

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
Sede: “Carlos Rafael Rodríguez”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA



Trabajo de Diploma

Tema:

Resistencia mecánica de edificaciones a solicitudes de cargas de sistemas fotovoltaicos en cubiertas. MICALUM. Cienfuegos

AUTOR: GODSON MAKUYA NZOLA

TUTOR(ES):

Dr.C. José P. Monteagudo Yanes. (CEEMA) UCF

MSc. Reinier Jiménez Borges. (CEEMA) UCF

Ing. Andrés L. Álvarez González (CEEMA) UCF

Ingeniería Mecánica 5to año

“Año 61 de la Revolución”

Cienfuegos 2020

Contenido	
Introducción	1
Problema científico:	2
Hipótesis:	2
Objetivo:	2
Objetivos específicos:	2
CAPÍTULO 1- Estado actual y tendencias en el estudio de los sistemas solares fotovoltaicos colocados en las cubiertas de las edificaciones.	4
1.1 Características de los sistemas solares fotovoltaicos colocados en las cubiertas de las edificaciones.	4
1.1.1 Sistemas fotovoltaicos conectados en la red en edificio	4
1.1.2 Sistema fotovoltaico en techos, cubiertas y suelos.	6
1.1.3 Orientación de los paneles	6
1.2 Tendencias en la colocación de paneles fotovoltaicos en las cubiertas de las edificaciones.	8
1.2.1 Posibilidades de integración morfológica de paneles solares en edificación.	8
1.2.3 Integración en cubiertas	9
1.2.4 Cubiertas inclinadas	10
1.2.5 Cubiertas Planas	10
1.3 Garantía de la ventilación para reducir la temperatura de operación.	12
1.3.1 Sistema de refrigeración de paneles fotovoltaicos.	12
1.4 Estudio de cargas en estructuras que soportan paneles fotovoltaicos en cubiertas.	14
1.5 Buenas prácticas en el uso de sistemas solares fotovoltaicos en cubiertas industriales.	17
1.5.1 Ronera Central de Santo Domingo (Villa Clara)	17
1.5.2 El Hospital General Doctor Juan Bruno Zayas (Santiago de Cuba)	18
1.5.3 Sanyo Solar Ark (Japón)	19
1.5.4 Apple Park (California)	20
1.6 Impacto económico del uso de la energía solar fotovoltaica en empresas industriales.	21
1.7 Softwares para el estudio de resistencia estructural de edificaciones sometidas a cargas externas.	22
1.8 Conclusiones Parciales.	0
Capítulo 2. Comportamiento de las estructuras de la empresa Micalum Cienfuegos bajo condiciones de carga	2

2.1 Levantamiento estructural de las naves de la empresa y estados ante solicitudes de carga propia de la edificación.....	2
2.1.2 Caracterización de la empresa MICALUM.	2
2.1.3 Característica constructivas de las edificaciones de la empresa Micalum.....	2
2.1.4 Levantamiento de las cubiertas de las edificaciones en la Empresa MICALUM.....	3
2.2 Teoría clásica sobre las deformaciones y tensiones en vigas.	4
2.3 Dibujo con dimensiones reales de las estructuras de las naves industriales....	9
2.4 Selección de software para evaluar la concentración de tensiones y desplazamientos. Aplicación a las tres naves en estudio.	11
2.5 Respuesta de las estructuras a las solicitudes de cargas propias de la edificación. Determinación de las zonas de peligro.....	14
2.6 Conclusiones parciales.....	20
Capítulo 3: Zonas de altas concentración de tensiones en las estructuras ante la acción de las cargas distribuida de los paneles fotovoltaicos. Evaluación de soluciones.....	22
3.1 Evaluación del comportamiento de las estructuras de las naves antes la solicitud de cargas distribuidas por los paneles fotovoltaicos. Determinación de las zonas de peligro.	22
3.2 Propuesta de modificaciones estructurales a la concentración de tensiones peligrosas.....	33
3.3 Simulación con software profesional de la respuesta de la estructura ante las solicitudes de carga.....	34
3.4 Conclusiones parciales	36
Capítulo IV. Evaluación económica de la solución estructural para lograr resistencia a las cargas distribuidas de los paneles fotovoltaicos en cubiertas.....	38
4.1 Cuantificación de los costos de perfiles.....	38
4.2 Conclusiones generales	39
4.3 Recomendaciones.....	40
Bibliografía.....	41

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Nombre y Apellidos. Firma.
Vice Decano.

Firma del Tutor.

Nombre y Apellidos. Firma.
Sistema de Documentación y Proyecto.

Frases

"Imposible es solo una palabra que utilizan los débiles que encuentran más fácil vivir en el mundo que les ha dado que explorar el poder que tienen para cambiarlo. Imposible no es un hecho. Es una opinión. Imposible no es una declaración. Es un desafío. Imposible es potencial. Imposible es temporal. Nada es imposible"

Muhammad Ali.

Dedicatoria

A mis padres por su gran dedicación y su apoyo, les agradezco el haberme apoyado y ayudado a ser la persona que soy.

A mis hermanos y primos por el apoyo moral.

A mi novia por haberme soportado todo mi estrés.

A mis amistades que de una forma u otra han contribuido a mi formación y han estado presentes todo momento.

Agradecimientos

A mi tutor Dr.C. José P. Monteagudo Yanes, sin el cual este proyecto no se hubiese realizado, gracias por sus consejos, su paciencia, entrega y por brindarme la oportunidad de ser su estudiante.

A mi tutor MS.c Reinier Jiménez Borges sin el cual este proyecto no hubiese realizado, gracias por su ayuda, su paciencia y su entrega en este proyecto.

Y también agradezco a ingeniero Andrés L. Álvarez por ayudarme en toda esta etapa del proyecto gracias por su paciencia y su entrega en este proyecto.

A los directivos y trabajadores de la Empresa MICALUM de Cienfuegos en especial al profesor Ing. Francisco Pérez Díaz por brindarme su apoyo en la realización de este proyecto.

Agradezco también a Lazara Pérez Clemente por ser una madre para nosotros durante estos 5 años en la República de Cuba y a los directivos de la relación internacional.

Agradezco la Revolución Cubana y su líder histórico el comandante Fidel Castro Ruz por esta cooperación con la Republica hermana de Angola.

Agradezco al gobierno de la Republica de Angola por brindarme esta oportunidad y haberme ayudado en realizar mi sueño de ser ingeniero y contribuir para el desarrollo de Angola.

Muchas gracias a todos que de una forma u otra han contribuido en mi formación durante estos 5 años.

Resumen

El presente trabajo aborda la resistencia mecánica de edificaciones a solicitudes de cargas de sistemas fotovoltaicos en las cubiertas de las naves de la empresa MICALUM Cienfuegos. Para lograr los objetivos propuestos se realizó el cálculo de resistencia mecánica en las naves 11,15,16, para la evaluación de las estructuras de la empresa se utilizó el software Autodesk Inventor y se calculó los desplazamientos principales de las tres estructuras considerando la fuerza gravitatoria que fueron 3.66 mm para la nave 11, 2.4 mm para la nave 15 y 1.3 mm para nave 16. Se calculó los desplazamientos y se construyó el diagrama de cortante y momento flector de las estructuras 11,15,16 y soportaran las cargas uniformemente distribuida de los módulos fotovoltaicos excepto la nave 11 que presenta un mayor desplazamiento que las otras naves. La nave 11 sufre mayor deformación a un valor de 8.18 mm y se modificó la nave 11 colocándose 22 vigas pie de amigos y se logró disminuir un 50% la deformación de dicha nave a un valor de 3.87 mm y la evaluación económica muestra que la inversión para el reforzamiento de la nave 11 asciende a un costo de 612.00 euro.

Palabras claves:

Sistemas fotovoltaicos en cubiertas; Sistemas fotovoltaicos conectados a la red, Generación fotovoltaica.

Summary

This work addresses the mechanical resistance of buildings to load requests from photovoltaic systems on the roofs of the warehouses of the company MICALUM Cienfuegos. To achieve the proposed objectives, the mechanical resistance calculation was carried out in the buildings 11,15,16, for the evaluation of the company's structures, the Autodesk Inventor software was carried out and the main displacements of the three affected structures were calculated, the gravitational force. which were 3.66 mm for the ship 11, 2.4 mm for the ship 15 and 1.3 mm for the ship 16. The displacements were calculated and the shear diagram and the bending moment of the structures 11,15,16 were constructed and the Uniformly distributed loads of the photovoltaic modules except Hall 11, which has a greater displacement than the other ships. The ship 11 undergoes greater deformation to a value of 8.18 mm and ship 11 was modified, placing 22 friends foot beams and the deformation of said ship was modified by 50% to a value of 3.87 mm and the economic evaluation shows that the investment for The reinforcement of ship 11 amounts to a cost of 612.00 euros.

Keywords:

Roof photovoltaic systems; Photovoltaic systems connected to the network, Photovoltaic generation.

Introducción

Un sistema fotovoltaico de conexión a red, es aquel que aprovecha la energía del sol para transformarla en energía eléctrica que cede a la red convencional para que pueda ser consumida por cualquier usuario conectado a ella. (Sánchez Ros, 2015)

Aprovechar la energía solar es sostenible, sensato y seguro. La técnica para beneficiarse de todo su rendimiento es moderna y eficaz, cumpliendo con las exigencias de un abastecimiento duradero y a la vez respetuoso con el medio ambiente. (Gutiérrez, Carbalán, & Giró, 2007)

Los sistemas para la impermeabilización de la cubierta con módulos fotovoltaicos integrados-módulos-fotovoltaicos- son respetuoso con el medio ambiente, duraderos, sólidos y extraordinariamente resistentes a la intemperie. (Gutiérrez, Carbalán, & Giró, 2007)

El sistema con modulo fotovoltaico puede instalarse en cualquier tipo de cubierta, sea plana o inclinada, pudiéndose adaptar a cualquier forma de construcción de un edificio industrial, comercial, residencial, etc. La única condición recomendable es que la cubierta tenga un mínimo de pendiente suficiente, para que la escorrentía del agua de lluvia proceda a su auto-evacuación. (Gutiérrez, Carbalán, & Giró, 2007)

Debido a su escaso peso, esta tecnología no supone un aumento considerable para la carga estática de la construcción de la cubierta ni del edificio, ya que no se necesita instalar una subestructura especial para la sustentación del sistema como ocurre con los paneles solares convencionales. Asimismo, las ráfagas de los vientos no suponen ningún problema, ni es necesaria la instalación de pararrayos independiente. (Gutiérrez, Carbalán, & Giró, 2007)

La aplicación del sistema con módulos fotovoltaicos repercute positivamente en los aspectos económicos y funcionales de la impermeabilización de la cubierta.

A solicitud de la dirección de la empresa MICALUM de Cienfuegos se realiza este trabajo, producto de la necesidad de determinar las zonas de mayores concentraciones de cargas, ante las solicitudes de los pesos de los paneles

fotovoltaico en las cubiertas de las edificaciones, lo que posibilitará reforzar las estructuras de las naves industriales garantizando la estabilidad mecánica.

Problema científico:

¿Soportarán las estructuras de las naves industriales de la empresa MICALUM las cargas uniformemente distribuidas de los módulos fotovoltaicos ubicados en las cubiertas?

Hipótesis:

Determinar las zonas de mayores concentraciones de cargas, ante las solicitudes de los pesos de los paneles fotovoltaico en las cubiertas de las edificaciones posibilitará reforzar las estructuras de las naves industriales garantizando la estabilidad mecánica.

Objetivo:

Determinar las zonas de altas concentraciones de carga y proponer formas de reforzamiento de las estructuras con el menor número de perfiles y los menores costos.

Objetivos específicos:

1. Resumir el estado actual y las tendencias nacionales e internacionales en el estudio de los sistemas solares fotovoltaicos colocados en las cubiertas de las edificaciones.
2. Realizar el levantamiento estructural de las edificaciones (naves) de la empresa y determinar el estado actual ante las solicitudes de carga propia de la edificación.
3. Establecer las zonas de altas concentraciones de carga cuando sobre la estructura actúa la carga distribuida de los paneles fotovoltaicos. Proponer soluciones que garanticen la resistencia estructural con el menor costo.

4. Evaluación económica de los cambios estructurales que garanticen la resistencia a la carga de los paneles fotovoltaicos en la cubierta de las naves.

CAPÍTULO 1- Estado actual y tendencias en el estudio de los sistemas solares fotovoltaicos colocados en las cubiertas de las edificaciones

1.1 Características de los sistemas solares fotovoltaicos colocados en las cubiertas de las edificaciones

Tradicionalmente se distingue entre los sistemas fotovoltaicos conectados en la red (SFGR) instalados sobre suelo y en edificio. Dentro de los instalados sobre suelo existen los sistemas estáticos, con una inclinación y orientación fija, y los sistemas de seguimiento, que varían la posición del generador a lo largo del día y año para maximizar la radiación efectiva incidente. (Meneses, 2016)

En los instalados sobre edificación es frecuente diferenciar los sistemas según el grado de integración del sistema con el edificio. Así, el documento HE5 (FCEdificiones, 2010) del Código Técnico de la edificación considera tres casos en lo que a la disposición de los módulos se refiere: general, superposición de módulos e integración arquitectónica. Considera que existe integración arquitectónica cuando los módulos cumplen una doble función energética y arquitectónica y además sustituyen elementos constructivos convencionales o son elementos constituyentes de la composición arquitectónica. Se supone que existen superposición arquitectónica cuando la colocación de módulos se realiza paralela a la envolvente del edificio. (Meneses, 2016)

1.1.1 Sistemas fotovoltaicos conectados en la red en edificio

El diseño de un sistema fotovoltaico conectado en la red en edificaciones es frecuentemente más complejo que el de un sistema fotovoltaico conectado sobre suelo. La integración del sistema fotovoltaico con el edificio exige tener en cuenta muchos factores que condiciona la ubicación y la configuración del generador. Así, la orientación e inclinación del generador ya no puede ser elegida para optimizar la producción energética, sino que las características propias del edificio y de los elementos que alberga obligan muy frecuentemente a optar por ángulos que difieren del óptimo. En este tipo de sistemas, el diseñador debe tomar las

decisiones oportunas para aprovechar las sinergias entre edificios y sistemas fotovoltaicos, reduciendo las posibles interferencias entre uno y otro. Por ejemplo, un generador fotovoltaico puede ser instalado como toldo fijo sobre ventanas reduciendo la insolación que entra en el edificio y, por tanto, disminuyendo la carga térmica en el mismo. La ubicación del generador vendrá determinada por la orientación de la fachada que se pretende sombrear, su inclinación será un compromiso entre la producción energética del SFCR y la cantidad de sombra deseada, y el tamaño del generador dependerá del área acristalada a sombrear. (Meneses, 2016)

Los sistemas instalados en edificación no suelen superar la potencia de 100 kW. Su interconexión con la red eléctrica se realiza frecuentemente en baja tensión, aunque esta opción no siempre es posible. En este tipo de Sistemas fotovoltaicos conectados en la red (SFCR) el diseño de los sistemas eléctricos debe tener en cuenta canalizaciones previstas o existentes en el edificio. Por facilidad de instalación y mantenimiento, y seguridad de los sistemas, es recomendable el uso de canalizaciones separadas del resto de sistemas del edificio. Sin embargo, los criterios de seguridad eléctrica aconsejan utilizar una red de tierras común para el edificio y el sistema fotovoltaico. Una proporción importante del trabajo de ingeniería se dedica a ubicar correctamente el generador para maximizar la producción y minimizar el efecto del sombreado, y a diseñar y elegir los elementos de anclaje de los módulos al edificio. (Meneses, 2016)

Los SFCR en edificación poseen grandes ventajas como son una mayor cercanía entre el lugar de consumo y el de generación y su sencillo montaje, aprovechando al máximo la estructura del edificio, sin la necesidad de una obra ingenieril que requiera movimientos de tierra ni cimentación para el montaje de la estructura. (Meneses, 2016)

1.1.2 Sistema fotovoltaico en techos, cubiertas y suelos

Los techos, cubiertas y suelos de diferentes dimensiones son potencialmente aptos para las instalaciones fotovoltaicas. En el caso de los parques fotovoltaicos se debe simplificar al máximo la preparación del terreno, por ejemplo, el movimiento de tierra. (Novygrad, 2019)

La geometría del parque puede ser diversa, rectangular, irregular o dispersa, de acuerdo con la geografía del lugar. Se tiende que sea rectangular con las líneas de módulos de una misma longitud, pero esto depende también de la orientación de los módulos con respecto al área disponible para la ubicación del parque fotovoltaico. En la figura 1.1 se muestra un ejemplo de un espacio completamente rectangular, donde la disposición por la orientación de los módulos no puede tener la misma longitud, o sea, donde es imposible lograr el parque en forma rectangular. (Novygrad, 2019)

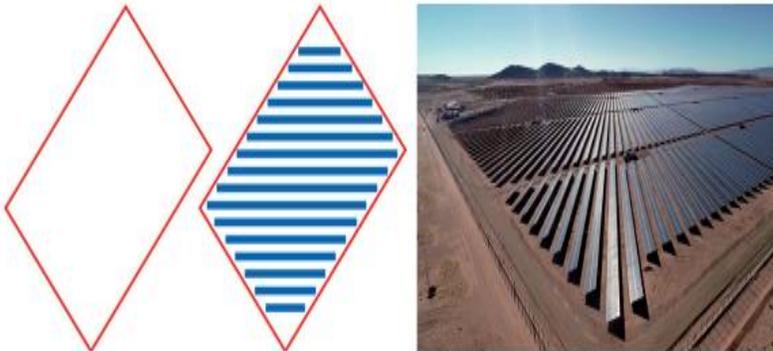


Figura 1.1: Geometrías irregulares de instalaciones fotovoltaicas. **Fuente:** (Novygrad, 2019)

La tendencia de que los parques tengan una configuración rectangular no se debe convertir en una camisa de fuerza.

