

Análisis estático de los esfuerzos y deformaciones de la estructura de un Invernadero tipo “Ventila Cenital” ubicado en Veracruz

Static analysis of the efforts and deformations of the structure of a greenhouse type “Ventila Cenital” located in Veracruz

M.Sc. Arturo Ocampo Ramírez¹, Dr.C. Luis Héctor Hernández Gómez¹, Ing. Dayvis Fernández Valdés¹, Ing. Daybelis Fernández Valdés^{II}, M.Sc. Rafael Cervantes Beyra^{III}

¹ Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, México D.F., México.

^{II} Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{III} Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Agronomía, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN. Las estructuras de los invernaderos suelen fallar por una incorrecta selección de las cargas a las que se ven sometidas y por una estructura menos robusta con el objetivo de ahorrar costos en el dimensionamiento de los materiales. La acción del viento es una de las principales causa de falla en una estructura de este tipo. El objetivo de este trabajo es realizar un estudio en los que se consideren a) cargas por viento, b) cargas debido al peso de la estructura, c) cargas debido al cultivo, d) cargas del recubrimiento plástico y e) cargas por granizo. Este trabajo utiliza como referencia la norma Mexicana NMX-ECNCP-2008. Se realiza un primer análisis estático usando el método del elemento finito para la estructura de un invernadero tipo “ventila cenital” para la región de Xalapa, Veracruz en las que se obtendrán los esfuerzos y deformaciones más críticos.

Palabras clave: invernadero, análisis estático, fallas por viento, método de los elementos finitos.

ABSTRACT. Sometimes the structures that represent the greenhouses fail due to the bad consideration of the loads which are submit and the implementation of a structure less robust with the objective of saving costs in the dimension of materials. The action of wind is one of the main causes of fail in this sort of structure. That is why the objective of this work is performing a study in which are considered some topics like these: a) loads by wind, b) loads due the weight of the structure, c) loads due the crop, d) loads of the plastic coating, and e) loads by hail. This work is based on *The Standard Mexican NMX-ECNCP-2008*. It is analyzed a first static analysis using the method of the finite element to the structure of a greenhouse type named “ventila cenital” for the region of Xalapa, Veracruz in which will be obtain the most critical efforts and deformations.

Keywords: Greenhouse, Static analysis, Wind Failures, method of the finite elements

INTRODUCCIÓN

Un invernadero es una construcción agrícola de estructura metálica, usada para el cultivo y/o protección de plantas, con cubierta de película plástica traslucida (Calzadilla *et al.*, 2007), 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 (NMX-E-255-CNCP-2008).

Clasificación de los Invernaderos (Bastida y Ramírez, 2008):

Clase A: estructuras de invernaderos unitarios o en batería.

Clase B: estructuras tipo casa-sombra y macro túneles.

En ambos tipos el período mínimo de vida útil de la estructura es de 10 años.

Materiales empleados en las estructuras

Los materiales de las estructuras deben ser económicos, ligeros, resistentes y esbeltos; deben formar estructuras poco voluminosas a fin de evitar sombras de las mismas sobre las plantas, de fácil construcción, mantenimiento y conservación, modificables y adaptables al crecimiento y expansión futura de estructuras, sobre todo cuando se planean ensamblar en batería (Kendirli, 2005).

Normatividad de los materiales (Silva et al., 2003)

En lo referente a las normas a cumplir en aspecto de materiales, para el acero a utilizar en la estructura de un invernadero, se deberá cumplir con las siguientes especificaciones de acuerdo al fabricante:

- Perfil cuadrado o redondo de acero fabricado según norma NMX-B-009, con acero grado 30 ($F_y = 2,320 \text{ kg/cm}^2$); rolado en frío.
- Además se debe de cumplir con que las estructuras deben de tener de 5 a 6 kg/m^2 de acero. Las columnas deben de ser mínimo de 2" y los arcos de 1 3/4".
- Manual de Diseño de Obras Civiles de la C.F.E. (sección C-14), la cual define las condiciones de viento y sismo a considerar de acuerdo a la ubicación de la estructura dentro de la República mexicana.
- Cubiertas. Polietileno Cal. 720 tratado contra rayos ultravioleta UV II, diferentes porcentajes de sombra y color.

