



DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE INVERNÁCULO METÁLICO TIPO CUBIERTA A 2 AGUAS SOMETIDO A CARGAS DE VIENTO PARA USO HORTÍCOLA.

Daiana Gaggiotti¹, Javier L. Idzi¹, Marcos Amado¹, Santiago Mugetti¹ y Fernando Gutierrez¹

¹ IAME-Departamento de Mecánica - Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata.

Av. 1 y 47, B1900 La Plata, Buenos Aires

correo-e: marcos.amado@ing.unlp.edu.ar, iame@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

Con el objetivo de incrementar la calidad, cantidad, continuidad, rendimiento y competitividad de la producción hortícola del partido de La Plata, surge la necesidad de estudiar la implementación de una tecnología de invernáculos adecuada a los requerimientos situacionales de resistencia estructural y resiliencia ante ráfagas de viento elevadas. Estas ráfagas de viento se producen al menos en dos oportunidades al año, produciendo grandes pérdidas de producción.

A partir de lo anterior y en respuesta a la necesidad expuesta se ha desarrollado el diseño y la simulación de un prototipo de invernáculo modelo para la producción de hortalizas en el Partido de La Plata con prestaciones funcionales adecuadas a las velocidades pico de viento de la zona.

El prototipo propuesto fue un modelo a dos aguas de 6mx6mx3m.

Se utilizó la Norma CIRSOC 102 para determinar la velocidad básica del viento, los factores de direccionalidad, altura, ocupación y cerramiento del edificio, y luego calcular las presiones dinámicas sobre las 6 superficies a barlovento y sotavento, y las fuerzas netas sobre cada superficie. El material utilizado fue IRAM-IAS U500 2592.

La simulación estructural se realizó utilizando un software comercial, las cargas se aplicaron sobre los perfiles estructurales de todas las superficies. Los vínculos que son empotramientos se aplicaron sobre las bases de las columnas. De la simulación estructural estática isotrópica se analizaron las tensiones y los desplazamientos.

La simulación permitió analizar las tensiones con el objetivo de verificar que no superen el límite de fluencia. En cuanto a los desplazamientos verticales se verificó que sean inferiores a $L/150$, y los laterales inferiores a $H/160$, donde L es la distancia entre apoyos y H es la altura de las columnas.

Se pudo concluir que los diseños propuestos satisfacen las solicitaciones estructurales y se cumplen las condiciones impuestas por la normativa utilizada para el desarrollo.

Palabras Clave: *Invernáculos, Elementos Finitos, Análisis lineal.*

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un prototipo de invernáculo a escala real, dentro del marco del programa de financiamiento del COFECyT (Consejo Federal de Ciencia y Tecnología – COFECyT) para AgroIndustria. El trabajo surge debido a la necesidad del sector hortícola de disponer de una estructura alternativa que pueda soportar los vientos de la región, dado que las estructuras que se utilizan actualmente son de madera y no soportan la velocidad del viento característica de la región, afectando, después de una tormenta, el cultivo, lo que se traduce en pérdidas de cultivo, gastos de mano de obra y nuevos materiales. El trabajo de diseño se realizó durante el año 2020 y se está planificando la construcción del prototipo en la zona hortícola.

Para el desarrollo de este trabajo se propuso una configuración estructural de 3m de ancho, 6m de largo, y 3m de alto, para esta configuración se determinan las presiones netas sobre cada superficie del invernáculo. Las presiones que aparecen sobre las distintas caras se deben a la velocidad del viento, y a otros factores como la altura. Como no existe una normativa nacional que para el dimensionamiento de invernáculos, se utilizó como base las normas CIRSOC 102 y CIRSOC 301, después de una amplia revisión bibliográfica sobre el tema.

Se analizaron alrededor de 8 configuraciones distintas, la presentada en este trabajo es la que mejor se adapta a las características del viento en la región hortícola platense. Los criterios que se utilizaron para seleccionar las estructuras fueron el desplazamiento y la tensión admisible del material, los desplazamientos permisibles se determinaron en base a las normas mencionadas y la tensión admisible en base al material de los perfiles. Los casos analizados fueron 2, ambos se muestran en la Figura 1, y tienen en cuenta la dirección en la que sopla el viento, luego para cada caso se determinaron las presiones sobre las distintas caras del invernáculo, luego se aplicó el coeficiente de seguridad y en base a estos valores se aplicaron las cargas sobre los perfiles de las distintas superficies y se realizaron las simulaciones para encontrar los desplazamientos máximos, las tensiones máximas y las zonas de mayor sollicitación.

