

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño y análisis de un sistema fotovoltaico en una nave industrial
en Villa Nueva, Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Fernando José Salazar Medrano para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



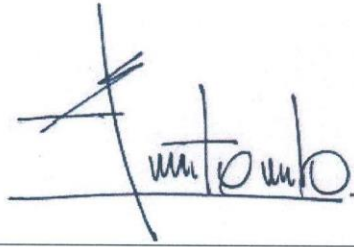
Diseño y análisis de un sistema fotovoltaico en una nave industrial
en Villa Nueva, Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Fernando José Salazar Medrano para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

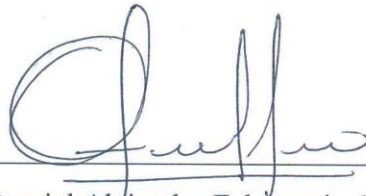
2025

Tribunal Examinador:

Handwritten signature of Danilo Antonio Rodríguez Cerón, consisting of a stylized 'D' and 'A' followed by 'ntonio' and 'cerón'.

(f)

Ing. Danilo Antonio Rodríguez Cerón

Handwritten signature of Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos, featuring a large, stylized 'O' and 'A' followed by 'nel' and 'Echeverría Castellanos'.

(f)

Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

Handwritten signature of Juan Pablo Blas Arias, consisting of a large, stylized 'J' and 'P' followed by 'Blas Arias'.

(f)

Arq. Juan Pablo Blas Arias

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de mayo de 2025

CONTENIDO

RESUMEN.....	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. IMPORTANCIA	3
IV. OBJETIVOS.....	4
A. Objetivo general	4
B. Objetivos específicos	4
V. MARCO TEÓRICO	5
A. Naves industriales	5
1. Uso de la nave industrial.....	5
2. Ejemplo de Kimberly Clark	5
3. Eficiencia energética	6
4. Normas – auditorias	6
5. ASHRAE.....	6
6. Consumo energético.....	7
7. Beneficios de la eficiencia energética	7
8. Sostenibilidad.....	8
B. Microgeneración	8
1. Enfoque	8
2. Metodologías.....	9
C. Arquitectura bioclimática.....	9
1. Concepto	9
2. Técnicas	10
D. Iluminación eficiente.....	10
1. Tipos de iluminación industrial.....	10
2. Comparación de tecnología LED contra la halógena.....	11
3. Sistemas automatizados	12

4.	Luz natural	13
E.	Aislamiento térmico.....	14
1.	Importancia	14
2.	Materiales.....	14
3.	Tipos de aislamiento térmico	14
4.	Ahorro por el aislamiento térmico	15
F.	Ventilación	15
1.	Importancia	15
2.	Tipos de ventilación	15
G.	Sistema de climatización.....	16
1.	Sistemas óptimos de climatización	16
2.	Mantenimiento	17
3.	Aspectos generales.....	17
H.	Energía solar	18
1.	Equipo más común.....	18
2.	Beneficios	18
3.	Empresas en Guatemala	19
I.	Diseño estructural de naves industriales	19
J.	Normas de diseño estructural aplicables.....	19
K.	Tipologías estructurales comunes en naves industriales.....	20
VI.	ANÁLISIS PREVIO DEL SITIO	21
VII.	METODOLOGÍA	22
A.	Fase de investigación	22
B.	Fase de ejecución	22
C.	Fase final.....	23
VIII.	RESULTADOS Y CÁLCULOS	24
A.	Análisis de iluminación.....	24
B.	Análisis de la resistencia de la cubierta	25
C.	Análisis del sistema de módulos fotovoltaicos	33

D.	Análisis de retorno de inversión.....	41
IX.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
A.	Análisis de iluminación.....	42
B.	Análisis de la capacidad de la cubierta	43
C.	Análisis del sistema de módulos fotovoltaicos	44
X.	CONCLUSIONES.....	46
XI.	RECOMENDACIONES.....	47
XII.	BIBLIOGRAFÍA.....	48
XIII.	APÉNDICE.....	50

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Lightning power densities using space by space method.....	24
Ecuación 2. Momento máximo	27
Ecuación 3. Cortante máximo	27
Ecuación 4. Deformación del elemento	27
Ecuación 5. Tensión crítica de pandeo en el eje menor	27
Ecuación 6. Tensión crítica torsional	27
Ecuación 7. Capacidad flexionante	27
Ecuación 8. Resistencia crítica a flexión.....	28
Ecuación 9. Momento nominal	28
Ecuación 10. Resistencia crítica al cortante	28
Ecuación 11. Revisión de deflexiones.....	28
Ecuación 12. Revisión de deflexiones con carga viva y muerta	28
Ecuación 13. Revisión de compacidad del ala	29
Ecuación 14. Revisión de compacidad del espesor del alma	29
Ecuación 15. Índice de esbeltez	29
Ecuación 16. Esfuerzo crítico de Euler	29
Ecuación 17. Esfuerzo crítico de diseño	30
Ecuación 18. Carga axial de diseño	30
Ecuación 19. Longitud no soportada máxima para pandeo plástico	30
Ecuación 20. Radio efectivo para torsión de la sección.....	30
Ecuación 21. Longitud crítica para pandeo lateral-torsional	30
Ecuación 22. Momento plástico.....	30
Ecuación 23. Capacidad nominal a flexión.....	31
Ecuación 24. Factor de estabilidad al cortante.....	31
Ecuación 25. Combinación de esfuerzos de carga axial y momento flector.....	31
Ecuación 26. Horas solares pico	35
Ecuación 27. Temperatura crítica.....	35
Ecuación 28. Cálculo de pérdida por panel.....	36
Ecuación 29. Diferencia de potencia.....	36
Ecuación 30. Demanda eléctrica al día	36
Ecuación 31. Cálculo de paneles solares.....	36
Ecuación 32. Inclinación.....	36
Ecuación 33. Área necesaria por panel	36
Ecuación 34. Área total necesaria	36

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ventilación eólica (Siber, 2023).....	16
Ilustración 2. Energía solar (Fundación Aquae, 2017).....	18
Ilustración 4. Cargador de baterías.....	21
Ilustración 3. Mapa del centro de distribución.....	21
Ilustración 5. Resultados del lightning power densities.....	24
Ilustración 6. Condiciones climáticas del sitio.....	35
Ilustración 7. Irradiación solar del sitio.....	35
Ilustración 8. Plano del área necesaria de los módulos fotovoltaicos.....	38
Ilustración 9. Dimensiones de los módulos fotovoltaicos.....	38
Ilustración 10. Sección de módulos.....	39
Ilustración 11. Tipo de luminarias.....	50
Ilustración 12. Gasto de energía por año.....	50
Ilustración 13. Consumo por día.....	51
Ilustración 14. Precio por día.....	51
Ilustración 15. Dimensiones del sistema fotovoltaico.....	52
Ilustración 16. Cálculo de los módulos fotovoltaicos.....	53
Ilustración 17. Total de paneles por inversor.....	53
Ilustración 18. Especificaciones estructurales.....	55
Ilustración 19. Especificaciones de sitio.....	56
Ilustración 20. Códigos.....	56
Ilustración 21. Cargas.....	57
Ilustración 22. Carga viva en cubierta.....	57
Ilustración 23. Deflexión máxima.....	58
Ilustración 24. Determinación capacidad a momento flexionante.....	59
Ilustración 25. Determinación capacidad a cortante.....	60
Ilustración 26. Revisión de compacidad.....	61
Ilustración 27. Determinación de capacidad a flexión.....	61
Ilustración 28. Determinación de la capacidad a corte.....	62
Ilustración 29. Resistencia crítica.....	62
Ilustración 30. Determinación de la capacidad axial de la columna.....	63
Ilustración 31. Determinación de la capacidad a flexión de la columna.....	64
Ilustración 32. Determinación de la capacidad a corte.....	65
Ilustración 33. Resultado de la capacidad de la columna.....	65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Consumo mensual del centro de distribución.....	21
Cuadro 2. Lightning power densities using space by space method.....	24
Cuadro 3. Especificaciones del sitio	25
Cuadro 4. Cargas muertas de cubierta.....	25
Cuadro 5. Otras cargas de cubierta.....	26
Cuadro 6. Carga de viento.....	26
Cuadro 7. Especificaciones de sitio	27
Cuadro 8. Parámetros sísmicos de interés.....	29
Cuadro 9. Resultados de la costanera.....	32
Cuadro 10. Resultados de la viga.....	32
Cuadro 11. Resultados de la columna	32
Cuadro 12. Resultados de la columna 2	32
Cuadro 13. Datos de módulo fotovoltaico TSM-NEG9R.28	33
Cuadro 14. Datos de módulo fotovoltaico TSM-NEG18R.20.....	33
Cuadro 15. Datos de módulo fotovoltaico TSM-Neg21C.20.....	34
Cuadro 16. Resultados de módulos fotovoltaicos tipo 1	37
Cuadro 17. Inclinação y área de módulos fotovoltaicos	37
Cuadro 18. Resultados de módulos fotovoltaicos tipo 2.....	37
Cuadro 19. Inclinação y área de módulos fotovoltaicos tipo 2.....	37
Cuadro 20. Resultados de módulos fotovoltaicos tipo 3.....	39
Cuadro 21. Inclinação y área de módulos fotovoltaicos tipo 3.....	40
Cuadro 22. Chequeo de inversiones.....	40
Cuadro 23. Tarifa media tensión horaria	41

RESUMEN

Las naves industriales se utilizan para diversas aplicaciones, y su diseño depende de los requerimientos específicos de cada cliente y las normativas vigentes según el sector industrial. Las características de estas estructuras varían considerablemente, dado el amplio espectro de actividades económicas que se desarrollan en su interior. Este factor brinda una gran variedad de soluciones en el diseño energético de cada nave industrial, considerando aspectos como la luz solar, la dirección del viento y materiales.

En Guatemala, se implementó el “Plan Nacional de Eficiencia Energética 2019-2032”, cuyo objetivo principal es priorizar el ahorro energético. Este plan busca reducir el uso y consumo de energía proveniente de diversas fuentes mediante la promoción de la eficiencia energética (ARIAE, 2019).

La adopción de tecnologías fotovoltaicas en naves industriales se plantea como una solución económicamente viable y sostenible para reducir los costos energéticos de las empresas. El crecimiento del sector industrial en Guatemala facilita el acceso a módulos fotovoltaicos en diferentes regiones del país.

Esta tesis se centrará en el diseño y análisis de un sistema fotovoltaico para una nave industrial ubicada en Villa Nueva, Guatemala, teniendo en cuenta factores como la orientación, inclinación y capacidad de los paneles solares, además se tomará en cuenta la estructura de la nave industrial para determinar si es capaz de resistir el equipo. Asimismo, se incluirá un análisis del retorno de inversión, evaluando el ahorro energético en función de las tarifas locales

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el crecimiento en la demanda de naves industriales en el mundo ha sido un factor clave para afrontar el tema de la sostenibilidad y eficiencia en el uso de recursos energéticos. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA,2022), los edificios industriales representan aproximadamente el 30 % del consumo energético global, lo que resalta la importancia de usar recursos renovables para reducir su huella de carbono y mejorar la eficiencia.

La eficiencia no solo es importante para la reducción de costos, también por un cumplimiento de normativas, en este aspecto las innovaciones tecnológicas han beneficiado, así como la automatización, materiales diferentes, mejores aparatos electrónicos, etc.

Una forma de complementar la innovación tecnológica es una buena práctica hacia el enfoque arquitectónico de las naves industriales, orientándose al aislamiento térmico, ventilación natural, iluminación natural, posicionamiento de la nave industrial, ventilación, etc. (Méndez & Torres, 2020).

