160.70
Refuerzo diagonal frontal 1 1/4"	6	3.3	19.8	1.873	37.09
Arco 2"	66	9.25	610.5	2.961	1 807.69
Tirante horizontal de columna					
frontal 1 1/2	8	3.6	28.8	2.234	64.34
Tirante horiz. diag, de columna					
frontal 1 1/2"	12	4.58	54.96	2.234	122.78
Corredera ventila cenital 1 1/2"	6	1.7	10.2	2.234	22.79
Soporte canalón 1 ¼	63	1.8	113.4	1.873	212.40
Canalón	3	75.6	226.8	4200	952.56
Tubo cortina paredes laterales 1"					
diam	4	34	136	2.41	327.76
Tubo cortina paredes frontales 1"					
diam	2	20	40	2.41	96.40
Tubo cortina ventila cenital 1"					
diam	3	75.6	226.8	2.41	546.59
Caseta de entrada perfil de 1 3/4"	1	58.4	58.4	2.599	151.78
Perfil de sujeción paredes					
laterales	4	75.6	302.4	0.5	151.20
Perfil de sujeción paredes					
frontales	4	25.5	102	0.5	51.00
Perfil de sujeción ventila cenital	3	75.6	226.8	0.5	113.40
Alambre de sujeción	1	176.7	176.7	0.050	8.84
PESO TOTAL DEL INVERNADERO					10 464.5

Con el valor obtenido, se obtiene el peso de la estructura por unidad de superficie (ecuación 2.2).

$$P_u = \frac{P_t}{S} \quad (3.2)$$

Donde P_u es el peso de la estructura por unidad de superficie medido en kgf/m^2 ; P_t es el peso total del invernadero en kgf ; S_c es la superficie cubierta en m^2 .

De esta forma, para este ejemplo, resulta que el peso por unidad de superficie es $P_u = 5.43 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$.

El procedimiento de caracterización estructural mostrado en el ejemplo anterior se repitió para diferentes invernaderos de la zona centro de México.

3.2. Diseño estructural de invernaderos.

El diseño estructural de un invernadero comprende los cálculos de la resistencia, la rigidez y la estabilidad de los elementos estructurales aislados (tales como columnas, arcos, marcos y armaduras) y del propio invernadero como un todo. El diseño y cálculo de la estructura es de suma importancia ya que de un buen diseño estructural depende la seguridad, duración y resistencia de la estructura.

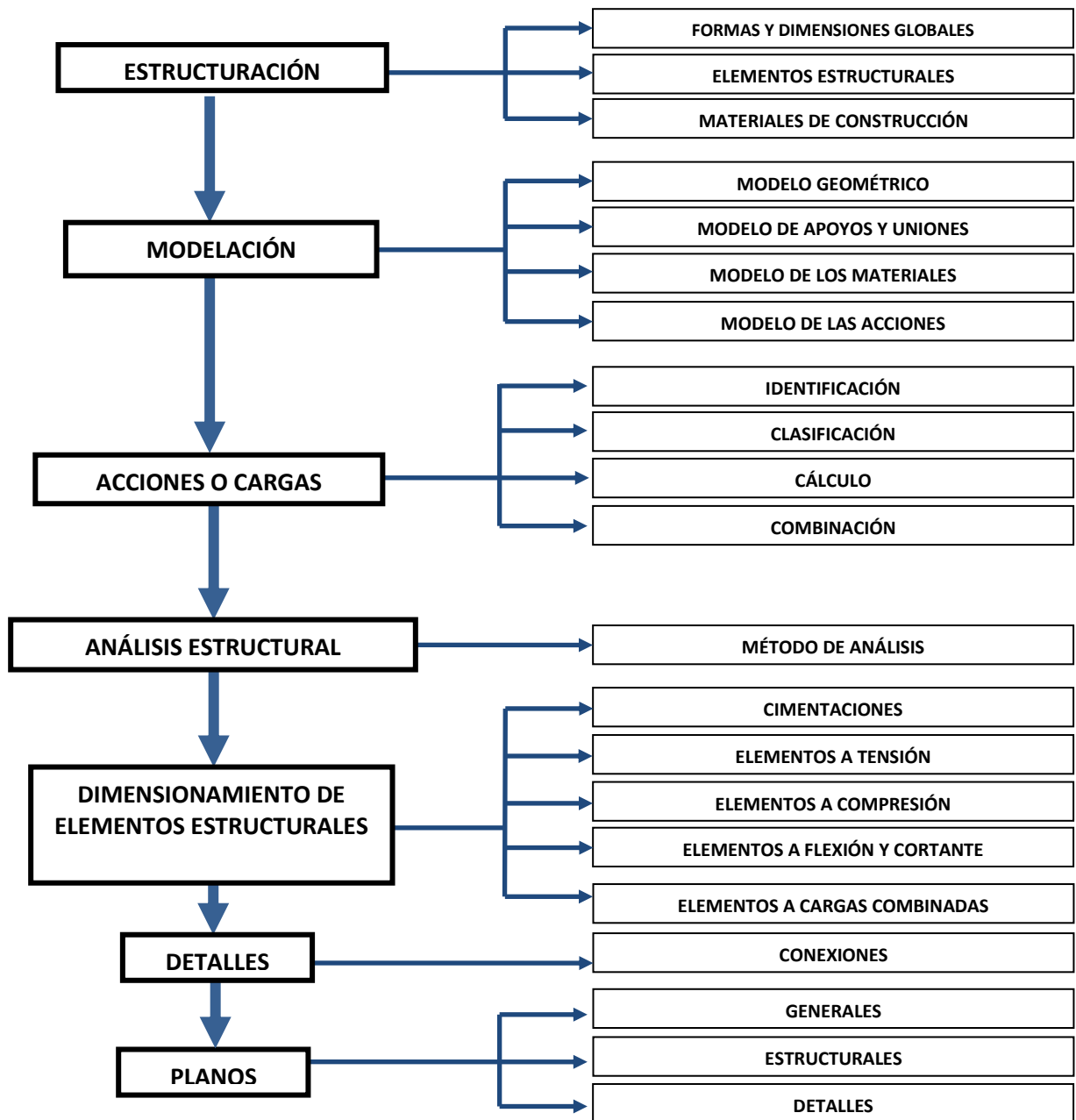


Figura 3.2. Metodología para el diseño estructural de invernaderos.

A continuación se describen las etapas de la metodología de diseño estructural de un invernadero.

3.2.1. Estructuración

La estructuración es la primera etapa del diseño estructural; representa el puente entre el diseño agronómico-funcional y el diseño estructural. En la estructuración se precisan los siguientes aspectos:

- a) Forma y dimensiones globales del o los invernaderos
- b) Selección de elementos estructurales a utilizar y su arreglo
- c) Selección de los materiales de construcción

- **Forma**

La forma de un invernadero queda definida por el tipo de elementos estructurales, las dimensiones de éstos y su arreglo o composición.

Los factores que determinan la forma de un invernadero son:

- Tamaño del invernadero (superficie de terreno cubierta)
- Clima
- Materiales de construcción
- Volumen de material de construcción requerido
- Facilidad de construcción
- Facilidad de colocación de los materiales de cubierta
- Ahorro energético
- Preferencias

De manera general, la forma de un invernadero puede ser curva o recta

- **Dimensiones globales**

Las dimensiones globales de la estructura de un invernadero son: el ***largo*** y ***ancho*** de la vista en planta, que determinan la ***superficie cubierta***; así como la ***altura*** o elevación de la sección transversal, y la ***separación*** entre elementos portantes (columnas, marcos, arcos, armaduras y largueros).

Las dimensiones globales, sobre todo el largo y ancho (superficie cubierta), se determinan de acuerdo con la ***magnitud del proyecto*** (volumen de producción y su programación) y los ***requerimientos agronómicos*** del cultivo (rendimiento, densidad de plantación y características físicas de las plantas); mientras que la altura queda definida por ***condiciones del clima*** y aspectos de control ambiental y ahorro energético.

$$A_r = A_c + A_o \quad (3.3)$$

Donde A_r es el área total requerida en planta medida en m^2 ; A_c es el área ocupada por el cultivo en m^2 ; y A_o es el área requerida para operaciones en m^2 .

Al estimar el área ocupada por el cultivo, deben considerarse diferentes aspectos agronómicos tales como la producción que se desee obtener, la densidad de población y los requerimientos de espacios del cultivo.

El área A_o , que se destina para fines de operación o manejo, puede llegar a ser de un 25 a 35 % de la superficie total cubierta por el invernadero.

El porcentaje de la superficie total del invernadero destinada para fines operativos, varía en función del arreglo que se establezca dentro del mismo, es decir, del tamaño, ubicación y orientación que se asigne a los pasillos y áreas operativas. Existen diferentes variantes de arreglos para los espacios operativos, sin embargo éste dependerá principalmente de las necesidades del cultivo, sobre todo de la interceptación de radiación solar por la vegetación.

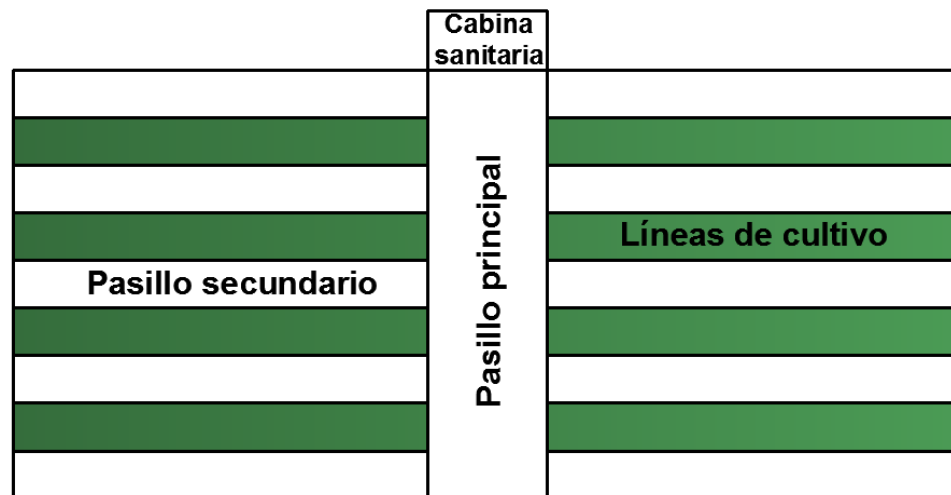


Figura 3.3. Ejemplo de la disposición de los pasillos en un invernadero.

Una vez que se calcula A_r , se decide si es conveniente la construcción de invernaderos **individuales** o **agrupados**, para cubrir el área requerida. Dicha decisión se toma a partir de analizar factores tales como:

- ✓ Ventilación
- ✓ Iluminación
- ✓ Aspectos constructivos
- ✓ Calefacción
- ✓ Economía
- ✓ Control del cultivo (plagas, luz, polinización, etc.)

Con respecto a la **altura**, que es otra de las dimensiones globales, se toman en cuenta los siguientes factores:

- ✓ Temperatura y humedad relativa
- ✓ Ventilación
- ✓ Patrón de crecimiento del cultivo

- **Elementos estructurales.**

Los elementos estructurales son piezas o componentes que tienen como función soportar y transmitir las acciones o cargas que actúan sobre la estructura, así como servir de soporte a los materiales de cubierta del invernadero.

Los elementos estructurales se caracterizan por la forma en que soportan y transmiten las fuerzas.

Se pueden resumir los elementos estructurales más importantes para la estructura de un invernadero en los siguientes:

1. Tensores
2. Columnas
3. Vigas
4. Armaduras
5. Arcos
6. Marcos

✓ **Tensores.**

Son elementos que trabajan a fuerzas de tensión. Este tipo de elementos es de amplio uso en la estructura de invernaderos.