1.1.3 Orientación de los paneles

En el hemisferio norte, la mayoría de los sistemas fotovoltaicos están orientados hacia el sur, en ocasiones se desvían ligeramente hacia el sureste o suroeste,

buscando privilegiar la generación a ciertas horas con una ligera disminución de ésta. (Novygrad, 2019)

También existen instalaciones fijas con orientación este-oeste figura 1.2 Su aspecto negativo es que la eficiencia de un módulo disminuye un poco. No obstante, la configuración este-oeste tiene varias bondades, que se pueden tener en cuenta para algunas instalaciones de acuerdo con sus características:

- Aunque por cada módulo la generación fotovoltaica disminuye, debido a que en una misma área puede haber como 40% más de módulos este-oeste, se puede generar por área alrededor de 30% más que los sistemas orientados al sur.
- Ensanchan la curva de generación; aunque disminuye algo la potencia generada en el día por módulos, comienzan a generar energía fotovoltaica más temprano y terminan más tarde.
- Los ángulos de inclinación para Cuba serían 15°, por lo que a menores ángulos de inclinación se pueden utilizar con capacidades de soporte de carga más bajas.
- Poseen una mayor resistencia a los vientos huracanados; no importa de donde venga el viento, incluso del norte.
- Pueden requerir menos materiales de montaje, con reducción en los costos de instalación.



Figura 1.2: Sistemas fotovoltaicos con orientación este-oeste. **Fuente:** (Novygrad, 2019)

Los módulos fotovoltaicos se pueden instalar con separaciones mínimas e inclinaciones de unos 15° . Para una misma cantidad de área, en orientación este-oeste, se pueden instalar alrededor de 40% más de módulos que en orientación sur, por lo que el rendimiento anual de la instalación sería entre 30% y 40% mayor que la de los sistemas orientados al sur.

La orientación este-oeste, aunque no se recomienda todavía su generalización, es una posibilidad a experimentar en industrias y comercios, por ejemplo, que tengan techos o cubiertas de agua este-oeste.

1.2 Tendencias en la colocación de paneles fotovoltaicos en las cubiertas de las edificaciones

1.2.1 Posibilidades de integración morfológica de paneles solares en edificación

Entre los productos comerciales para integración arquitectónica, la agencia Internacional de la Energía (IEA) definen seis posibilidades morfológicas para integrarse arquitectónicamente (Figura 1.3):

1. Captadores para integración en techumbres inclinados

2. Sistemas de placas o elementos para disponerse como cubierta horizontal para techumbres planas o aproximadamente planas.
3. Filtros solares de techumbre con la presencia de colectores como elementos de filtración de luz.
4. Recubrimiento de fachada opaco como absorbentes solares para captación de los paneles fotovoltaicos.
5. Ventanales fotovoltaicos o filtros solares para ventanas configuradas por colectores fotovoltaico.
6. Elementos funcionales compositivos de fachadas como balaustradas o sombrillas colectoras.

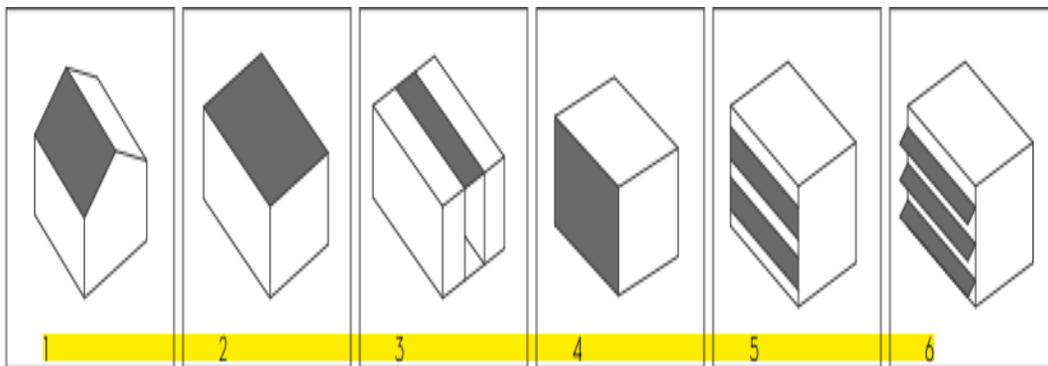


Figura 1.3: integración morfológica de los paneles en los edificios. **Fuente:** (López, 2018)

1.2.3 Integración en cubiertas

Las cubiertas ofrecen el mayor potencial de integración fotovoltaica de los edificios en los entornos urbanos, en términos de producción energética, por ser las superficies mejor situadas y de mayor extensión, libres de obstáculos y restricciones. Además, en zona ecuatorial el potencial es sustancialmente mayor en cubiertas, en cambio, en regiones cercanas a los polos, ganan potencial las fachadas. Dependiendo del tipo de edificación, la integración se puede realizar en cubiertas inclinadas o en horizontales, sean o no transitables. (López, 2018)

1.2.4 Cubiertas inclinadas

Conviene que los módulos se sitúen, en lo posible, paralelos a alguna de las aguas de la cubierta. Sin embargo, la verdadera integración consiste en sustituir los elementos convencionales de la techumbre por colectores solares. De este modo ya no es necesario tener en cuenta el área de sombra en la siguiente fila de módulos, como ocurre con la superposición (figura 1.4). En el caso de módulos fotovoltaicos pueden tener diversos tipos de estructuras, desde simples laminados, hasta paneles de cerramiento tipo sándwich o con forma y características de tejas. También puede resultar interesante utilizar módulos de silicio amorfo en edificios, por su bajo peso y facilidad de montaje, aunque se trata de una tecnología menos eficiente. (López, 2018)



Figura 1.4: Integración de fotovoltaicos en cubiertas inclinada. **Fuente:** (López, 2018)

1.2.5 Cubiertas Planas

La incorporación de colectores solares, ya sea fotovoltaica, sobre una cubierta plana es la forma de integración más habitual. Mediante una estructura de soporte, se calibran y disponen colectores en inclinación y orientación adecuada para conseguir la máxima producción energética, normalmente retranqueados (construir edificio más adentro respecto a las fachadas de sus edificios vecino) del

perímetro del edificio, haciéndolos menos perceptibles desde la calle y reduciendo la afectación arquitectónica figura 1.5. (López, 2018)

Pero esto tiene otro valor añadido; al colocar así los paneles, estos pueden estar muy juntos y dar una sombra continua a toda la cubierta, lo que conlleva a reducir el calor y contribuyen a mitigar el sobrecalentamiento. Esta estrategia consigue convertir una cubierta convencional en una cubierta ventilada. No obstante, debemos cuestionarnos sobre escaso grado de integración alcanzado, en la mayoría de los casos los paneles se superponen a una cubierta ya existente y, por tanto, no sustituyen a ningún otro elemento constructivo. (López, 2018)

En general, hay dos tipos de sistemas de fijación para cubiertas planas, mediante perforación del material de la cubierta, o mediante lastres, si las cargas de viento sobre las estructuras lo permiten. Los cables deben ir protegidos, en canaletas o huecos y debe dejarse algo de espacio entre filas, tanto para el mantenimiento, como para evitar en lo posible el sombreado de unas sobre otras.



Figura 1.5: Sistema de fijación en cubierta plana de módulos fotovoltaico. **Fuente:** (López, 2018)

1.3 Garantía de la ventilación para reducir la temperatura de operación

En la última década se han desarrollado investigaciones para identificar los factores que afectan el funcionamiento de los paneles fotovoltaico, con el fin de mitigar sus efectos y lograr mejoras significativas en términos de eficiencia para este tipo de sistemas. Dichos factores se clasifican en propios o externos de acuerdo con su naturaleza de operación. Variaciones climáticas, alta temperatura de la célula solar y exposición al medio ambiente, por ejemplo, pueden afectar el rendimiento de los paneles solares considerablemente. (Cepeda & Sierra, 2017)

Los factores propios son condiciones con las que cuenta el panel solar en su estructura interna que puedan llegar a afectar su funcionamiento, se pueden encontrar factores como temperatura de funcionamiento del panel y efectos de reflexión y suciedad. (Cepeda & Sierra, 2017)

La temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico, desempeña un papel clave en el proceso de conversión de energía. Tanto en el rendimiento eléctrico como la potencia de salida del módulo, depende linealmente de la temperatura de funcionamiento del panel. (Cepeda & Sierra, 2017)

Los paneles solares absorben en promedio el 80% de la irradiación solar recibida. Sin embargo, una parte de esta irradiación se convierte en electricidad y la restante se convierte en calor. La fracción que se convierte en calor aumenta la temperatura del módulo, formando concentraciones de portadores intrínsecos produciendo una mayor saturación de corriente, lo que provoca una reducción en la eficiencia y deterioro en el panel fotovoltaico.

1.3.1 Sistema de refrigeración de paneles fotovoltaicos

Vista la negativa influencia de la alta temperatura en el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, surge la necesidad de analizar los métodos de refrigeración estudiados y empleados. Existen básicamente dos métodos a seguir: la refrigeración pasiva y la refrigeración activa. Las técnicas más utilizadas y viables

para controlar el aumento de la temperatura de los paneles fotovoltaicos son (Teruel, 2015):

- Aire condicionado
- Enfriamiento a base de agua
- Enfriamiento por inmersión líquida
- Refrigeración termoeléctrica
- Refrigeración del tubo de calor
- Micro-canales
- Intercambiadores de calor mejorado
- Enfriamiento por chorros
- Micro-canales híbridos
- Sistema de cambio de fase

Otros estudios, optan por hacer circular un flujo de agua en forma de capa delgada sobre la cara frontal del módulo fotovoltaico. El agua absorbe gran parte del calor generado por el módulo y, además, su evaporación contribuye aún más a la disminución de la temperatura. Se consiguen mejoras de rendimiento de hasta el 12%. La capa de agua se generaba a través de su rocío sobre la cara anterior del panel, mediante una serie de boquillas situadas en la parte superior, tal como se puede ver en la figura 1.6. (Teruel, 2015)



Figura 1.6: Creación de la capa de agua sobre el módulo fotovoltaico a través de las boquillas. **Fuente:** (Teruel, 2015)

1.4 Estudio de cargas en estructuras que soportan paneles fotovoltaicos en cubiertas

Las dimensiones de la nave Figura 1.7 surgen como respuesta a las necesidades de espacio/ volumen de la nave, esta quedara completamente definida en función de las siguientes magnitudes (Garcia & Gálvez, 2003):

Ancho o luz (L): Amplitud necesaria, capaz de cubrir el ancho máximo presupuestado en el diseño.

Altura útil (H): También llamada altura de columna, equivale a la altura disponible para la instalación de equipos, accesorios a la nave o la altura necesaria para el paso de vehículos, si fuera necesario.

Pendiente (α): Angulo de la vertiente con respecto a la horizontal que pasa por los extremos de las columnas. Deberá representar la inclinación necesaria que impida el efecto pleno del viento sobre las vertientes, evacue convenientemente las aguas lluvias y deslice la nieve acumulada en el techo.

Longitud (Z): Extensión, capaz de cubrir la longitud máxima presupuestada en el diseño.

Las dimensiones restantes, quedarán definidas mediante las relaciones siguientes:

Longitud de la vertiente (Q):

$$Q = \frac{L}{2 * \cos(\alpha)}$$

Altura de Techo (F):

$$F = Q * \sin(\alpha)$$

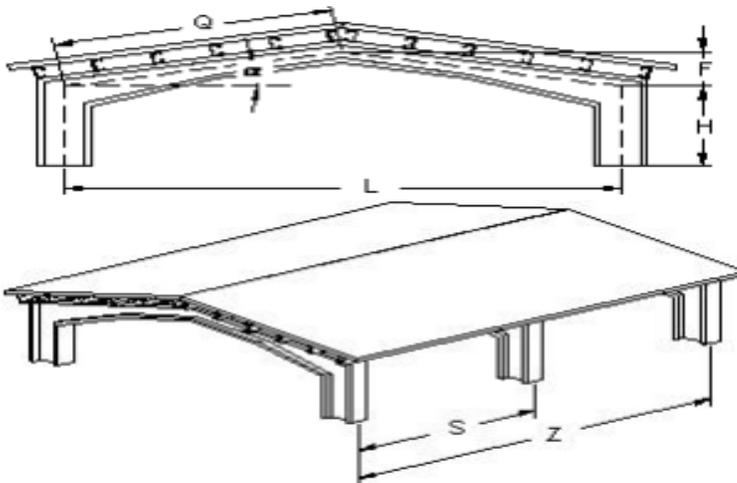


Figura 1.7: Dimensiones de una nave. **Fuente:** (García & Gálvez, 2003)

Solicitaciones

En el diseño del método se distinguen dos clases de esfuerzo, en función de las características y naturaleza de la nave:

Acciones Directas

Se definen como aquellas solicitaciones sobre las cuales un usuario podrá tener control absoluto de ellas, cuantificando su magnitud o ignorando completamente su efecto en función de las condiciones geográficas, forma, posición o instalación.

Entre este tipo de cargas es posible de distinguir:

Acción del viento.

Nieve sobre la estructura.

Variación de la temperatura.

Acción del viento

La acción del viento sobre las construcciones de acero deberá estar conforme a lo dispuesto en la NC-285:2003 (Oficina Nacional de Normalización, 2003):

Esta norma establece los valores nominales mínimos de cargas debido al uso y/o ocupación de edificaciones de todo tipo.

$$q = q_{10} * C_t * C_s * C_H * C_r * C_{ra} * C_f \quad \left(\frac{KN}{m^2} \right)$$

Donde:

q_{10} : presión básica del viento.

C_t : coeficiente de recurrencia.

C_s : coeficiente de topografía o de sitio.

C_H : coeficiente de altura se determina según lo establecido en la NC: 285:2003.

C_r : coeficiente de ráfaga.

C_{ra} : coeficiente de reducción de área.

C_f : coeficiente de forma.

1.5 Buenas prácticas en el uso de sistemas solares fotovoltaicos en cubiertas industriales

1.5.1 Ronera Central de Santo Domingo (Villa Clara)

Aprovechando las características de los techos de la fábrica, fue instalado un parque solar fotovoltaico, compuesto por un total de 2 752 paneles, capaces de generar más de 900 MWh/año. (Cabrera, 2018)

Pionera en el uso de la energía solar en Cuba, la estrategia se vincula a las acciones encaminadas a prevenir, mitigar y eliminar impactos negativos de quehacer industrial al entorno en la elaboración de rones. (Cabrera, 2018)

Del total de la energía producida por los paneles a partir del empleo de la luz solar, la fábrica consume 38% y entrega el resto es decir el 62%, al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) lo cual significa un importante ahorro y eficiencia en la producción ronera. (Cabrera, 2018)

Con esa práctica se han dejado de emitir a la atmósfera 19 142 toneladas de dióxido de carbono y no ha sido necesario el empleo de 473 toneladas de crudo, lo cual ahorro a la economía de la empresa. (Cabrera, 2018)



Figura 1.8: Paneles fotovoltaico sobre el techo de la empresa ronera central de Santo Domingo. **Fuente:** (Cabrera, 2018)

1.5.2 El Hospital General Doctor Juan Bruno Zayas (Santiago de Cuba)

El Hospital General Doctor Juan Bruno Zayas, de la ciudad santiaguera, está formada por 384 paneles con una potencia de 96 kWp, que ocupa una extensión de 600 metros cuadrados sobre los techos de la cisterna y la lavandería del centro asistencial.