El objetivo de presentar este trabajo en el congreso es que se pueda disponer de un procedimiento claro de dimensionamiento de invernáculos, dado que para el desarrollo del trabajo fue difícil disponer de una referencia clara y concreta.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del prototipo comienza con el diseño de la configuración estructural mostrada en la Figura 1. Para esta configuración se seleccionan los posibles perfiles que soporten las cargas del viento asociadas a la región. Luego por [3] se determinan y se establecen las características geográficas y geométricas que se muestran en Tabla 1, posteriormente con la Ecuación (1) se calcula la presión dinámica que depende de las características del terreno y del cuadrado de la velocidad, con este valor se determinan las presiones netas sobre las superficies a sotavento, barlovento y laterales, considerando los casos de presión interna positiva y negativa, utilizando la Ecuación (2) y considerando los estados de carga de viento normal a la cumbrera y viento paralelo a la cumbrera Figura 2, luego por [3] se aplica la Ecuación (4), que es con la que definitivamente se dimensiona la estructura, posteriormente se realiza una simulación estructural elástica estática, en la cual las cargas se colocan sobre los perfiles y las sujeciones de la Figura 11.

El análisis se realiza con el objetivo de conocer los desplazamientos resultantes de la Figura 12 y las tensiones mostradas en la Figura 13, luego los valores de las tensiones se comparan con la tensión admisible del material y los desplazamientos se comparan con las Ecuaciones (5) y (6).

3. ECUACIONES

Se presentan las ecuaciones principales utilizadas para el cálculo de las presiones.

Presión dinámica

$$q_z = 0.613 * K_z * K_{zt} * K_d * V^2 * I \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (1)$$

K_d : Factor de direccionalidad del viento

K_z : coeficiente de exposición

K_{zt} : Factor topografico

V : velocidad básica del viento

I : factor de importancia

Presión neta

$$p = q * G * C_p - q_i * (GC_{pi}) \quad \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2)$$

G : Factor de efecto de ráfaga

C_p : coeficiente de presiones

GC_{pi} : Coeficiente de presión interna

Según [4], se consideran las siguientes ecuaciones para los estados límites de servicio, que tienen en cuenta las acciones permanentes (peso propio) y las acciones variables (esfuerzos generados por el viento):

$$\text{Estados límites de servicio: } D + 0.7W \quad (3)$$

$$\text{Estados últimos de servicio: } 1.2D + 1.6W \quad (4)$$

D: Peso propio de la estructura

W: Fuerza generada por el viento

Desplazamientos verticales: no debe superar $L/150$, siendo L, la distancia entre apoyos.

$$D_V = \frac{2000 \text{ mm}}{150} = 13.33 \text{ mm} \quad (5)$$

Desplazamientos laterales: Son los desplazamientos de las columnas respecto a las bases por acción del viento y los valores máximos no deben superar $H/160$, siendo H la altura de la columna.

$$D_L = \frac{2000 \text{ mm}}{160} = 12.5 \text{ mm} \quad (6)$$

Los valores calculados anteriormente no se deben superar en ninguna parte de la estructura.

4. TABLAS

4.1 Clasificación del invernáculo

La tabla que se presenta a continuación contiene la información de la ubicación geográfica del invernáculo y los coeficientes obtenidos de la norma [3].

Tabla 1. Clasificación del invernáculo

Localidad de emplazamiento	La Plata-Pcia de Buenos Aires
Topografía del Terreno	Rural Plano
Altura de cumbrera	3 m
Longitud	6 m
Ancho	6 m
Naturaleza de la ocupación	Categoría 1
Categoría de exposición	C
Velocidad básica del Viento	45 m/s
Altura media de Cubierta	2.5 m
$K_{zt}=1$	Factor topográfico
$K_d=0.85$	Factor de direccionalidad
$K_z=0.87$ entre 0-5m para exposición C	Coefficiente para la presión dinámica
$I=0.87$	Importancia
$G=0.85$, para edificio rígido	Factor de efecto de ráfaga
$G_{Cpi}= +0.55, -0.55$, para edificio parcialmente cerrado	Coefficiente de presión interna

4.2 Presiones netas de diseño

En las Tablas 1 a 4 se muestran las presiones netas resultantes, calculadas con la Ecuación (2) y con el factor de seguridad (1.6) contemplado en la Ecuación (4), para las distintas direcciones del viento mostradas en la Figura 1 y para las distintas superficies mostradas en la Figura 2.