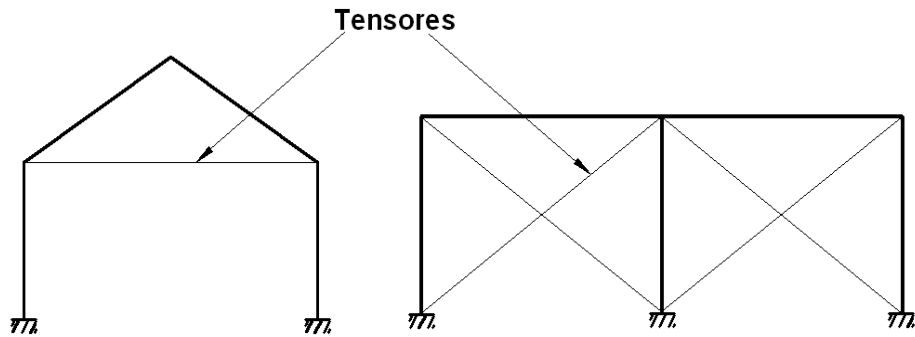


Figura 3.4. Ejemplos de tensores.

✓ **Columnas.**

Las columnas proporcionan estabilidad a la estructura total del invernadero; trabajan fundamentalmente a compresión.

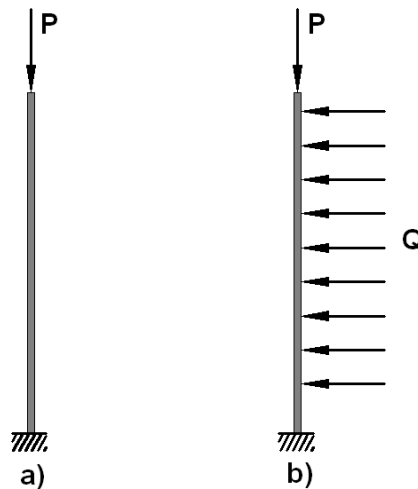


Figura 3.5. a) Columna empotrada sometida a compresión simple, b) Columna empotrada sometida a compresión y flexión.

✓ **Vigas.**

Las vigas son elementos estructurales que están sometidos fundamentalmente a flexión, bajo la acción de cargas perpendiculares a su eje.

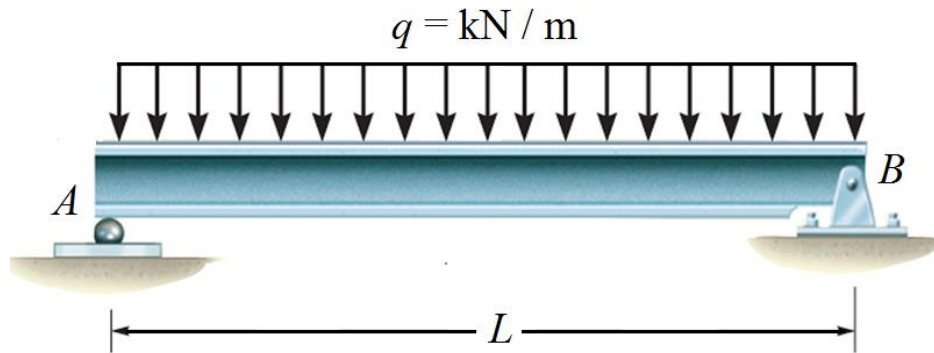


Figura 3.6. Viga simplemente apoyada y cargada por la fuerza distribuida q . (Hibbeler, 2011).

✓ **Armaduras.**

Las armaduras son elementos estructurales formados por barras unidas en sus extremos, de tal manera que se forma un conjunto de triángulos estables.

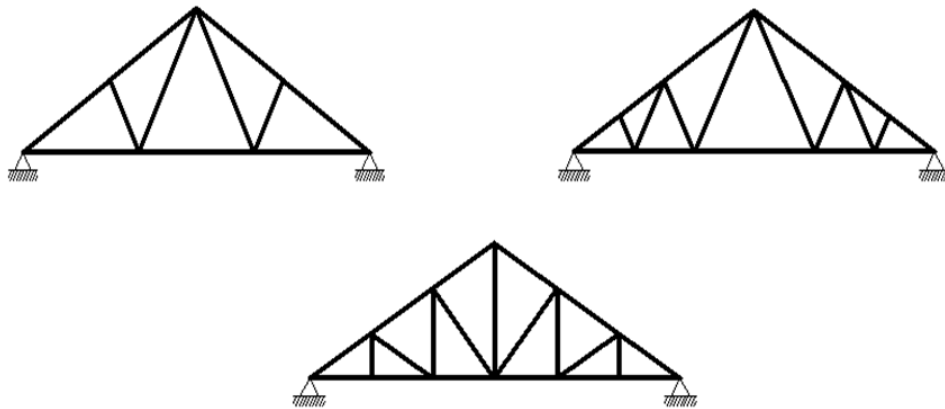


Figura 3.7. Armaduras típicas empleadas o adecuadas para su empleo en invernaderos.

✓ Arcos

Los arcos son elementos estructurales diseñados para soportar un sistema de cargas, contenidas en su plano, las cuales inducen fuerzas internas axiales de compresión.

Los invernaderos de formas curvas están contruidos con arcos, que pueden ser de una pieza, cuyos extremos van anclados al piso formando una semicircunferencia (tipo arco clásicos), o secciones de arcos que se unen a un poste en la parte central a diferentes alturas, dejando un claro para colocar ventilas cenitales (arco modificado).

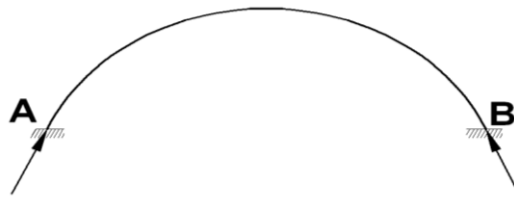


Figura 3.8. Arco donde se muestran las cargas de compresión generadas en sus extremos empotrados A y B.

✓ Marcos.

El marco es un elemento estructural formado por la combinación de una viga horizontal que forma el cabezal y las columnas laterales.

Comúnmente se busca que las uniones entre los diversos elementos que conforman un marco sean rígidas para desarrollar momentos flexionantes, lo cual proporciona continuidad a la estructura. Si la viga superior, en lugar de ser horizontal forma una doble pendiente, generalmente se le llama pórtico. En este sentido, los pórticos son más comúnmente elegidos para generar estructuras de

invernadero, que los propiamente llamados marcos, sobre todo para conformar el techo de toda la estructura, ya que permiten un mejor desalojo de agua y nieve.

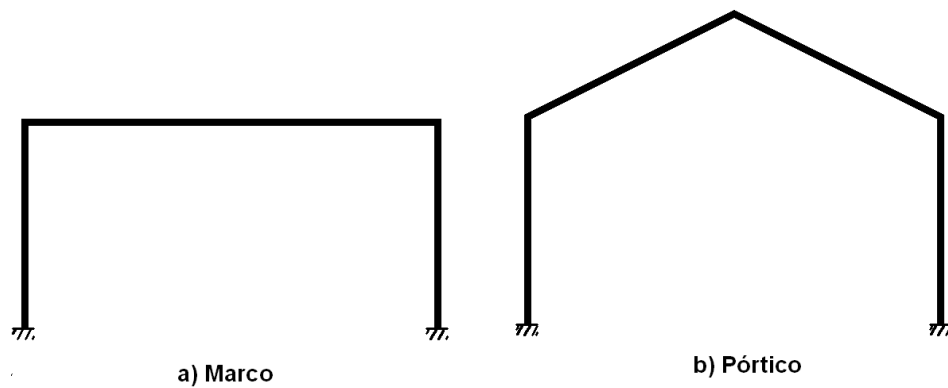


Figura 3.9. Forma geométrica de un marco (a) y un pórtico (b)

3.2.2. Modelación

Se refiere a la simplificación de la estructura para disponer de un modelo analítico o de cálculo, comprende los siguientes aspectos:

3.2.2.1. Modelación geométrica

En el plano:

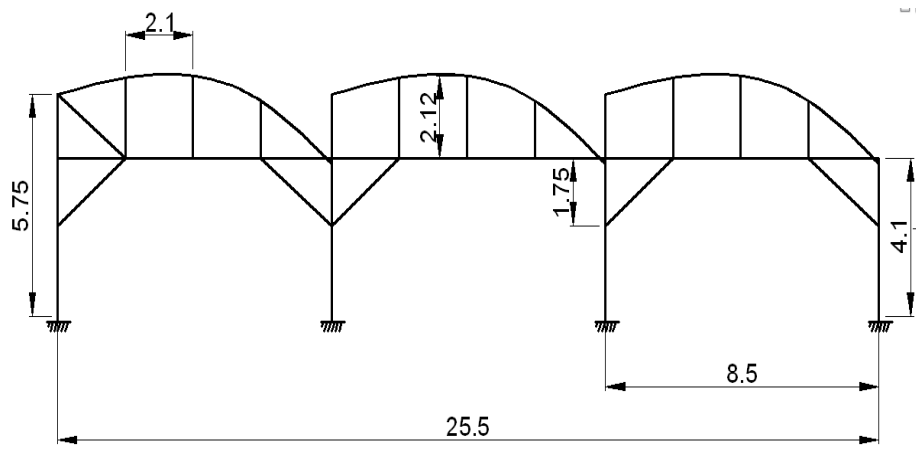


Figura 3.10. Modelo geométrico de una sección interior, acotaciones en m.

En el espacio o tridimensional, en este modelo no sólo se representan las dimensiones globales, sino también la distribución de los elementos estructurales en el espacio.

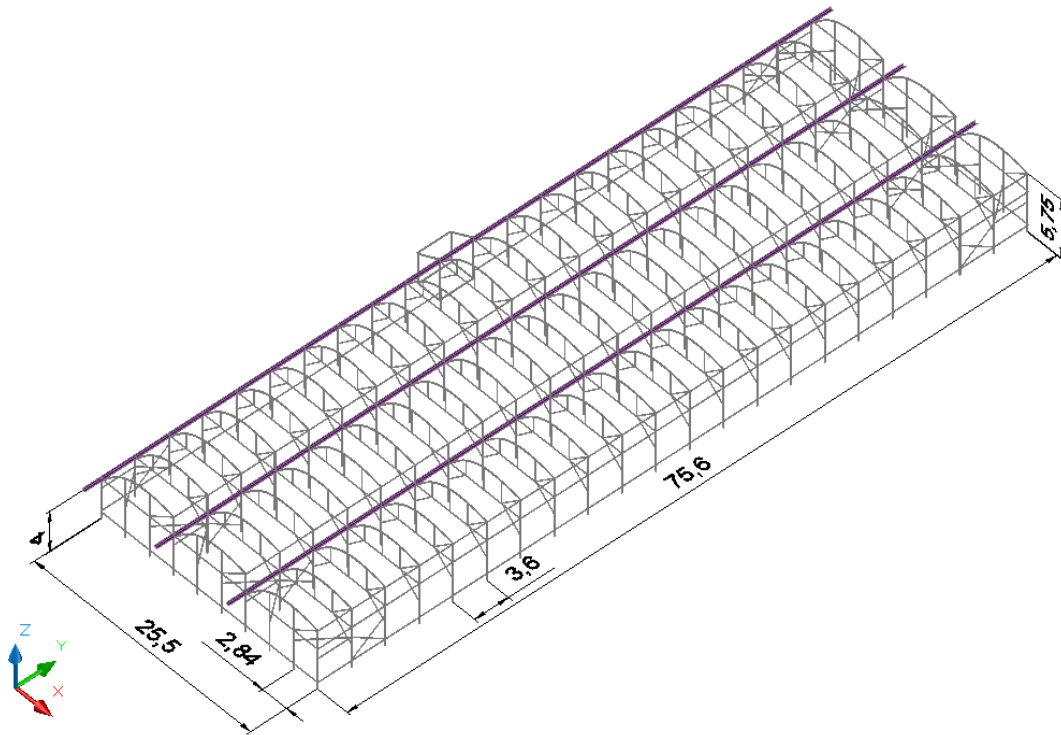


Figura 3.11. Modelación geométrica de un invernadero en el espacio.