Al captar la energía solar durante aproximadamente cinco horas al día, el parque fotovoltaico garantiza el consumo total de 14 salas y la lavandería, que favorece a cerca de 700 pacientes.

El Clínico Quirúrgico Juan Bruno Zayas, como también se le conoce, es un alto consumidor de energía, al igual que todos los hospitales de Cuba, y esta energía alternativa es utilizada en función de brindar un buen servicio al paciente en la cocción de los alimentos, el agua caliente para el baño de los enfermos así como la iluminación de las salas. (Redacción Digital, 2019)

En las zonas de actividades logísticas de la Zona Especial de Desarrollo de Mariel (ZEDM), por ejemplos, las empresas cubanas Servicios Logísticos Mariel, tiendas Recaudadoras de Divisa (TRD) y Cimex operan extensas plataformas de almacenamiento, con cubiertas que suman más de 22 000 m² (Prensa Latina, 2019)

En ellas se han instalado 9 480 paneles fotovoltaicos, que tienen un potencial total de 2.4 MWh, lo cual permite satisfacer la demanda de sus operaciones y vender el excedente a la Unión Eléctrica Cubana. (Prensa Latina, 2019)

La base logística de TRD ha aportado al sistema electroenergetico 1.1 GWh, mientras que CIMEX reporta una entrega de 900 MWh y Servicios Logísticos Mariel, genera como promedio mensual 138 MWh y su suministro a la red nacional supera los 2.5 GWh. (Prensa Latina, 2019)

En la terminal intermodal de Angosta, los techos tienen instalados paneles solares con una potencia total de 125 kWh. Esta energía generada contribuye a cubrir una parte del consumo de electricidad en la edificación.

El centro de Elaboración de Alimentos, cubre el 75% de su consumo diario de electricidad mediante la generación de energía solar. Los 2 520 paneles instalados sobre su cubierta de 280 W, tienen una capacidad máxima instalada de 705 kW y generan como promedio diario 4 MWh. (Prensa Latina, 2019)



Figura 1.9: Paneles fotovoltaicos sobre las naves de la zona de desarrollo de Mariel.
Fuente: (Prensa Latina, 2019)

1.5.3 Sanyo Solar Ark (Japón)

Es un edificio con una arquitectura fotovoltaica en Japón de 315 metros de largo, 37 de alto, con formas curvas, elegantes y rotundas a la vez, muy al estilo japonés, un edificio puente, un cuadrado curvo y gigante forrado de 5 000 paneles fotovoltaicos. Se construyó en 2005 para la exposición universal de Aichi, como un icono de lo que puede conseguir la arquitectura integrada con las tecnologías productoras de energías renovables. (Marrero, 2018)



Figura 1.10: Arquitectura fotovoltaica en Japón, Sanyo Solar Ark. **Fuente:** (Marrero, 2018)

1.5.4 Apple Park (California)

Las nuevas instalaciones de Apple en Cupertino, en construcción, alojarán sus nuevas oficinas centrales. Será alimentado en un 100% por energías renovables, sin dejar de estar conectado a la red eléctrica. El conjunto solar en el techo del complejo proporcionará el 75% (17 MW) de la energía requerida al día y la parte restante provendrá de una granja solar de 130 MWh/día. Otra característica importante es la ventilación natural del edificio, con lo que se estima que no se requeriría de sistemas de ambientación mecánicos durante 9 meses del año. (López, 2018)



Figura 1.11: Apple Park. **Fuente:** (López, 2018)

1.6 Impacto económico del uso de la energía solar fotovoltaica en empresas industriales

Se sabe que la energía solar es una fuente renovable de energía ilimitada que no produce emisiones de CO₂ u otros gases, ya que no consume combustible ni precisa de otros recursos como el agua o el viento. Un aspecto que la convierte en uno de los sistemas de producción de energía más interesantes desde el punto de vista medioambiental. (Perez, 2014)

Los costos pueden variar mucho dependiendo de la ubicación de su instalación aunque los costos de un sistema solar fotovoltaico han disminuido considerablemente en la última década, la energía solar aún sigue siendo una inversión a largo plazo y que depende de muchos factores, estas son algunas herramientas que sirven para evaluar si es rentable o no tener un sistema de paneles fotovoltaico en edificios, más allá de su importancia como apoyo a la disminución del uso de energías más contaminantes. (Rodríguez, 2017)

- Reducción de impuestos para empresas.
- La vivienda adquiere mayor valor de venta por la instalación solar y el uso de energías menos contaminantes.
- Cero costos de producción de energía.
- **Impacto económico:** Por último, destacar que la mayor parte del coste económico proviene de la propia instalación de los sistemas de paneles solares, por lo que se fomenta la creación de empleo local. Por tanto, el uso generalizado de estos sistemas impulsa la creación de empleo y repercute en la economía de la zona.
- **Ahorro económico:** La producción de energía limpia proveniente del sol supone un ahorro económico importante, ya que es una fuente inagotable de energía que no está sujeta a las fluctuaciones de los mercados ni a los efectos derivados de la especulación. Como ya ha sido mencionado anteriormente, requiere un desembolso inicial importante que se ve

compensado por una rápida amortización de la inversión. Y lo más importante, es una fuente de producción continua e ilimitada de energía que no requiere costes adicionales de mantenimiento ni de uso.

1.7 Softwares para el estudio de resistencia estructural de edificaciones sometidas a cargas externas

Los softwares realizan las operaciones computacionales orientadas a calcular los esfuerzos, reacciones, deformaciones u otra información relevante. Permiten agilizar el largo proceso de cálculo de una modelación y además obtener resultados de alta confiabilidad. Existen diferentes tipos de software para la modelación, los más utilizados son:

Tabla 1.1: Descripción de los softwares para el estudio de resistencia estructural de edificación sometidas a cargas externas. **Fuente:** Elaboración propia.

Software	Descripción
CYPECAD 3D	Posee variadas soluciones para diseñar, modelar, calcular y documentar diferentes tipos de estructuras dependiendo las características de cada una, ha sido concebido para realizar el cálculo y dimensionamiento de estructuras de hormigón armado y metálicas, sometidas a acciones horizontales y verticales, para viviendas, edificios y proyectos de obra civil.
SAP2000	Programa de elementos finitos que cuenta con una interfaz gráfica 3D orientada a objetos. Debido a su fiabilidad, poder de cálculo y versatilidad, se utiliza para dimensionar puentes, presas, edificios y todo tipo de infraestructuras. Cabe destacar también la amplia selección de plantillas con las que dispone, la generación de mallas de cálculo automáticas o la facilidad en la definición de vistas personalizadas.
	Este software está especialmente destinado al cálculo y diseño de infraestructuras de obra civil, solucionando problemas de ingeniería

<p>Midas</p>	<p>estructural, geotecnia y mecánica.</p> <p>Entre las ventajas que nos aporta está la utilización de algoritmos avanzados de elementos, un aumento importante de la velocidad de análisis y el uso ilimitado de elementos, nudos o combinaciones de cargas.</p>
<p>Autodesk Robot</p>	<p>Con el respaldo de una compañía especializada como es Autodesk, está considerado uno de los más completos del mercado. Cuenta con tecnología MEF y es capaz de calcular las uniones de acero, estructuras de madera o secciones de armado, entre otras cosas. Con el uso cada vez más extendido de la metodología Building Information Modeling hay que destacar también su gran interoperabilidad con Revit, uno de los programas BIM más utilizados, mejorando de forma notable los flujos de trabajo.</p>
<p>Tekla Structures</p>	<p>Por último, vamos a destacar el programa Tekla Structures que, aunque no es capaz de dimensionar la estructura, gracias a la enorme cantidad de materiales que puede modelar es de gran utilidad.</p> <p>Asimismo, desde un enfoque BIM, está pensado para todo tipo de estructuras, como pueden ser estadios de fútbol, plataformas marítimas, puentes o rascacielos.</p>
<p>ArcelorMittal</p>	<p>Este software se utiliza para el cálculo y diseño preliminar de estructuras de acero que sirve de soporte a ingenieros y arquitectos: pórticos de un solo vano, uniones y conectores, cerchas, vigas, compuestas y alveolares.</p>

1.8 Conclusiones Parciales

1. La instalación de los sistemas solares fotovoltaicos se ha realizado preferiblemente sobre el suelo, con un alto costo en la preparación del terreno y las estructuras de soporte de los paneles. Ello atenta contra el costo competitivo de esta tecnología como sistema de generación eléctrica.
2. En los últimos años ha existido una fuerte tendencia a la instalación de los sistemas solares fotovoltaicos sobre la cubierta de edificaciones, dado que reduce los gastos de preparación del terreno, no requiere complejas estructuras de soporte y deja en libertad grandes áreas de terreno disponible para otros usos.
3. La colocación sobre cubierta ha demostrado que también resulta útil la colocación de sistemas orientados este-oeste, lo cual no era utilizado en los sistemas colocados sobre terrenos. Ello amplió la posibilidad de generación de los sistemas porque se pueden instalar cerca de un 40% más de módulos que en orientación sur.
4. Ha resultado de gran utilidad el sistema fotovoltaico integrado a la arquitectura de la edificación en cubiertas y paredes. Contribuyen a la hermetización de la edificación y a la rigidez de áreas o zonas en construcción.
5. La verdadera integración arquitectónica consiste en sustituir los elementos convencionales de la techumbre por colectores solares. Con ello ya no es necesario tener en cuenta el área de sombra en la siguiente fila de módulos, como ocurre con la superposición.
6. Hay que garantizar la ventilación del panel en la colocación en cubiertas. La temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico es determinante en el proceso de conversión de energía. El rendimiento eléctrico y la potencia de salida del módulo, dependen linealmente de la temperatura de funcionamiento del panel.

7. La carga sobre la cubierta que crea la colocación de los paneles en Cuba está en dependencia del peso propio de la cubierta, el peso de la instalación fotovoltaica y la carga de los vientos. Ello obliga a una comprobación de resistencia de la estructura ante estas solicitudes.
8. Si bien ya hoy es una tendencia a nivel mundial, existen en Cuba buenas prácticas en el uso de sistemas solares sobre cubiertas, la Ronera del Central George Washington y el hospital general Dr. Juan Bruno Zayas en Santiago de Cuba son ejemplos de ello.
9. Para el estudio de la resistencia de las edificaciones son varios los softwares que hoy se dispone en el campo de la ingeniería civil y mecánica. Algunos de costo excesivo, por lo que se decide que el software Inventor puede ser una buena contribución a la determinación de las cargas y resistencia de las naves a estudiar.

Capítulo 2. Comportamiento de las estructuras de la empresa Micalum Cienfuegos bajo condiciones de carga

2.1 Levantamiento estructural de las naves de la empresa y estados ante solicitudes de carga propia de la edificación

2.1.2 Caracterización de la empresa MICALUM

La Empresa de Tecnología Avanzada de la Construcción, MICALUM, creada el 25 de mayo de 1999, tiene como objetivo realizar la fabricación, montaje y comercialización de carpintería de aluminio, cristal y falsos techos integrales y registrables, utilizando tecnologías de avanzada con destino al mercado interno en divisas en obras de los sectores turístico, inmobiliario, centros comerciales, aeropuertos, etc.

La empresa está ubicada en la calle 85-A, entre camino de la conductora y avenida 90, zona Industrial No.1, Pueblo Griffó, provincia de Cienfuegos. Las coordenadas geográficas dentro de las cuales se encuentra enmarcada esta empresa son: latitud norte 25,46 y -80.44 de longitud oeste. Cuenta con 19 edificaciones que están distribuidos entre talleres y zonas administrativas.

2.1.3 Característica constructivas de las edificaciones de la empresa Micalum



Figura 2.1: Vista satelital de la Empresa Micalum. **Fuente:** (Google Maps,2020).

La instalación de los paneles solares se realizará sobre los techos de las naves de la empresa Micalum, En la figura 2.1 se muestra una vista superior de la empresa Micalum.

Esta Empresa se caracteriza por ser una organización flexible y profesional, con un capital humano motivado y comprometido con sus clientes, la organización y la sociedad.

Objeto social:

- Producir, montar y comercializar productos y sistemas basados en la carpintería metálica y de PVC.
- Producir, montar y comercializar paneles divisorios, cubiertas y paquetes constructivos integrales.
- Producir, ensamblar y comercializar muebles de oficinas y habitacionales.

2.1.4 Levantamiento de las cubiertas de las edificaciones en la Empresa

MICALUM

En la tabla 2.1 se presenta el levantamiento de cada una de las cubiertas y la denominación dentro de la entidad.

Tabla 2.1: Descripción de las edificaciones de la Empresa MICALUM. **Fuente:** Elaboración propia.

Nave #	Denominación
1	Economía y Recursos Humanos
2	UEB Industria y Estantería Metálica
3	Dirección
4	Energético y producción (Dirección)
5	Comedor
6	Archivos, compradores, etc.



7	Almacén y Oficina de transporte
8	Taquillero
9	Taller Automotor
10	Almacén de carpintería de aluminio
11	Taller de Carpintería de aluminio
12	Almacén de Clarita
13	Almacén de Materias Primas e Insumos
14	Taller Estructura (industria)
15	Taller estructura (Laminador)
16	Parqueo
17	Taller de Madera
18	Taller de Madera y Almacén
19	Taller de Estructura (industria)

2.2 Teoría clásica sobre las deformaciones y tensiones en vigas

El análisis estructural de las vigas suele dividirse en vigas isostáticas e hiperestáticas. Esto está dado a las condiciones de apoyo que presente el elemento a analizar. Si esta tiene un número igual o inferior a tres incógnitas en sus reacciones. Para esto caso bastará con la aplicación de las ecuaciones (1) de equilibrio estático para resolverla:

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum M = 0 \quad \text{Ec.1}$$

Por otro lado, si la viga presenta un mayor número de incógnitas las ecuaciones anteriores no son suficientes y es necesario incorporar nuevas expresiones. A estos sistemas se le conocen como hiperestáticos.

Para el análisis de las vigas hiperestáticas es necesario analizar las deformaciones que experimenta, luego de ser cargada. Estas cargas generan tensiones de cortante y flexión en la barra que provocan su deformación. Este análisis tiene como objetivo fundamental en el caso de las estructuras el correcto

dimensionamiento, ya que muchas veces la verificación de las estructuras se realiza por este parámetro y no por la resistencia mecánica.

La teoría de las deformaciones se basa fundamentalmente en la Ley de Hooke. Esta establece que la relación entre la deformación unitaria es una constante y se denomina módulo de elasticidad

$$E = \left(\frac{\tau}{\varepsilon} \right) \text{ Ec. (2)}$$

Donde:

E: Modulo Elasticidad;(kg/cm²)

τ : Tensión;(kg/cm²)

ε : Deformación unitaria

Por otra parte, para dimensionar elementos sometidos a la flexión simple se tiene que la ecuación (3):

$$\tau = \left(\frac{Mf*V}{I} \right) \text{ Ec. (3)}$$

Donde:

τ : Tensión (kg/cm²)

M: Momento Flector (kg.cm)

V: Distancia entre la fibra neutra a la fibra más traccionada o más comprimida (cm)

I: Inercia (cm⁴)

La figura 2.2 presenta una estructura o pórtico compuesto, entre cada una de las bases existe un desplazamiento vertical (flecha) provocado por la carga distribuida. Además, existe una deformación en las bases, pero esta es despreciable en comparación con la flecha.