Tabla 2. Caso-Viento Normal a la cumbrera-Coefficiente de presión interna positivo

Superficie	z (m)	q (Pa)	C_p	G_{Cp}	+ G_{cpi}	Presión Neta (Pa)	f	Presión Neta (Pa)
Pared a barlovento	0-3	1218	0.8	0.85	0.55	158.34	1.6	253.34
Pared a sotavento	0-3	1218	-0.5	0.85	0.55	-1187.55	1.6	-1900.08
Paredes laterales	0-3	1218	-0.7	0.85	0.55	-1394.61	1.6	-2231.37
Cubierta a barlovento	0-3	1218	-0.5	0.85	0.55	-1187.55	1.6	-1900.08
Cubierta a sotavento	0-3	1218	-0.6	0.85	0.55	-1291.08	1.6	-2065.72

Tabla 3. Caso-Viento Normal a la cumbrera-Coeficiente de presión interna negativo

Superficie	z (m)	q (Pa)	Cp	GC _p	-G _{cpi}	Presión neta (Pa)	f	Presión neta (Pa)
Pared a barlovento	0-3	1218	0.8	0.85	-0.55	1498.14	1.6	2397.024
Pared a sotavento	0-3	1218	-0.5	0.85	-0.55	152.25	1.6	243.6
Paredes laterales	0-3	1218	-0.7	0.85	-0.55	-54.81	1.6	-87.696
Cubierta a barlovento	0-3	1218	0.5	0.85	-0.55	152.25	1.6	243.6
Cubierta a sotavento	0-3	1218	-0.6	0.85	-0.55	48.72	1.6	77.952

Tabla 4. Caso-Viento paralelo a cumbrera – Coeficiente de presión interna positivo

Superficie	z(m)	q(Pa)	Cp	G	+G _{cpi}	Presión neta (Pa)	f	Presión (Pa)
Pared a barlovento	0-3	1218	0.8	0.85	0.55	158.34	1.6	253.344
Pared a sotavento	0-3	1218	-0.5	0.85	0.55	-1187.55	1.6	-1900.08
Paredes laterales	0-3	1218	-0.7	0.85	0.55	-1394.61	1.6	-2231.376
Cubierta	0-h (2,5 m)	1218	-0.9	0.85	0.55	-1601.67	1.6	-2562.672
Cubierta	h-2h (2,5 -5 m)	1218	-0.5	0.85	0.55	-1187.55	1.6	-1900.08
Cubierta	>2h	1218	-0.3	0.85	0.55	-980.49	1.6	-1568.784

Tabla 5. Caso-Viento paralelo a cumbrera-Coeficiente de presión interna negativo

Superficie	z(m)	q (Pa)	Cp	G	-Gcpi	Presión neta (Pa)	f	Presión (Pa)
Pared a barlovento	0-3	1218	0.8	0.85	-0.55	1498.14	1.6	2397.024
Pared a sotavento	0-3	1218	-0.5	0.85	-0.55	152.25	1.6	243.6
Paredes laterales	0-3	1218	-0.7	0.85	-0.55	-54.81	1.6	-87.696
Cubierta	0-h (2,5 m)	1218	-0.9	0.85	-0.55	-261.87	1.6	-418.992
Cubierta	h-2h (2,5 -5 m)	1218	-0.5	0.85	-0.55	152.25	1.6	243.6
Cubierta	>2h	1218	-0.3	0.85	-0.55	359.31	1.6	574.896

5. FIGURAS

Se presentan las figuras de: la configuración estructural propuesta; las presiones sobre cada superficie para los estados de carga; los vínculos en las bases de las columnas; los desplazamientos y las tensiones.