Esta investigación tiene como objetivos la presentación de los beneficios y un análisis de un sistema de energía solar para la implementación de eficiencia energética en una nave industrial en un contexto en Villanueva, Guatemala, llamada UNISUR 3.

Este estudio se enfoca en generar recomendaciones y la demostración de un sistema de energía solar para abastecer un centro de distribución, volviéndolo energéticamente eficiente y ayudando al medio ambiente reduciendo la producción de la huella de carbono.

II. JUSTIFICACIÓN

El consumo energético en Guatemala ha aumentado de manera constante a lo largo de los últimos seis años. En 2005, el consumo energético del país fue de 338,913.54 terajoules, mientras que para 2016 alcanzó los 481,862.72 terajoules, lo que representa un crecimiento promedio anual del 3.35 %. Este aumento se atribuye al crecimiento del sector de la construcción, que registró un crecimiento promedio del 3.6 % en 2023 y se espera que aumente un 3.9 % para 2024, según datos de la Cámara Guatemalteca de la Construcción.

Existen diversas soluciones, como la planificación urbana eficiente, el aprovechamiento de la luz solar y la consideración de la dirección del viento. La eficiencia energética no solo tiene un impacto ambiental positivo, sino también económico, al beneficiar a sectores industriales al mejorar la competitividad. Esto se traduce en la posibilidad de aumentar la planilla o redirigir recursos hacia otros sectores, además de cumplir con objetivos de desarrollo ecológico, lo que repercute favorablemente en la imagen corporativa.

Un informe de PwC señala que el sector inmobiliario es uno de los principales contribuyentes al efecto invernadero y al calentamiento global, ya que los edificios representan más del 40 % del consumo global de energía y las emisiones de carbono. Es por esto que se deben buscar soluciones innovadoras. (PwC, 2021)

El objetivo global de reducir en un 55 % las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 impulsa la necesidad de desarrollar naves industriales más sostenibles. Estas naves influyen en el entorno ambiental, y los impactos ambientales varían según la naturaleza de las operaciones industriales que se realizan en su interior, así como la gestión del entorno circundante. Para mitigar estos impactos, es necesario adoptar prácticas sostenibles y tecnologías eficientes en su construcción y operaciones.

III. IMPORTANCIA

De acuerdo al Departamento de Análisis de Datos de la Consultora de Gestión y Consultoría, la construcción en el sector industrial en Guatemala se encuentra en auge, por lo que resulta crucial buscar soluciones renovables. La investigación se muestra sumamente relevante en el contexto actual del país, al promover una transición hacia fuentes de energía renovables y la optimización de recursos en dicho sector.

La instalación de módulos fotovoltaicos posibilita la reducción de la dependencia de fuentes de energía convencionales, beneficiando al medio ambiente mediante la disminución de gases de efecto invernadero y ofreciendo un respaldo económico a largo plazo para el cliente. Además, la investigación incorpora un análisis estructural destinado a verificar la capacidad de la nave industrial para soportar los módulos y garantizar su seguridad.

De igual forma, diversas empresas podrían adaptar este enfoque, permitiéndoles implementar módulos fotovoltaicos en sus instalaciones y, de esta manera, impulsar una transformación hacia modelos más sostenibles que optimicen la eficiencia energética, reduzcan costos y contribuyan a mitigar el impacto ambiental.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar un sistema de módulos fotovoltaicos y evaluar el impacto de la implementación del sistema en una nave industrial en Villa Nueva, Guatemala, con el fin de mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos.

B. Objetivos específicos

- Evaluar el sistema de iluminación de la nave industrial en base a la normativa ASHRAE, con el propósito de determinar su eficiencia energética.
- Determinar si la cubierta de la nave industrial es capaz de soportar la carga del equipo del sistema de paneles fotovoltaicos.
- Proponer un sistema de módulos fotovoltaicos capaz de satisfacer el consumo energético de la instalación, especificando los equipos necesarios para su implementación y realizando un análisis de retorno de inversión y viabilidad económica.

V. MARCO TEÓRICO

A. Naves industriales

1. Uso de la nave industrial

La nave industrial es un centro de distribución de grupo TICAL, ubicada en Villa Nueva, esta es una instalación estratégica para gestionar eficientemente el almacenamiento, manejo y distribución de productos.

El consumo energético de un centro de distribución depende de varios factores, así como el tamaño de la instalación, el tipo de productos que se maneja, la eficiencia de los equipos utilizados, algunos aspectos que influyen en este consumo son: la iluminación, sistemas de climatización, sistemas de almacenamiento, tecnología de gestión de pedidos, equipos de manipulación, sistemas de energía renovable, etc.

2. Ejemplo de Kimberly Clark

Un ejemplo relacionado es el centro de distribución de Kimberly Clark en Guatemala que opera con energía solar. Tiene 461 paneles solares, estos generan 250.6 megavatios hora anuales, es decir, el consumo anual de 70 hogares en Guatemala y reduce su impacto ambiental en 127 toneladas de dióxido de carbono anuales (Enertiva, 2019).

3. Eficiencia energética

La eficiencia energética es la capacidad de ahorrar la mayor cantidad de energía en algún ámbito para realizar una tarea o proporcionar un servicio sin sacrificar la calidad o el rendimiento. En el contexto de la construcción la eficiencia energética representa diseñar, construir y que la construcción se mantenga operando con un mínimo consumo de energía y así satisfacer las necesidades de la nave industrial (TotalEnergies, 2021).

4. Normas – auditorias

Los certificados energéticos son documentos que reflejan los consumos de energía estimados que las instalaciones de un inmueble emiten en un año, así como las emisiones de CO₂. Este certificado informa el consumo aproximado de energía y por temas de sostenibilidad y respeto al medio ambiente.

En Guatemala se toman en cuenta solo dos certificados los cuales son LEED y EDGE. La eficiencia energética mayormente se diseña con la normativa americana ASHRAE ya que no se cuenta con una propia (Communications, 2023).

5. ASHRAE

(American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)

En Guatemala se diseña con base en la norma ASHRAE, que se enfoca en los sistemas de edificios, la eficiencia energética, la calidad del aire interior y la sostenibilidad dentro de la industrial.

Su propósito es promover el avance tecnológico en las áreas de HVAC&R alrededor del mundo, compartiendo conocimiento que permita servir a la humanidad y promover un mundo sustentable.

La versión del Estándar 90.1-2019 ayuda a satisfacer la necesidad de la eficiencia energética al ofrecer pautas mínimas de eficiencia energética para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de edificios. Se aplica a nuevos edificios y nuevas porciones de edificios y sus sistemas de construcción específicamente identificados en el estándar que son parte de procesos industriales o de fabricación (Infoteknico, 2024).

6. Consumo energético

El consumo energético es la cantidad de energía utilizada en un periodo de tiempo. Lo asociamos al gasto de luz y de energía eléctrica, pero también entra el gas, gasoil o biomasa. De esta forma, a mayor consumo energético, menor es la eficiencia, por lo tanto, menor es el ahorro.

Esto se mide en kilovatios por hora (kWh) (TotalEnergies, 2021).

7. Beneficios de la eficiencia energética

La eficiencia energética ofrece muchos beneficios, algunos de los destacados son:

- Reducción de costos: esto es de suma importancia para las empresas ya que tienen un consumo de energía muy elevado, lo que hace facturas muy grandes.
- Sostenibilidad financiera: esto implica realizar inversiones en tecnologías más eficientes, pero suelen pagarse a largo plazo mediante los ahorros en las facturas de energía.
- Menor dependencia de combustibles fósiles: se reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables, como combustibles fósiles, esto ayuda a mitigar los impactos ambientales asociados a la extracción y quema de combustibles.
- Reducción de emisiones de gases: contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la generación de energía. Esto es fundamental para contribuir con la reducción de la huella de carbono y el cambio climático.
- Competitividad empresarial: las empresas adoptan prácticas y tecnologías eficientes energéticamente, pueden mejorar su competitividad al reducir costos operativos, cumplir con regulaciones ambientales y satisfacer las demandas de los consumidores conscientes del medio ambiente.
- Cumplimiento de normativas y regulaciones: la mejora de la eficiencia energética a menudo va de la mano con el cumplimiento de regulaciones gubernamentales y normativas ambientales. Las empresas que adoptan prácticas eficientes pueden evitar multas y sanciones asociadas con el incumplimiento de estas normativas (DocuSign, 2022).

8. Sostenibilidad

La RAE define el término sostenibilidad como aquello que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente. El modelo energético actual se implantó hace aproximadamente 150 años, es insostenible por razones ambientales, económicas y sociales. La sostenibilidad energética lleva a buscar nuevos métodos para generar energía que no dañen el medio ambiente y sea económicamente viable.

La sostenibilidad energética exige equilibrio en estos aspectos:

- Seguridad energética: capacidad de garantizar la continuidad y estabilidad a los consumidores del mundo.
- Competitividad económica: no debe poner en riesgo la economía ni el crecimiento industrial.
- Sostenibilidad ambiental: debe poder mitigar el impacto ambiental al generar este recurso (RAE, 2024).

B. Microgeneración

La microgeneración es utilizada en sistemas doméstico como para sistemas industriales.

1. Enfoque

Se les denomina la microgeneración a los sistemas de cogeneración de potencia inferior a 50 kW, tiene la ventaja el aprovechamiento de cerca del 100 % de la energía consumida para la producción de electricidad y calor.

Los motores de microgeneración basan su funcionamiento en el aprovechamiento de la elevada energía de los gases de combustión provenientes del motor debido a su alta temperatura y mediante un intercambiador de calor, suministrar la energía calorífica necesaria para el agua corriente sanitaria y la calefacción del local, además de producir energía eléctrica (Twenergy, 2019).

2. Metodologías

- Micromotores

Los micromotores emplean la misma tecnología que normalmente se emplea en los automóviles, el giro del eje mueve un generador que produce electricidad, aprovechando el calor disipado a través de los circuitos de agua de refrigeración y de los gases de escape (Twenergy, 2019).

- Microturbinas

Las microturbinas de gas son máquinas que emplean la misma tecnología que se emplea comúnmente en las grandes centrales de producción de electricidad, aunque a una escala más pequeña.

Los gases calientes producidos por la combustión del gas con el aire hacen girar una turbina, que a su vez acciona un alternador que genera electricidad (Twenergy, 2019).

Si las comparamos, ambas son válidas y presentan un rendimiento similar, sin embargo, las microturbinas tienen una fiabilidad mayor y sus costes de mantenimiento son inferiores. De todas maneras, en cada caso se debe de escoger la tecnología más apropiada en función a la potencia y modo de operación que requiere el proyecto.

C. Arquitectura bioclimática

1. Concepto

La arquitectura bioclimática consiste en el diseño de edificios teniendo en cuenta las condiciones climáticas, aprovechando los recursos disponibles como el sol, vegetación, lluvia, vientos, etc. Para disminuir los impactos ambientales, intentando reducir los consumos de energía.

2. Técnicas

- Trayectoria solar: siendo el sol la principal fuente energética que afecta al diseño bioclimático, es importante tener una idea de su trayectoria en las distintas estaciones del año. Modificando el eje de rotación de la construcción o tipos de ventanas a utilizar.
- Formas de transmisión de calor: es importante tener presentes los mecanismos de transmisión del calor para comprender el comportamiento térmico. Este se transmite en tres formas diferentes: conducción, convección y radiación.
- Ubicación: la ubicación determina las condiciones climáticas con las que la vivienda tiene que relacionarse. Podemos hablar de condiciones macroclimáticas y microclimáticas. Las macroclimáticas son consecuencia de la pertenencia a una latitud y región determinada. Las microclimáticas son consecuencia de la existencia de accidentes geográficos locales que pueden modificar las anteriores condiciones de forma significativa.
- Ventilación: la ventilación es importante teniendo varios usos; renovación del aire para mantener condiciones higiénicas, incrementar el confort térmico en verano, climatización e infiltraciones.