3.2.2.2. Modelo de los materiales de construcción

La resistencia de un material depende de su capacidad para soportar una carga excesiva sin presentar deformación o falla. Esta propiedad es inherente al propio material y debe determinarse mediante la experimentación (Hibbeler, 2011). Una de las pruebas más utilizada para modelar un material es la prueba a tensión, mediante la cual se obtiene un esquema denominado diagrama esfuerzo – deformación que se muestra en la figura 3.12, y del cual se obtienen las propiedades mecánicas más importantes de cualquier material

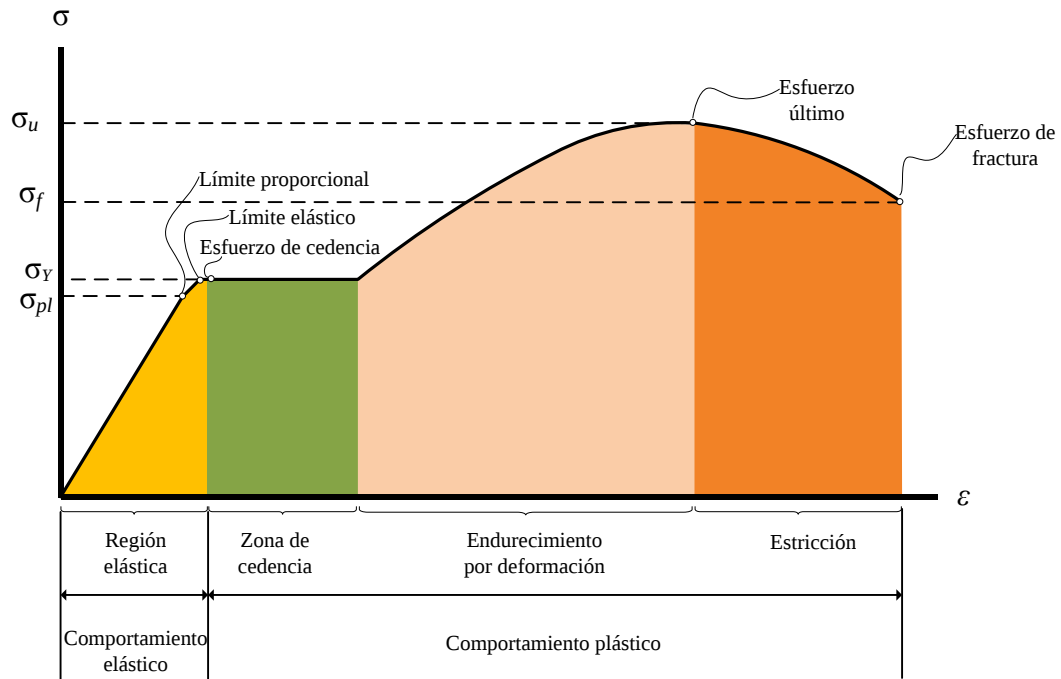


Figura 3.12. Comportamiento del material de construcción (Hibbeler, 2011).

Cuadro 3.5. Propiedades mecánicas de acero galvanizado.

Propiedad	Valor	Unidad
Módulo de elasticidad	200	GPa
Razón de Poisson	0.29	Adimensional
Densidad	0.00787	g/mm^3
Resistencia de Fluencia	204	MPa

3.2.2.3. Modelación de las condiciones de apoyo

Todo lo que restringe los desplazamientos de un cuerpo dado en el espacio se llama apoyo. La fuerza con la cual el apoyo dado actúa sobre un cuerpo, restringiendo uno u otro de sus desplazamientos, se llama fuerza de reacción de apoyo o, simplemente, reacción. En la figura 3.13 se muestra un ejemplo de la modelación de los apoyos en un marco empotrado en A y B.

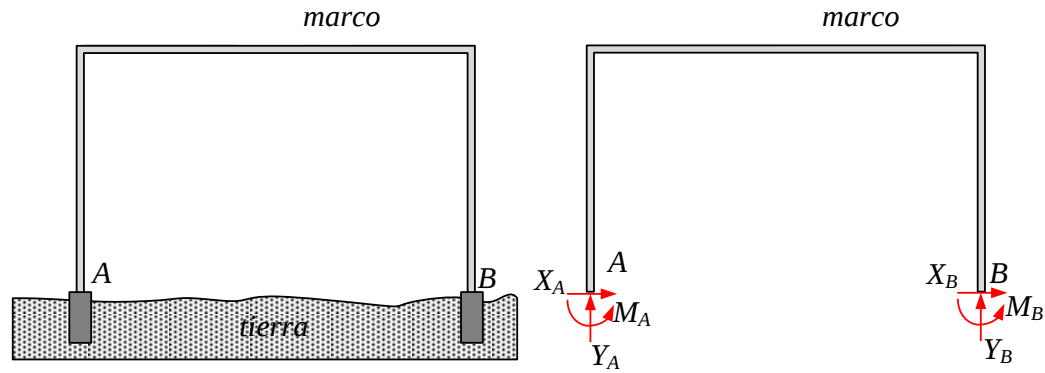


Figura 3.13. Modelación de los apoyos de un marco estructural

3.2.2.4. Modelación de las cargas o acciones.

De forma simple se puede decir que las acciones se modelan como cargas concentradas, cargas distribuidas, cargas estáticas, cargas dinámicas. Para evaluar el efecto de las acciones sobre la estructura se requiere modelar dichas acciones como fuerzas concentradas, lineales o uniformemente distribuidas. En la figura 3.14 se muestran la modelación de las cargas que actúan sobre una columna, w es la carga por viento, la cual se modela como una carga distribuida uniforme, mientras que la P que es concentrada se debe a la carga por lluvia

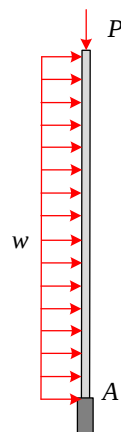


Figura 3.14. Modelación de las cargas P y w .

3.2.3. Acciones o cargas

3.2.3.1 Identificación de las acciones o cargas de diseño

Acción o carga es todo agente externo a la estructura, inherente a ella o a su funcionamiento, cuyos efectos pueden hacer que la estructura alcance un estado límite (Nelson, *et al.*, 1988).

La identificación de las acciones consiste en señalar el tipo de acción, su número y su causa.

3.2.3.2 Clasificación de las acciones o cargas de diseño.

Durante su vida útil, una estructura, es sometida a diferentes tipos de cargas; existen cargas que se mantienen constantes en el tiempo, otras que aparecen por periodos cortos y algunas que aparecen de manera accidental.

Las cargas sobre la estructura de un invernadero se clasifican de acuerdo al tiempo en que actúan sobre ella.

- a) Carga muerta.
- b) Carga viva.
- c) Carga accidental.

Carga muerta.

Actúan de manera permanente en la estructura y no varían su intensidad ni su punto de aplicación con el tiempo. Dentro de las cargas muertas se incluyen las siguientes:

- El peso de la estructura.
- El peso de la cubierta.

Carga viva.

Son cargas temporales producidas por el uso o funcionamiento del invernadero.

Dentro de ellas se distinguen:

- Carga de cultivo
- Carga de mantenimiento.
- Peso de los equipos incorporados de forma constante: calefacción, tuberías de riego, mallas de sombreo, alumbrado, enfriamiento, generadores de CO₂, entre otros.

Carga accidental.

Estas cargas actúan de manera impredecible en el tiempo y no se deben en modo alguno al funcionamiento normal del invernadero; su característica fundamental es que pueden alcanzar valores elevados, durante periodos de tiempo muy cortos a lo largo de la vida útil de la estructura. Aquí se incluyen acciones excepcionales como vientos, lluvias y otros fenómenos naturales esporádicos (nieve o granizo).

El viento es una acción dinámica que al actuar sobre un elemento produce una respuesta variable en el tiempo. Para el cálculo se considera la acción del viento como una presión o depresión estática.

Normalmente, es suficiente estudiar la acción del viento según dos direcciones coincidentes con los ejes principales de la estructura y en ambos sentidos.

3.2.3.3. Cálculo de las acciones o cargas

✓ Carga muerta D

Para conocer esta carga es necesario calcular el peso de los elementos que conforman la cubierta del invernadero, después se divide entre el área que cubre la estructura. Un invernadero debe ser diseñado para soportar una carga muerta de 10 kgf/m^2 (ASAE, 2005).

✓ Carga viva L

En estructuras que cuentan con techos planos, inclinados y curvos como es el caso de los invernaderos, se permite diseñarlos por una carga viva de 45 kgf/m^2 (ASAE, 2005).

✓ Carga accidental

En este tipo de cargas destacan principalmente las cargas por viento, lluvia y granizo.

- **Carga por lluvia R.** Estas cargas incidirán sobre los sistemas de drenaje los cuales al ser parte de la estructura actuarán sobre las columnas que los sostienen, se debe diseñar tomando en cuenta una carga de lluvia de 2 kg/m^2 (ASAE, 2005).
- **Cargas por viento W.** Estas cargas dependen de la ubicación de la estructura, altura, del área expuesta y de la posición. Deberán revisarse la seguridad de la estructura principal ante el efecto de las fuerzas que se generan por las presiones (empujes o succiones) producidas por el viento sobre las superficies de la construcción expuestas al mismo y que son transmitidas al sistema estructural (García y Sánchez ,2012).

1. La velocidad del viento básica V debe determinarse de la tabla de velocidades regionales de la CFE. De acuerdo para la zona centro de México se toma una $V = 80 \text{ km/h} = 22.2 \text{ m/s}$.
2. El factor de direccionalidad de viento k_d debe de ser 0.85
3. Al tratarse de una construcción con techo arqueado se toma $k_d = 0.85$.
4. La categoría de ocupación del invernadero se denomina Tipo 1, al tratarse de una instalación agrícola que representa un bajo nivel de peligro a los ocupantes en caso de falla.
5. El factor de importancia I debe ser determinado de acuerdo con la categoría determinada, en este caso se toma como 0.87.
6. Se toma una categoría de exposición tipo C al tratarse de una estructura que se localizara en áreas abiertas con obstrucciones dispersas de alturas menores de 9.1 m.
7. Basándose en la categoría de exposición determinada anteriormente, un coeficiente de exposición de presión por velocidad $K_z = 0.94$ debido a que será una estructura con una altura sobre el nivel del suelo menor a 7.6 m.
8. Los efectos del incremento de velocidad del viento en colinas, cerros y acantilados apartados constituyendo cambios abruptos en la topografía general, localizados en cualquier categoría de exposición, deben de ser incluidos en el diseño cuando edificios y otras condiciones del sitio y la colocación de las estructuras cumplan todas las condiciones siguientes.

Como las condiciones y localizaciones de un invernadero no reúne las condiciones anteriormente especificadas entonces el factor topográfico

$$k_{zt} = 1.0$$

9. Clasificaciones de cercado. Con el propósito de determinar los coeficientes de presión interna, los invernaderos deben de clasificarse como cerrados ó parcialmente cerrados.