MÉTODOS

Cálculo de las cargas que afectan a la estructura

La obra se desarrollará en Xalapa, Veracruz, el dimensionamiento es para una nave de (8x42) metros (Figura 1) para desarrollar jitomate con crecimiento indeterminado, el invernadero será tipo túnel con ventila cenital orientada en la dirección opuesta del viento.

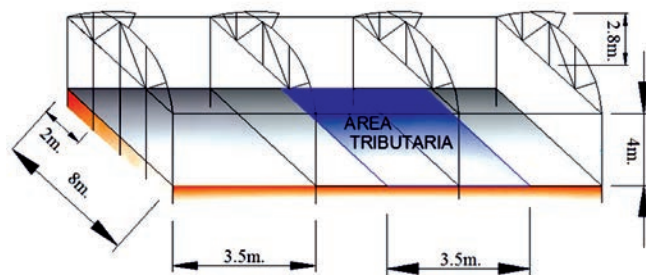


FIGURA 1. Dimensiones de invernadero tipo "ventila cenital".

Los tipos de cargas que se consideraran en la estructura son:

- Cargas de la estructura;
- Cargas del plástico;
- Cargas del cultivo;
- Cargas del granizo;
- Cargas del viento:

Cálculo de las cargas debido al peso de la estructura

Para conocer el peso de la estructura es necesario conocer las dimensiones de los elementos como los refuerzos y los arcos

para posteriormente conocer su peso el cual está especificado por el proveedor. Las especificaciones se mencionan en la Tabla 1, con respecto a la Figura 2.

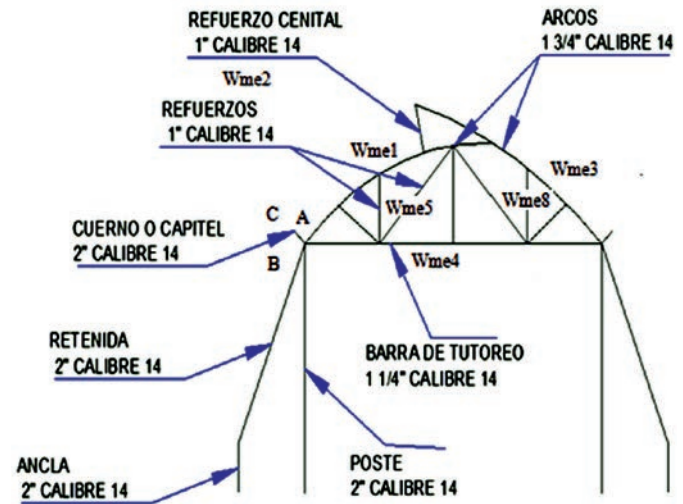


FIGURA 2. Tipo de material utilizado en el invernadero.

TABLA 1. Pesos y dimensiones de los elementos que componen a la estructura

DATOS		kg/m	L	kgms
Wme1	Arco inferior	2,50	5,65	14,12
Wme2	Refuerzo cenital	1,50	1,00	1,50
Wme3	Arco superior	2,50	5,87	14,67
Wme4	Barra de tutoreo	1,90	8,00	15,20
Wme5	Refuerzo diagonal	1,50	1,34	2,01
Wme6	Refuerzo diagonal	1,50	1,33	2,00
Wme7	Refuerzos diagonales	1,50	2,81	8,43
Wme8	Refuerzos verticales	1,50	1,41	2,12
Wme9	Refuerzos verticales	1,50	1,52	2,28
Wme10	Refuerzos verticales	1,50	1,98	2,97
Wme11A	Canalón	4,34	3,50	15,19
Wme11B	Perfil sujetador	0,38	7,00	2,65
Wme11C	Cuerno capitel	3,00	0,40	1,20
Wme11a y Wme11b				19,04

Estimación de las cargas debidas al plástico

La forma de calcular el peso de la cubierta es conociendo la cantidad o peso del plástico que se utiliza para cubrir el invernadero, (Figura 3), para ello es necesario calcular o medir la superficie del plástico para posteriormente multiplicarlo por su densidad o peso específico (Von Elsner et al., 2000). Siendo para este caso de 989 kg/m^3 .