Figura 1: Dimensiones de la estructura y direcciones del viento

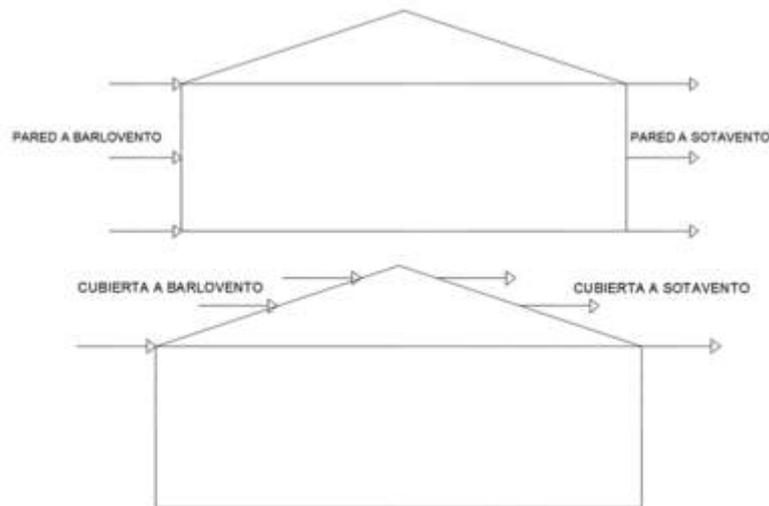


Figura 2: Superficies a barlovento y sotavento

5.1 Estados de carga considerados

Se consideran dos estados de carga, que se corresponden con las dos posibles direcciones del viento, siendo estas, normal a la cumbrera y paralela a la cumbrera.

5.1.1 Viento normal a cumbrera

Para los distintos estados de carga se determinan las presiones netas sobre el SPRFV.

Interpretación física de los signos

Los signos positivos indican que el viento se dirige hacia la superficie (presiona la superficie), los signos negativos indican que el viento sale de la superficie (succiona la superficie).

Caso 1. Viento Normal a la cumbrera-Coeficiente de presión interna positivo

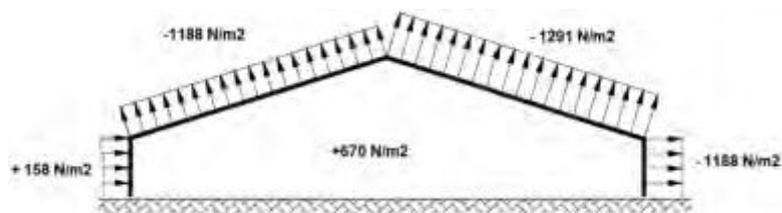


Figura 3: Presiones sobre paredes y cubiertas a sotavento y barlovento



Figura 4: Presiones sobre paredes laterales

Caso 2. Viento Normal a la cumbrera-Coeficiente de presión interna negativo

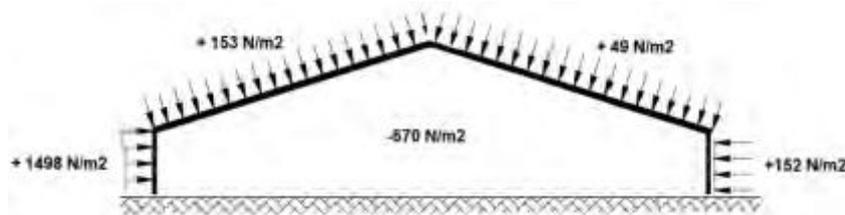


Figura 5: Presiones sobre paredes y cubiertas a sotavento y barlovento



Figura 6: Presiones sobre paredes laterales

5.1.2 Viento paralelo a la cumbrera

Caso 1. Viento paralelo a cumbrera – Coeficiente de presión interna positivo

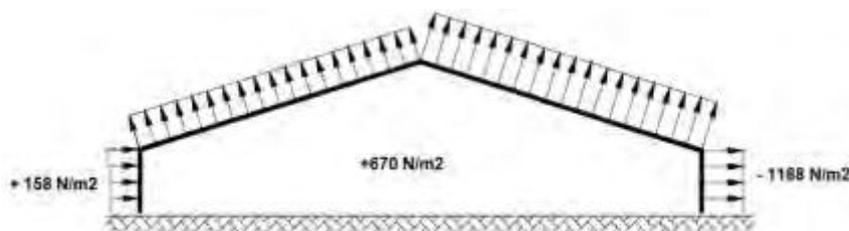


Figura 7: Presiones sobre superficies y cubiertas a sotavento y barlovento.