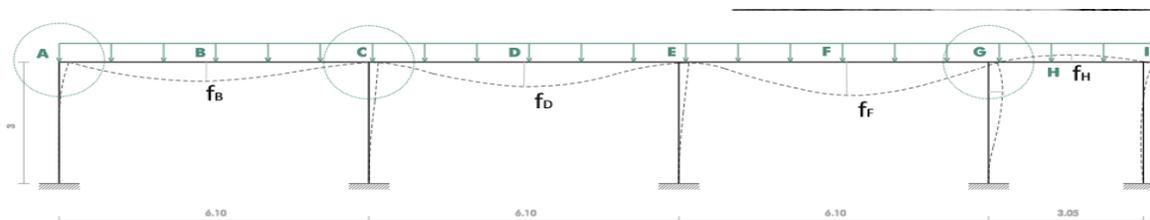


Figura 2.2: Representación de los desplazamientos verticales en estructuras compuestas.

Fuente: Elaboración propia.

La representación básica de las restricciones y la carga distribuida para la determinación de los diagramas de cortante y momento flector que se generan en la viga se observa en la figura 2.3

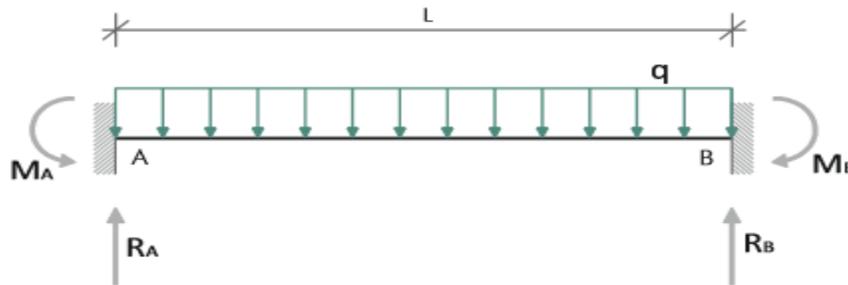


Figura 2.3: Restricciones y carga distribuida aplicada a la viga. **Fuente:** Elaboración propia.

Bajo estas condiciones el diagrama de cortante, momento flector y deformaciones se puede apreciar en la figura 2.4. Las expresiones que caracterizan dichas sollicitaciones son dadas en las ecuaciones 4,5 y 6.

$$V = \left(\frac{q \cdot L}{4} \right) \quad \text{Ec. (4)}$$

$$M_f = \left(\frac{q \cdot L^2}{12} \right); \quad M_f = \left(\frac{q \cdot L^2}{24} \right) \quad \text{Ec. (5)}$$

$$f_c = \left(\frac{q \cdot L^4}{384 \cdot EI} \right) \quad \text{Ec. (6)}$$

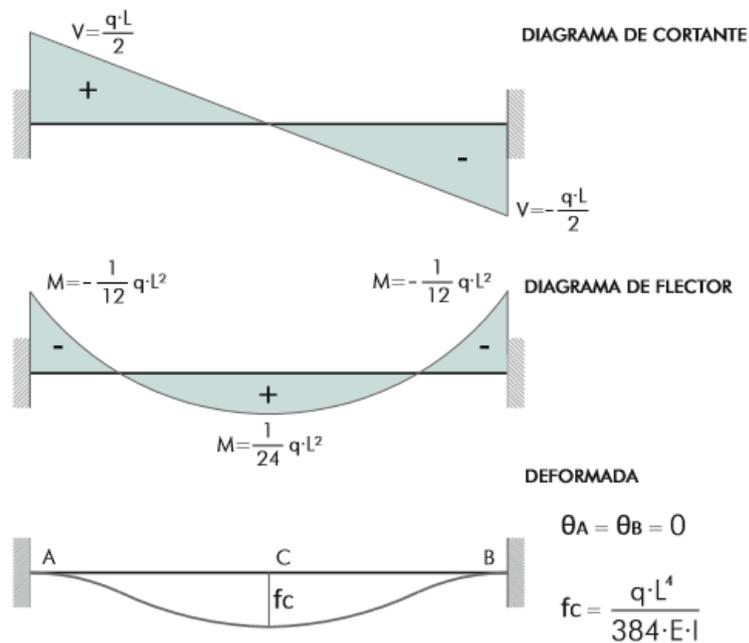


Figura 2.4: Diagrama de cortante, momento flector y deformaciones. **Fuente:** Elaboración propia.

En el caso de las tensiones actuantes están pueden ser del tipo axial (Figura 2.5), debidas al esfuerzo cortante (Figura 2.6) y momento flector (Figura 2.7). Para el caso de la tensión axial se tiene que:

$$\sigma = \left(\frac{N}{A}\right) Ec. (7)$$

Donde:

N: Esfuerzo axial; (kgf)

A: Área de la sección transversal;(m²)

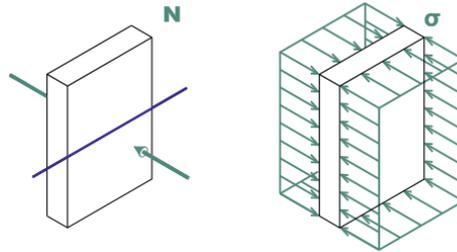


Figura 2.5: Representación de las tensiones axiales. **Fuente:** Elaboración propia.

Las tensiones de cortante son tensiones tangenciales (tangentes a la sección), por lo general tienen una distribución parabólica. Estas pueden ser determinadas mediante la Ec.8.

$$\tau_{\max} = \frac{3.V}{2.A}$$

Ec.8

V: Esfuerzo cortante (kg)

A: Área de la sección (m²)

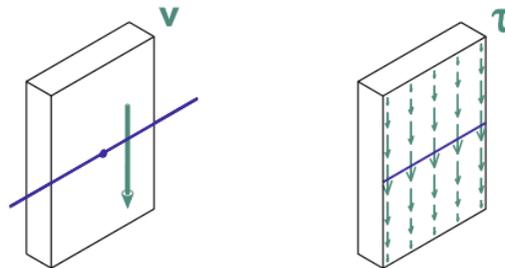


Figura 2.6: Representación de las tensiones de cortante. **Fuente:** Elaboración propia.

Las tensiones debidas al momento flector son tensiones normales (perpendicular a la sección), tienen una distribución lineal y máximas en los bordes de la sección. Las tensiones máximas pueden ser determinadas a partir de la ecuación 9 como:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_f}{W} \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

W: Módulo de la sección (m³)

M_f: Momento flector (kg.cm)

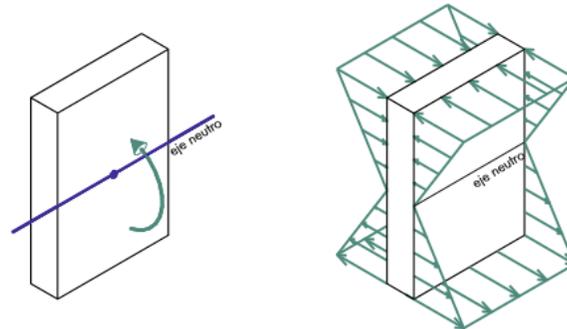


Figura 2.7: Representación de las tensiones para el caso del momento flector. **Fuente:** Elaboración propia

2.3 Dibujo con dimensiones reales de las estructuras de las naves industriales

Para el estudio fueron seleccionadas tres estructuras (naves) dentro de la empresa para así poder establecer una metodología de trabajo.

1. Nave 11: Taller de Carpintería de Aluminio
2. Nave 15: Taller de Estructuras
3. Nave 16: Parqueo

La Figura 2.8 corresponde a la **nave 11** (Taller de Carpintería de Aluminio), esta presenta la vista isométrica de la estructura. La tabla 2.2 presenta la distribución por tipos de vigas que fueron utilizadas en la estructura. En su mayoría son del tipo cuadradas/rectangulares utilizadas fundamentalmente en los soportes del techo. Las vigas en I presentes se utilizaron para todas las naves como bases de las mismas.

Tabla 2.2: Distribución de las vigas dentro de la estructura. **Fuente:** Elaboración propia.

Tipo de material	Cantidad
Vigas	113
- Canales	6
- Vigas en I	45
- Tubos cuadrados/rectangulares	62

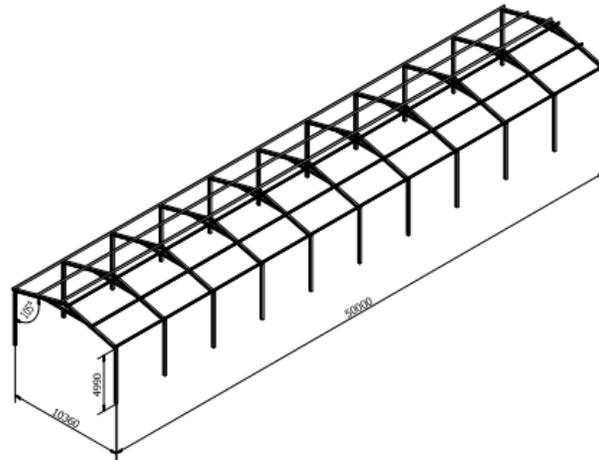


Figura 2.8: Vista isométrica nave 11 (Taller de Carpintería de Aluminio). **Fuente:** Elaboración propia.

La **nave 15** (Figura 2.9), presenta la vista isométrica de esta estructura. La estructura está compuesta por perfiles tipo I, tipo C y tubos rectangulares. La tabla 2.3 presenta la distribución de estas vigas.

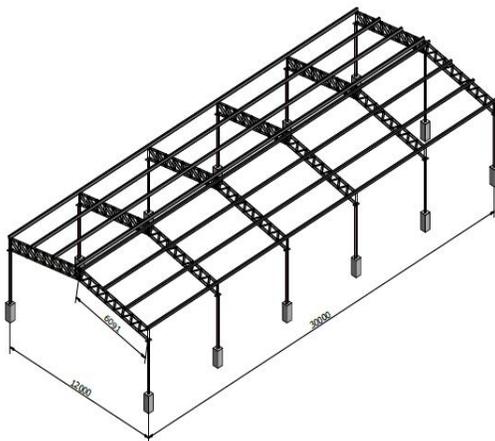


Figura 2.9: Nave 15 (Taller de Estructuras). **Fuente:** Elaboración Propia.

Tabla 2.3: Distribución de la cantidad de vigas en la estructura nave 15. **Fuente:** Elaboración propia.

Tipo de material	Cantidad
Vigas	960
- Canales	1
- Vigas en I	888
- Tubos cuadrados/rectangulares	46
-Barras cuadras/rectangulares/hexadecimales	8

La nave 16 (**parqueo**) figura 2.10 cuenta con un total de 74 vigas, 7 del tipo canales y 67 del tipo tubos rectangulares.

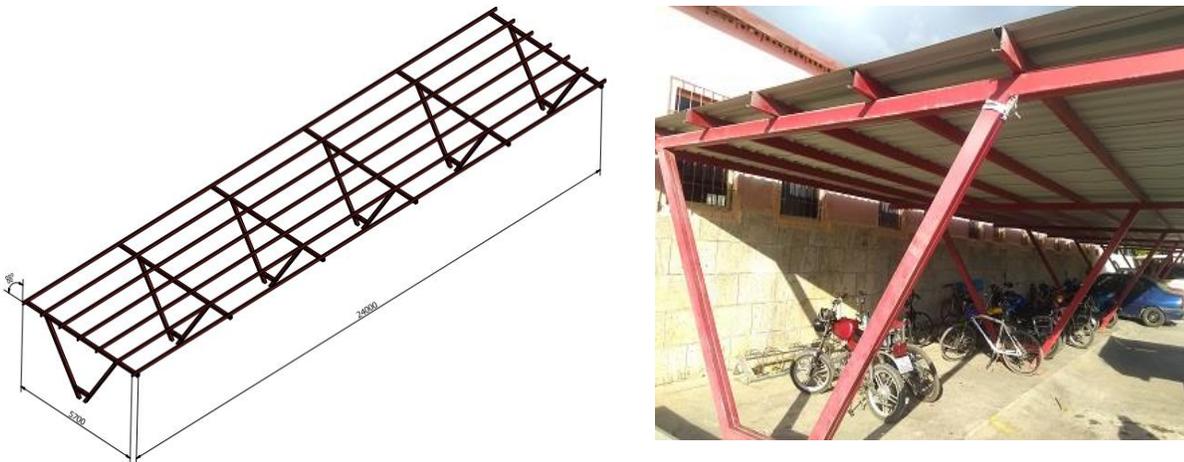


Figura 2.10: Vista de dibujo para el parqueo. **Fuente:** Elaboración propia.

2.4 Selección de software para evaluar la concentración de tensiones y desplazamientos. Aplicación a las tres naves en estudio

Autodesk Inventor (Figura 2.11) es el programa para diseño mecánico avanzado en 3D, con modelado paramétrico, directo y libre, tiene una capacidad base para realizar diseño de piezas, sus dibujos y ensambles de partes. En una versión

profesional, Inventor ofrece simulación por elementos finitos, sistemas de movimientos, chapa metálica, ruteo de cables, plástico, moldes y administración de datos.

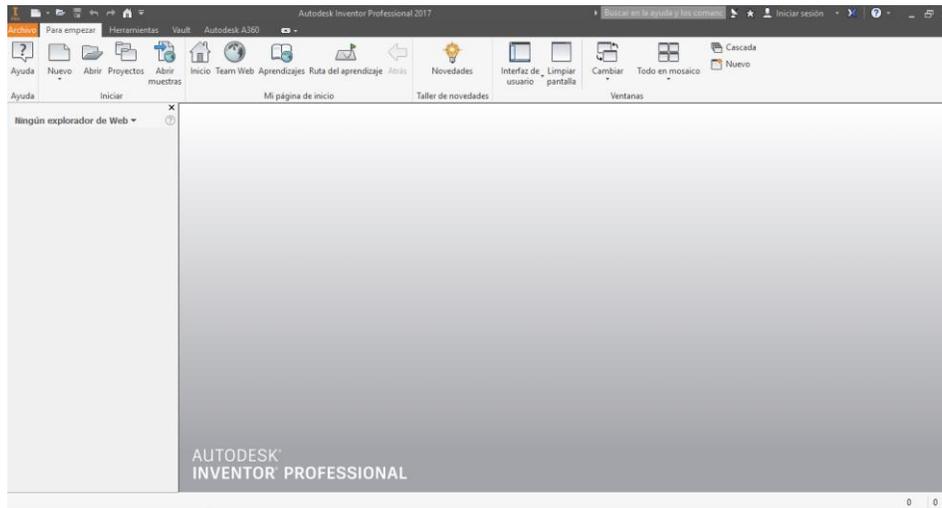


Figura 2.11: Interface principal del software profesional Autodesk Inventor 2017. **Fuente:** (Autodesk, 2017)

Con este software es posible someter el diseño a una validación virtual variando sus parámetros, analizando su resistencia, desde la optimización de su forma hasta la preparación de moldes.

El programa inventor fue utilizado para el diseño y ensamble de todas las estructuras de la empresa Micalum Cienfuegos. Se contó con la disponibilidad a partir de la biblioteca de contenido de una amplia gama de perfiles que se ajustaban a los que estaban presentes en la estructura, así como otros que fueron considerados en el estudio (Figura 2.12).

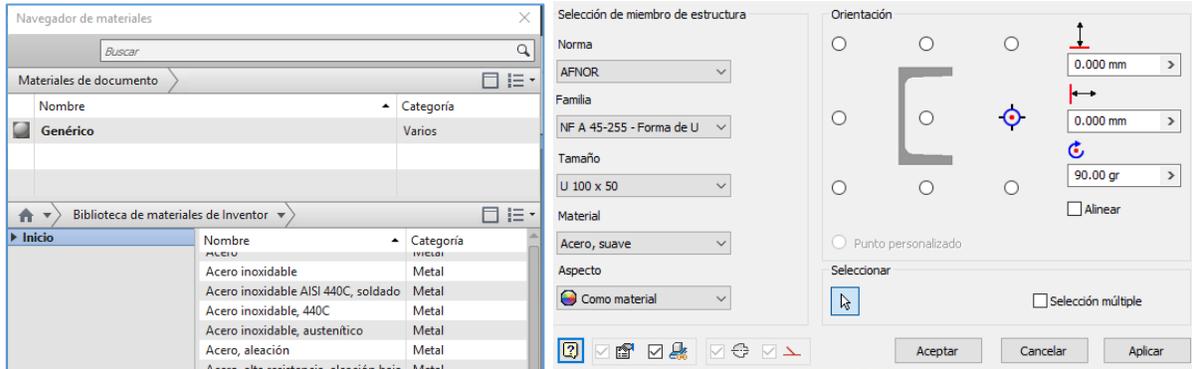


Figura 2.12 a) Navegador de materiales que ofrece el Inventor **Figura 2.12 b)** Biblioteca de contenidos con distintos tipos de perfiles utilizados.