TABLA 2. Peso del plástico

Wmc1	0,63	kg
Wmc2	2,37	kg
Wmc3	2,016	kg
Wmc11a y b	3,69	kg

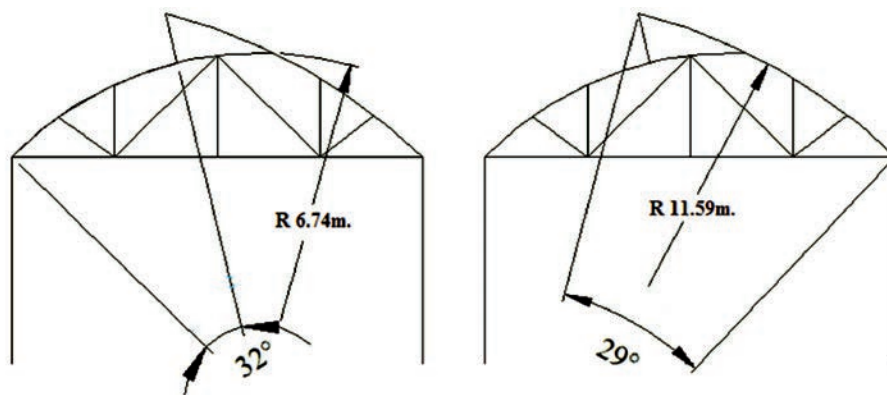


FIGURA 3. Área que cubre el plástico en la parte superior del invernadero.

Cálculo de las cargas debidas al tipo de cultivo

El peso del cultivo afecta a la estructura porque estos están sujetos al invernadero. Los valores de las acciones de los productos se toman de la Tabla 3 de la norma NMX-E-255-CNCP-2008, la cual expresa que para carga pesada el valor de peso de los productos es de 35 kg/m².

TABLA 3. Peso del producto (Jitomate)

Wp11a	98	kg
Wp11b	98	kg
wp12	98	kg
Wp13	98	kg
Wp14	98	kg

Cálculo de las cargas debidas al granizo

En la norma NMX-E-255-CNCP-2008, Los valores propios de la carga de granizo deben estimarse tomando como base 30 kg por metro lineal en el canalón, para el área tributaria (30 kg/m×3,5 m), el peso del granizo se concentrara en las columnas.

TABLA 4. Peso del granizo

Wg11a	105	kg
Wg11b	105	kg

Cálculo de las cargas debidas a la acción del viento

A fin de evaluar las fuerzas provocadas por la acción del viento, se proponen principalmente tres procedimientos. El primero, referido como análisis estático este se empleará cuando se trate de estructuras o elementos estructurales suficientemente rígidos, que no sean sensibles a los efectos dinámicos del viento.

En caso contrario, deberá utilizarse un segundo procedimiento en base a un análisis dinámico, en el cual se afirma que una construcción o elemento estructural es sensible a los efectos dinámicos del viento cuando se presentan fuerzas importantes provenientes de la interacción dinámica entre el viento y la estructura.

Un tercer procedimiento para evaluar la acción del viento sobre las construcciones consiste en llevar a cabo pruebas experimentales de modelos en túnel de viento. Estas pruebas

deben realizarse cuando se desee conocer la respuesta dinámica de estructuras cuya geometría sea marcadamente diferente de las formas comunes para las cuales no existe información disponible en los reglamentos o en la literatura.

Velocidad de diseño

Tanto en el procedimiento del análisis estático como dinámico, intervienen factores que dependen de las condiciones topográficas y de exposición locales del sitio en donde se desplantará la construcción, así como del tamaño de ésta.

La velocidad de diseño, V_D es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura (CFE, 1993).

La velocidad de diseño, en km/h, se obtendrá de acuerdo con la ecuación 1 y depende de la clase de estructura que afectara, de la categoría del terreno, de la rugosidad del terreno y de la velocidad regional estimada en cada región de la República Mexicana para un retorno de vida de 10 años para el caso de los invernaderos de acuerdo a la norma mexicana, (NMX-E-255-CNCP-2008).

$$V_D = F_T F_a V_R \tag{1}$$

TABLA 5. Datos requeridos para obtener la velocidad de diseño

Velocidad regional (V_{rz})	118	km/h
Altura del invernadero (Z)	6,80	m
Clase de estructura	B	
Factor de tamaño (F_c)	0,95	
Factor de rugosidad (F_{rz})	1,13	
Factor de exposición (F_a)	1,07	
Factor de topografía (F_t)	1,00	
Categoría del terreno	1,00	
Velocidad de diseño	126,60	km/h

Análisis estático

Los empujes medios que se evalúan con este procedimiento son aplicables al diseño de las estructuras pertenecientes al Tipo 1, (INIFE, 1998).