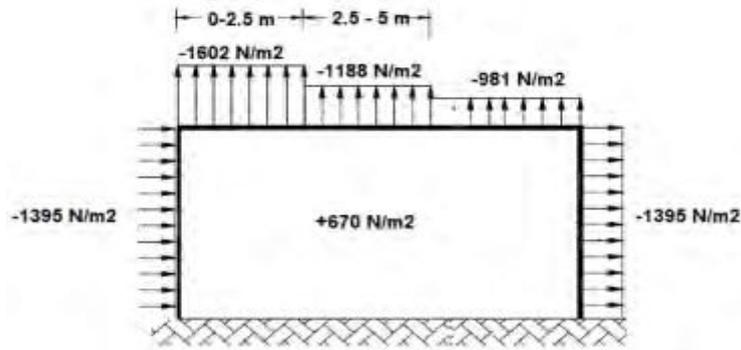


Figura 8: Presiones sobre laterales y cubierta

Caso 2. Viento paralelo a cumbrera-Coeficiente de presión interna negativo

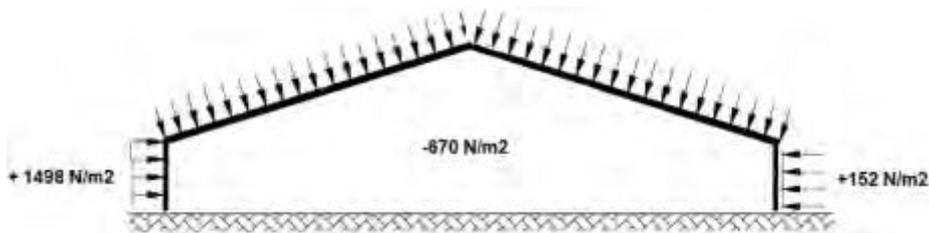


Figura 9: Distribución de presiones sobre paredes laterales

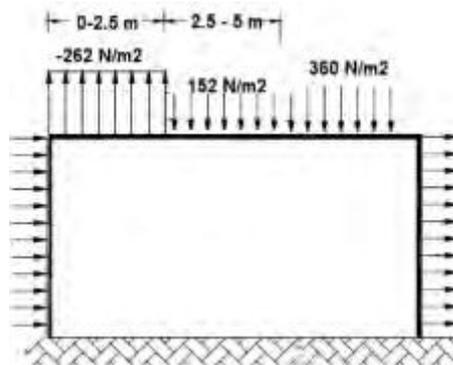


Figura 10: Distribución de presiones sobre la cubierta

6. MALLA Y VÍNCULOS

Se presentan los detalles de la malla utilizada en la simulación y los vínculos propuestos.

Tabla 6. Características de la malla utilizada

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño de elementos	12 mm
Tolerancia	0,6 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	3.850.634
Número total de elementos	1.928.360
Porcentaje de elementos distorsionados	0%