D. Iluminación eficiente

1. Tipos de iluminación industrial

Una buena iluminación es clave en cualquier espacio, según la iluminación que se escoja, la percepción del entorno cambia por completo. Por lo tanto, no se debe utilizar la misma ubicación en todos los ambientes o espacios (Décima Technologic Solutions, 2023).

- Luminarias LED: esta tecnología LED es una de las más populares, ya que la principal característica de estas es la eficiencia energética. Tiene un soporte óptimo para aguantar una gran cantidad de encendidos, sus componentes son reciclables, disipan muy bien el calor y son para alturas de 5 metros en adelante. Esto es muy útil ya que gestiona la luz mejor, se consume menos electricidad y se libera menor energía térmica, la combinación de esto influye en una mayor durabilidad. Tienen diferentes tonalidades, colores fríos y cálidos, depende del lugar de trabajo.

- Luminarias cold storage: son luminarias para cualquier comercio que necesite refrigerar los alimentos o industrias que trabajen con el frío. Diseñadas especialmente para soportar bajas temperaturas. Con una vida útil extensa y estas no atraen insectos y evitan la acumulación de polvo o restos de productos.
- Luminarias antivandalismo LED: para exteriores, tienen alta resistencia a los golpes, con un estilo refinado. Pueden estar expuestas o en contacto con la naturaleza, focos de bajo consumo.

Iluminar correctamente una zona industrial es importante para la estética, pero sobre todo para las funciones que se tendrán que llevar a cabo (Décima technologic solutions, 2023).

2. Comparación de tecnología LED contra la halógena

Ventajas de la tecnología LED:

- Bajo consumo energético debido a que no es necesario calentar un filamento, no desperdicia energía y es posible ahorrar hasta un 80 %.
- Larga duración con aproximadamente 15,000 a 40,000 horas de duración.
- Respetuosos con el medio ambiente ya que no contiene químicos tóxicos.
- Consume entre un 80 % y un 90 % menos de energía que las bombillas halógenas.

Desventaja de la tecnología LED:

- Alto costo de adquisición, sin embargo, la inversión se amortiza rápidamente por su larga duración.

Ventajas de las bombillas halógenas:

- La intensidad de luz es potente y tienen un amplio rango.
- Los costes de adquisición son asequibles.

Desventajas de las bombillas halógenas:

- Duración corta de 1000 horas.
- Se calientan mucho

- Emite rayos ultravioletas

(Lampara directa, 2024)

3. Sistemas automatizados

La innovación y evolución en las naves industriales es de lo más importante, actualmente la automatización cobra más importancia a medida que las empresas evolucionan y requieren incrementos en su producción. Con el objetivo de optimizar el consumo y ahorrar energía, se mejoran las funciones importantes para la empresa tanto para las áreas de producción internas con sensores de movimiento que reaccionan a la presencia de personal, como los automatismos fotosensibles instalados al momento de automatizar las luces, los cuales de ajustan a las diferentes estaciones del año y niveles de luz natural.

Sistemas de automatización:

- Control manual: el más simple, con interruptores de luz (Decima Technologic Solutions, 2023).
- Control por sensor: es una tecnología con sensores para detectar la presencia de personas y ajustar la iluminación en consecuencia (Decima Technologic Solutions, 2023).
- Control por programación: permite establecer programas de iluminación para sus espacios (Decima Technologic Solutions, 2023).
- Control por zonificación: permite a los usuarios controlar diferentes áreas de un espacio de manera independiente (Decima Technologic Solutions, 2023).

Se debe de tomar en cuenta que un sistema básico cuenta con:

- Controladores de luz: dispositivos con los cuales se controla la iluminación o los sistemas vinculados (Decima Technologic Solutions, 2023).
- Actuadores para luz: controlan los puntos de luz individualmente (Decima Technologic Solutions, 2023).
- Dimmer de luz: regula la intensidad de la luz (Decima Technologic Solutions, 2023).
- Sensores de luz: aparatos que controlan las condiciones de iluminación, agua, gas, lluvia y demás sistemas vinculados (Decima Technologic Solutions, 2023).

4. Luz natural

Las naves industriales no suelen contar con mucha luz solar, pero si se puede aprovechar la iluminación natural. Con ventanas o techos que dejan pasar la luz. Es fundamental mantenerlas en buen estado y lo más limpias posibles para facilitar el acceso de la luz. Es necesario colocar cristal transparente y utiliza estores para controlar la luz que entra a determinadas horas del día (Lightning Custom, 2023).

Soluciones para la iluminación natural

- Placas traslucidas: esto puede favorecer la transmisión lumínica, ofreciendo al mismo tiempo suficiente resistencia frente a fenómenos atmosféricos adversos y a posibles golpes. Existen determinadas opacidades y espesores de los materiales proporcionan una mejor difusión de la luz (Lightning Custom, 2023).
- Tubos solares: los conductos de luz se emplean habitualmente en espacios o zonas oscuras dónde la proyección de la luz a través de alguno de los elementos anteriormente mencionados, e instalados en las cubiertas, no llegan a iluminar estas zonas, por ejemplo, salas o espacios interiores dentro de una nave. Los conductos de iluminación tubulares junto a los distintos elementos de conexión nos facilitan una óptima reflexión interior desde la cubierta, zona de captación, hasta llegar a los puntos de interés iluminar (Lightning Custom, 2023).
- Exutorios: los exutorios o aireadores son dispositivos muy versátiles. Empleados en proyectos PCI como sistemas de control de temperatura y evacuación de humos (SCTEH), permiten la apertura o cierre de sus compuertas (Lightning Custom, 2023).

E. Aislamiento térmico

1. Importancia

El aislamiento térmico en naves industriales es esencial para mejorar la eficiencia energética, mantener temperaturas adecuadas en el interior y crear un ambiente de trabajo más cómodo. Una de las consideraciones muy importantes es el tipo de nave industrial que se quiere construir, ya que pueden variar en su función, desde almacenes hasta instalaciones de producción. El tipo de aislamiento térmico que necesitas dependerá de la finalidad de la nave (Isocold, 2019).

2. Materiales

Los materiales aislantes comunes utilizados en naves industriales incluyen paneles sándwich de metal con núcleo aislante como espuma de poliuretano o lana mineral, lana de vidrio, lana de roca, poliestireno expandido y otros. La elección del material dependerá de factores como el presupuesto, el rendimiento térmico requerido y las regulaciones locales. El aislamiento térmico se instala típicamente en techos y paredes de las naves industriales. Esto ayuda a mantener la temperatura interior y a prevenir la pérdida de calor en el invierno o el exceso de calor en el verano (Isocold, 2019).

3. Tipos de aislamiento térmico

- Paneles sándwich: es de los más comunes de poliuretano, tienen una doble lamina con un núcleo de espuma rígida de poliuretano, tienen baja conductividad impermeabilidad al agua y al vapor (Grupo Unamacor, 2023).
- Reflectantes: capas de material reflectante y guata. Tienen poco espesor e instalación sencilla. Suelen aplicarse en instalación de aislamiento térmico bajo techos (Grupo Unamacor, 2023).
- Poliestireno expandido: tiene un ancho entre 3 a 12 cm, material de baja conductividad térmica, pesa poco y es muy resistente a la humedad y absorbe bien los golpes (Grupo Unamacor, 2023).

- Lanas minerales: de roca o fibra de vidrio que aíslan acústica y térmicamente. Para mayor efectividad térmica suelen usarse lanas con más densidad; las que tienen mayor densidad se utilizan para suelos, fachadas o techados (Grupo Unamacor, 2023).

4. Ahorro por el aislamiento térmico

En una vivienda medida de unos 80 o 90 metros cuadrados podemos ahorrar entre un 20 y 25 % de consumo eléctrico gracias al aislamiento térmico. Se debe tener en cuenta que este beneficio se aplicaría durante 12 meses, las 24 horas del día, de esta forma se rentabiliza con facilidad la inversión (Grupo Unamacor, 2023).

F. Ventilación

1. Importancia

- Ventilación adecuada: es importante asegurarse de que el sistema de ventilación este diseñado de manera eficiente para evitar problemas de humedad o condensación que perjudiquen el aislamiento o estructura (Cushman, 2020).
- Regulaciones locales o normas: asegurarse de cumplir todas las normas relacionadas con el aislamiento y construcción (Cushman, 2020).
- Diseño eficiente: diseño adecuado que tome en cuenta la ubicación de las puertas y ventanas (Cushman, 2020).
- Mantenimiento: inspecciones regulares y reparaciones oportunas son esenciales (Cushman, 2020).

2. Tipos de ventilación

- Ventilación estática: llamada también natura porque consiste en la apertura de puertas y ventanas para facilitar la renovación del aire del inmueble, aprovechando el viento. Elevada ineficiencia a nivel térmico (Cushman, 2020).

- Ventilación eólica: sistema que utiliza la fuerza del viento para mover los ventiladores que se encargan de facilitar la entrada de aire del exterior y la salida del aire del interior de la nave (Cushman, 2020).
- Ventilación forzada o dinámica: sistema más recomendado, pero hace demasiado ruido y necesita potentes extractores para naves industriales con el objetivo de forzar la salida del aire (Cushman, 2020).



Ilustración 1. Ventilación eólica (Siber, 2023)

G. Sistema de climatización

Las naves industriales son espacios de gran tamaño en los que suelen trabajar un número grande de personas y que además albergan diversidad de mercancías y maquinaria. Los sistemas de climatización industrial son aquellos que permiten garantizar la temperatura y humedad óptimas dentro de las naves industriales. Dichos valores serán diferentes en función del tipo de actividad que se desarrolle dentro de las instalaciones.

1. Sistemas óptimos de climatización

- Ventiladores de alta potencia: no reducen la temperatura, pero sí la sensación térmica, funcionan con hélices generando aire. Es un sistema muy económico que permite que el aire fluya (EIGO).
- Sistema de climatización industriales: consiste en la instalación de un circuito frigorífico por el cual circula un refrigerante por varias etapas, este modifica su presión y la temperatura mediante un compresor, evaporador y condensador (EIGO).
- Climatizadores evaporativos: un sistema por el que el aire caliente se enfría al entrar en contacto con filtros de evaporación que contienen agua. Estos permiten renovar el aire

continuamente, así como bajar su temperatura hasta un máximo de doce grados dependiendo de la humedad del ambiente (EIGO).

2. Mantenimiento

Un mantenimiento y revisiones preventivas hacen que la vida útil de los aparatos sea más prolongada y se asegure un funcionamiento correcto. Si estas no son revisadas periódicamente, cuando se produce un fallo, en numerosas ocasiones este es catastrófico para el sistema ya que puede estar afectado en su totalidad. Este problema que puede ser solucionado si ha sido revisado con cierta frecuencia, ya que se evita llegar al problema radical (Novofri, 2023).