Tipo 1.- Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. Abarca todas aquellas en las que la relación de aspecto λ , (definida como el cociente entre la altura y la menor dimensión en planta), es menor o igual a cinco y cuyo periodo natural de vibración es menor o igual a dos segundos. También incluye las construcciones cerradas techadas con sistemas de cubierta suficientemente rígidos, es decir, capaces de resistir las cargas debidas al viento sin que varíe esencialmente su geometría. Se excluyen las cubiertas flexibles, como las de tipo colgante, a menos que por la adopción de una geometría adecuada, proporcionada por la aplicación de pre esfuerzo u otra medida conveniente, logre limitarse la respuesta estructural dinámica.

El método estático sólo puede utilizarse para diseñar estructuras o elementos estructurales poco sensibles a la acción turbulenta del viento. Esta condición se satisface cuando:

- La relación $5 \leq d/H$, en donde H es la altura de la construcción y d es la dimensión mínima de la base.
- El periodo fundamental de la estructura es menor o igual que dos segundos.

Para el caso de construcciones cerradas, techos aislados, toldos y cubiertas adyacentes, no es necesario calcular su perio-

do fundamental cuando se cumplan las siguientes condiciones (Emekli *et al.*, 2010):

- La altura total de la construcción, H, es menor o igual que 15 m.
- La planta de la estructura es rectangular o formada por una combinación de rectángulos.
- La relación H/d es menor que cuatro para construcciones cerradas y menor que uno para techos aislados, para toldos y cubiertas adyacentes en voladizo, el claro no debe ser mayor que 5 m.

Presiones de diseño sobre la cubierta

La presión exterior, P_z , en cubiertas de arco circular se calculará con la ecuación 2.

$$P_z = C_q P_z \quad (2)$$

donde:

P_z -Presión exterior, en kg/m²;

C_p -Coeficiente de presión exterior, adimensional;

q_z -Presión dinámica de base del viento evaluada en h+Hc en kg/m².

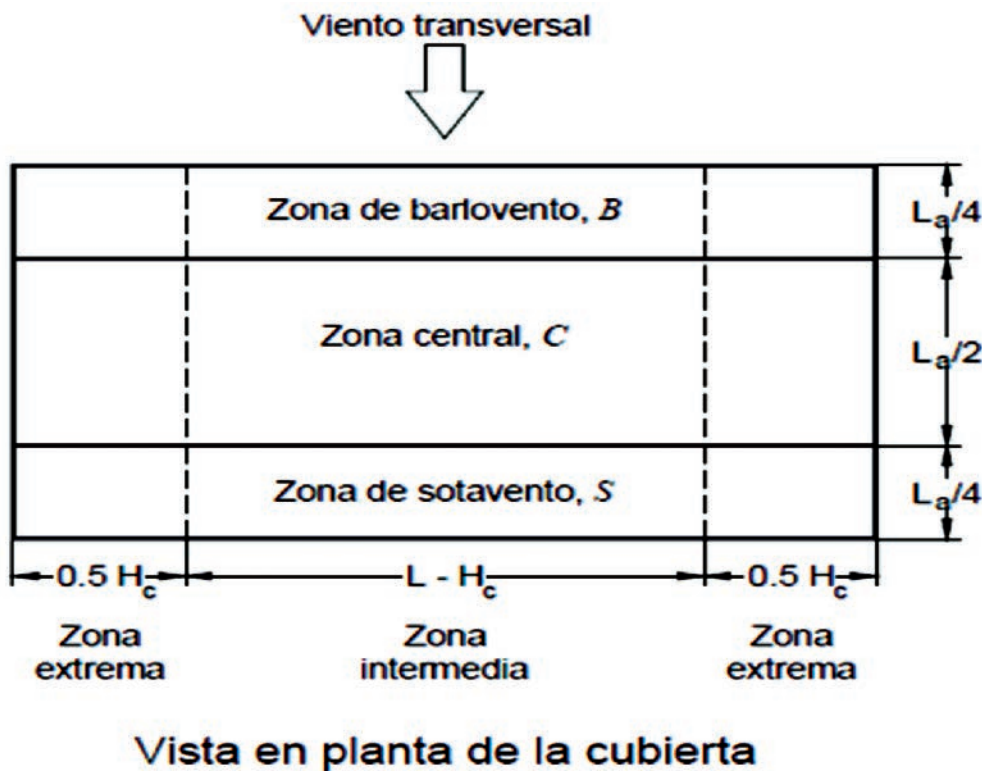


FIGURA 4. Zonas de afectación del viento.