10. Presión de velocidad. La presión de velocidad, q_h , evaluada a la altura media del techo h debe calcularse por la ecuación 3.4

$$q_h = 0.613 K_z k_{zt} k_d V^2 I \quad (3.4)$$

Donde q_h es la presión de velocidad medida en N/m^2 ; K_z es el coeficiente de exposición de presión de velocidad; k_{zt} es el factor topográfico asumiendo que no existen efectos de incremento de velocidad; k_d es el factor de direccionalidad del viento; V = Velocidad del viento básica en m/s; e I es el factor de importancia.

11. Coeficientes de presión interna. Los coeficientes de presión interna (GC_{pi}) se deberán determinar de la cuadro 3.6, basándose en la clasificación de cercado determinada anteriormente. Los signos + y – significan presiones y succiones.

Cuadro 3.6. Valores del coeficiente de presión interna.

Clasificación de cercado	GC_{pi}
Parcialmente cerrado	+0.55
	-0.55
Cerrado	+0.18
	-0.18

Fuente: Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por viento, CFE (1969)

12. Coeficientes de presión externa.

Los coeficientes de presión externa y el efecto de ráfaga combinados, GC_{pf} , se dan para edificios de poca altura en la figura 3.15 y no deben de separarse cada uno de los valores.

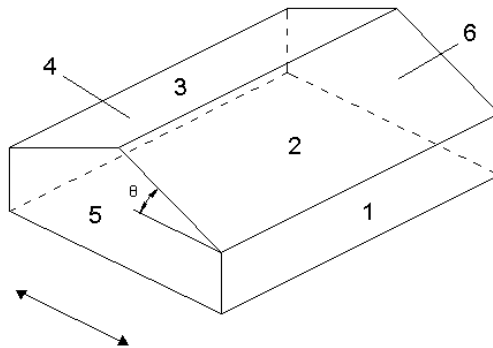


Figura 3.15. Dirección del sistema de fuerzas por viento (CFE, 1981).

Cuadro 3.7. Valores del coeficiente de presión externa.

Ángulo del techo θ (grados)	Superficie del edificio					
	1	2	3	4	5	6
0-5	0.40	-0.69	-0.37	-0.29	-0.45	-0.45
20	0.53	-0.69	-0.48	-0.43	-0.45	-0.45
30-45	0.56	0.21	-0.43	-0.37	-0.45	-0.45
90	0.56	0.56	-0.37	-0.37	-0.45	-0.45

Fuente: Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por viento, CFE (1981)

13. Cargas de diseño por viento en construcciones cerradas y parcialmente cerradas, bajo de condición de construcción de poca altura.

$$p = q_h[(GC_{pf}) - (GC_{pi})] \quad (3.5)$$

Donde p es la carga de diseño por viento en N/m^2 ; GC_{pf} es coeficientes de presión externa; y GC_{pi} es el coeficientes de presión interna.

Se determinan las presiones de viento en dirección transversal, deseándose construir el invernadero en esta dirección para su apropiada ventilación cenital y se establece cuales cargas por viento usar (cuales gobiernan) en las combinaciones de carga, las presiones negativas indican succiones. Para un velocidad de viento de 100 km/h se toma la carga lateral en la superficie 1 y 4 de 1.25 kgf/m^2 y en las caras 2 y 3 en 1.15 kgf/m^2 .

Deben de identificarse las cargas críticas para cada caso además de que deben de determinarse los valores característicos de los efectos de cada una las acciones. Debido a que se trata de una construcción ligera de un solo piso, no se toma en cuenta los valores de nieve, sismo ni de empujes de suelo.

3.2.3.4. Combinación de las acciones o cargas.

Reglas de combinación de las acciones (Nelson, *et al.*,1988).

$$1.4D$$

$$1.2D + 0.5(L \text{ ó } R)$$

$$1.2D + 1.6(L \text{ ó } R) + 0.8W$$

$$1.2D + 1.6W + 0.5(L \text{ ó } R)$$

$$1.2D$$

$$0.9D + 1.6W$$

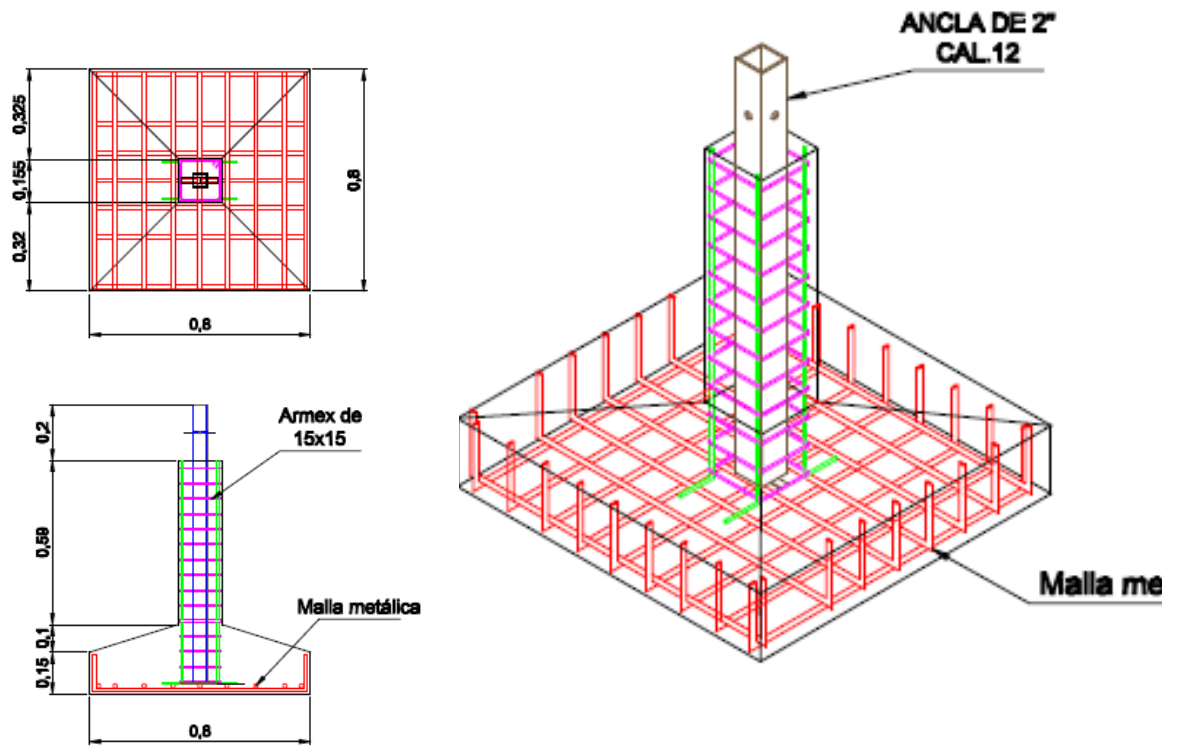
3.2.4. Dimensionamiento de elementos estructurales

3.2.4.1. Cimentaciones

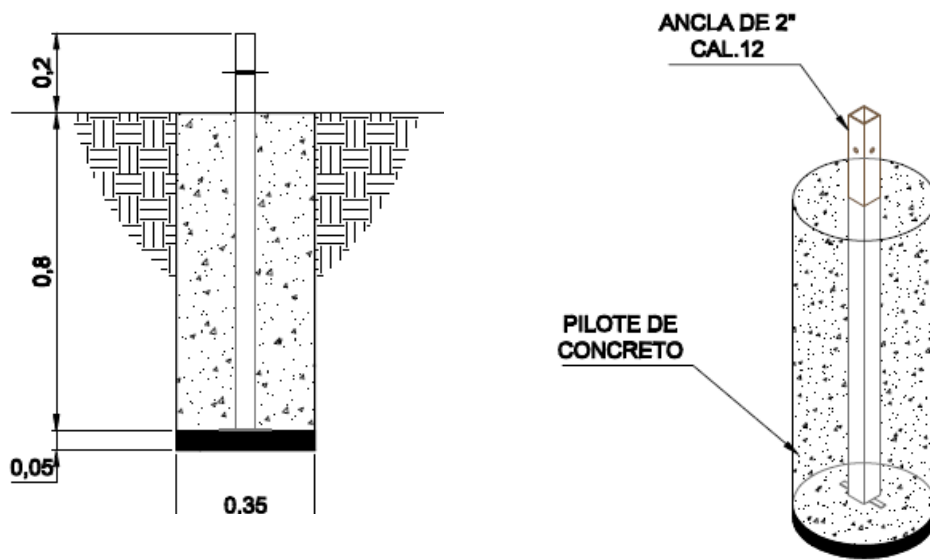
Es la base física sobre la cual se erige toda la estructura del invernadero y se requiere fundamentalmente para distribuir las cargas concentradas sobre las columnas de la estructura, y de esta manera distribuir dichas cargas de manera uniforme sobre el piso o suelo que soporta la estructura. Podemos resumir las funciones de la cimentación como sigue:

- Prevenir o evitar una excesiva concentración de cargas mediante la distribución de éstas sobre áreas más grandes que las columnas o los muros de soporte.
- Evitar concentraciones irregulares de esfuerzos a lo largo de algunas partes de la estructura, para lo cual los cimientos uniformizan o reducen el empuje del suelo bajo los muros o columnas del invernadero.
- Proporcionar un soporte lateral para los postes y columnas de la estructura, es decir, contrarrestar cargas laterales sobre la estructura.
- Prevenir levantamientos o dislocaciones de la estructura debidos a la adherencia del suelo y de la acción de hielo y nieve.
- Mantener la humedad fuera de la construcción.

Básicamente existen dos tipos de cimentación: muros de soporte continuo y columnas individuales, estas últimas son las más comunes (ASAE, 2005).



(a)



(b)

Figura 3.16. Tipos de cimentaciones.

3.2.4.2. Elementos a tensión.

Al diseñar una estructura, se deben determinar las propiedades de la estructura a fin de que soporte las cargas y cumpla sus funciones previstas. El diseño de elementos a tensión es el diseño estructural en su forma más elemental, ya que el proceso de diseño es muy directo, si se conocen las cargas que se van a transmitir y los esfuerzos permisibles de los materiales, se pueden calcular las áreas de sección transversal necesarias de los elementos a partir de la relación del esfuerzo normal (ecuación 3.6).

$$\sigma_{perm} = \frac{N}{A_{req}} \quad (3.6)$$

Donde σ_{perm} es el esfuerzo normal permisible, propio del material a utilizar medido en Pa; N es la fuerza normal interna del elemento a tensión en N y A_{req} es el área requerida de la sección transversal del elemento estructural en m².

Los elementos estructurales que comúnmente se encuentran en un invernadero sometidos a cargas de tensión son los tensores, los cables de tutoreo y los elementos a tensión que conforman una armadura.

3.2.4.3. Elementos a compresión (columnas).

Las columnas son los miembros estructuras largos y esbeltos sometidos a cargas axiales de compresión, y donde la deflexión que sucede al someterlos a dicha carga se denomina pandeo.

Con bastante frecuencia, el pandeo de una columna puede causar una falla repentina y dramática de una estructura o mecanismo, y en consecuencia se

debe poner atención especial al diseño de columnas, para que puedan soportar con seguridad, sin pandearse, las cargas que se pretende (Ugural, 2008).

La fórmula que se utiliza, se deduce a partir de la ecuación de Euler, y es:

$$r = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{E}} \quad (3.7)$$

Donde r es el radio de giro más pequeño de la columna, determinado a partir de $r = \sqrt{I/A}$, donde I es el menor momento de inercia del área de la sección transversal A de la columna, medido en m^4 ; L es la longitud de la columna sin soporte, cuyos extremos están articulados, también medido en m ; σ_{cr} es el esfuerzo crítico, que es un esfuerzo normal en la columna justo antes de que ésta se pandee. Este esfuerzo es un esfuerzo elástico y por lo tanto $\sigma_{cr} \leq \sigma_Y$ medido en Pa ; y E es el módulo de elasticidad del material en Pa .