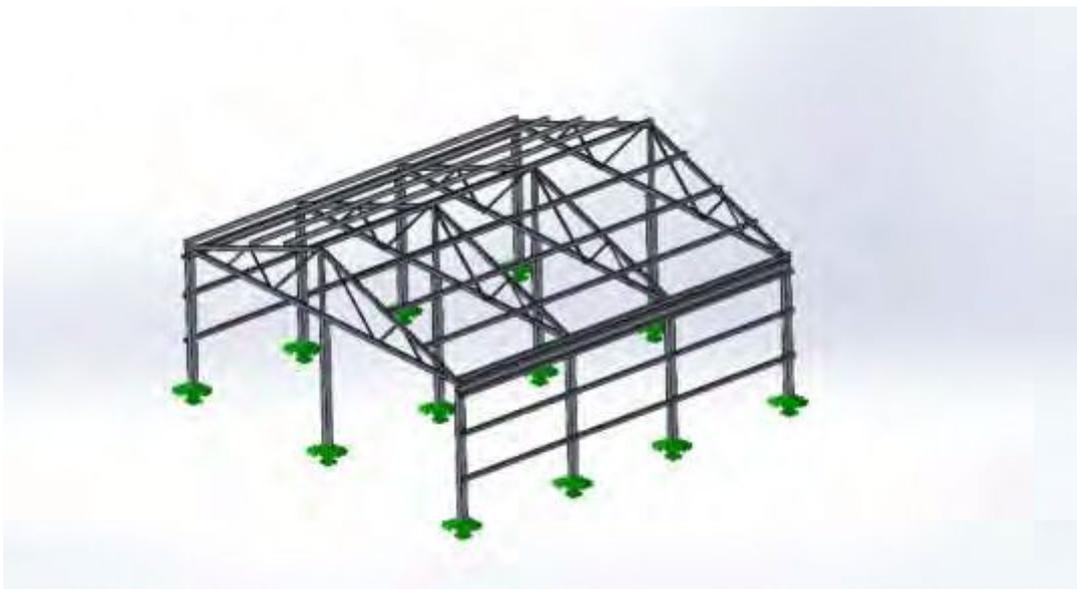


Figura 11: Fijaciones consideradas en el modelo

7. RESULTADOS

Los resultados obtenidos fueron los desplazamientos y las tensiones resultantes.

Se pudo observar que los desplazamientos no superan los valores límites de las Ecuaciones (5) y (6), y que las tensiones resultantes en el punto de mayor sollicitación no superan la tensión admisible del material. Además de los resultados antes mencionados con la simulación realizada se pudo identificar las zonas de mayor sollicitación, siendo los perfiles que se encuentran en techo (cubierta).