Cálculo de fuerzas en los muros

Las presiones exteriores, p_e , sobre una de las superficies de una construcción cerrada se calculará utilizando la ecuación 3 de acuerdo a la Figura 4.

$$P_e = C_{pe} K_A K_L q_z \quad (3)$$

donde:

p_e - presión exterior, en Pa;

C_{pe} - coeficiente de presión exterior, adimensional;

K_A - factor de reducción de presión por tamaño de área, adimensional;

K_L - factor de presión local, adimensional;

q_z - presión dinámica de base del viento, en kg/m².

TABLA 6. Presiones del viento

WwA	62,43	kg/m ²
Ww3a	22,89	kg/m ²
Ww3b	26,36	kg/m ²
Ww1	21,50	kg/m ²
WwB	31,22	kg/m ²

TABLA 7. Concentración de las cargas que afectan a la estructura

Elemento	N/m ²	x	y	N
Arco-infl/Wwmec	-210,96			
Arco-sup3/Wwmec	224,57			
Ww3b-sup	-258,59			
Arco Inf Wmc1e1		2,37	5,36	144,66
Arco sup Wme3c3		5,58	5,63	163,65
Wmec2		3,10	6,31	37,98
Wmep4		4,00	4,00	1139,63
Wme5		1,45	4,39	19,72
Wme6		6,53	4,40	19,57
Wme7		3,00	4,99	82,7
Wme7		5,00	4,99	82,7
Wme8		2,00	4,71	982,13
Wme9		6,00	4,76	983,75
Wmepgc11a		0,00	4,00	2214,5
Wmepgc11b		8,00	4,00	2214,5
WwA		2,00	4,00	120
WwB		6,00	4,00	60

Método del elemento finito

El elementos BEAM3 es un elemento uniaxial que pueden estar sometidos a tensión, compresión y flexión.

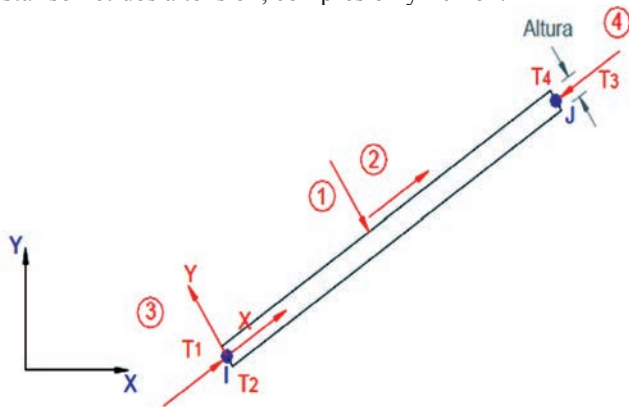


FIGURA 5. Elemento BEAM3.

El elemento BEAM3 tiene tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones (X y Y) y rotación alrededor del eje Z. La comprensión del sistema coordinado resulta fundamental a la hora de aplicar cargas distribuidas (presiones) sobre los elementos; las presiones normales positivas actúan hacia el elemento, de la forma indicada por los números encerrados en círculo en la misma Figura 5.

El elemento requiere de la definición del área transversal, el momento de inercia del área, la altura de la sección transversal y una deformación inicial (si existe), (Silvestre, 1998).

Simulación

Análisis estático

Modelo del marco de la estructura de un invernadero tipo túnel con ventila cenital

Usando el elemento BEAM3, se realizara un modelo estático usando las dimensiones de la Figura 2, con un espesor de 2 mm equivalente a las dimensiones de la cedula 14, las unidades utilizadas son las correspondientes al S.I. de medidas.