A las formas y tamaños de secciones transversales estándares los fabricantes y comerciantes las ordenan en catálogos, y el parámetro de selección de un perfil que se utilizará como columna será precisamente el radio de giro, calculado con la ecuación 3.7 y seleccionado de la tabla del anexo A.

3.2.4.4. Elementos a flexión y cortante.

Los elementos estructurales que se diseñan por flexión y cortante son las vigas, el proceso de diseño de una viga requiere que se consideren muchos factores, incluyendo el tipo de estructura, los materiales que se emplearán, las cargas que se soportarán, las condiciones ambientales que se tendrán y los costos por pagar. Sin embargo, desde el punto de vista de la resistencia, a final la tarea se

reduce a seleccionar la forma y el tamaño de la viga de manera que los esfuerzos reales en ésta no excedan los esfuerzos permisibles para el material (Gere and Goodno, 2009).

- **Diseño de vigas por flexión**

Al someter una viga a una carga P , perpendicular a su eje longitudinal, ésta se flexiona, apareciendo dos zonas claramente identificadas, la zona de tensión y la zona de compresión (figura 3.16), separadas por el eje neutro, el cual es el eje que une todos los puntos en donde se localiza el centroide de la sección transversal a lo largo de la viga.

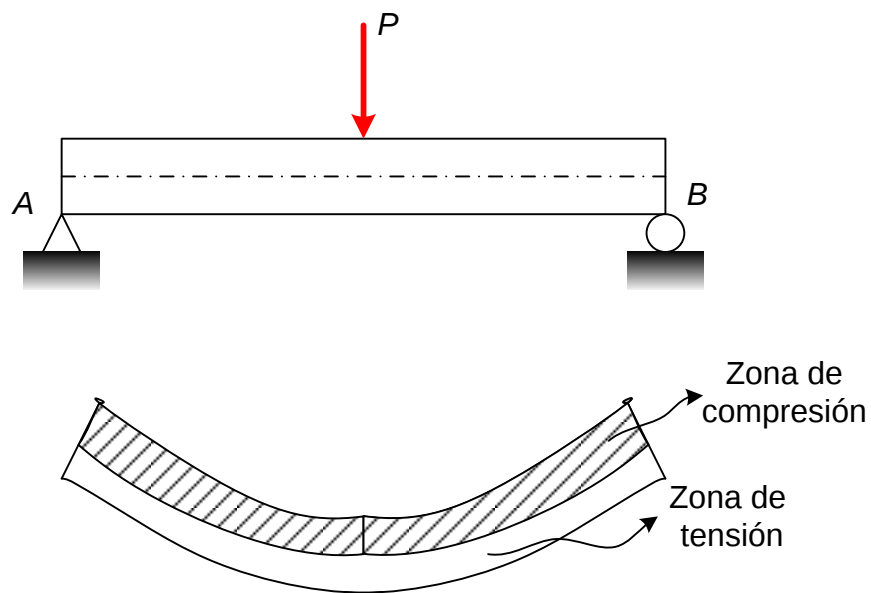


Figura 3.17. Comportamiento de una viga sometida a flexión.

Una forma de diseñar este tipo de elementos a flexión es utilizando precisamente la fórmula de la flexión:

$$\sigma_{perm} = \frac{M_{m\acute{a}x} \cdot c}{I} \quad (3.8)$$

Donde σ_{perm} es el esfuerzo normal permisible en Pa; $M_{m\acute{a}x}$ es el momento flexionante interno máximo que actúa en la sección transversal en N·m; I es el momento de inercia de la sección transversal calculado respecto al eje neutro en m⁴ y c es la distancia perpendicular del eje neutro al punto más alejado de este eje en m.

De forma práctica, regularmente la fórmula de la flexión adopta la forma siguiente:

$$S_{req} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{\sigma_{perm}} \quad (3.9)$$

Donde a S_{req} se le conoce como módulo de sección requerido en m³;

Puesto que el esfuerzo normal permisible se basa en las propiedades del material y el factor de seguridad deseado y el momento máximo depende de la condición de carga, el módulo de sección depende únicamente de la geometría de la sección transversal, es decir, de su forma y tamaño.

Ahora el parámetro de selección de un perfil que se utilizará como viga al entrar a uno de catálogos de fabricantes y comerciantes será precisamente el módulo de sección mostrado en la anexo A.

- **Diseño de vigas por cortante**

A pesar de que el momento flexionante M es la fuerza interna que domina el diseño de las vigas, pero puede existir el caso en que la fuerza cortante V sea

crítica, por lo que siempre es importante analizar también el efecto de los esfuerzos cortantes (Popov, 1998).

Para calcular los esfuerzos cortantes, es importante ciertos parámetros geométricos de la sección transversal de la viga, para su mejor entendimiento éstos se muestran en la figura 3.18.

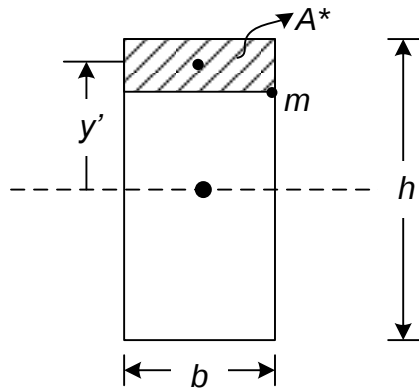


Figura 3.18. Parámetros geométricos para aplicar la fórmula del cortante

La fórmula del cortante:

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} \quad (3.10)$$

donde τ es el esfuerzo cortante en la sección transversal de una viga en Pa; V es la fuerza cortante interna en N; Q es el momento estático de A^* que se localiza por encima del punto de interés m ; I es el momento de inercia centroidal de la sección medido en m^4 ; y b es el ancho de la sección transversal a la altura del punto de interés m .

Algunos ejemplos de los elementos estructurales localizados en el invernadero que pueden ser diseñados con base en la fórmula de la flexión y la fórmula del cortante son los largueros transversales, las vigas de tutoreo, etc.

3.2.5. Análisis estructural basado en el software SAP2000

Enseguida se mostrará la metodología a seguir para realizar el análisis estructural basado en el software SAP2000. En primera instancia se eligen las unidades con las que se trabajará. Normalmente se utilizan las unidades newton, metro y grados Celsius (N, m, C); esto se realiza en la parte inferior derecha de la ventana (figura 3.19).

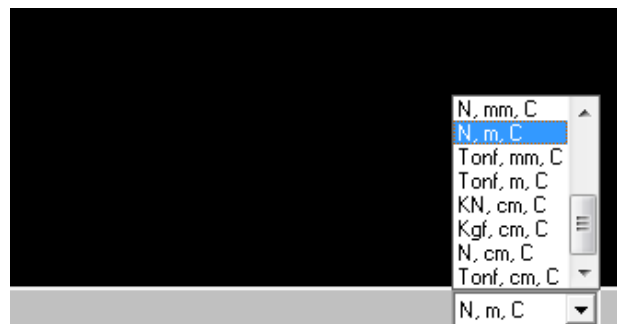


Figura 3.19. Elección de unidades en el software SAP2000

- **Modelación geométrica**

Se elige *new model* en el menú file, y dentro de las opciones se opta por la *grid only*, ya que este es el modelo más adecuado para estructuras como las que conforman un invernadero (figura 3.20).

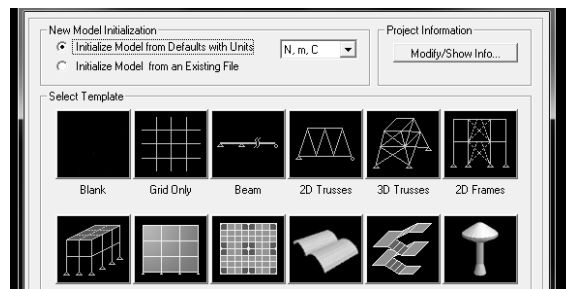


Figura 3.20. Elección de un nuevo modelo de trabajo.

Posteriormente en la siguiente ventana, se introduce el número de líneas (grids), que se quiere en cada uno de los ejes (x, y, z) y el espaciamiento entre éstas (figura 3.21). Los grids son solamente referencias, sobre las cuales se pueden trazar las líneas de trabajo, para generar el modelo del invernadero.

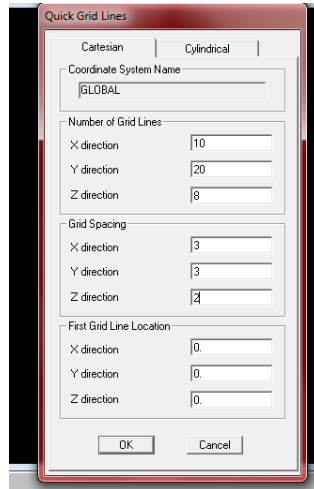


Figura 3.21. Especificación del número de líneas en cada eje.

Para empezar a dibujar una línea, se elige el comando *line* y se empieza a trazar sobre cada grid, dando click donde se desea que inicie y finalice respectivamente (figura 3.22), cada línea representará un elemento estructural.

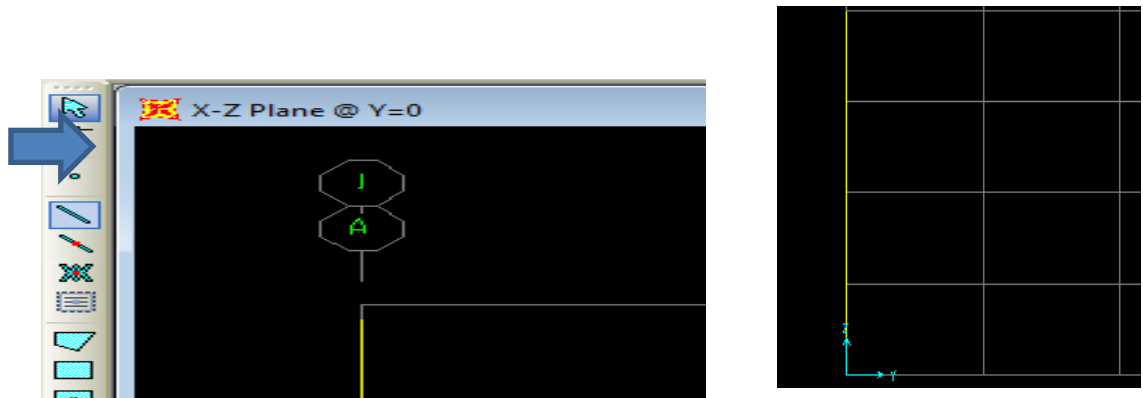


Figura 3.22. Elección del comando line y trazo en un grid.

Para dibujar una línea curva se llevan los siguientes pasos, se traza una línea recta, se selecciona y se va al botón *edit*, donde se elige la opción *edit line*; posteriormente, la opción *edit curved frame geometry* (figura 3.23).

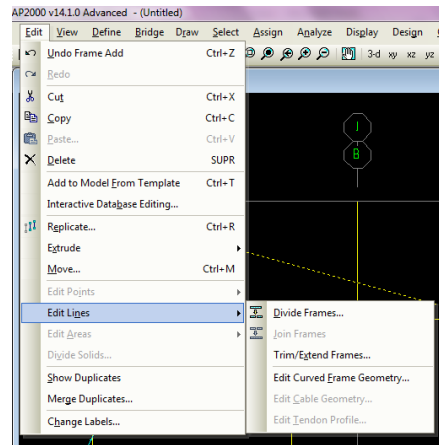


Figura 3.23. Edición de una línea curva

Al dar click en *edit curved frame geometry* aparece la siguiente ventana (figura 3.24), donde se selecciona la opción *curved frame*, se elige *parabolic 3rd point coords* y finalmente se tiene que dar de alta las coordenadas del tercer punto que se quiere que toque la curva en la opción *3rd point*.