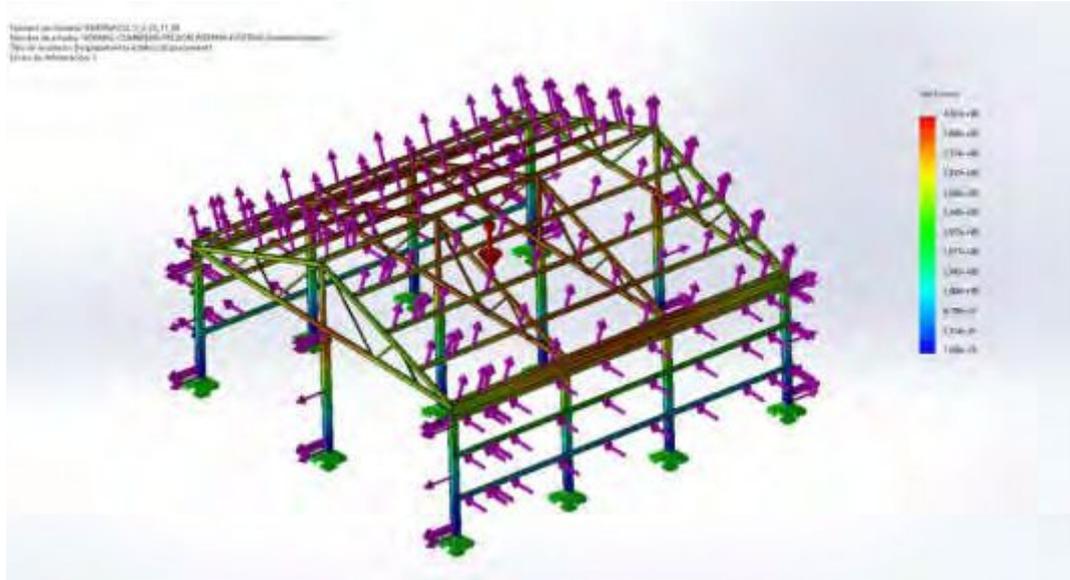


Figura 12: Desplazamientos resultantes del SPRFV

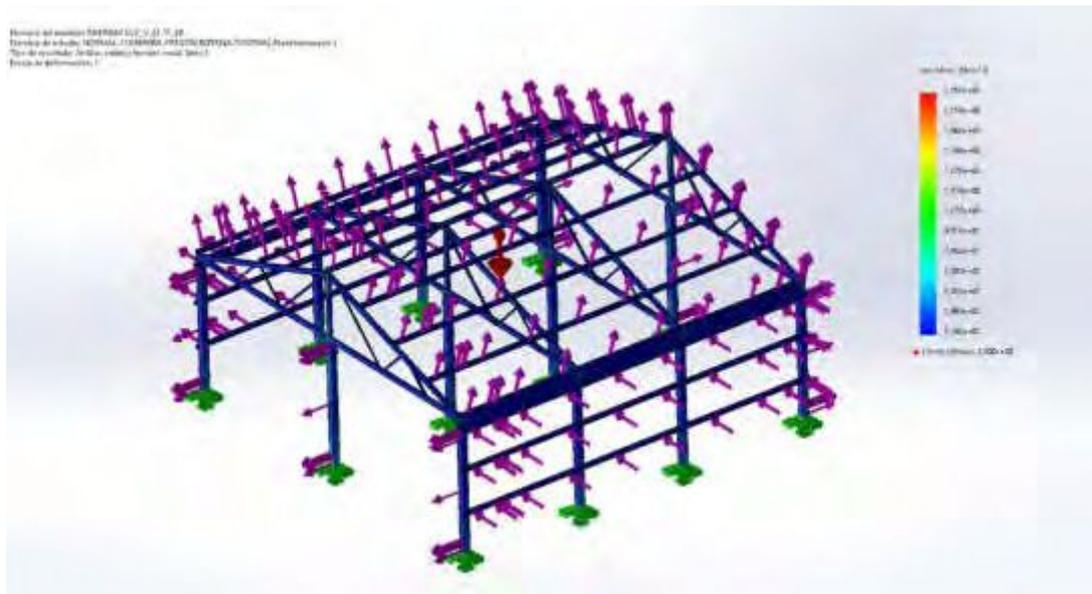


Figura 13: Tensiones sobre la estructura del SPRFV

8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El principal factor que influye sobre los esfuerzos en las distintas superficies es la velocidad del viento al cuadrado, por lo tanto, el dimensionamiento estructural está condicionado por la velocidad.

Otro factor que condiciona el diseño de los invernáculos es su altura, a mayor altura mayor presión dinámica sobre las superficies, por lo tanto, la altura del invernáculo se debe limitar entre 3 m y 5 m.

El costo de la estructura está condicionado por la velocidad del viento, a mayor velocidad, mayor costo debido a que los perfiles estructurales que se deben utilizar, deben ser de mayor espesor para soportar los esfuerzos estructurales.

Se pudo observar que los mayores esfuerzos se concentran en los perfiles de la cubierta para los casos de viento normal a la cumbrera, además en el caso de viento paralelo a la cumbrera, la distribución de presiones no es uniforme a lo largo de la longitud de cumbrera, siendo mayor en el primer tramo de contacto entre el edificio y el viento.

Se verificó que los desplazamientos resultantes no superan los valores máximos admisibles contemplados en la norma y que las tensiones no superan la tensión admisible del material, por lo tanto, el caso considerado se encuadra dentro del campo de validez establecido por la norma.

Con respecto a los diseños propuestos y al estudio de cargas realizado sobre la geometría propuesta, se puede concluir que para el caso más crítico de análisis que es el de viento normal a la cumbrera con coeficiente de presión interna positivo, se verifica que los desplazamientos verticales y horizontales no superan el valor máximo calculado, y que las tensiones no superan la tensión admisible del material.

Se está realizando una investigación en conjunto con productores y pymes de sector agropecuario para el desarrollo de invernáculos modulares, tipo a dos aguas, tipo túnel y mixto. El objetivo es desarrollar una línea de fusibles mecánicos que permitan reducir los costos de la estructura metálica. Estos fusibles permitirán desconectar el nylon de la estructura cuando el viento supere un umbral de velocidad (90-110 Km/h), de esta forma el invernáculo quedaría completamente abierto y las cargas sobre los perfiles se verían reducidas ampliamente. Otro factor sobre el que se está trabajando es la ensamblabilidad de las estructuras metálicas, para que los productores puedan armar en un tiempo reducido la estructura, en caso de que fuertes tormentas afecten su estabilidad, además se está buscando que los invernáculos puedan sujetarse al suelo mediante anclajes móviles (actualmente en diseño), esto evitaría la ejecución de obras civiles en terrenos que son destinados a la producción de cultivo.

REFERENCIAS

- [1] Gates N. et al, *Notched fatigue behavior and stress analysis under multiaxial states of stress*, International Journal of Fatigue, Vol. 67, pp. 2–14, 2014.
- [2] Tropea C. et al, *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007.
- [3] CIRSOC 102. Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones, 2005.
- [4] CIRSOC 301- Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios y sus comentarios, 2005.