TABLA 8. Datos generales para cargar los valores en ANSYS

Módulo de Young	250 GPa
Módulo de Poisson	0,28
Tipo de elemento	Beam3
L1 sección 1	C-100 espesor = 2 mm
L2 sección 2	C-125 espesor = 2 mm
L4 sección 3	C-150 espesor = 2 mm
L5 sección 5	C-175 espesor = 2 mm

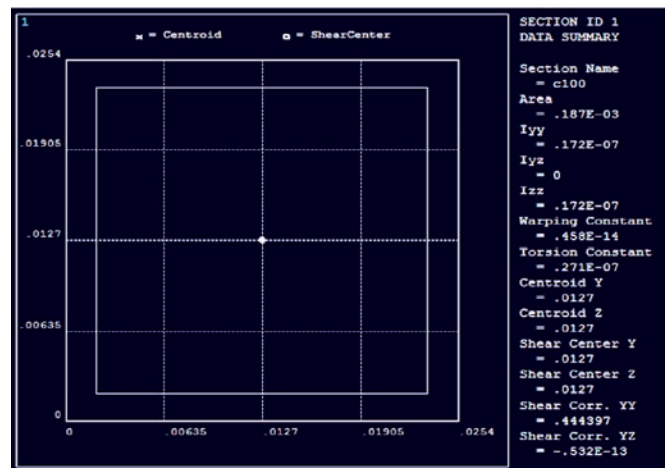


FIGURA 6. Dimensionamiento del elemento BEAM3.

El elemento BEAM3 puede tener cualquier forma de sección transversal Figura 6, sin embargo, los esfuerzos se determinan como si la distancia del eje neutro hasta la fibra extrema fuera igual a la mitad de la altura. Esta altura es utilizada entonces en el cálculo de esfuerzos de flexión, y debe tenerse presente esta restricción (Moaveni, 2007).

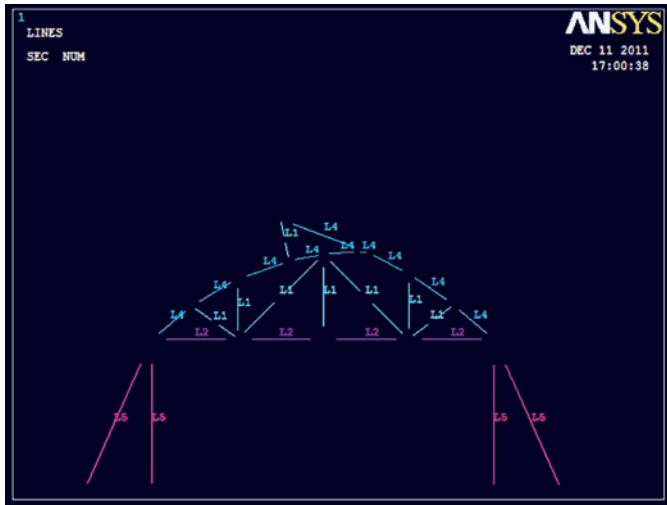


FIGURA 7. Elementos BEAM3 que componen la estructura.

Las cargas se aplican en el programa de elemento finito en las coordenadas de la Tabla 7 y la Figura 8.

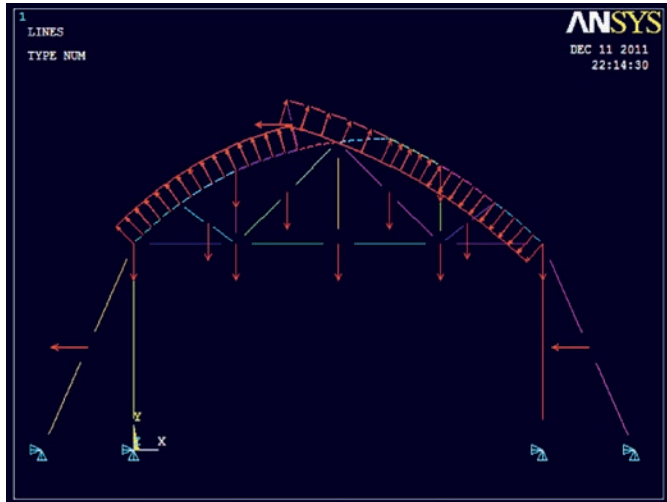


FIGURA 8. Aplicación de las cargas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la simulación mediante la aplicación del Método del Elemento Finito

En la Figura 9, se observan los elementos de la estructura que son sometidos a un mayor esfuerzo de tensión y compresión, en donde se puede ver que el viento es un factor importante que repercute en la estabilidad de la estructura, (Medina *et al.*, 1997). En la Tabla 9, se aprecian los valores de los esfuerzos, para este caso.

TABLA 9. Elementos más castigados en esfuerzos

Nivel	Elemento	Esfuerzos, Pa
Compresión	28	-0,72421E+07
Tensión	5	0,73034E+08

Las deformaciones máximas se presentan como máxima (MX) y para la mínima (MN), (Figura 10) en donde se pueden

observar los elementos estructurales que sufren una mayor deformación, donde la acción del viento vuelve a ser un factor importante a considerar en el diseño de los invernaderos, (Urriola *et al.*, 1997).