3. Aspectos generales

- Temperatura óptima: es un proceso complejo que debe considerar las dimensiones de la nave y el número de trabajadores. Se debe de tomar en cuenta las peculiaridades de la maquinaria y la naturaleza de la actividad desempeñada. Este dependerá el diseño y desarrollo de una infraestructura de climatización interna precisa para este tipo de espacios (Intersam, 2024).
- Investigación y selección del sistema adecuado: los aires acondicionados en naves industriales solo se utilizan en oficinas o cuartos fríos por los grandes espacios que estos tienen (Intersam, 2024).
- Coste, calidad y consumo de energía: el coste inicial de la instalación y el sistema en sí mismo es un aspecto que a menudo se considera con gran cuidado. Sin embargo, no debe pasarse por alto la relación calidad-precio. Optar por un sistema más costoso, pero de mayor calidad puede resultar beneficioso a largo plazo, ya que su durabilidad y eficiencia pueden reducirse en ahorros significativos (Intersam, 2024).
- Cambio climático y necesidades emergentes: el cambio climático global está generando un aumento constante de las temperaturas, lo que impacta directamente en la necesidad de climatización en naves industriales. Por esta razón, anticipar y adaptarse a estos cambios es esencial para garantizar un ambiente de trabajo cómodo y eficiente (Intersam, 2024).
- Productividad laboral y estrés térmico: existe una estrecha relación entre las condiciones ambientales y la productividad en el trabajo está ligada al estrés térmico. Este fenómeno

generado por temperaturas extremas puede resultar en una disminución significativa del rendimiento de los trabajadores. Estudios de la NASA indican que la productividad puede bajar hasta un 4.8 % (Intersam, 2024).

H. Energía solar

1. Equipo más común

Los módulos fotovoltaicos son cada vez más utilizados por varios sectores en naves industriales, en las industrias textiles, papelera, química, etc. Con el propósito de reducir sus gastos de electricidad. Es por eso que el ahorro potencial que se puede obtener al instalar módulos fotovoltaicos puede ir de un 20 a 30 %, aproximadamente.

2. Beneficios

- Permite a las empresas generar su propia energía, reduce la dependencia de la red eléctrica tradicional y reduce costes a largo plazo.
- Es energía renovable y no produce emisiones de gases contaminantes, ayuda a combatir el cambio climático.
- Se mejora la imagen empresarial.
- Aumenta el valor de la propiedad de la nave industrial
- Actúa como barrera de almacenamiento que reduce el consumo de energía para calefacción o refrigeración (Novaluz, 2023).



Ilustración 2. Energía solar (Fundación Aequae, 2017)

3. Empresas en Guatemala

- Green Power Energy: es una empresa especializada en proveer soluciones para la generación y consumo óptimo de energía solar, a través del aprovechamiento de la energía renovable de los sistemas solares. Diseña, comercializa e instala los productos que se adapten eficazmente a las necesidades y requerimientos de los clientes.
- Solución Solar: empresa con más de 30 años. Diseña e instala sistemas de energía renovable.
- Eden Global Solutions: empresa de ingeniería especializada en soluciones de energía solar para comercio e industrias; abarca diseño y la instalación.

I. Diseño estructural de naves industriales

El diseño estructural de naves industriales es un proceso fundamental que garantiza la seguridad, funcionalidad y eficiencia de edificaciones destinadas a actividades industriales. Estas estructuras se caracterizan por sistemas metálicos que permiten cubrir grandes luces con rapidez constructiva y eficiencia económica. El diseño debe contemplar tanto cargas gravitacionales como laterales, siendo el comportamiento sísmico un factor clave en regiones sísmicamente activas como Ecuador. (NSE, 2015)

J. Normas de diseño estructural aplicables

- NSE: establece los requisitos mínimos para el diseño sísmico de edificaciones nuevas y la evaluación existente.
- AISC 360-16: regula el diseño de estructuras metálicas en Estados Unidos y es ampliamente utilizada en América Latina. Incluye criterios para el diseño por métodos de resistencia (LRFD) y por esfuerzos admisibles (ASD).
- AISC 341-16: establece requisitos adicionales al diseño convencional, para asegurar un comportamiento adecuado en eventos sísmicos.
- ASCE/SEI 7-16: proporciona lineamientos para determinar las cargas mínimas como cargas muertas, cargas vivas, cargas de viento y cargas sísmicas.

K. Tipologías estructurales comunes en naves industriales

- Pórticos rígidos: son sistemas en los que las conexiones viga-columna resisten momentos flectores, permitiendo disipar energía en las zonas críticas de momento. Son típicamente empleados como SMF en zonas de alta peligrosidad sísmica (AISC 341-16).
- Marcos con arriostramientos: emplean diagonales metálicas que proporcionan rigidez lateral. Los marcos arriostrados especiales (SCBF) requieren que los elementos se diseñen para soportar deformaciones inelásticas, y que los arriostres trabajen en tracción y compresión alternada durante el sismo (AISC 341-16).
- Sistemas duales o híbridos: combinan marcos resistentes a momento con sistemas arriostrados, optimizando tanto la rigidez como la ductilidad. Son recomendados por ASCE 7-16 cuando se requieren desplazamientos limitados en estructuras con elementos de servicio sensibles (AISC 341-16).

VI. ANÁLISIS PREVIO DEL SITIO

Se realizó una visita previa a la nave industrial. Se encuentra en Bárcenas, zona 3, Villa Nueva. La nave industrial la ocupa grupo TICAL y este es un centro de distribución que almacena y distribuye pintura, comida de animales, medicinas, comida, etc. Las horas laborales en la bodega dependen de la programación de camiones, es de doble turno de 6 a.m. a 2 a.m. y llegan aproximadamente 30 camiones al día.

Hay dos tipos de máquinas que consumen energía eléctrica, el montacargas y la carretilla. Estas máquinas funcionan con baterías y tienen una zona de carga de baterías que distribuye 480 W, la que más consume es el montacargas, hay un total de 12 máquinas. Como sistema de climatización solo hay en las oficinas aire acondicionado y cuentan con 8 equipos de aire acondicionado.

La empresa Mayorista de Electricidad MEL, suministra la energía en bloque por ser grandes usuarios, con un consumo promedio de 44,144.53 KWH en los primeros tres meses del mes.

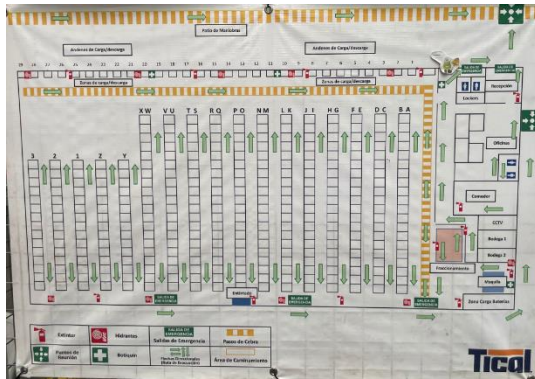


Ilustración 3. Mapa del centro de distribución



Ilustración 4. Cargador de baterías

Mes	Consumo energético (kWh)
Enero	44,244.15
Febrero	43,126.46
Marzo	45,062.99

Cuadro 1. Consumo mensual del centro de distribución

VII. METODOLOGÍA

A. Fase de investigación

Primeramente, se realizó una búsqueda para identificar una nave industrial que cumpliera con todas las características necesarias para la investigación. Se mostró especial interés en un centro de distribución, dado que estos contaban con maquinaria especializada, equipada con baterías, iluminación y operaban en horarios diurnos y nocturnos. Se investigó a la empresa desarrolladora y constructora de la nave para obtener datos técnicos y constructivos destinados a los cálculos del sistema de módulos fotovoltaicos. Esa información fue considerada importante para determinar el área de la cubierta y realizar el análisis estructural correspondiente. Asimismo, se organizó una visita al centro de distribución para recopilar información; durante la misma, se mantuvo comunicación con los directores y personal de mantenimiento. Dichas personas organizaron un recorrido para ver las áreas más importantes, así como la bodega, la zona de baterías, oficinas, zona de carga y descarga, etc. Estos empleados proporcionaron datos precisos sobre el consumo energético mensual de la instalación.

B. Fase de ejecución

Con los datos obtenidos de la constructora, se procedió a realizar los cálculos. Se comenzó con el dimensionamiento del sistema de módulos fotovoltaicos para abastecer en su totalidad la energía consumida por el centro de distribución. Con la información y los cálculos previos, se generó el diseño técnico de la instalación de los módulos fotovoltaicos sobre la cubierta del centro de distribución con el tipo de módulo que se seleccionó.

A continuación, se realizó el análisis respectivo con base en una nave industrial OMF para asegurarse de que la nave industrial aguante el sistema de módulos fotovoltaicos sin comprometer su seguridad. Por último, se analizó el sistema de iluminación de la nave industrial con el “Lighting Power Densities Using Space by Space Method”.

C. Fase final

En esta fase, se evaluaron los resultados obtenidos del sistema de módulos fotovoltaicos, se generó un análisis de retorno de inversión para determinar la viabilidad económica a largo plazo del proyecto, se comparó el precio gastado de energía con el precio final del sistema de módulos fotovoltaicos. Esta información ayudó a generar las conclusiones y recomendaciones correspondientes para el análisis realizado.

VIII. RESULTADOS Y CÁLCULOS

A. Análisis de iluminación

Se realizó un análisis de iluminación del espacio evaluado, considerando las características técnicas de las luminarias instaladas, así como su distribución en relación con el área total. Se calcula la densidad de potencia lumínica, comparando el resultado obtenido con los valores de referencia establecidos.

- Datos de la luminaria: Philips Green Perform High Bay Elite

Flujo luminoso: 3,000 LM

Temperatura de color correlacionada: 4,000 K

Potencia máxima: 228 W

Altura: 13 m

Área: 8560 m²

Cantidad de luminarias: 126

Lighting Power Densities Using Space by Space Method	
Building Specific Space Types	LPD, W/ft ²
Warehouse, Medium/Bulky Material Storage	0.58

Cuadro 2. Lightning power densities using space by space method

$$LPD: \frac{(Cantidad)(Watts)}{Area}$$

Ecuación 1. Lightning power densities using space by space method

$$LPD: 0.327 < 0.58$$

Nivel	Ubicación	Tipología	Cantidad	Watts	Area (m ²)	W/m ²	W/ft ²
1	Nave Industrial	A	126	228	8560	3.356075	0.327422

Ilustración 5. Resultados del lightning power densities

B. Análisis de la resistencia de la cubierta

- Costanera: C8"x2"x1/8"
- Viga: W24x55
- Columna 1: W24x106
- Columna 2: W24x62

Especificaciones de sitio (NSE 2-10)	
Io	4
Scr	1.65
S1r	0.60
D	Clase de sitio
Fa	1
Fv	1.5
Tipo B	Fuente sísmica
Na	1.08
Nv	1.17

Cuadro 3. Especificaciones del sitio

Cargas muertas de cubierta	
CINDU SCC-18	6 kgf/m ²
Instalaciones Eléctricas	5 kgf/m ²
Polines de techo y forro	6 kgf/m ²
Sistema contra incendio	10 kgf/m ²

Cuadro 4. Cargas muertas de cubierta

Otras cargas de cubierta (NSE 2-10)	
20 mm Tefra (Incluida por cliente)	34 kgf/m ²
25 mm estimada de agua	25 kgf/m ²
Carga viva	50 kgf/m ²
Panel solar	19 kgf/m ²

Cuadro 5. Otras cargas de cubierta

Carga de viento (NSE 2-10)	
Exposición	C
Presión básica	48 kgf/m ²
Factor de importancia por viendo	1
St (Pendiente de techo)	35%
Velocidad básica del viento	27.8 m/s
Coefficiente de presión Cq1	0.7
Coefficiente de presión Cq2	0.8
Coefficiente de presión Cq3	0.5

Cuadro 6. Carga de viento

Especificaciones estructurales	
Categoría (NSE 1-10)	Importante
Factor de importancia estructural (ASCE 2-10)	1.25
Nivel de protección sísmica (NSE 2.10)	D
5% de probabilidad de exceder un sismo de diseño en un periodo de 50 años (NSE 2-10)	Sismo severo
Kd (NSE 2-10)	0.8

R (NSE 3-10)	3.5
Cd (NSE 3-10)	2.5
Método utilizado	LRFD
Sistema estructural (NSE 3-10)	E1-C