Para los cálculos de resistencia se utilizó el análisis de estructura (Figura 2.13). Este permite estimar mediante un análisis nodal las tensiones máximas principales, así como las deformaciones resultantes. El software permite calcular aquella o aquellas vigas más peligrosas (con las tensiones o deformaciones mayores) los diagramas de cortante y momento flector. De manera general permite un análisis integral de la estructura en materia de resistencia mecánica.

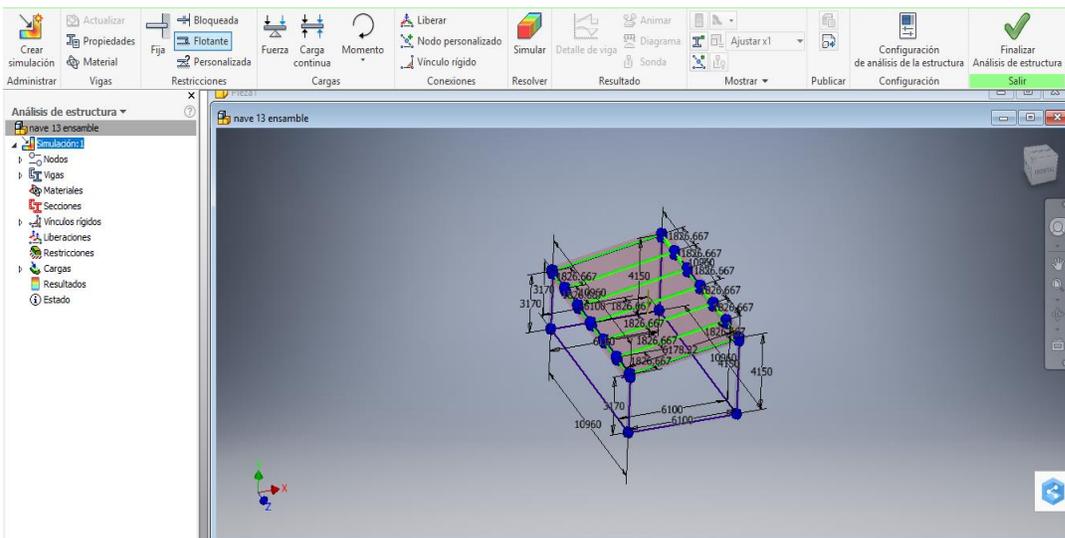


Figura 2.13. Análisis de estructuras. **Fuente:** Elaboración propia.

2.5 Respuesta de las estructuras a las solicitudes de cargas propias de la edificación. Determinación de las zonas de peligro

La simulación partió del diseño de la geometría, está compuesta por perfiles tipo Vigas I para los soportes de estas, vigas Canales o rectangulares para los soportes del techo. La vista de dibujo con los detalles y dimensiones pueden ser consultados en la hoja de planos en los anexos. Las selecciones de las restricciones fueron del tipo fija o empotradas en cada una de las bases de esta. Para cada una de las naves fueron calculadas los desplazamientos sin considerar los paneles y accesorios con el propósito de evaluar el comportamiento inicial de las estructuras. Además, la carga distribuida aplicada en un segundo momento en el techo, fue tomada en consideración al peso propio del panel y accesorios (cables, anillos de fijación, etc). En cada estructura se incorporaron los perfiles necesarios para el montaje de los paneles. Estos no se colocarán directamente sobre la cubierta de las naves sino sobre elementos estructurales adicionales permitiendo el correcto manejo de los paneles, así como la ventilación necesaria.

Para el caso de la nave 11 cuyas dimensiones principales son (50x10,36x4,99) m, la figura 2.14 presenta el isométrico de esta nave, además los materiales asignados pueden ser consultados en la Tabla 2.4.

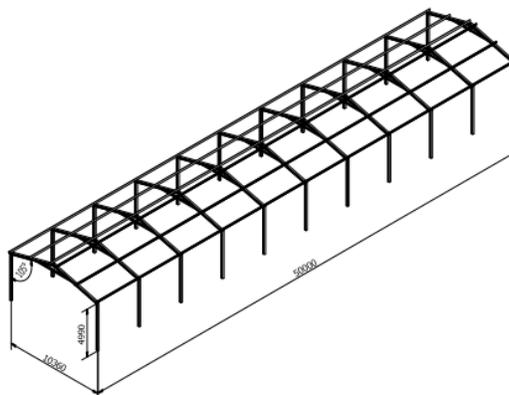


Figura 2.14: Vista isométrica para la nave 11. **Fuente:** Elaboración propia.

Todos los materiales para la estructura fueron Acero suave, cuyas propiedades mecánicas se recogen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4: Asignación de materiales para la nave 11. **Fuente:** Elaboración propia.

Nombre	Acero, Suave	
General	Densidad de masa	7.850 g/cm ³
	Límite de elasticidad	207.000 MPa
	Resistencia máxima a tracción	345.000 MPa
Tensión	Módulo de Young	220.000 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.275 su
Nombre(s) de pieza	DIN U 160 000000075.ipt DIN U 160 000000076.ipt DIN U 160 000000077.ipt DIN U 160 000000078ipt DIN U 160 000000080.ipt DIN U 160 000000081.ipt	

Como se puede apreciar Figura 2.15, los mayores desplazamientos se sitúan en el centro de la estructura (color rojo). Dichos desplazamientos son de 3,6 mm aproximadamente. Para este caso al igual que para las restantes naves fue considerada solamente la carga ejercida por la fuerza gravitatoria e igual aproximadamente a 9,81N.

Los desplazamientos próximos a los apoyos son despreciables debido a la elevada rigidez que esta presenta. Las zonas donde serán colocados los paneles presentan desplazamientos entre (1-3) mm respectivamente.

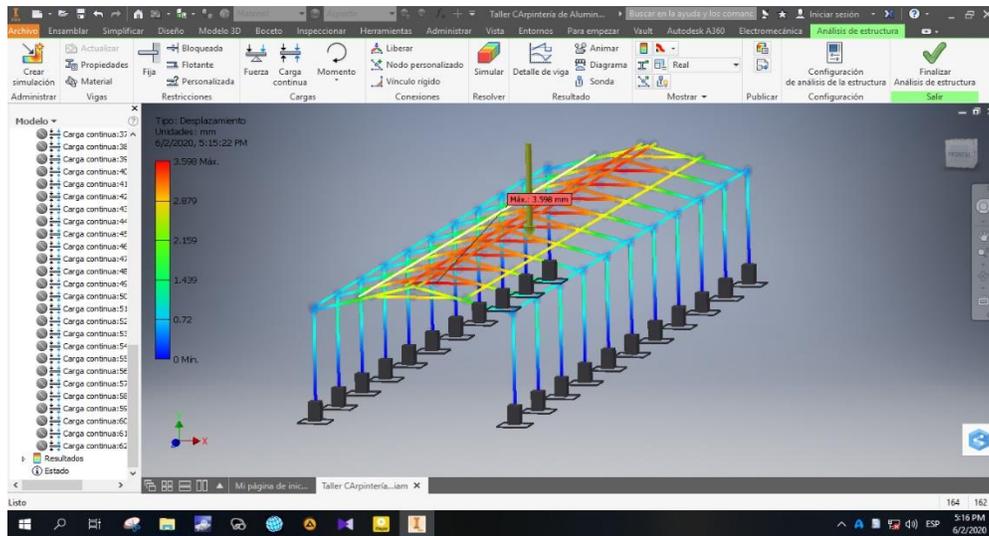


Figura 2.15: Desplazamiento de la estructura sin considerar el efecto de los paneles sobre la cubierta. **Fuente:** Elaboración propia.

De manera similar fueron calculados los desplazamientos de la nave 15. Esta estructura tiene las dimensiones siguientes (30x12) m Figura 2.16 a). A priori se observa que dicha nave debe en su conjunto tener un comportamiento más favorable en cuanto a desplazamientos. Las cerchas colocadas como elementos de apoyo para el techo Figura 2.16 b) aumentan sin duda alguna la rigidez y resistencia de esta.

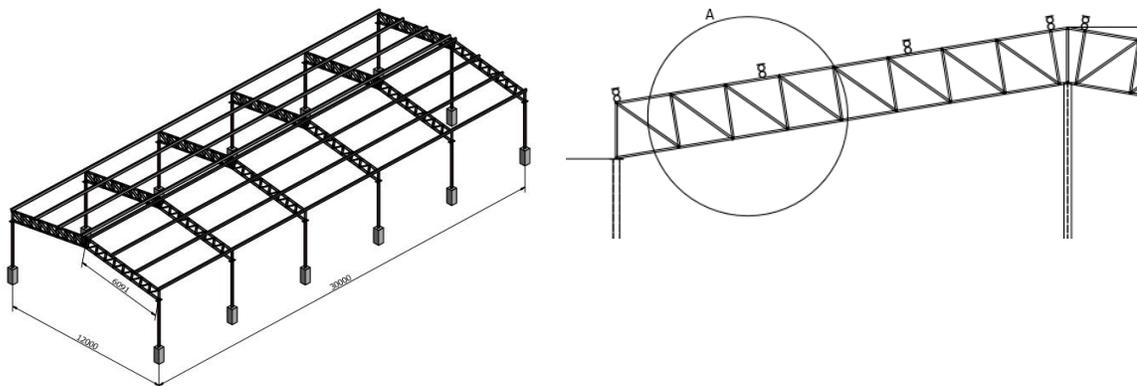


Figura 2.16: a) Diseño para la nave 15. b) Cerchas presentes en el techo de la estructura. **Fuente:** Elaboración propia.

La tabla 2.5 presenta los materiales presentes en la nave 15.

Tabla 2.5: Asignación de materiales para la nave 15. **Fuente:** Elaboración propia.

Nombre	Acero, Suave	
General	Densidad de masa	7.850 g/cm ³
	Límite de elasticidad	207.000 MPa
	Resistencia máxima a tracción	345.000 MPa
Tensión	Módulo de Young	220.000 GPa
	Coeficiente de Poisson	0.275 su
Nombre(s) de pieza	ISO 25 00000002.ipt ISO 25 00000003.ipt ISO 25 00000004.ipt ISO 25 00000005.ipt ISO 25 00000006.ipt ISO 25 00000007.ipt ISO 25 00000008.ipt ISO 25 00000009.ipt ISO 25 00000010.ipt ISO 25 00000011.ipt ISO 25 00000012.ipt ISO 25 00000013.ip	

Para este caso los desplazamientos mayores (2,4) mm (color rojo) fueron localizados en dos vigas fundamentales. La zona de colocación de los paneles presenta bajos desplazamientos entre (0,5-2) mm (Figura 2.17).

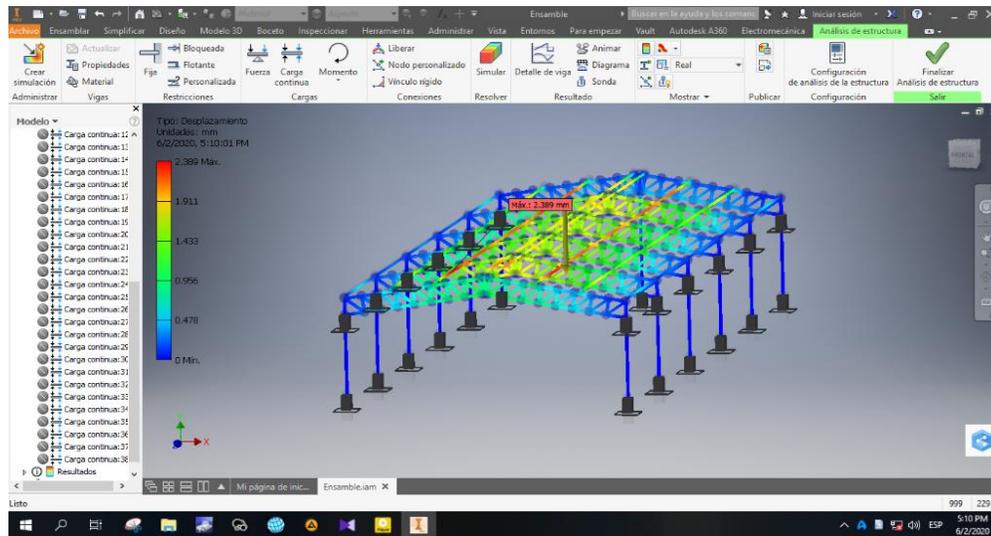


Figura 2.17: Desplazamiento de la nave 15. **Fuente:** Elaboración propia.

Para el caso de la nave 16 (Parqueo) cuyas dimensiones son (24 x 5,7) m Figura 2.18 fueron igualmente calculados los desplazamientos iniciales solo actuando la fuerza gravitatoria.

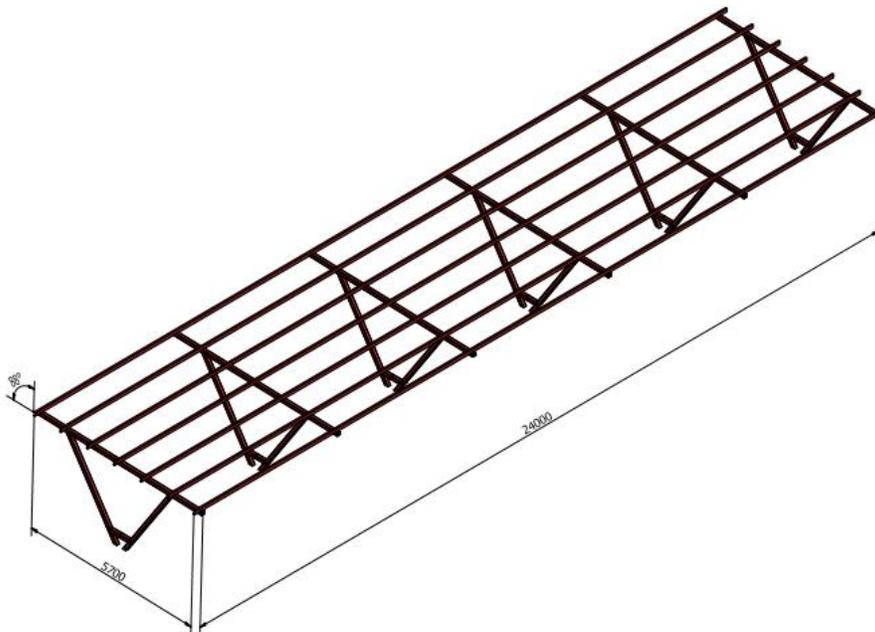


Figura 2.18: Diseño de la estructura del parqueo. **Fuente:** Elaboración propia.

Fueron considerados igualmente los materiales dados en la tabla 2.6

Tabla 2.6: Asignación de materiales para la nave 16. **Fuente:** Elaboración propia.

Nombre	Acero, Suave	
General	Densidad de masa	7.850 g/cm ³
	Límite de elasticidad	207.000 MPa
	Resistencia máxima a tracción	345.000 MPa
Tensión	Módulo de Young	220.000 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.275 su
Nombre(s) de pieza	DIN I 320 000000016.ipt DIN I 320 000000017.ipt DIN I 320 000000018.ipt DIN I 320 000000019.ipt DIN I 320 000000020.ipt DIN I 320 000000021.ipt	

Esta estructura fue de las tres consideradas la de menor desplazamiento. Solo la viga señalada en la figura de color rojo presentó desplazamientos de (1,3) mm (Figura 2.19).