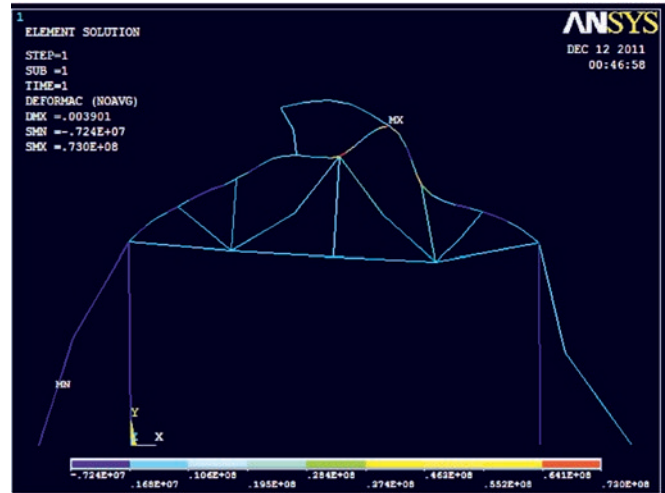


FIGURA 9. Esfuerzos.

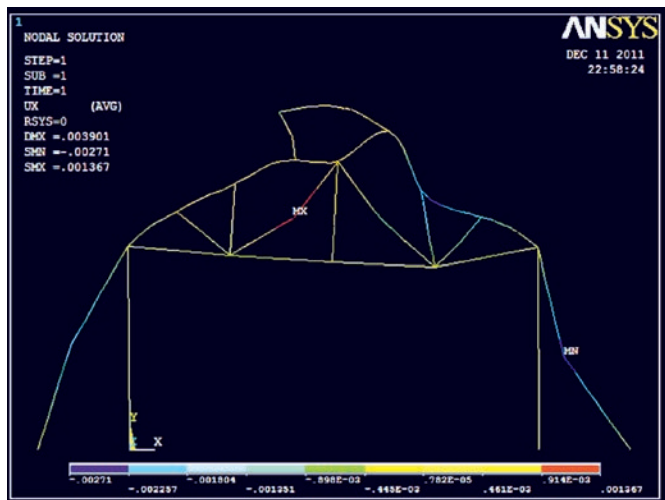


FIGURA 10. Deformaciones.

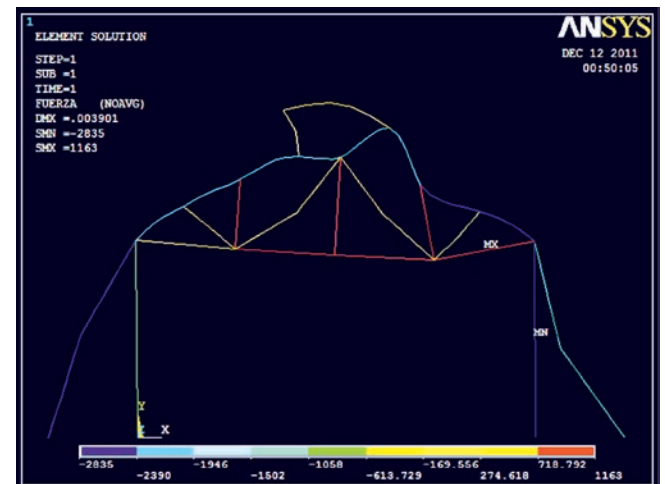


FIGURA 11. Deformaciones.

En la Tabla 10 y en la Figura 11, se muestran los elementos que son sometidos a una mayor fuerza a los lados.

TABLA 10. Elementos más castigados en fuerza

Nivel	Elemento	mm
Compresión	37	-2834,6
Tensión	36	1163,0

CONCLUSIONES

- Los valores de deformaciones y esfuerzos en los elementos están conforme a la norma mexicana NMX-E-255-CNCP-2008, con lo que se demuestra que el tipo de estructura es viable para la zona de Xalapa, Veracruz en donde existe una velocidad regional de 118 km/h, esto no causa sorpresa ya que se utilizaron los

elementos estructurales máximos recomendados por (NMX-E-255-CNCP-2008), con lo que se podría esperar reducir las dimensiones del material utilizado para el ahorro del mismo.