Cuadro 7. Especificaciones de sitio

$$M_u = \frac{W * L^2}{8}$$

Ecuación 2. Momento máximo

$$V_u = \frac{W * L}{2}$$

Ecuación 3. Cortante máximo

$$\delta = \frac{5 * W * L^4}{384 * E * I_x}$$

Ecuación 4. Deformación del elemento

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL}{n * r_y}\right)^2}$$

Ecuación 5. Tensión crítica de pandeo en el eje menor

$$\sigma_t = \frac{1}{A * r_o^2} * \left(G * J + \frac{\pi^2 * E * C_w}{KL^2} \right)$$

Ecuación 6. Tensión crítica torsional

$$F_e = \frac{C_b * r_o * A}{S_e} * \sqrt{\sigma_{ey} * \sigma_t}$$

Ecuación 7. Capacidad flexionante

Resistencia crítica a flexión	
Condición	Aplica
$F_e > 2.78 * F_y$	$F_c = F_y$
$0.56 * F_y < F_e < 2.78 * F_y$	$F_c = \frac{10}{9} * F_y * \left(1 - \frac{10 * F_y}{36 * F_e}\right)$
$F_e \leq 0.56 * F_y$	$F_c = F_e$

Ecuación 8. Resistencia crítica a flexión

$$\phi M_n = 0.9 * S_e * F_c$$

Ecuación 9. Momento nominal

Resistencia crítica al cortante	
Condición	Aplica
$\frac{h}{t} \leq \sqrt{\frac{E * K_v}{F_y}}$	$F_v = 0.60 * F_y$
$\sqrt{\frac{E * K_v}{F_y}} < \frac{h}{t} < 1.51 * \sqrt{\frac{E * K_v}{F_y}}$	$F_v = 0.6 * \sqrt{E * K_v * F_y} * \frac{h}{t}$
$\frac{h}{t} > 1.51 * \sqrt{\frac{E * K_v}{F_y}}$	$F_v = 0.904 * E * K_v * \frac{1}{\left(\frac{h}{t}\right)^2}$

Ecuación 10. Resistencia crítica al cortante

$$\delta_{cv} < \frac{L}{240}$$

Ecuación 11. Revisión de deflexiones

$$\delta_{CM_{cv}} < \frac{L}{180}$$

Ecuación 12. Revisión de deflexiones con carga viva y muerta

Parámetros sísmicos de interés (NSE 2-10)	
Na	1.08
Scs	1.782
Scd	1.426
Svd	0.285

Cuadro 8. Parámetros sísmicos de interés

$$\frac{bf}{2tf} < 0.56 * \sqrt{\frac{E}{Fy}}$$

Ecuación 13. Revisión de compacidad del ala

$$\frac{h}{tw} < 1.49 * \sqrt{\frac{E}{Fy}}$$

Ecuación 14. Revisión de compacidad del espesor del alma

$$KL = \frac{K * L}{r}$$

Ecuación 15. Índice de esbeltez

$$Fe = \frac{\pi^2 * E}{(K * \frac{L}{r})^2}$$

Ecuación 16. Esfuerzo crítico de Euler

Esfuerzo crítico de diseño	
Condición	Aplica
$KL \leq 4.71 * \sqrt{\frac{E}{Fy}}$	$Fcr = 0.658 \frac{Fy}{Fe} * Fy$

$KL > 4.71 * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$F_{cr} = 0.877 * F_e$
------------------------------------	------------------------

Ecuación 17. Esfuerzo crítico de diseño

$$\phi P_n = 0.9 * F_{cr} * A_g$$

Ecuación 18. Carga axial de diseño

$$L_p = 0.176 * r_y * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

Ecuación 19. Longitud no soportada máxima para pandeo plástico

$$r_{ts} = \sqrt{\frac{I_y * C_w}{S_x}}$$

Ecuación 20. Radio efectivo para torsión de la sección

$$L_r = 1.95 * r_{ts} * \sqrt{\frac{E}{0.7 * F_y}} * \sqrt{\frac{J * C}{S_x * h_o} + \sqrt{\left(\frac{J * c}{S_x * h_o}\right)^2 + 6.76 * \left(\frac{0.7 * F_y}{E}\right)^2}}$$

Ecuación 21. Longitud crítica para pandeo lateral-torsional

$$M_p = F_y * Z_x$$

Ecuación 22. Momento plástico

Capacidad nominal a flexión	
Condición	Aplica
L _b < L _p	$\phi M_n = \phi * F_y * Z_x$
L _p < L _b < L _r	$\phi M_n = \phi * \min \left(C_b * (M_p - 0.7 * F_y * S_x) * \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right),$ $F_y * Z_x$

$L_b \geq L_r$	$F_{cr} = C_b * \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} * \sqrt{1 + 0.078 * \frac{J * c}{S_x * h_o} * \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2}$
----------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Ecuación 23. Capacidad nominal a flexión

Capacidad nominal a cortante	
Condición	Aplica
$htw \leq 1.1 * \sqrt{\frac{K_v * E}{F_y}}$	1
$htw > 1.37 * \sqrt{\frac{K_v * E}{F_y}}$	$C_v = \frac{1.51 * K_v * E}{(htw)^2 * F_y}$
$1.1 * \sqrt{\frac{K_v * E}{F_y}} < htw \leq 1.37 * \sqrt{\frac{K_v * E}{F_y}}$	$C_v = \frac{1.1 * \sqrt{\frac{K_v * E}{F_y}}}{htw}$

Ecuación 24. Factor de estabilidad al cortante

Interacción axial y flexión	
Condición	Aplica
$\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2$	$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} * \frac{M_u}{\phi M_n}$
$\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2$	$\frac{P_u}{2 * \phi P_n} + \frac{M_u}{\phi M_n}$

Ecuación 25. Combinación de esfuerzos de carga axial y momento flector

Determinación de capacidad	
Chequeo	Relación de capacidad
Momento Flexionante	0.302
Cortante	0.135
Deflexión	Cumple

Cuadro 9. Resultados de la costanera

Determinación de capacidad	
Chequeo	Relación de capacidad
Compacidad del ala	Cumple
Compacidad del alma	No cumple
Capacidad axial	0.305
Capacidad a flexión	0.403
Factor de estabilidad al cortante	1
Esfuerzos combinados	0.664

Cuadro 10. Resultados de la viga

Determinación de capacidad	
Chequeo	Relación de capacidad
Compacidad del ala	No cumple
Compacidad del alma	Cumple
Capacidad a flexión	0.107
Capacidad a cortante	0.019
Esfuerzo combinado	0.122

Cuadro 11. Resultados de la columna

Determinación de capacidad	
Chequeo	Relación de capacidad
Compacidad del ala	Cumple
Compacidad del alma	No cumple
Capacidad axial	0.231
Capacidad a flexión	0.405
Esfuerzo combinado	0.591

Cuadro 12. Resultados de la columna 2

C. Análisis del sistema de módulos fotovoltaicos

TSM-Neg9R.28	
Potencia máxima	343 W
Voltaje máximo	41.7 V
Corriente máxima	8.24 A
Temperatura de operación	43 °C
Coefficiente de temperatura	-0.29%
Largo	1.762 m
Ancho	1.134 m
Precio	Q. 875.00

Cuadro 13. Datos de módulo fotovoltaico TSM-NEG9R.28

TSM-NEG18R.20	
Potencia máxima	386 W
Voltaje máximo	31.8 V
Corriente máxima	12.15 A
Temperatura de operación	43 °C
Coefficiente de temperatura	-0.29%
Largo	1.961 m
Ancho	1.134 m
Precio	Q. 975.00

Cuadro 14. Datos de módulo fotovoltaico TSM-NEG18R.20

TSM-NEG21C.20	
Potencia máxima	522 W
Voltaje máximo	37.4 V
Corriente máxima	13.93 A
Temperatura de operación	43 °C
Coefficiente de temperatura	-0.29%
Largo	2.384 m
Ancho	1.303 m
Precio	Q. 1,375.00

Cuadro 15. Datos de módulo fotovoltaico TSM-Neg21C.20

-Inversor: SOLIS – 50 K

Potencia máxima (Pmax): 55000 W

Voltaje máximo (Vmp): 1100 V

Corriente máxima (Imax): 28.5 A

Precio: USD 5,361

-Condiciones del lugar

Demanda energética promedio al mes: 44,144.53 kWh

Latitud: 14.46°

Hemisferio: Norte

Irradiación global: $5.758 \frac{kWh}{m^2}$

Temperatura ambiente: 21 °C

Área de construcción: 19,216.24 m²

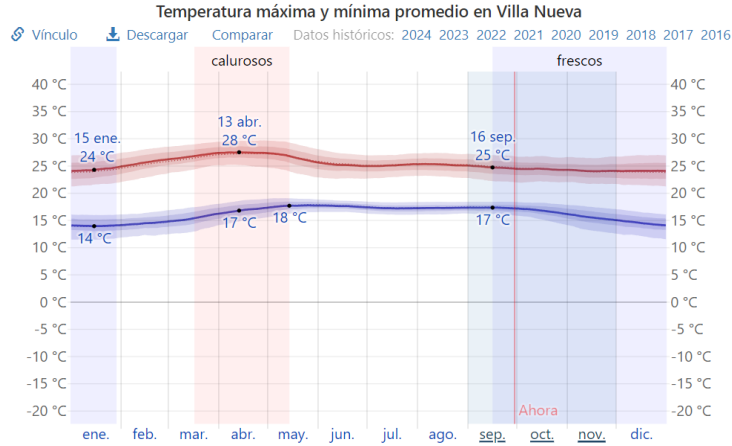


Ilustración 6. Condiciones climáticas del sitio

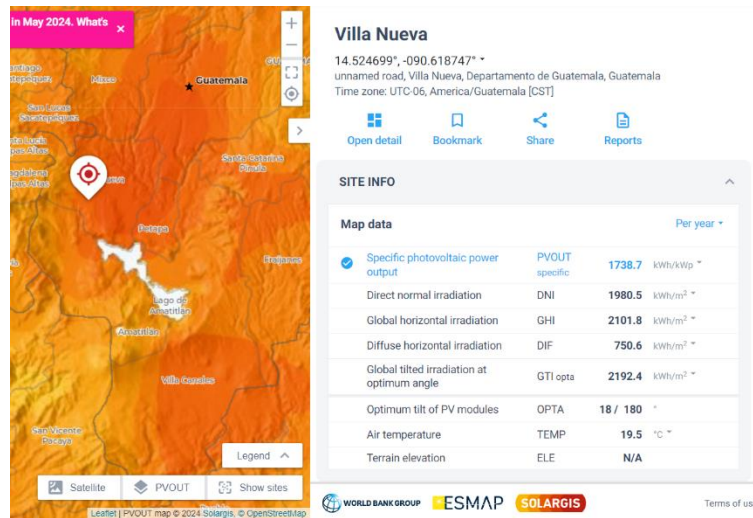


Ilustración 7. Irradiación solar del sitio

$$HSP = \frac{GHI}{1000 \frac{W}{m^2}}$$

Ecuación 26. Horas solares pico

$$Tc = Tamb + (Tnoct - 20^{\circ}C) \left(\frac{\frac{GHI * \frac{1000 W}{1 kW}}{800 W}}{\frac{m^2}{HSP}} \right)$$