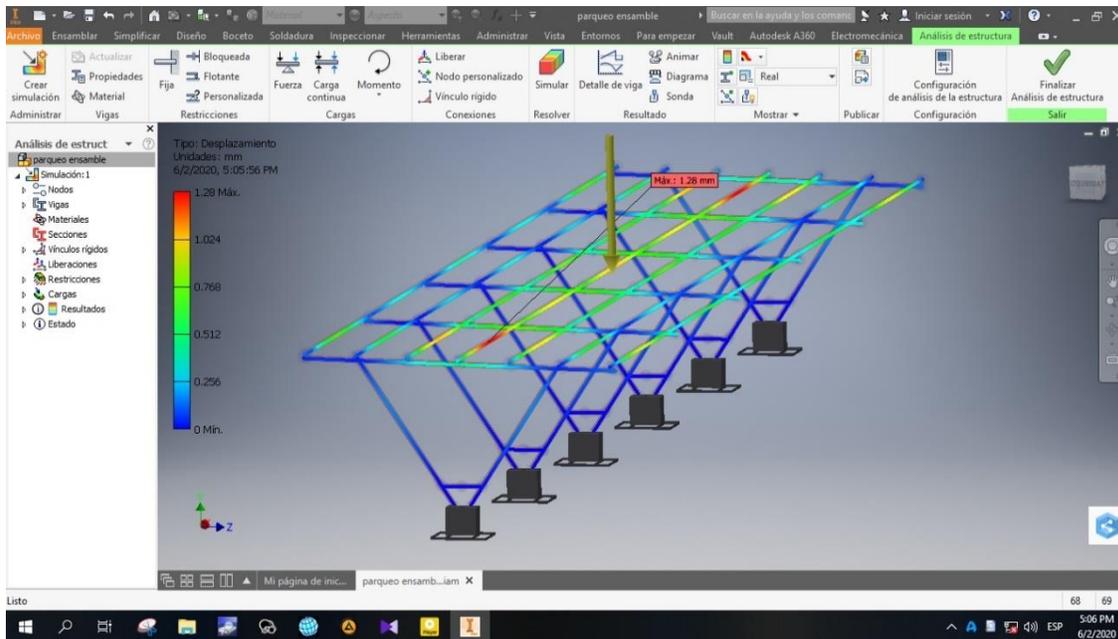


Figura 2.19: Desplazamientos presentes en la nave Parqueo. **Fuente:** Elaboración propia.

2.6 Conclusiones parciales

1. Las naves dentro de la empresa a considerar en el estudio para el cálculo de la resistencia mecánica fueron la Nave 11 (Taller de Carpintería de Aluminio), Nave 15 (Taller de Estructuras) y Nave 16 (Parqueo).
2. Fue seleccionado para la evaluación de las estructuras de la empresa el software Autodesk Inventor. Este permitió considerar los materiales, perfiles y demás componentes de cada nave de manera normalizada además de calcular con la simulación por elementos finitos las tensiones y deformaciones principales.
3. Fueron calculados los desplazamientos principales de las tres estructuras. Para todos los casos solo fue considerado la carga ejercida por la fuerza gravitatoria e igual aproximadamente a 9,81N. Para el caso de la nave 11, nave 15 y parqueo los desplazamientos mayores fueron de 3,66 mm, 2,4 mm y 1,3 mm respectivamente.

4. A partir de la obtención de los desplazamientos fueron identificadas zonas posibles a la falla mecánica. Estas zonas indicadas en color rojo por el análisis de tensión permiten una vez considerada la carga adicional a la que estará sometida buscar soluciones mecánicas de bajo costo.

Capítulo 3: Zonas de altas concentración de tensiones en las estructuras ante la acción de las cargas distribuida de los paneles fotovoltaicos. Evaluación de soluciones

3.1 Evaluación del comportamiento de las estructuras de las naves antes la solicitud de cargas distribuidas por los paneles fotovoltaicos. Determinación de las zonas de peligro

Para la determinación de las tensiones máximas y desplazamientos de las estructuras actuando sobre ellas la carga de los paneles y accesorios fue necesario calcular la carga distribuida sobre las vigas que soportaran el peso propio de los paneles y elementos adicionales. Los paneles no se colocarán directamente sobre el techo sino sobre vigas cuyo perfil utilizado fue ISO 10799-2 (Rectangular) (100x50x3) mm, estas vigas a su vez van apoyadas sobre tejas trapezoidales de forma perpendicular a la dirección de las correas de la cubierta, que permitirán la correcta conexión y ventilación de estos.

Los datos necesarios para la determinación de la carga por metro lineal de longitud son dados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Datos necesarios para la determinación de la carga distribuida sobre las vigas de la estructura. **Fuente:** Elaboración propia.

Criterios	Unidades
Total de paneles (T_p)	(u)
Peso lineal del calibre del conductor (W_c)	(kgf/m)
Longitud de las vigas (L_v)	(m)
Cantidad de largueros (C)	(u)
Peso propio del panel+accesorios (P_{p+a})	(kgf)
Densidad del acero	(g/cm ³)
Área de sección transversal	(mm ²)

De acuerdo con los datos necesario para la determinación de la carga (N) se tiene que:

$$N = \left(\frac{P_{p+a} + T_p}{L_v} \right) + W_c \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

P_{p+a} : Peso propio del panel + accesorios; (kgf)

T_p : Total de panel; (u)

W_c : peso lineal del calibre del conductor; (kgf/m)

L_v : Longitud de las vigas; (m)

Con ello y considerando el número de largueros por naves se puede calcular la carga distribuida (N_1) por cada elemento de acuerdo con:

$$N_1 = \left(\frac{N}{C} \right) \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde:

N_1 : Carga distribuida; (kgf/m)

N : Carga; (kgf)

C : Cantidad de larguero; (m)

Para el caso de la nave 11 la Tabla 3.2 resume los valores para la determinación de la carga distribuida. El total de paneles presentados corresponden a cada ala de la nave, esta nave tiene dos alas.

Tabla 3.2. Valores para la determinación de la carga distribuida. **Fuente:** Elaboración propia.

Criterios	Valores	Unidades
Total de paneles (T_p)	150	u
Peso del calibre del conductor (W_c)	0.064	(kgf/m)
Longitud de las vigas (L_v)	5.355	(m)
Cantidad de largueros (C)	30	(u)
Peso propio del panel + accesorios (P_{p+a})	20	(kgf)
Densidad del acero	7.85	(g/cm ³)
Área de sección transversal	840.82	(mm ²)

La tabla 3.3 presenta la magnitud de las cargas obtenidas aplicadas sobre las vigas

Tabla 3.3. Magnitud de las cargas obtenidas aplicadas sobre las vigas. **Fuente:** Elaboración propia.

Tipo de carga	Carga continua	Unidad
Magnitud	0.190	N/mm
Sistema de coordenadas de vigas	No	
Ángulo de plano	255.29	grado
Ángulo en plano	90.00	grado
Qx	-0.048	N/mm
Qy	-0.184	N/mm
Qz	0.000	N/mm
Desfase	0.000	mm
Longitud	5355.558	mm
Magnitud final	0.190	N/mm

La figura 3.1 presenta el comportamiento de los desplazamientos de dicha estructura (nave 11). Como puede observarse los desplazamientos en la estructura coinciden en localización (color rojo) similar al caso de la estructura sin paneles del capítulo 2. Por otro lado, la magnitud fue superior 8,18 mm en la zona más desfavorable. Dicha zona puede ser mejorada luego de tener exactamente las deformaciones en toda la estructura a partir de la incorporación de la carga adicional.

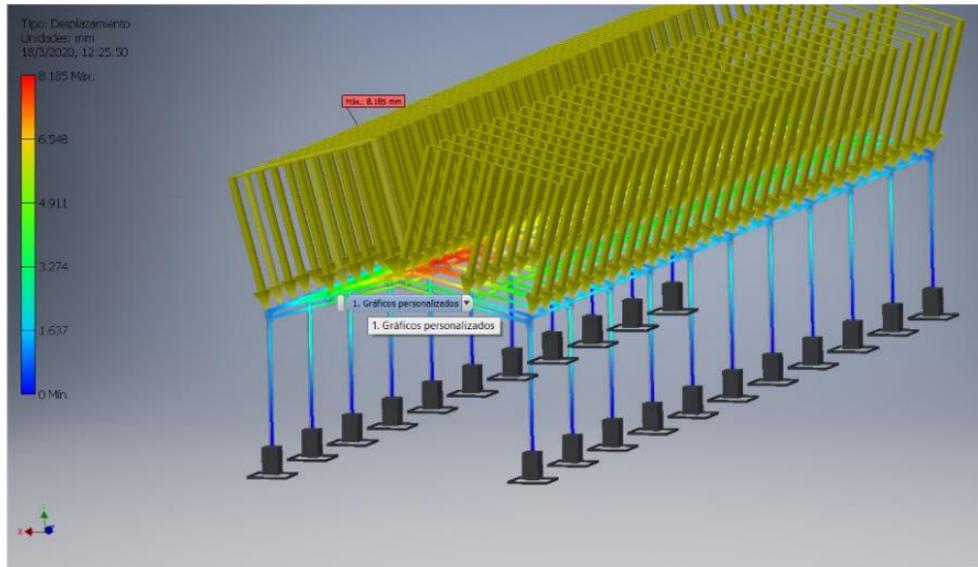


Figura 3.1: comportamiento de los desplazamientos en dicha estructura. **Fuente:** Elaboración propia.

La tabla 3.4 presenta el resumen de desplazamientos y tensiones máximas en la estructura.

Tabla 3.4. Resumen de desplazamientos y tensiones máximas en la estructura. **Fuente:** Elaboración propia.

Nombre		Máximo	Unidad
Desplazamiento		8.185	mm
Tensiones normales	Smax	25.352	MPa
Tensión de corte	Tx	1.625	MPa
	Ty	5.0	MPa
Tensiones de torsión	T	3.232	MPa

Además, para el caso de la viga fue posible mostrar con detalles los resultados de los esfuerzos cortantes y momentos flectores. Estos nos permiten conocer en que plano de aplicación de la fuerza se presentan los mayores resultados y comparar además la resistencia mecánica de la estructura. La tabla 3.5 resume estos resultados.

Tabla 3.5: Resultados de los esfuerzos cortantes y momentos flectores. **Fuente:** Elaboración Propia.

Parámetros	Magnitudes	Unidad
F_x	-429.15	N
F_y	7.31	N
F_z	5 375.93	N
M_x	-17 032.34	N.mm
M_y	-225 291.46	N.mm
M_z	-4 848.19	N.mm
S_{max}	14.90	MPa
S_{min}	-19.36	MPa
$S_{max} (M_x \text{ max})$	0.786	MPa
$S_{max} (M_y \text{ max})$	15.42	MPa
$S_{min} (M_x \text{ min})$	-0.786	MPa
$S_{min}(M_y \text{ min})$	-15.42	MPa

En las figuras 3.2 y figura 3.3 se presentan los diagramas de cortante y momentos flectores para los planos de mayor magnitud.

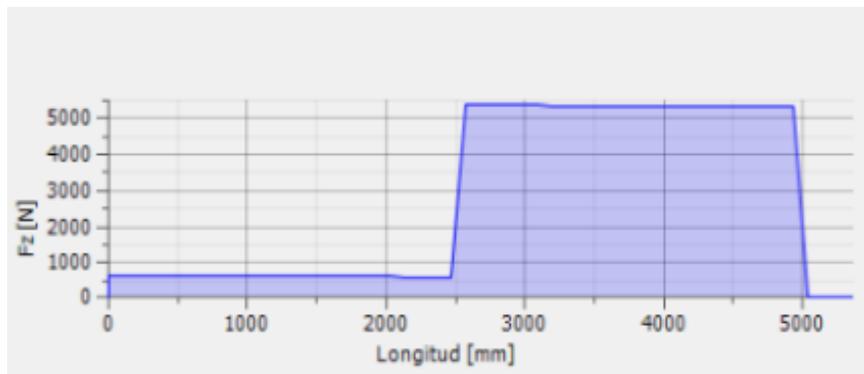


Figura 3.2: Diagrama de cortante plano XZ. **Fuente:** Elaboración Propia.

Los mayores momentos flectores coinciden prácticamente en los extremos de la viga con los valores que alcanzan 200 000 N.mm.

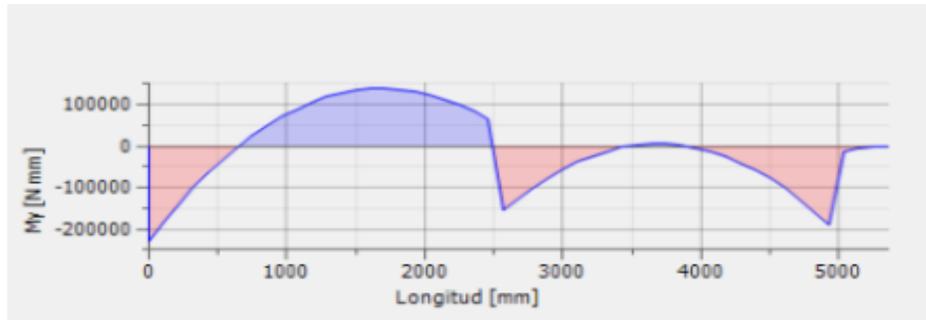


Figura 3.3: Diagrama de Momento flector para el plano XY. **Fuente:** Elaboración Propia. Se observa en la figura 3.3 como la magnitud mayor de este momento coincide con el plano de aplicación de la carga distribuida, es decir el plano XY.

Para el caso de la nave 15 (2 alas) la Tabla 3.6 resume los valores para la determinación de la carga distribuida.

Tabla 3.6: Valores resumen para la determinación de la carga distribuida. **Fuente:** Elaboración propia.

Criterios	Valores	Unidad
Total de paneles (T_p)	108	u
Peso del calibre del conductor (W_c)	0,064	Kgf/m
Longitud de las vigas (L_v)	6,08	m
Cantidad de largueros (C)	18	u
Peso propio del panel+accesorios (P_{p+a})	20	kgf
Densidad del acero	7,85	g/cm^3
Área de sección transversal	840,82	mm^2

La tabla 3.7 presenta la magnitud de las cargas obtenidas aplicadas sobre las vigas.

Tabla 3.7. Magnitud de las cargas obtenidas aplicadas sobre las vigas de la nave 15. **Fuente:** Elaboración propia.

Tipo de carga	Carga continua	Unidad
Magnitud	0.200	N/mm
Sistema de coordenadas de vigas	No	

Ángulo de plano	260.54	grado
Ángulo en plano	90.00	grado
Qx	-0.033	N/mm
Qy	-0.197	N/mm
Qz	0.000	N/mm
Desfase	0.000	mm
Longitud	6082.763	mm
Magnitud final	0.200	N/mm

La figura 3.4 presenta el comportamiento de los desplazamientos de dicha estructura (nave 15). Como puede observarse los desplazamientos mayores de la estructura están en dos vigas una en el extremo anterior y la otra en el extremo posterior. Por otro lado, la magnitud fue de 3,63 mm en la zona más desfavorable.

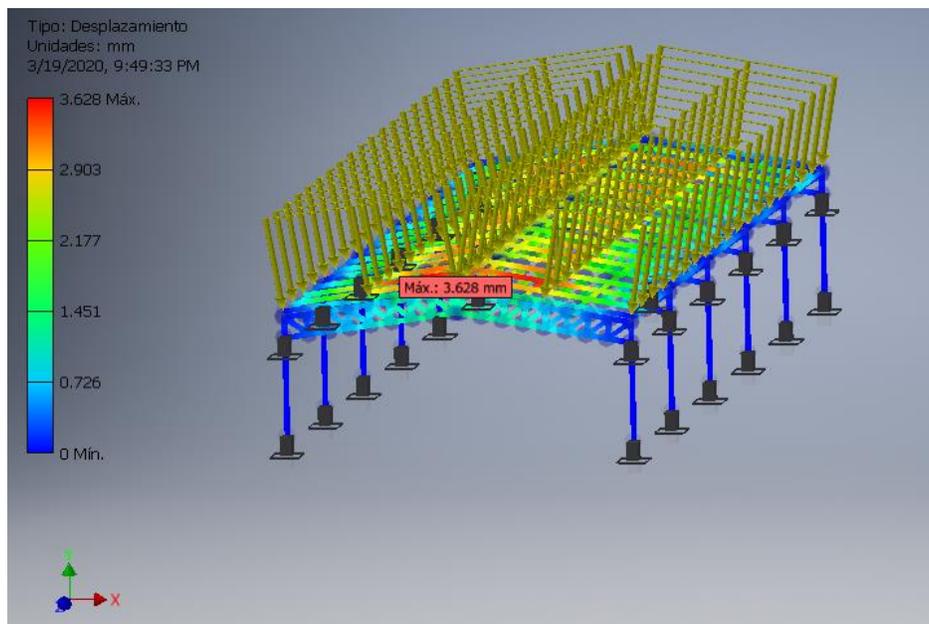


Figura 3.4. Comportamiento de los desplazamientos de dicha estructura. **Fuente:** Elaboración propia.