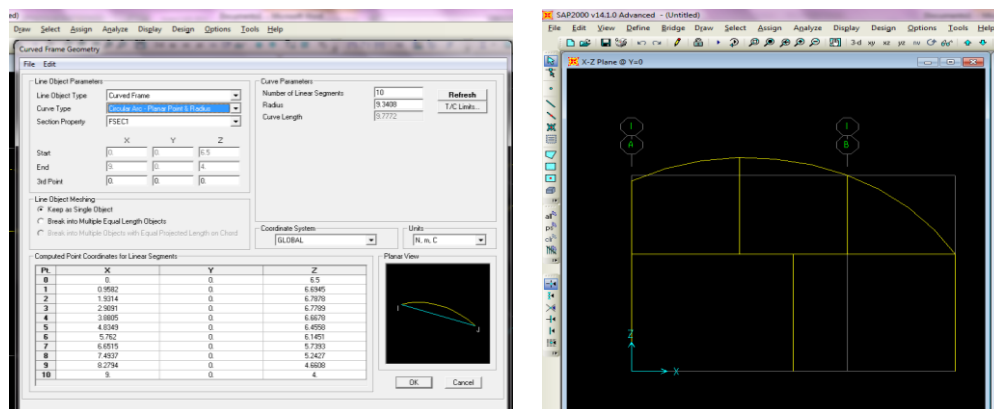


Figura 3.24. Datos para editar una línea curva.

- **Modelación del material de construcción**

Una manera fácil para terminar el modelo es dar de alta antes las características de los materiales, ya que con esto al dibujar una línea se puede asignar rápidamente el material del cual será construido. Para dar de alta las características del material se tiene que ir al botón *define* y dar click en la opción *materials*, con lo cual aparece la siguiente ventana.

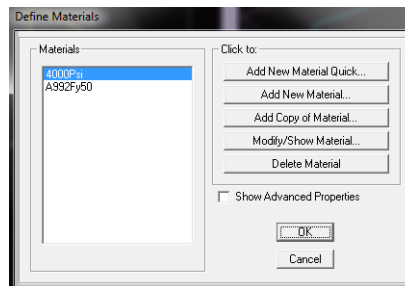


Figura 3.25. Definición de un nuevo material.

Al abrirse esta venta se da click en *add new material*, con lo cual se abre la ventana que muestra la figura 3.26, donde se introducen las propiedades mecánicas del material, que son el peso por unidad de volumen, la relación de Poisson (ν), el módulo de elasticidad (E) y el límite elástico (f_y).

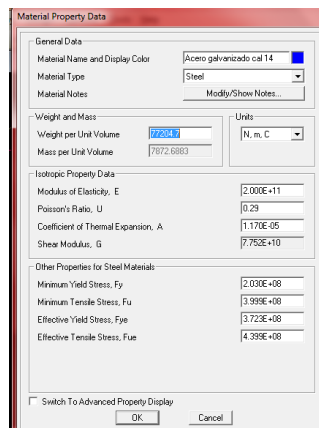


Figura 3.26. Asignación de las propiedades del material.

Después de asignar el material se asignan las características de cada sección transversal. Para hacer esto se va al botón *define* y después a la opción *section properties* y finalmente se da click en la opción *frame sections* (figura 3.27).

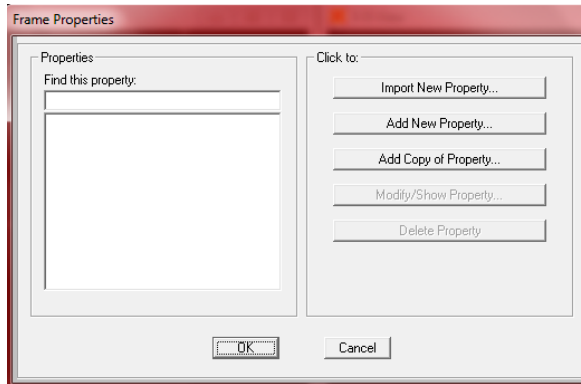


Figura 3.27. Agregar las propiedades de la sección transversal de un material.

Se le da click en la opción *add new property*, para que aparezca la ventana donde se tiene que elegir la opción deseada, normalmente para el caso de los invernaderos se elige *tube*,

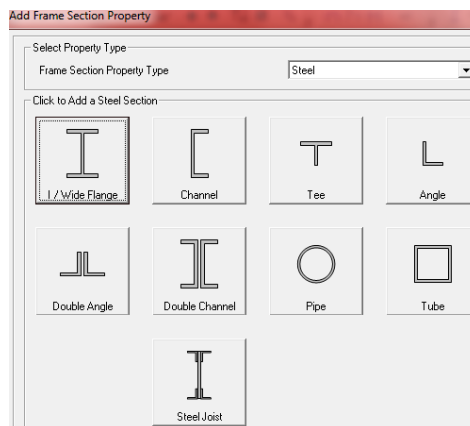


Figura 3.28. Selección de la sección transversal.

Al seleccionar la opción *tube* finalmente aparece la siguiente ventana donde se deben introducir las características de cada sección transversal de PTR (figura 3.29).

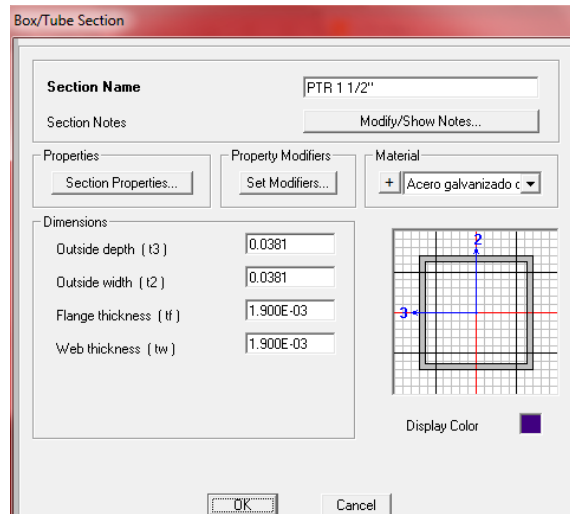


Figura 3.29. Definición de características de cada sección transversal de PTR.

Posteriormente se procede a realizar el modelado geométrico con llos estructurales que se posee, para llegar a obtener un modelo geométrico en el espacio (figura 3.30).

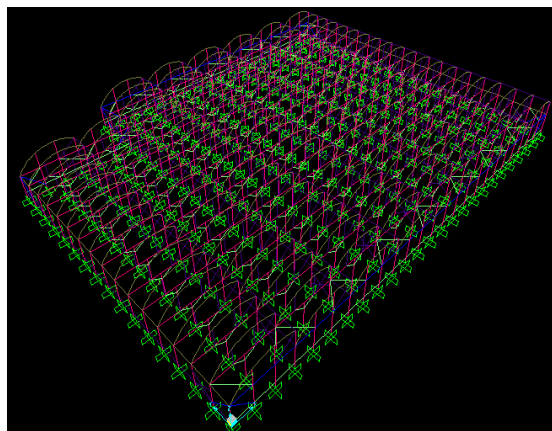


Figura 3.30. Ejemplo de modelo geométrico en 3D de un invernadero.

✓ **Modelación de las acciones cargas.**

Al tener finalizado el modelo del invernadero, con todas las medidas definidas, lo que prosigue es asignar las cargas, que deben haber sido previamente calculadas.

✓ **Carga ejercida por el peso de la estructura**

El SAP2000, calcula fácilmente la carga por la estructura, al definir las propiedades del material, así como todas las secciones transversales de cada medida de PTR, con las cuales se construirán las partes de la estructura del invernadero, a esta carga el SAP2000 la define como modal.

✓ **Carga ejercida por el peso del cultivo.**

En este caso la carga ejercida por el cultivo se efectúa en la viga de tutoreo, se seleccionan las vigas internas en las cuales se soportará la carga.

Una vez que se tienen seleccionadas todas las vigas de tutoreo internas, se va al botón *assign* y se da click en la opción *frame loads* y después en *distributed* (figura 3.31).

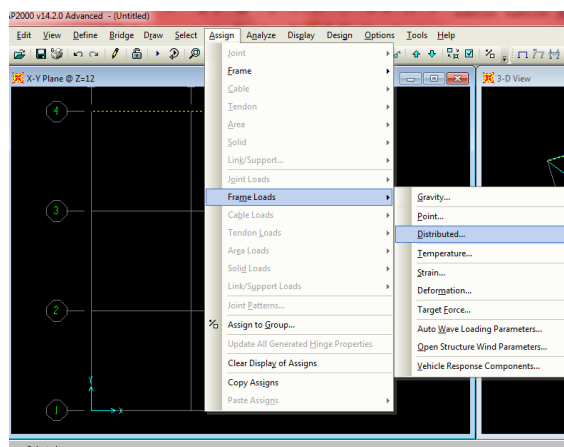


Figura 3.31. Asignación de carga sobre la viga de tutoreo.

Una vez asignada la carga, se observa su distribución y su valor (figura 3.32):

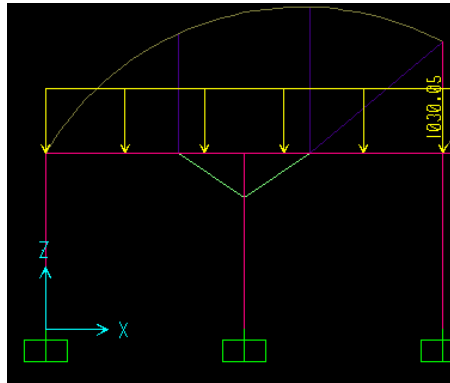


Figura 3.32. Carga ejercida por peso de cultivo en vigas internas.

✓ **Carga ejercida por la presión del viento.**

Normalmente la carga que ejerce el viento actúa sobre la pared lateral del invernadero y en la parte que corresponde a la cubierta perpendiculares a la dirección predominante.

Se seleccionan los elementos ubicados en la pared lateral del invernadero, se asigna la carga, previamente calculada, que deben soportar estos elementos; y se lleva a cabo un procedimiento similar al descrito anteriormente (figura 3.33).

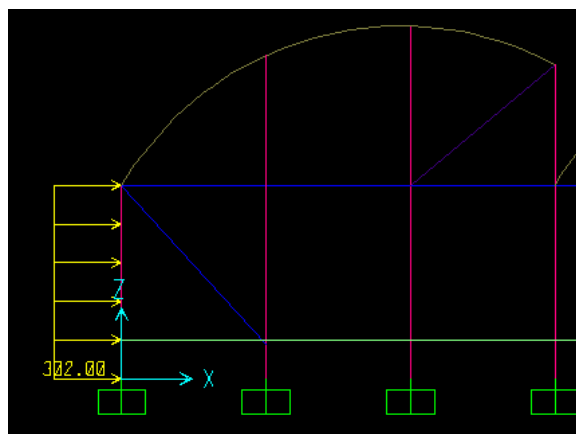


Figura 3.33. Carga ejercida por la presión del viento en el área rectangular.

Finalmente se asigna la carga ejercida por la presión del viento al área del arco, para esto se sigue un procedimiento similar, sólo que ahora se tomará en cuenta el área curva que corresponde al techo curvo del invernadero.