Ecuación 27. Temperatura crítica

$$P_{pmc} = P_{max} * (1 + \frac{g}{100\%} (T_c - 25^\circ\text{C}))$$

Ecuación 28. Cálculo de pérdida por panel

$$\Delta P = P_{max} - P_{pmc}$$

Ecuación 29. Diferencia de potencia

$$E = D * \frac{12}{1} * \frac{1}{365}$$

Ecuación 30. Demanda eléctrica al día

$$MFV = \frac{E * FS}{P_{pmc} * HSP}$$

Ecuación 31. Cálculo de paneles solares

$$h1 = L_{MFV} * \cos(\beta_{panel})$$

Ecuación 32. Inclinación

$$A = (d1 + dt) * ancho$$

Ecuación 33. Área necesaria por panel

$$At = A * MFV$$

Ecuación 34. Área total necesaria

Horas solares pico	5.758 hr
Temperatura critica	49.75°C
Potencia por panel	342.91 W
Diferencial de pérdida	0.101 W
Demanda eléctrica	1451.3 kWh
Cantidad de paneles	918 paneles
Inversores	9

Cuadro 16. Resultados de módulos fotovoltaicos tipo 1

β_{panel}	14.46°
h1 (Longitud horizontal)	1.706 m
d1 (Distancia mínima entre modulo)	0.417 m
Dt	1.939 m
A (Área de cada módulo)	2.676 m ²
At (Área total)	2454.5 m ²

Cuadro 17. Inclinación y área de módulos fotovoltaicos

Horas solares pico	5.758 hr
Temperatura critica	49.75°C
Potencia por panel	385.89 W
Diferencial de perdida	0.106 W
Demanda eléctrica	1451.3 kWh
Cantidad de paneles	817 paneles
Inversores	8

Cuadro 18. Resultados de módulos fotovoltaicos tipo 2

β_{panel}	14.46°
h1 (Longitud horizontal)	1.899 m
d1 (Distancia mínima entre modulo)	0.464 m
Dt	2.158 m
A (Área de cada módulo)	2.973 m ²
At (Área total)	2581.2 m ²

Cuadro 19. Inclinación y área de módulos fotovoltaicos tipo 2

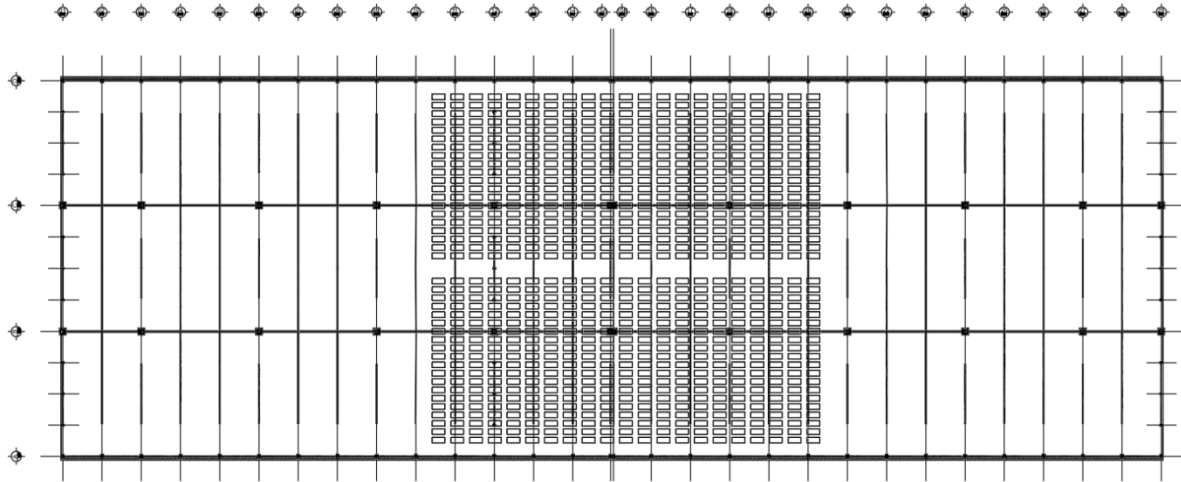


Ilustración 8. Plano del área necesaria de los módulos fotovoltaicos

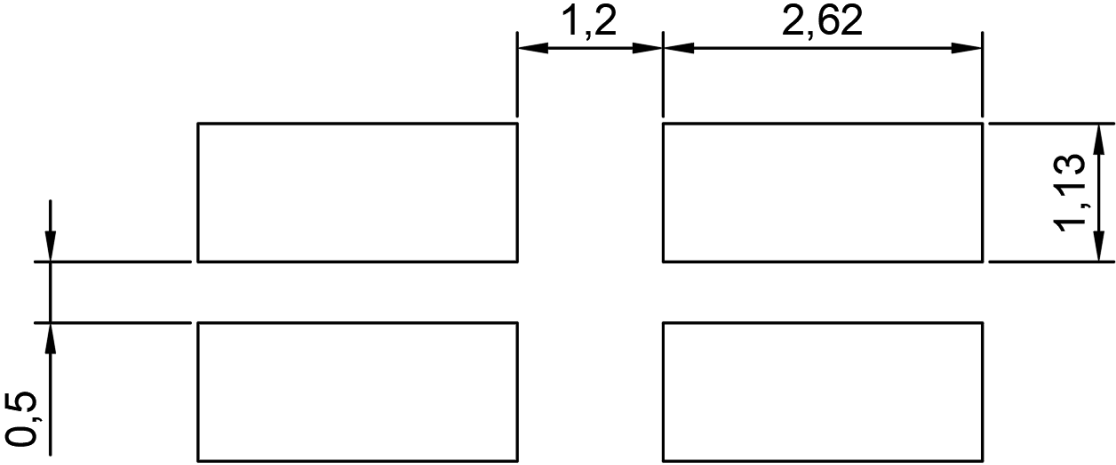


Ilustración 9. Dimensiones de los módulos fotovoltaicos

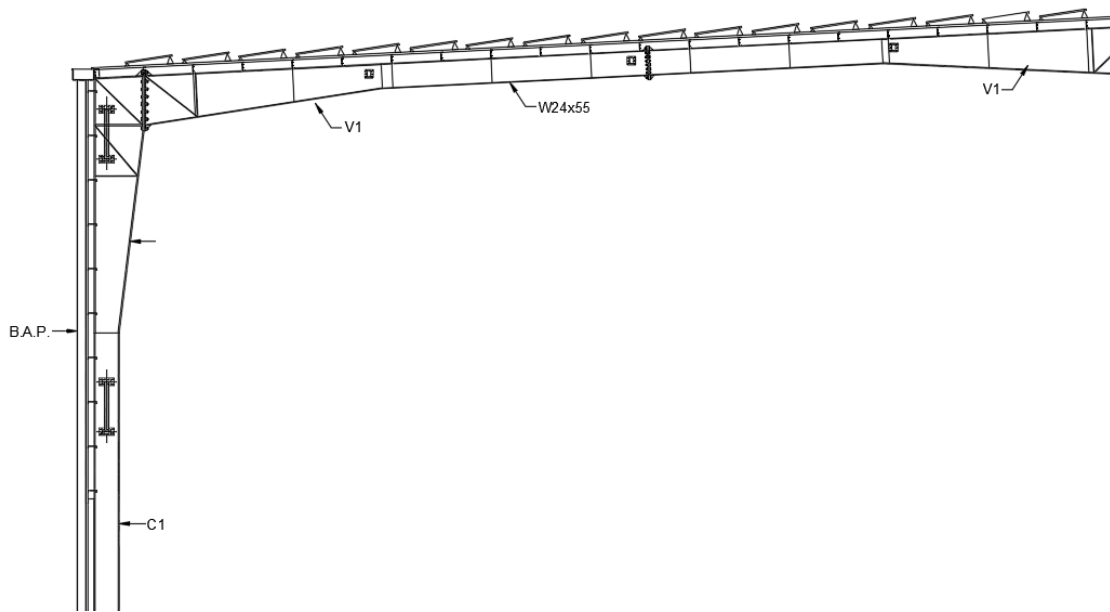


Ilustración 10. Sección de módulos

Horas solares pico	5.758 hr
Temperatura critica	49.75°C
Potencia por panel	522 W
Diferencial de perdida	0.137 W
Demanda eléctrica	1451.3 kWh
Cantidad de paneles	603 paneles
Inversores	8

Cuadro 20. Resultados de módulos fotovoltaicos tipo 3

β_{panel}	14.46°
h1 (Longitud horizontal)	2.308 m
d1 (Distancia mínima entre modulo)	0.564 m
Dt	2.62 m
A (Área de cada módulo)	4.15 m ²
At (Área total)	2507.4 m ²

Cuadro 21. Inclinación y área de módulos fotovoltaicos tipo 3

Paneles en serie	$\frac{V_{inversor}}{V_{panel}}$
Paneles en paralelo	$\frac{I_{inversor}}{I_{panel}}$
Paneles máximos	$\frac{P_{inversor}}{P_{panel}}$

Cuadro 22. Chequeo de inversiones

D. Análisis de retorno de inversión

Uno de los motivos principales de este análisis y diseño de un sistema fotovoltaico es el ahorro del costo en la energía que la empresa compra a MEL. Para una instalación de 817 módulos fotovoltaicos tipo 2 “TSM-NEG18R20”:

Costo promedio por modulo fotovoltaico: Q. 975.00 por panel

$$C = Q. 975.00 * 817 = Q. 796,575$$

Inversores

$$C = Q. 41276.00 * 8 = Q. 330,208$$

Costo de la estructura de soporte (Finmodelslab, 2024): 30% del total

$$C = Q. 1,126,783 * 1.3 = Q. 1,464,817.9$$

Costo de la electricidad (Diario de Centroamérica, 2024):

Tarifa: Media Tensión Horaria con Demanda - MTHD	Valor
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)	882.125232
Cargo Unitario por Energía en Punta (Q/kWh)	1.06452
Cargo Unitario por Energía Intermedia (Q/kWh)	1.026664
Cargo Unitario por Energía en Valle (Q/kWh)	0.997268
Cargo Unitario por Energía en Valle adicional (Q/kWh)	0.96746
Cargo Unitario por Potencia de Punta (Q/kW-mes)	48.581213
Cargo Unitario por Potencia Contratada (Q/kW-mes)	15.691474

Cuadro 23. Tarifa media tensión horaria

Precio por mes: Q. 53,883.6

Retorno – inversión

$$R = \frac{Q. 1,464,817.9}{Q. 53,883.61} = 27.18 \text{ meses}$$

Esto indica que la inversión inicial se recuperaría en aproximadamente 28 meses.

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Análisis de iluminación

En los planos entregados por el constructor, se especifica el tipo de luminaria que se utiliza para la nave industrial, sin incluir las oficinas. Estas son unas Philips Green Perform High Bay Elite, se caracterizan por ser luminarios de montaje alto para aplicaciones industriales con una gran calidad de luz, grandes ahorros de energía, larga duración a un precio asequible y una gran variedad de paquetes lumínicos y ópticos (Philips Lighting, 2019).

La iluminación es un tema importante por su consumo energético, en un centro de distribución debe haber una buena iluminación ya que afecta directamente a la seguridad de las personas, la eficiencia operativa y el ahorro energético, por lo cual, es necesario tener luminarias de buena calidad y con gran calidad de luz.

Se utilizó el método “*Lighting Power Densities using space-by-space*”. Es un método expresado en watts por pie cuadrado, depende de las especificaciones del código de energía adoptado, en este caso, el AHRAE 90.1. Con la ecuación planteada se involucró el área del lugar, los watts y la cantidad de luminaria que se utilizaron en el lugar. A partir de la tabla 9.6.1 del ASHRAE 90.1, se especifica que una bodega con medio/alto almacenamiento debe tener 0.58 watts por pie cuadrado.

Se realizó el análisis necesario a todo el centro de distribución en general y se determinó que el centro tiene 0.33 watts por pie cuadrado.

Se hizo una comparación entre el resultado en la norma y el resultado práctico del centro de distribución y se puede notar que hay una diferencia de 0.25 watts por pie cuadrado. Para mejorar este resultado, es posible cambiar las luminarias por unas con más potencia y complementarlo con poner una luminaria más en cada pasillo. Sin embargo, cuando se analizó físicamente la nave industrial, se notó que existe iluminación natural con tragaluces en la cubierta y esto no está

contemplado en los cálculos realizados, este detalle contribuye con una mejor iluminación, espacios más cálidos y lo más importante con un ahorro económico substancial.