La tabla 3.8 presenta el resumen de desplazamientos y tensiones máximas en la estructura.

Tabla 3.8: Resumen de desplazamientos y tensiones máximas para la nave 15. **Fuente:** Elaboración propia.

Nombre		Máximo	Unidad
Desplazamiento		3.63	mm
Tensiones normales	S _{max}	209.605	MPa
Tensión de corte	T _x	2.312	MPa
	T _y	5.921	MPa
Tensiones de torsión	T	7.995	MPa

La tabla 3.9 resume los resultados de los esfuerzos cortantes y flectores para esta viga.

Tabla 3.9: Resultados de los esfuerzos cortantes y momentos flectores para la estructura. **Fuente:** Elaboración Propia.

Parámetros	Magnitudes	Unidad
F _x	-391.66	N
F _y	-19.81	N
F _z	-447.48	N
M _x	-22 033.11	N.mm
M _y	-212 923.28	N.mm
M _z	4 502.18	N.mm
S _{max}	15.75	MPa
S _{min}	-14.99	MPa
S _{max} (M _x max)	1.035	MPa
S _{max} (M _y max)	14.76	MPa
S _{min} (M _x min)	-1.035	MPa
S _{min} (M _y min)	-14.76	MPa

En las figuras 3.5 y figura 3.6 se presentan los diagramas de cortante y momentos flectores para los planos de mayor magnitud.



Figura 3.5: Diagrama de cortante plano XZ. **Fuente:** Elaboración Propia.

De acuerdo con los resultados se puede apreciar como estos momentos máximos se colocan en los extremos de la viga. En el extremo inicial este momento es ligeramente superior $-200\,000$ N.mm.

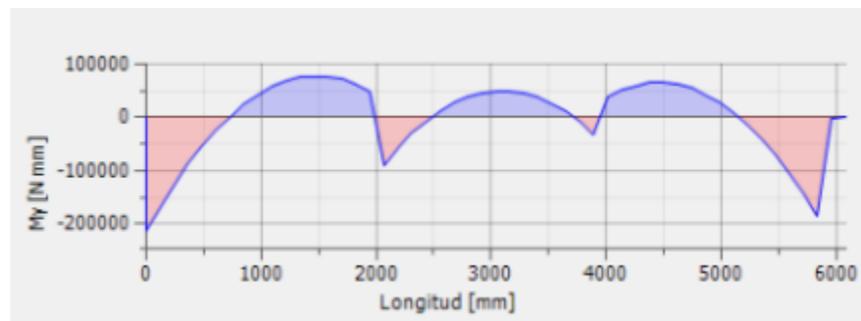


Figura 3.6: Diagrama de Momento flector plano XY. **Fuente:** Elaboración propia.

Para el caso del parqueo (Nave 16) la Tabla 3.10 resume los valores para la determinación de la carga.

Tabla 3.10. Valores para la determinación de la carga distribuida en el parqueo. **Fuente:** Elaboración propia.

Criterios	Valores	Unidad
Total de paneles (T_p)	72	u
Peso del calibre del conductor (W_c)	0.064	kgf/m
Longitud de las vigas (L_v)	5,702	m
Cantidad de largueros (C)	24	u
Peso propio del panel+accesorios (P_{p+a})	20	kgf
Densidad del acero	7,85	g/cm^3
Área de sección transversal	840,82	mm^2

La tabla 3.11 presenta la magnitud de las cargas obtenidas aplicadas sobre las vigas.

Tabla 3.11. Magnitud de las cargas obtenidas aplicadas sobre las vigas del parqueo.

Fuente: Elaboración propia.

Tipo de carga	Carga continua	unidad
Magnitud	0.110	N/mm
Sistema de coordenadas de vigas	No	
Ángulo de plano	270.00	grado
Ángulo en plano	91.60	grado
Qx	0.000	N/mm
Qy	-0.110	N/mm
Qz	-0.003	N/mm
Desfase	0.000	mm
Longitud	5702.245	mm
Magnitud final	0.110	N/mm

La figura 3.7 presenta el comportamiento de los desplazamientos de dicha estructura (nave 16). Como puede observarse los desplazamientos mayores de la estructura (color rojo) están en áreas específicas de cada lado de dicho parqueo. Por otro lado, las magnitudes de los desplazamientos son de 2,26 mm.

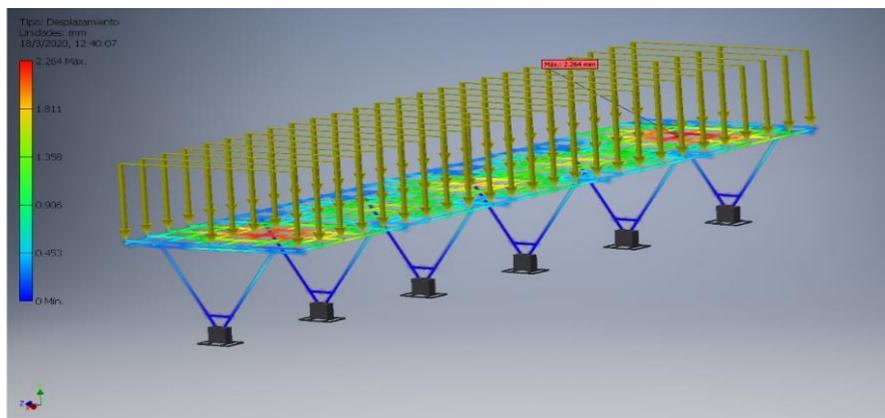


Figura 3.7: Comportamiento de los desplazamientos para el parqueo. **Fuente:** Elaboración propia.

La tabla 3.12 presenta el resumen de desplazamientos y tensiones máximas en la estructura.

Tabla 3.12. Resumen de desplazamientos y tensiones máximas en la estructura. **Fuente:** Elaboración propia

Nombre		Máximo	unidad
Desplazamiento		2.26	mm
Tensiones normales	S _{max}	9.389	MPa
Tensión de corte	T _x	2.344	MPa
	T _y	2.814	MPa
Tensiones de torsión	T	1.142	MPa

La tabla 3.13 resume los resultados de los esfuerzos cortantes y flectores para esta viga.

Tabla 3.13: Resultados de los esfuerzos cortantes y momentos flectores. **Fuente:** Elaboración Propia.

Parámetros	Magnitudes	Unidad
F _x	69.69	N
F _y	543.31	N
F _z	562.22	N
M _x	-430 110.08	N.mm
M _y	13 790.35	N.mm
M _z	-50.52	N.mm
S _{max}	11.13	MPa
S _{min}	-10.28	MPa
S _{max} (M _x max)	10.26	MPa
S _{max} (M _y max)	-1.38	MPa
S _{min} (M _x min)	-10.26	MPa
S _{min} (M _y min)	-1.32	MPa

En las figuras 3.8 y figura 3.9 se presentan los diagramas de cortante y momentos flectores para los planos de mayor magnitud.

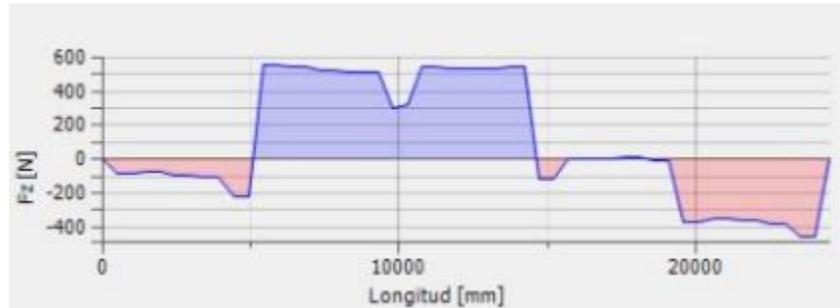


Figura 3.8: Diagrama de cortante plano XZ. **Fuente:** Elaboración Propia.

De acuerdo con los resultados se puede apreciar como estos momentos máximos se colocan en los extremos de la viga igual que para el caso del taller de industrias. En estos extremos la magnitud del momento flector es cerca de 400 000N.mm.

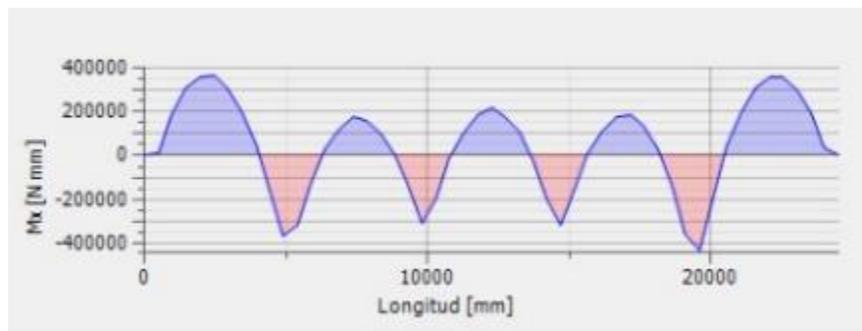


Figura 3.9: Diagrama de Momento flector plano XY. **Fuente:** Elaboración Propia.

3.2 Propuesta de modificaciones estructurales a la concentración de tensiones peligrosas

Las propuestas de soluciones se elaboraron para la nave 11 debido a que de las tres fue la de mayores desplazamientos, estas modificaciones fueron básicamente las siguientes:

Nave 11. Taller de Carpintería de Aluminio

- I. Se colocaron un total de 22 "pie de amigos" a $1\text{ m} \times 45^\circ$ (Figura 3.10 círculo rojo) (con respecto a la vertical) en todas las vigas principales. El perfil de las vigas utilizadas como "pie de amigos" fue ISO 10799-2 (Rectangular) (100x50x3) mm, que son las de mayor presencia en la empresa.
- II. En caso de que las vigas principales (en la zona del techo) de la primera y última hilera estuvieran apoyadas sobre una pared se garantizaría una menor deformación de la nave.

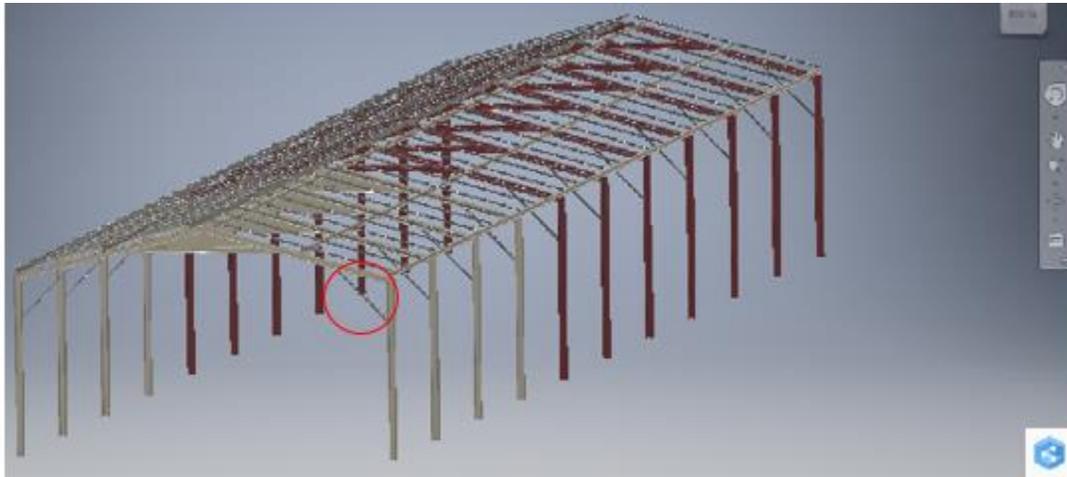


Figura 3.10: Detalles de alguna de las propuestas de modificaciones para la nave 11.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Simulación con software profesional de la respuesta de la estructura ante las solicitudes de carga

Para este caso los desplazamientos se lograron disminuir un 50 % aproximadamente (Figura 3.11). El esfuerzo cortante máximo correspondió al plano XY con una magnitud de 352,96 N (Figura 3.12) mientras que el momento flector máximo fue de 126 114 N.mm (Figura 3.13).

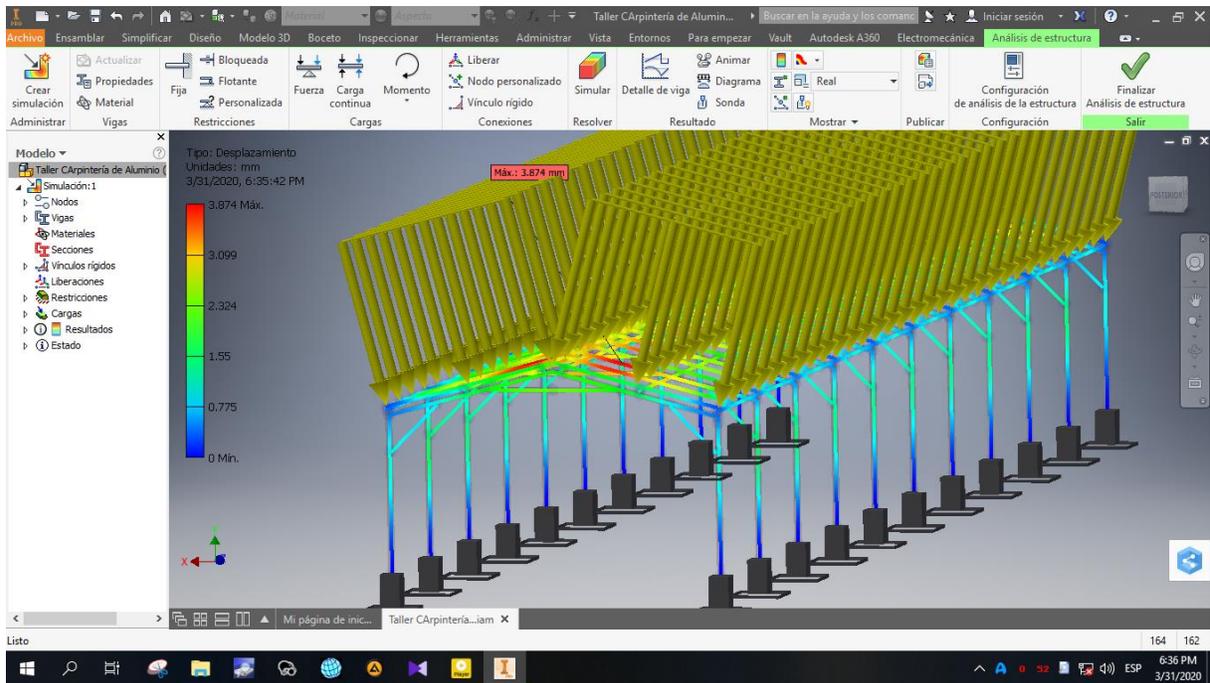


Figura 3.11: Desplazamiento de la estructura con las modificaciones incorporadas.
Fuente: Elaboración Propia.

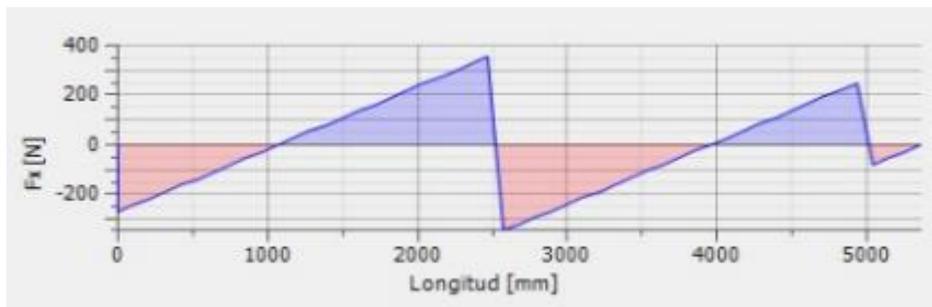


Figura 3.12: Diagrama de cortante de la nave con las modificaciones. **Fuente:** Elaboración Propia.