✓ Corrida del análisis estructural

Para analizar la estructura en SAP2000, se presiona el botón *run analysis* (figura 3.34)

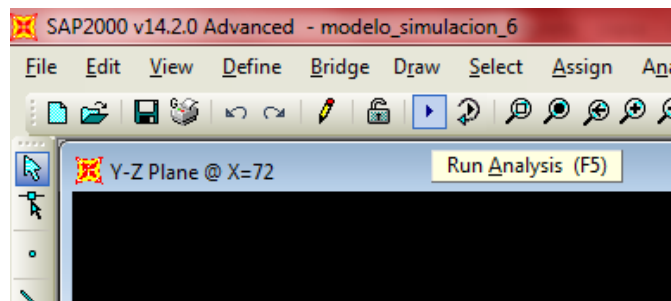


Figura 3.34. Inicio del análisis estructural.

Se selecciona la combinación de carga deseada.

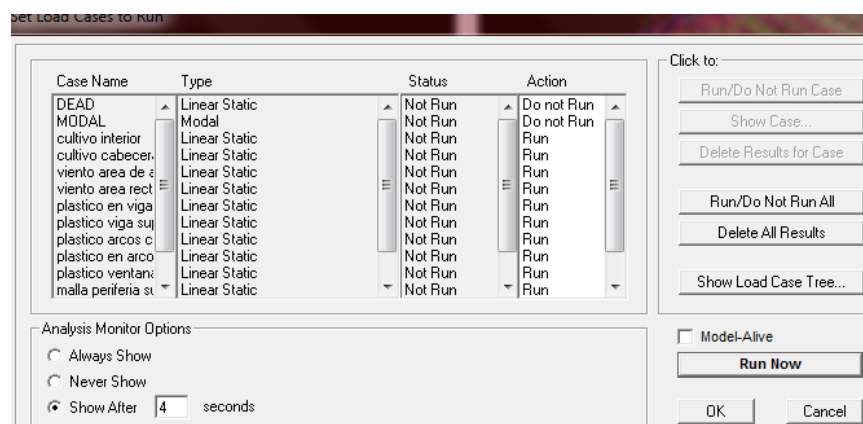


Figura 3.35. Selección de cargas para el análisis estructural.

Por último se da click en *run now*, en la misma ventana de la figura 3.35, y el análisis inicia.

El software SAP2000, crea un resultado exagerado en cuanto a las deformaciones de las estructuras. Para obtener un resultado más exacto se elige el botón *design*, después a la opción *steel frame design* y por último se debe dar click en *start design/ check of structure*, para que el software genere los resultados del análisis en una escala de colores.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado de la caracterización estructural de los invernaderos localizados en el Valle de México muestra que el principal material utilizado en la estructuración de invernaderos es del tipo de acero fabricado según norma ASTM-A-446, con un acero grado 30, rolado en frío, el recubrimiento de éstos perfiles es de Zinc-Aluminio galvanizado en caliente, capa AZ-90 según norma ASTM-792 el cual proporciona una excelente resistencia a ambientes corrosivos, calibre 14, ya que en su totalidad los invernaderos analizados son contruidos con este tipo de material.

La caracterización estructural realizada consistió en investigar el peso total de la estructura así como el peso por unidad de superficie de diferentes invernaderos ubicados en la zona, en el Cuadro 4.1 se muestran las principales formas estructurales encontradas

Cuadro 4.1. Caracterización estructural.

Forma	Superficie (m ²)	Peso total (N)	Peso por unidad de superficie (N/m ²)
Arco	765	31377.68	41.02
Arco asimétrico	1927.8	102656.75	53.25
Arco simétrico	2663.64	140131.34	52.61
Arco con ventila cenital	1053	46918.48	44.56
Armadura	466.2	18411.02	39.49
Arco bicenital	819	39952.99	48.78

El invernadero con forma de arco tiene un peso por unidad de superficie de 41.02 N/m^2 y es un invernadero dedicado a la producción de flores ornamentales, mientras que el invernadero con forma de arco asimétrico que cubre una superficie de 1927.8 m^2 tiene un peso por unidad de superficie de 53.25 N/m^2 y es un invernadero dedicado a la producción de jitomate, de los invernaderos analizados ambos tiene el peso por unidad de superficie mínimo y máximo, esto se debe fundamentalmente a su finalidad de producción, el primero que produce flores no requiere una alta estructuración en la parte de la cubierta pues es de baja tecnificación lo que implica pocos o prácticamente ningún equipo colgado a la estructura y el tipo de plantas no requieren ser sujetas mediante un sistema de tutoreo, mientras que el segundo invernadero es clasificado como un invernadero de media o alta tecnificación, lo que conlleva a que el número de equipos de riego, calefacción y ventilación artificial colocados en la estructura sea considerable, además el invernadero está dedicado a la producción de jitomate y esta producción induce una carga más a la estructura mediante el sistema de tutoreo, por lo que el invernadero al tener un aumento considerable de carga tiene que ser reforzado elevando el número de elementos estructurales y por tanto aumentando el peso de la estructura por unidad de superficie.

Normalmente el ancho de los túneles tiene un rango de variación de 6 a 9 m, la separación entre columnas generalmente es de 3 m, con una altura hasta el cenit de 7.5 m en promedio. Existe la tendencia a realizar la propuesta

estructural general en forma de cuadrado, es decir el ancho y el largo del invernadero aproximados, con formas curvas para mejorar el flujo del aire dentro del invernadero.

Se desarrolló una metodología con la que se puede realizar el diseño y análisis estructural de invernaderos, propia para profesionales y constructores de invernaderos en la zona centro de México, que consta de la modelación geométrica, modelación de las cargas, modelación de los materiales de construcción, definición de las condiciones de apoyo y realización de la corrida en el software SAP2000 con diversas iteraciones de corrección de elementos, para definir los miembros estructurales del invernadero.

A continuación se presenta los resultados del diseño de un invernadero obtenido mediante la metodología desarrollada; que será construido en el campo agrícola experimental Tlapeaxco de la Universidad Autónoma Chapingo, con las características estructurales mostradas en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Características estructurales del invernadero.

Características	Cantidad	Unidad
Superficie cubierta	3,942	m ²
Número de módulos	8	Adimensional
Ancho de módulo	9	m
Altura hasta el canalón	4	m
Altura hasta el cenit	7.3	m
Separación entre columnas longitudinales	3	m

Este invernadero es del tipo diente de sierra, está diseñado para ser adaptable a cada tipo de cultivo. Está cubierto con plástico y malla. Combina las características de los túneles con los invernaderos diente de sierra y se obtienen techos curvos que terminan en dientes de sierra, la ventaja de ello es que son más aerodinámicos. La ventila cenital se coloca en el espacio que queda sobre el techo de la nave contigua.

El sistema de ventilación cenital es continuo en el techo; ya que permite una ventilación eficaz en los invernaderos multimodulares, evitando las limitaciones en la anchura máxima a construir. El presente diseño incluye por túnel 1 ventilación fija de 57 m de longitud y 2.5 m de ancho. Se consideran 8 cortinas de 2.5 m para ventilación cenital, accionadas manualmente.

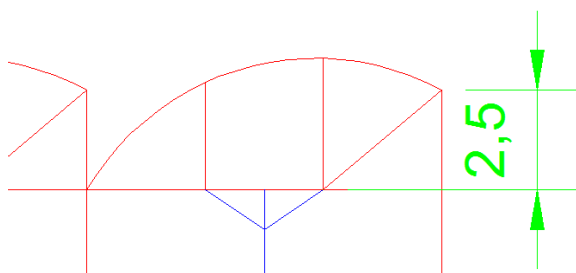


Figura 4.1. Ubicación de ventilas cenitales

Las ventilaciones laterales consisten en ventanas abiertas a lo largo de toda la superficie de la pared del invernadero. El presente diseño incluye 2 ventilaciones laterales de 57 m de largo y un ancho de 3.4 m, mediante sistema de enrollamiento, con apertura manual.

Mientras que las ventilaciones laterales consisten en ventanas abiertas a lo largo de toda la superficie de la pared del invernadero. El diseño incluye 2 ventilaciones frontales de 72 m de largo, mediante sistema de enrollamiento y un ancho de 3.4 m, para su apertura manual.

Para la cubierta del invernadero se utiliza plástico 30 % sombra, calibre 720 galgas, blanco lechoso, UV 3 años. En las diferentes ventilas se utiliza además malla antiáfidos 20x10 hilos/cm².

En la figura 4.1 se presenta la modelación geométrica en el software SAP2000 para el invernadero propuesto

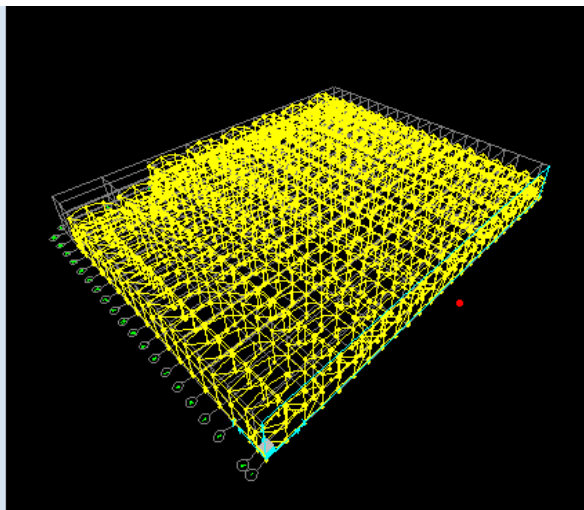


Figura 4.2. Modelación de invernadero en SAP2000.

Una vez realizada la modelación geométrica se procedió a incluir en el modelo la modelación de los materiales, la modelación de las condiciones de apoyo y la asignación de las cargas calculadas. Se propone un diseño capaz de resistir una velocidad de viento de 100 km/h y una carga por cultivo de 35 kgf/m².

Al realizar la corrida en el software SAP2000 este muestra los resultados en una escala de colores donde el material críticamente cargado se muestra de color rojo (figura 4.3). En los elementos críticamente cargados se modificaron sus secciones transversales antes de realizar una nueva corrida. Es decir, se hicieron las secciones transversales de los elementos críticamente cargados más robustas y se redujeron las secciones transversales de los elementos con menor sometimiento a esfuerzo.

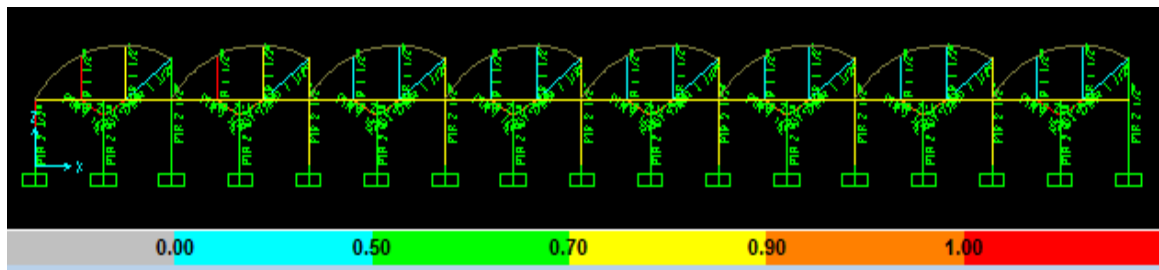


Figura 4.3. Ejemplo del resultado de una corrida en la vista interior de un invernadero tipo diente de sierra.

Una vez modificadas las secciones transversales se inició una nueva corrida, cabe mencionar que este proceso es lo que hace iterativa a la metodología de diseño. Los resultados de la última corrida se muestran en la figura 4.4.