B. Análisis de la capacidad de la cubierta

Se analizó un sistema de módulos fotovoltaicos en la nave industrial, por lo tanto, es importante determinar si la cubierta fue diseñada o resiste los módulos con los que se realizaron los cálculos. Se analizaron las costaneras, las vigas y las columnas con la norma AISC 360-16. Es muy importante recalcar que en el primer plano de notas generales aparece una carga de paneles solares de 19 kgf/m², por lo tanto, la nave industrial fue diseñada con un plan a futuro de agregar módulos fotovoltaicos para ayudar con el consumo energético.

Primero, se analizó la costanera con un perfil C8”X2”X1/8” con los resultados en el Cuadro 9, se contemplaron las cargas que ya están en los planos y se agregó la carga de los módulos fotovoltaicos que se utilizaron para los cálculos que era mayor a la que estaba en el plano. Se determinó que la relación del momento a flexión y la capacidad del esfuerzo cortante es menor que 1. Por lo tanto, esto indica que las costaneras están trabajando a un nivel considerablemente seguro frente a su capacidad a flexión y cortante. La deflexión se cumplió igualmente considerando los criterios de diseño en el AISC 360-16 mostradas en las Ecuaciones 13 y 14.

A continuación, se tiene el análisis de la viga principal con los resultados en el Cuadro 10, se puede destacar el chequeo en la compacidad del alma que tuvo un resultado negativo, no cumple, sin embargo, tiene diferentes tipos de soluciones y lo que se utilizó en este diseño son rigidizantes en la viga. Por otro lado, se chequeó la compacidad del ala, capacidad a flexión, capacidad a cortante y esfuerzos combinados, todos estos se comportaron bien por su relación cercana a 1. Los resultados mostrados en el Cuadro 10 demuestran que es menor a 1 la relación siguiendo los criterios que indica el AISC 360-16.

Por último, tenemos la evaluación de capacidad de la columna 1 y 2. El análisis muestra que la compactación del ala de la columna 1 no cumple, sin embargo, esto se puede solucionar con rigidizantes para que la columna satisfaga con los límites de esbeltez permitidos. La columna 1 es una columna más pesada que la 2, por lo tanto, se puede comparar los resultados de capacidad a

flexión, capacidad a cortante y el esfuerzo combinado, la columna 1 tiene resultados con un margen de seguridad muy alto ya que no se acerca a 1. La columna 2 es un perfil menos pesado y el área es menor, por lo tanto, se puede notar que, aunque se acerque a 1, satisface con los criterios del AISC 360-16.

C. Análisis del sistema de módulos fotovoltaicos

A partir de los cálculos realizados, se puede hacer una comparación entre cada tipo de módulo fotovoltaico. El primer tipo de módulo fotovoltaico presenta una baja potencia, esto indica que se necesitan aproximadamente 918 unidades. Cada módulo tiene un precio de Q.875.00, es una opción económica tomando en cuenta que son módulos fotovoltaicos de una empresa llamada SolarGuat, por lo tanto, no es necesario importarlos, otro aspecto beneficioso es la garantía que se puede obtener con la empresa o servicios de mantenimiento que tengan.

Por otro lado, se debe evidenciar que hay una diferencia de Q.100 entre el primer y segundo tipo de módulo fotovoltaico, el segundo módulo tiene un precio de Q.975, sin embargo, se necesitan menos módulos para abastecer la energía ya que el segundo tiene una potencia mayor. El segundo tipo de módulo fotovoltaico fue el seleccionado para los siguientes cálculos de retorno de inversión, ya que tiene un buen balance entre potencia máxima y precio, con este se necesitan 817 módulos fotovoltaicos y un área de 2581 metros cuadrados, lo cual no es un problema, la nave industrial cuenta con un área muy amplia en su cubierta y si es posible realizar el diseño.

El tercer tipo de módulo fotovoltaico tiene un precio de Q.1375, la razón es que tiene una mayor capacidad que los demás tipos. Sin embargo, de igual forma se necesitan 604 paneles y al realizar un análisis de retorno inversión se evidencia que el costo total es mayor. Este módulo es casi el doble de ancho que los demás, por lo tanto, abarca mucha más área que los otros módulos.

Como se mencionó anteriormente, se seleccionó el tipo de panel 2 para los cálculos de retorno de inversión. Esta elección permitió reducir significativamente la cantidad de paneles necesarios para el sistema, estableciéndose en un total de 817 unidades. Esta decisión no solo logró optimizar el costo total del proyecto, sino que también minimizó el espacio requerido para la instalación, lo que resulta sumamente importante en proyectos donde la disponibilidad de espacio es un factor.

Sin embargo, esta parte de la nave industrial cuenta con aproximadamente 8600 metros cuadrados, por lo tanto, no hay problema con el espacio. La vida útil de estos módulos estimada con un buen mantenimiento y operación es de entre 30 y 40 años.

A partir de los resultados descritos anteriormente, se necesitarán 8 inversores para poder transformar la corriente continua en corriente alterna para que pueda ser utilizada sin ocasionar daños, de igual forma se encargara de optimizar el rendimiento global de la instalación, por estas razones se buscaron inversores de marcas reconocidas.

Con base en los cálculos realizados, se determinó que la inversión inicial sería recuperada en un periodo aproximado de 28 meses. Este rápido retorno de inversión posiciona el sistema como una opción muy competitiva a comparación de otras alternativas de generación de energía renovable. Además, la proyección de ahorro mensual estimada en Q. 53,883.6 durante al menos 22 años adicionales garantiza una rentabilidad sostenida a largo plazo.

Es importante tomar en cuenta que los módulos fotovoltaicos experimentan una disminución anual en su eficiencia, generalmente en un rango de 0.5 % a 1 % pero este efecto no impacta de manera significativa al desempeño o la eficiencia en el sistema. Los costos de mantenimiento de igual forma son relativamente bajos a comparación del ahorro generado, consolidando la viabilidad económica.

Se puede ver desde una perspectiva ambiental, la implementación del sistema ofrece beneficios sustanciales. Evitar la emisión de 10.3 toneladas de CO₂ al mes es equivalente a retirar de circulación aproximadamente a vehículos de combustión interna por mes o cerca de 120 árboles anuales. Existe un impacto positivo del proyecto en la mitigación del cambio climático así se puede alinear con las metas globales.

Adicionalmente, depender de una fuente de energía renovable como la solar representa una contribución a la matriz energética en Guatemala, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles, esto es muy importante tomando en cuenta el aumento de la demanda energética en el país.

X. CONCLUSIONES

- A partir de los cálculos realizados, la combinación entre luz natural e iluminación artificial es óptima para un centro de distribución con bastante almacenamiento, por lo cual genera un espacio seguro y con un ahorro de energía considerable.
- La nave industrial fue construida considerando un sistema de módulos fotovoltaicos en el futuro, ya que realizando los chequeos mostrados en las tablas 10, 11 y 12. Se determinó que la nave industrial es capaz de cumplir con los parámetros del AISC 360-16, AISC 341 y ASCE/SEI 3-16.
- La inversión estimada del sistema de módulos fotovoltaicos es de Q. 1,464,817. Por lo tanto, relacionándolo con el costo de la energía eléctrica en Guatemala y el consumo eléctrico al año de la nave industrial, la inversión se recuperaría en 28 meses, siendo un buen tiempo de retorno a largo plazo y se concluye que sí vale la pena invertir en un sistema de módulos fotovoltaicos en este centro de distribución.

XI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que los módulos fotovoltaicos a utilizarse sean de un proveedor de Guatemala por los temas de precios de importación, impuestos, pero sobre todo de garantías y mantenimientos, ya que es un sistema fotovoltaico muy grande, por lo tanto, el mantenimiento constante sumamente importante para el buen funcionamiento de este sistema.
- Se debe hacer un estudio de desplazamientos y derivas para asegurarse de la seguridad estructural.
- Se recomienda utilizar una lámina Ternium con un calibre en específico para poder resistir la carga de los módulos o especificar una estructura que se apoye en las costaneras.
- Se recomienda tomar en cuenta el contador de doble vía en los análisis del sistema de módulos fotovoltaicos y en el análisis de retorno de inversión.
- Se debe contemplar siempre en el análisis de retorno de inversión, el gasto en cables, mantenimiento y el precio de la estructura para montar los módulos, ya que en un sistema tan grande estos dos factores pueden elevar el costo del sistema.
- Se recomienda un cuarto de baterías para almacenar el excedente de energía generada, permitiendo su uso en fechas de baja producción y si es posible vender el excedente a la empresa eléctrica.

XII. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Internacional de Energía (IEA). (2022). *World Energy Outlook 2022*. IEA.
- American Institute of Steel Construction (AISC). (2016). *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16) (Rev. junio 2019)*. Chicago, IL: AISC.
<https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/standards/a360-16w-rev-june-2019.pdf>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). (2019). *ASHRAE Standard 90.1-2019: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*. Atlanta, GA: ASHRAE. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1>
- Argüello, F. (2024, 26 enero). ¿Qué es la ASHRAE? *Felipe Argüello*.
<https://www.infotecnico.com/que-es-la-ashrae/>
- Anaya, C. (2023, 22 mayo). ¿Por qué instalar placas solares en naves industriales? *Novaluz*.
<https://novaluz.es/blog/consejos-practicos/por-que-instalar-placas-solares-en-naves-industriales>
- Communications. (2023, 7 diciembre). ¿Qué son los certificados de eficiencia energética? *BBVA Noticias*. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-son-los-certificados-de-eficiencia-energetica/>
- Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED). (2018). *Norma de Seguridad Estructural NSE-2: Diseño de estructuras de acero*. Guatemala: CONRED.
https://conred.gob.gt/normas/NRD1/NSE_2_07112018.pdf
- Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED). (2018). *Norma de Seguridad Estructural NSE-3: Diseño estructural de edificaciones*. Guatemala: CONRED.
https://conred.gob.gt/normas/NRD1/NSE_3_2018_disenio_estructural_de_edificaciones.pdf
- Décima Technologic Solutions. (2023, 20 abril). Tipos de sistemas de control de iluminación. *LinkedIn*. <https://es.linkedin.com/pulse/tipos-de-sistemas-control-iluminaci%C3%B3n-decima-tecnologias>
- Docusign. (2022, 19 septiembre). 6 consejos para reducir el consumo de energía en tu empresa. <https://www.docusign.com/es-mx/blog/reducir-consumo-energia>