- Los valores de deformaciones y esfuerzos obtenidos están lejos de los valores críticos, con lo cual se pueden emplear materiales de menores dimensiones para reducir costos.
- Al considerar todos los factores de carga que afectan a la estructura, se reducen considerablemente las fallas debidas a una mala condición de carga (Calzadilla *et al.*, 2007; Vázquez *et al.*, 2011).
- La carga debida al viento es una de las más importantes en este tipo de análisis, en este caso aun cuando la acción del viento es una condición dinámica, es posible tratarla como una carga estática siempre que se cumplan ciertas condiciones de diseño (CFE, 1993).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASTIDA, A. y RAMÍREZ, A.: *Los Invernaderos en México*, Ed. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 2008.
- CALZADILLA, H.; PÉREZ, J. R.; ESTRADA, R.; GÓMEZ, E.: "Análisis numérico de la estructura metálica del modelo de casa de cultivo EMBA-MSC (Parte I: análisis resistivo de la estructura)", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3): 53-57, 2007.
- CALZADILLA, H.; PÉREZ, J. R.; ESTRADA, R.; GÓMEZ, E.: "Análisis numérico de la estructura metálica del modelo de casa de cultivo EMBA-MSC" (Parte II: análisis resistivo de la estructura)", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(4), 2007.
- EMEKLİ, N.; KENDIRLI, B.; KURUNC, A.: "Structural analysis and functional characteristics of greenhouses in the Mediterranean region of Turkey", *African Journal of Biotechnology*, 9(21): 3131-3139, 2010.
- KENDIRLI, B.: "Structural análisis of greenhouses: A case study in Turkey", *Build Environ*, 41(7): 864-871, 2005.
- MEDINA, J.L.; HERNÁNDEZ, L.H.; URRIOLAGOITIA, G.; VILLA, G.; VÁZQUEZ, H.H.; URRIOLAGOITIA, G.M.: "Análisis tridimensional de transferencia de calor en componentes mecánicos de reactores nucleares por el Método del Elemento Finito", *Científica*, 1(3): 33-40, 1997.
- MOAVENI, S.: "Trusses", *Finite element analysis: theory and application with ANSYS*, pp. 80-100, Ed. Prentice Hall, New Jersey, US, 2007.
- NMX-E-255-CNCP:08.: *Norma Mexicana para el Diseño y construcción de Invernaderos. Diario Oficial de la Federación*, Vig. 2008.
- SILVA, V.E.; C. RUBIO; J.J. LÓPEZ y R.A. RODRÍGUEZ: Dimensionamiento estructural de un módulo para un invernadero de producción intensiva, En: III Congreso Internacional de Innovación basada en Diseño e Ingeniería por Computadora 2003, Guanajuato. México, 2003.
- SILVESTRE, P.: *Elemento finito para ingeniería eléctrica*, Ed. Noriega, t. 1, 1998.
- URRIOLAGOITIA, G.M.; HERNÁNDEZ, L.H.; VILLA, G.; MEDINA, J.L.; VÁZQUEZ, H.H.: "Aplicación de los Elementos Finitos al diseño de engranes y algunos aspectos fundamentales relativos a la mecánica de fractura", *Científica*, 1(4): 1-7, 1997.
- VÁZQUEZ, J.; PÉREZ, J.; CALLEJÓN, A.J.; CARREÑO, A.: "Design of a new multispan greenhouse capital", *Informes de la Construcción*, 63(2): 47-56, 2011.
- VON ELSNER, B.; BRIASSOULIS, D.; WAAIJENBERG, D.; MISTRIOTIS, A.; VON ZABELTITZ, C.; GRATRAUD, J.; RUSSO, G.; SUAY-CORTES, R.: "Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries (Part I: Design Requirements)", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75(1): 1-16, 2000.
- MÉXICO, COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE): *Manual de diseño de obras civiles*, pp.7-80, México, 1993.
- MÉXICO, INSTITUTO NACIONAL DE LA INFRAESTRUCTURA FÍSICA EDUCATIVA (INIFE): *Normas y especificaciones para el estudio y proyectos de construcción e instalaciones*, pp. 2-17, México, 1998.

Recibido: 17 de junio de 2013.

Aprobado: 22 de julio de 2014.

Arturo Ocampo Ramírez, Ing. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, Correo electrónico: ingaor@hotmail.com