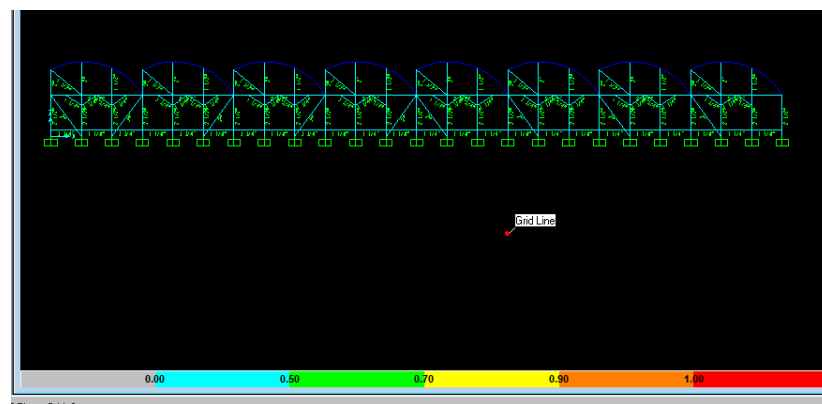


Figura 4.4. Resultados de la última corrida en software SAP2000.

De esta forma se definió el material a utilizar en la construcción del invernadero diseñado, en el Cuadro 4.3 se muestra a detalle cada uno de los componentes a utilizar en toda la construcción. La ubicación y estructuración final del proyecto se muestran en los Anexos A.2 y A.3.

Cuadro 4.3. Detalle del material a utilizar en la construcción del invernadero.

ESTRUCTURA		
CONCEPTO	CANT.	UNIDAD
Perfil ZCM250 , Perfil tubular cuadrado galvanizado de 0.0635 m (2.5 pulgadas) calibre 14 , para:		
• Columna de 6.5 m	1960	m
• Columna de 4.0 m		
• Columna interior de 4 m		
• Columna de 6.69 m		
• Columna de 7.3 m		
Perfil ZCM200 , Perfil tubular cuadrado galvanizado de 0.0508 m (2.0 pulgadas) calibre 14 , para:		
• Viga de tutoreo de 9 m	3150.4	m
• Arcos de 10.3 m longitud		
• Tensores esquineros de 4.27 m		
Perfil ZCM175 , Perfil tubular cuadrado galvanizado de 0.0445 m (1.75 pulgadas) calibre 14 , para:		
• Montante de 2.69 m	2203.2	m
• Diagonal de 3.9 m		
• Montante de 3.3		
Perfil ZCM150 , Perfil tubular cuadrado galvanizado de 0.0381 m (1.5 pulgadas) calibre 14 , para:		
• Larguero ventila cenital superior	843	m
• Larguero ventila cenital inferior		
Perfil ZCM125 , Perfil tubular cuadrado galvanizado de 0.0318 m (1.25 pulgadas) calibre 14 , para:		
• Refuerzos en diagonal	834	m
• Larguero inferior lateral		
• Larguero superior lateral		
• Larguero inferior frontal		
• Larguero superior frontal		

ESTRUCTURA		
CONCEPTO	CANT.	UNIDAD
Cable zigzag para sujeción de plástico por rollo	2	rollo
Lamina lisa para canalón calibre 24		
Cable de acero galvanizado 0.00635 m (0.25 pulgadas) para cabecera de tutoreo	720	m
Alambre galvanizado acerado calibre 10 para 8 hileras de tutoreo por módulo	3648	m
Tubo de 0.0381 m (1.5 pulgadas) de diámetro para la cortina de plástico de las ventilas cenitales y laterales	570	m
Winch y poleas para la apertura y cierre de ventilas	8	piezas
CIMENTACIÓN		
CONCEPTO	CANT.	UNIDAD
Cemento	80	bultos
Perfil ZCM200 , Perfil tubular cuadrado galvanizado de 0.0508 m (2.0 pulgadas) calibre 12 , para las 366 zapatas de cimentación de 0.7 m	256.2	m
CUBIERTA		
CONCEPTO	CANT.	UNIDAD
Plástico de 12.20 m de ancho, 30 % sombra, calibre 720, blanco lechoso, UV 3 años	560	m
Plástico de 8.20 m de ancho, 30 % sombra, calibre 720, blanco lechoso, UV 3 años	135	m
Plástico de 6.20 m de ancho, 30 % sombra, calibre 720, blanco lechoso, UV 3 años	240	m
Malla antiáfidos 10 x 20 hilos/ cm ²	240	m

Como se puede observar en el Cuadro 4.3, se detallaron cada uno de los componentes de los cuales consta la estructura, pues el diseño de un invernadero involucra gran cantidad de factores, la presente investigación comprende el detalle del diseño estructural, pero éste, es sólo una parte de la metodología de diseño general de un invernadero, el diseño estructural no puede estar aislado de ninguna forma de los demás procesos de diseño.

5. CONCLUSIONES

Se realizó una caracterización estructural de algunos invernaderos localizados en el Valle de México. Dentro de la caracterización estructural se observó una estrecha relación entre el peso de la estructura del invernadero y el cultivo que se maneja en él, bajo el parámetro peso de la estructura por unidad de superficie, dicho parámetro aumenta con aquellos invernaderos destinados a la producción de cultivos que se tutorean por el peso propio de los cultivos que se conllevan a la estructura y en invernaderos de alta tecnificación, ya que el grado de mecanización y equipos sujetos a la estructura también aumenta.

Se calcularon las principales cargas de diseño a las que estará sometida la estructura, en las que se debe poner especial atención en las cargas vivas, que tienen una estrecha relación con el cultivo dentro del invernadero y con las cargas accidentales, que son las ocasionadas por los factores ambientales. Se dio especial énfasis al desarrollo de la metodología para calcular la carga por viento, ya que se considera un factor de primordial importancia para tomar.

Se desarrolló una metodología general para el diseño estructural de invernaderos, en la que se propone un proceso iterativo mediante el análisis estructural para modificar las secciones transversales de los elementos estructurales, eligiendo el mejor arreglo estructural general y las secciones

transversales mínimas permitidas, lo que repercute en un menor peso de la estructura y por lo tanto un menor costo, pero además asegurando que se cumplan las condiciones de rigidez, resistencia y estabilidad de la estructura como un solo conjunto.

Como comentario final, es recomendable realizar un trabajo de investigación para desarrollar una metodología basada en un análisis CFD para determinar las dimensiones globales y forma de un invernadero, ya que sería un modelo que interrelacionaría las condiciones ambientales dentro y fuera del invernadero con la geometría del mismo, todo esto para establecer un vínculo sólido entre el diseño agronómico y el diseño estructural.

6. BIBLIOGRAFÍA

ASAE. 2005. Commercial greenhouse design and layout. ASAE Standards. American Society for Agricultural Engineers. Michigan. USA. 751-757 p.

Bastida Tapia A. 2006. Manejo y operación de invernaderos agrícolas. México: Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Preparatoria Agrícola, Área de Agronomía, Serie de Publicaciones Agribot. 14-18, 55-64, 183-190 p.

Bastida T. A.; Ramírez A. A. 2002. Invernaderos en México: diseño, construcción y manejo. México: Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Preparatoria Agrícola, Área de Agronomía, Serie de Publicaciones Agribot. 1-31 p.

CFE, 1969. Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por viento, Comisión federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas. México. 70 p.

Celigueta, J.T. 1998. Curso de análisis estructural. EUNSA. España.

García, S. M. A; Sánchez, C. O. 2011. Metodología para el diseño y construcción de invernaderos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo México. 140 p.

Gere, J. M. and Goodno, B. J., 2009. ***Mechanics of Materials***, 7th ed., CENGAGE Learning. 1025 p.

Hannan, J.J., 1998. Greenhouses: advanced technology for protected horticulture. CRC Press. 684 p.

Hibbeler R.C., 2011. Mechanics of Materials. 8a ed. Pearson Pearson Prentice Hall, USA. 876 p.

Hibbeler, R. C., 2006. Structural analysis. 7th edition. Pearson Pearson Prentice Hall. USA. 667 p.

IMCA, A. C., 1990. Manual de Construcción en Acero. 2^a edición. Editorial Limusa. 236 p.

Johnson, J.E., Salmon, C.G., 1990, Steel Structures: Design and Behavior. New York: Harper Collins Publishers Inc.

Matallana G.A.; Montero C.J.I. 2001. Invernaderos: Diseño, Construcción y Climatización. Mundi-Prensa, España. 184 p.

McCormac, J. C., 2007. Structural Analysis, Using Classical and Matrix Methods. 4th edition. John Wiley and Sons, Inc. USA. 577 p.

McCormac, J. C., 1999. Diseño de estructuras metálicas, método ASD, 4^a edición. Editorial Alfaomega. México. 740 p.

Nelson G.L, *et al.*, 1988. Light Agricultural and Industrial Structures. Avi Book, New York. 558 p.

Nieves, G.V. *et al.*, 2012. Mexican Protected Horticulture, Production and market of Mexican protected horticulture described and analysed. Wageningen U. R. Technical Report GTB-1126. ICSI.

NMX-E-255-CNCP-2008: 2008. Invernaderos, Diseño y Construcción, Especificaciones. Vig. agosto 2008

Popov, E. P., 1999. Engineering Mechanics of Solids. 2nd edition. Pearson Prentice Hall, 864 p.

Ugural, A. C., 2008. Mechanics of Materials, 1st edition. John Wiley and Sons, Inc. USA. 716 p.

Rico, G. E., 2008. Modelación climática en invernaderos: Ventilación natural. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Querétaro.

Sánchez del Castillo, F.; *et al.* Hidroponia: principios y métodos de cultivo; un sistema de producción de plántulas. México: Universidad Autónoma Chapingo, 2005, 194 p.

Tung, A. and Christiano, P., 1987. Fundamentals of structural analysis. Prentice-hall. USA. 510 p

ANEXOS

Cuadro A.1. Ejemplo de dimensiones y propiedades del perfil tubo cuadrado (OR).

Designación Tamaño y espesor		Peso		Área cm ²	Ejes X-X y Y-Y		
mm x mm	in. x in	kg/m	lb/ft		<i>I</i> cm ⁴	<i>S</i> cm ³	<i>r</i> cm
25 x 2.4	1 x 0.095	1.62	1.09	2.07	1.75	1.38	0.92
x 3.4	x 0.133	2.10	1.41	2.68	2.01	1.58	0.87
38 x 2.8	1.5 x 0.11	2.95	1.98	3.74	7.56	3.96	1.42
X 3.2	X 0.125	3.29	2.21	4.17	8.21	4.30	1.40
51 X 2.8	2 X 0.110	4.00	2.69	5.11	19.04	7.49	1.93
X 3.2	X 0.125	4.54	3.05	5.79	21.40	8.42	1.92
X 4.0	X 0.156	5.45	3.55	6.97	24.70	9.72	1.88
X 4.8	X 0.188	6.43	4.32	8.19	27.80	10.95	1.84
X 6.4	X 0.250	8.05	5.41	10.26	31.88	12.55	1.76
64 X 3.2	2.5 X 0.125	5.84	3.92	7.40	44.07	13.88	2.44
X 3.6	X 0.141	6.47	4.35	8.26	48.30	15.20	2.42
X 4.8	X 0.188	8.32	5.59	10.58	59.10	18.68	2.36
X 6.4	X 0.250	10.58	7.11	13.48	70.34	22.12	2.28
76 X 3.2	3 x 0.125	7.12	4.78	9.01	78.93	20.71	2.95
X 4.8	X 0.188	10.20	6.85	13.00	108.00	28.30	2.90
X 6.4	X 0.250	13.11	8.81	16.71	131.53	34.41	2.79
X 7.9	X 0.313	15.74	10.58	20.10	149.0	39.17	2.72

Fuente: Manual de Construcción en Acero, IMCA (1990)

ANEXO A.2. UBICACIÓN DEL PROYECTO

ANEXO A.3. ESTRUCTURACIÓN DEL INVERNADERO
DISEÑADO