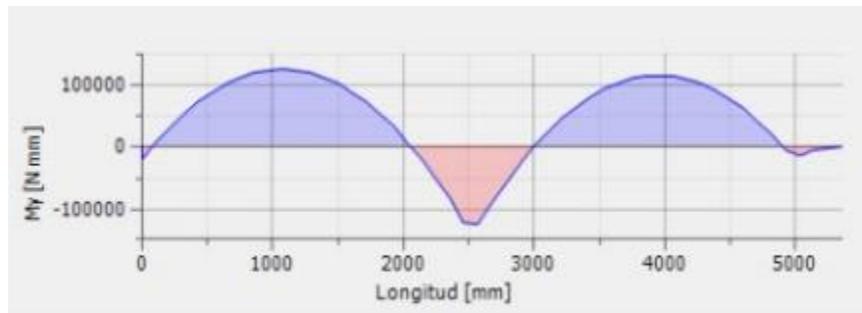


Figura 3.13: Diagrama de momento flector con las modificaciones. **Fuente:** Elaboración Propia.

3.4 Conclusiones parciales

1. Se calcularon los desplazamientos y tensiones máximas de cada una de las estructuras estudiadas. Para el caso de la nave 11 los desplazamientos y tensiones máximos fueron de 8,18 mm y 25,35 MPa. En el caso de la nave 15 estos fueron de: 3,63 mm, 209.605 MPa y para el Parqueo: 2,26 mm, 9.389 MPa respectivamente.
2. Fueron construidos los diagramas de cortante y momento flector de cada una de las estructuras. El esfuerzo cortante máximo para la nave 11 fue de 5 375 N, mientras que el momento flector fue de -225 291,46 N.mm. Para la nave 15 fue de -447,48 N, -212 923,28 N.mm y para el parqueo (Nave 16) 562,22 N y -430 110,08 N.mm respectivamente.
3. Las propuestas de soluciones se presentaron para la nave 11 pues de las tres estudiadas fue la de mayores desplazamientos obtenidos. Estas modificaciones fueron: Incorporar 22 "pie de amigos" a 1m x 45° en todas las vigas principales y valorar el apoyo de uno de los extremos sobre una posible pared.
4. Los desplazamientos luego de las modificaciones para esta nave se lograron disminuir un 50 % aproximadamente 3,87 mm, mientras que para el caso inicial eran de 8,18 mm. El esfuerzo cortante máximo correspondió al plano XY con una magnitud de 352,96 N mientras que el momento flector máximo fue de 126 114 N.mm inferiores igualmente que para el caso inicial.



UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
INGENIERÍA



CEEMA
Centro de Estudios de
Energía y Medio Ambiente

Capítulo IV. Evaluación económica de la solución estructural para lograr resistencia a las cargas distribuidas de los paneles fotovoltaicos en cubiertas

4.1 Cuantificación de los costos de perfiles

Tabla 4.1: Perfiles angulares de alas desiguales. **Fuente:** (Stiopin, 1968)

Tipo de perfil	Dimensiones de perfil (mm)	Número de perfil	B (Largo) (mm)	B (Ancho) (mm)	d (espesor) (mm)	Área del perfil (cm ²)	Peso por metro lineal (kg/m)
Viga rectangular	100x50x3	10/6.3	100	63	6	6	7.53

Datos

Cantidad de viga= 22

Lv= 2.044 m

Dónde:

Lv: longitud de la viga

Precio= 1800 euro/toe

$L_T \text{ de vigas} = (\text{Cantidad de viga} * \text{longitud de viga})$

$L_T \text{ de vigas} = 44.97 \text{ m}$

$\text{Peso total} = L_T \text{ de vigas} * \text{peso por metro lineal}$

$\text{Peso total} = 0.34 \text{ toe}$

$\text{Costo} = \text{Peso total} * \text{precio/toe}$

$\text{Costo} = 612.00 \text{ euro.}$

4.2 Conclusiones generales

- Las estructuras de las naves estudiada (nave 11,15,16) soportaran las cargas uniformemente distribuida de los módulos fotovoltaicos excepto la nave 11 que presenta un desplazamiento mayor que las otras naves.
- La nave que sufre mayor deformación es la nave 11 llegando a valore de 8.18 mm en la región tal y se teme falle a las solicitudes de carga de los paneles.
- Se modificó la nave 11, colocándose 22 vigas pie de amigos a 1m x 45°. El perfil de las vigas utilizadas es rectangular de (100 x 50 x 3) mm y los desplazamientos luego de las modificaciones para la nave 11 se lograron disminuir un 50%, Llegando a valores de 3.87 mm el desplazamiento inicial. El esfuerzo cortante y el momento flector máximo disminuyó en un 55%.
- La evaluación económica muestra que la inversión para el reforzamiento de la nave asciende a un costo de materiales de 612,00 € (Euros). Garantizando la resistencia mecánica de la nave modificada.

4.3 Recomendaciones

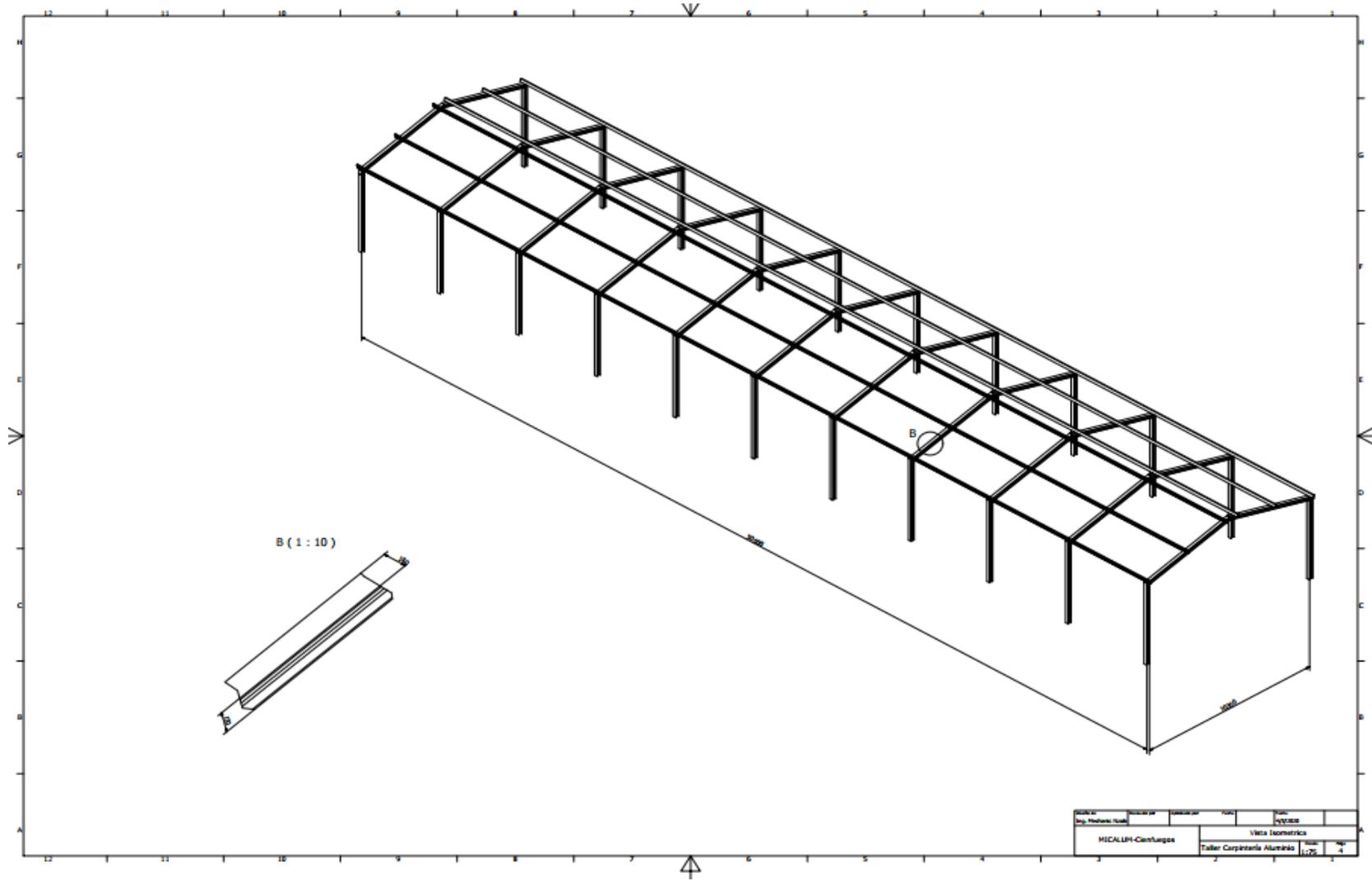
- Continuar con el estudio de las naves restante.
- Proponer un diseño constructivo en que el sistema solar fotovoltaico coincidan con la orientación Sur para que haya mayor captación de la energía solar fotovoltaica.
- Proponer un diseño constructivo de las naves que tome en consideración el peso de los paneles para que no afecte en las estructuras de las naves.
- Proponer un diseño constructivo que se aproveche el área para la instalación de un número superior de paneles solares.

Bibliografía

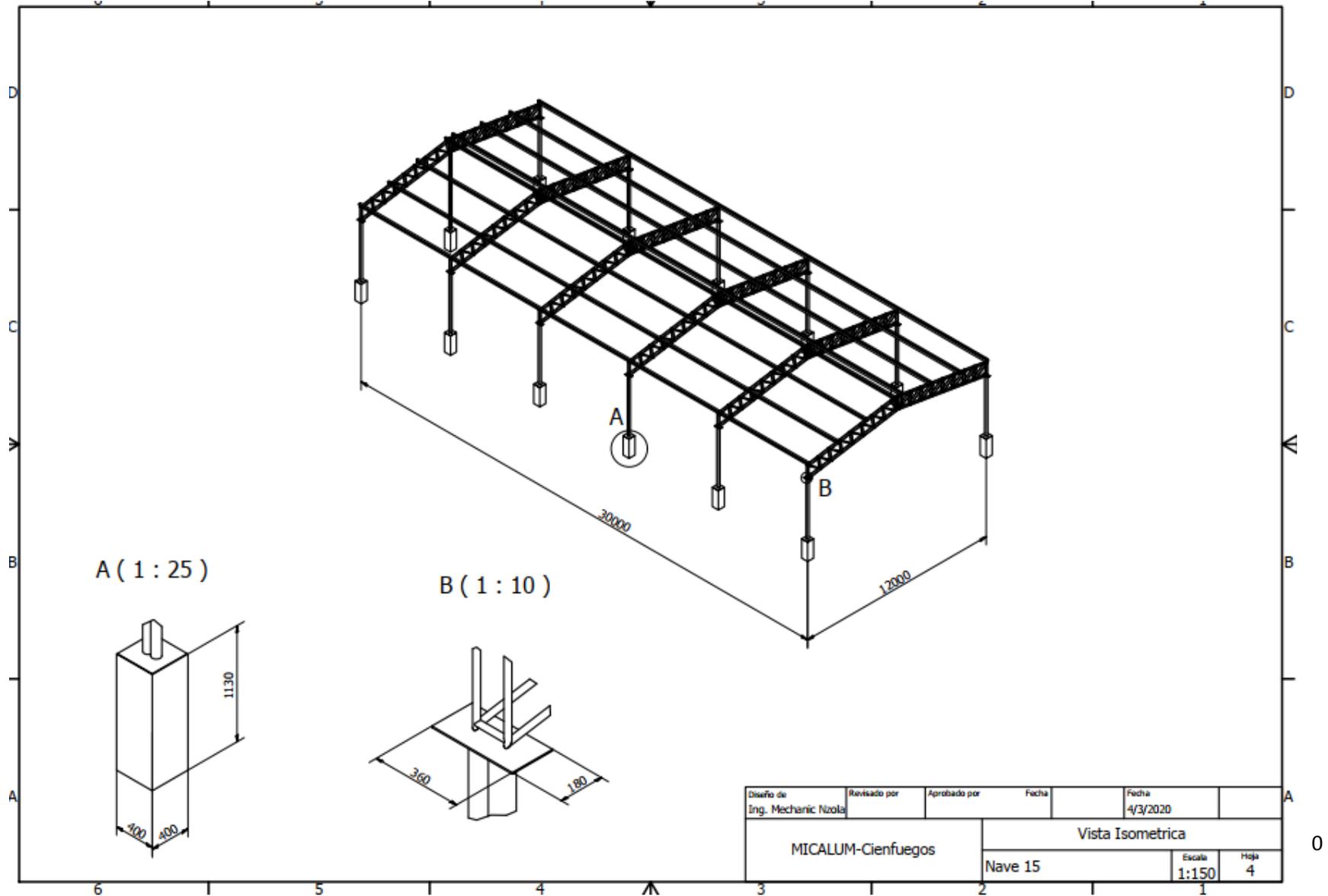
- Cabrera, Á. (7 de mayo de 2018). *Producir con conciencia ambiental*. Granma. Recuperado de: <http://www.granma.cu/cuba/2018-05-07/producir-con-conciencia-ambiental-07-05-2018-21-05-10>
- Cepeda, J., & Sierra, A. (2017). *Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones*. (Tesis de pregrado). Universidad Santo Tomás. Bogota, Colombia. Recuperado: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/4196/cepedajuan2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Redación Digital, (27 de Octubre de 2019). *Hospital santiaguero posee mayor parque fotovoltaico sobre cubierta de cuba*. Granma. Recuperado: <http://www.granma.cu/cuba/2019-10-27/hospital-santiaguero-posee-mayor-parque-fotovoltaico-sobre-cubierta-de-cuba-27-10-2019-09-10-35>
- Fediciones. (2010). *Código técnico de la edificación*. Madrid, España: Editorial. Recuperado de: lulu.com.
- García, A., & Gálvez, E. (2003). *Cálculo interactivo de galpones simétricos asistido por computador*. *Revista facultad de ingeniería, Universidad Tarapacá*, 11 (1), 47-55. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-13372003000100007&lng=es&nrm=iso
- Gutiérrez, I., Carbalán, M., & Giró, J. (2007). *Energía a partir de módulos fotovoltaicos integrados en la cubierta*. *Directivos construcción*. Volúmen 13 (204), 67-70. Recuperado de: <http://pdfs.wke.es/4/0/2/1/pd0000014021.pdf>
- Prensa Latina. (19 de junio de 2019). *Zona de desarrollo en cuba estimula empleo de energías renovables*. Recuperado de: <https://www.prensa-latina.cu/index.php/component/content/?o=rn&id=285095&SEO=zona-de-desarrollo-en-cuba-estimula-empleo-de-energias-renovables&Itemid=1>
- López, D. S. (2018). *Integración arquitectónica de sistemas solares activos y pasivos en edificios industriales. Caso de estudio Cuenca-Ecuador*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Marrero, J. B. (2018). *Anteproyecto y simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red para alimentar la división territorial copextel cienfuegos*. (Tesis de pregrado). Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos.

- Meneses, A. A. (2016). *Diseño de un parque fotovoltaico conectado a la red en techos del despacho provincial de villa clara.* (Tesis de pregrado). Universidad Central de las Villas. Santa Clara
- Novygrad, D. S. (2019). *Energía fotovoltaica para Cuba.* La Habana: Cubasolar.
- Oficina nacional de normalización. (2003). *Norma Cubana: edificaciones. Cargas de uso.* La Habana, Cuba.
- Pérez, M. (3 de julio de 2014). Algunos beneficios no evidentes de la energía solar. *Blogthinkbig*. Recuperado de: <https://blogthinkbig.com/beneficios-de-la-energia-solar>.
- Rodriguez, M. (07 de noviembre de 2017). Los beneficios económico de la energía solar. *La estrella de Panamá*. Recuperado de: <https://www.laestrella.com.pa/economia/171107/solar-energia-beneficios-economicos>
- Sánchez Ros, J. (2015). *Instalación solar fotovoltaica de una nave industrial.* (Tesis de pregrado). Universidad de Sevilla. Sevilla.
- Stiopin. (1968). *Resistencia de materiales.* Moscú, Rusia: mir.moscu. Recuperado de: <https://www.iberlibro.com/buscar-libro/titulo/resistencia-de-materiales/autor/stiopin-p-a/>
- Teruel, J. (2015). *Evaluación del potencial térmico del sistema de ventilación y refrigeración en una instalación de placas solares fotovoltaicas.* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.

Anexo 1: Vista isométrica de la nave 11. **Fuente:** Elaboración Propia.



Anexo 2: Vista isométrica de la Nave 15. **Fuente:** Elaboración Propia.



Anexo 3: Vista isométrica de del parqueo (nave 16). **Fuente:** Elaboración Propia.