- Eigo. (s. f.). ¿Cómo climatizar una nave industrial?
<https://eigoconstrucciones.com/noticia/como-climatizar-una-nave-industrial/>
- Enertiva. (2019, 4 noviembre). Centro de distribución de Kimberly-Clark opera con energía solar. *Enertiva - Energía Alternativa*. <https://enertiva.com/centro-de-distribucion-de-kimberly-clark-en-guatemala-opera-con-energia-solar/>
- Finmodelslab. (n.d.). *Costos operativos de la planta de fabricación de paneles solares*. Recuperado el 18 de diciembre de 2024, de <https://finmodelslab.com/es/blogs/operating-costs/solar-panel-manufacturing-plant-operating-costs>
- Flores, A. (2023, 21 agosto). Aislamiento térmico, tipos y recomendaciones (actualizado). *Grupo Unamacor*. <https://www.grupounamacor.com/aislamiento-termico-tipos-y-recomendaciones/>
- Guerra, H., & Archivo. (s. f.). Tarifas de luz siguen iguales. *Diario de Centro América*. <https://dca.gob.gt/noticias-guatemala-diario-centro-america/tarifas-de-luz-siguen-iguales>
- Intersam. (2024, 12 febrero). La importancia de la climatización en naves industriales. *Intersam*. <https://intersam.es/la-importancia-de-la-climatizacion-en-naves-industriales/>
- Lamparadirecta.es. (s. f.). Comparativa LED vs Halógena. Recuperado el 8 de mayo de 2024, de <https://www.lamparadirecta.es/blog/led-vs-halogenas>
- Luz y Color 2000. (2022, 22 abril). Cómo iluminar una nave industrial. *Luz y Color 2000 | Proyectos de iluminación*. <https://www.luzycolor2000.com/noticias/como-iluminar-nave-industrial>
- Méndez, J., & Torres, F. (2020). Arquitectura sostenible para naves industriales: Principios y beneficios. *Arquitectura Verde*, 12(3), 34–50.
- Primagas. (s. f.). ¿Qué es la sostenibilidad energética? *Primagas*. <https://www.primagas.es/blog/sostenibilidad-energetica>
- TotalEnergies. (2021a). ¿Qué es y cómo se mide el consumo energético? *TotalEnergies*. <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/consumo-energetico>
- Twenergy. (2019, 13 noviembre). ¿En qué consiste la microgeneración? *Twenergy*. <https://twenergy.com/eficiencia-energetica/como-ahorrar-energia-casa/que-es-la-microgeneracion-143>

XIII. APÉNDICE



Ilustración 11. Tipo de luminarias

GASTO EN ENERGIA POR AÑO	
Costo fijo por usuario al mes	882.125
Cargo Unitario por energía en punta	1.06
Cargo Unitario por energía intermedia	1.02
Cargo Unitario por energía en valle	0.99
Cargo Unitario por energía en valle adicional	0.96
Cargo Unitario por potencia de punta	48.58
Cargo Unitario por potencia contratada	15.69

Ilustración 12. Gasto de energía por año

PROMEDIO POR DIA		
hora	KWH	
00:00	69.59	
01:00	78.03	
02:00	70.27	valle
03:00	53.49	
04:00	44.90	
05:00	45.97	
06:00	69.76	
07:00	72.91	
08:00	73.41	
09:00	76.16	
10:00	70.13	
11:00	68.29	intermedia
12:00	68.19	
13:00	83.12	
14:00	70.98	
15:00	71.65	
16:00	73.81	
17:00	83.21	
18:00	83.95	
19:00	87.05	punta
20:00	92.53	
21:00	85.16	
22:00	72.43	
23:00	68.21	

Ilustración 13. Consumo por día

	kwh	Q.
Total Valle	502.881408	497.8526
Total Intermedia	881.63	899.2578
Total Punta	348.69	369.6062

Ilustración 14. Precio por día

CÁLCULO MÓDULO FOTOVOLTAICO TIPO 2

Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

Datos: TSM-NEG18R20

$P_{max} = 386 \text{ W}$ $FS = 1.25$ $V_{max} = 31.8 \text{ V}$ $I_{mp} = 12.15 \text{ A}$

$g = \frac{-0.29\%}{1 \text{ }^\circ\text{C}}$

$T_{noct} = 43 \text{ }^\circ\text{C} = 43 \text{ }^\circ\text{C}$ Temperatura de operación de las celdas - dato de panel

$T_{amb} = \frac{14 \text{ }^\circ\text{C} + 28 \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$

$GHI = 5.758 \frac{\text{kW}\cdot\text{hr}}{\text{m}^2}$ por día

- Horas solares pico

$HSP = \frac{GHI}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 5.758 \text{ hr}$

- Temperatura Critica

$$T_c = T_{amb} + (T_{noct} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) \left(\frac{GHI \cdot \frac{1000 \text{ W}}{1 \text{ kW}}}{\frac{800 \text{ W}}{\text{m}^2} \cdot HSP} \right) = 49.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Calculo P_{pmc}

$$P_{pmc} = P_{max} \cdot \left(1 + \frac{g}{100\%} (T_c - 25 \text{ }^\circ\text{C}) \right) = 385.899 \text{ W}$$

- Calculo de perdida por cada panel

$$\Delta P = P_{max} - P_{pmc} = 0.101 \text{ W}$$

- Calculo de demanda eléctrica

$$D = \frac{44244.15 \text{ kW}\cdot\text{hr} + 43126.46 \text{ kW}\cdot\text{hr} + 45062.99 \text{ kW}\cdot\text{hr}}{3} = 44144.533 \text{ kW}\cdot\text{hr}$$

$E = D \cdot \frac{12}{1} \cdot \frac{1}{365} = 1451.327 \text{ kW}\cdot\text{hr}$ Al día

Ilustración 15. Dimensiones del sistema fotovoltaico

- Cálculo de paneles

$$MFV := \frac{E \cdot FS}{P_{pmc} \cdot HSP} = 816.451 \quad \text{paneles}$$

- Inclinación y diseño

Hemisferio: Norte
 $lat := 14.46^\circ$ $largoMFV := 1.961 \text{ m}$ $anchoMFV := 1.134 \text{ m}$

$\beta_{panel} := lat$ $\beta_{cubierta} := 6^\circ$

$$h_1 := largoMFV \cdot \cos(\beta_{panel}) = 1.899 \text{ m}$$

$$d_1 := \frac{largoMFV \cdot \sin(\beta_{panel})}{\tan(61^\circ - lat)} = 0.464 \text{ m}$$

$$d_2 := largoMFV \cdot \left(\frac{\sin(\beta_{panel}) - \sin(\beta_{cubierta})}{\tan(61^\circ - lat + \beta_{cubierta})} + \cos(\beta_{panel} - \beta_{cubierta}) \right) = 2.158 \text{ m}$$

$$A := (d_1 + d_2) \cdot anchoMFV = 2.973 \text{ m}^2$$

$$At := A \cdot MFV = 2427.432 \text{ m}^2$$

Cálculo de inversores

Modelo SOLIS-50K

$V_{max1} := 1100 \text{ V}$	$V_{max} = 31.8 \text{ V}$	$MFV = 816.451$
$I_{max1} := 28.5 \text{ A}$	$Imp = 12.15 \text{ A}$	
$P_{max1} := 55000 \text{ W}$	$P_{max} = 386 \text{ W}$	

Total de paneles por inversor

Ilustración 16. Cálculo de los módulos fotovoltaicos

Total de paneles por inversor

$$Panelserie1 := \frac{V_{max1}}{V_{max}} = 34.591 \quad Panelserie1 := 37$$

$$Panelparalelo1 := \frac{I_{max1}}{Imp} = 2.346 \quad Panelparalelo1 := 3$$

$$Panclesmaximos := \frac{P_{max1}}{P_{max}} = 142.487 \quad Panclesmaximos1 := 152$$

$Totalpanes1 := \text{if}(Panelserie1 \cdot Panelparalelo1 > Panclesmaximos, Panclesmaximos1, Panelserie1 \cdot Panelparalelo1)$

$$Totalpanes1 = 111$$

$$Totalinversores1 := \frac{MFV}{Totalpanes1} = 7.355 \quad Totalinversores1 := 8$$

Ilustración 17. Total de paneles por inversor

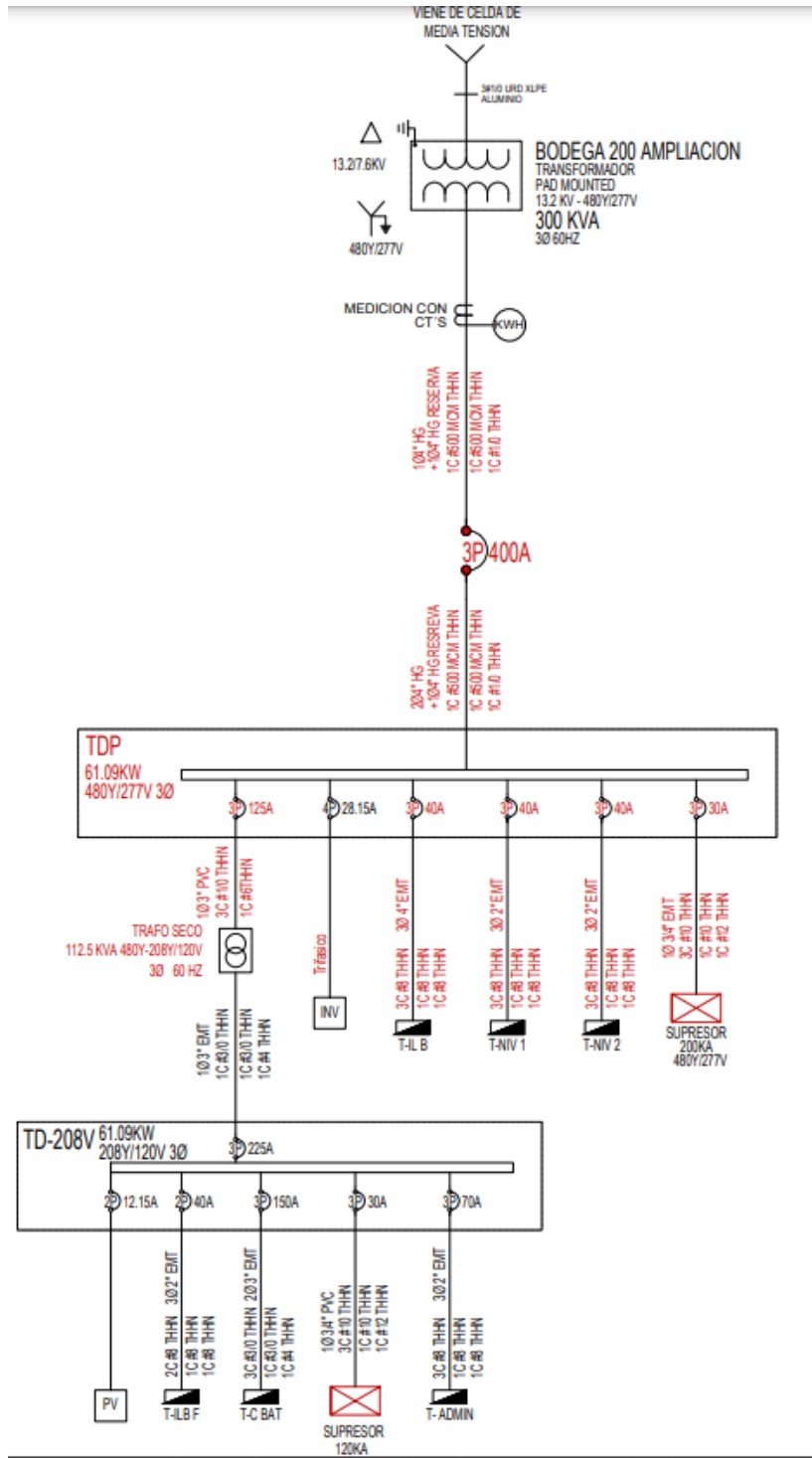


Ilustración 3. Diagrama Unifilar

ILUSTRACIONES DE COSTANERAS

ESPECIFICACIONES ESTRUCTURALES	
VALOR	PARÁMETRO Y/O OBSERVACIONES
Importante (III)	Categoría ocupacional. (NSE 1-10 3.1 & ASCE 7-10 Tabla 3.1.7)
$I_e = 1.25$	Factor de importancia estructural. (ASCE Tabla 1.5-2)
D	Nivel de protección sísmica. (NSE 2-10 4.2.2 y tabla 4-1)
Sismo severo	5% de probabilidad de exceder un sismo de diseño en un período de 50 años. (NSE 2-10 y tabla 4-1)
$K_d = 0.80$	Factor de escala NSE 2-10 4.3.4.1
E1-C	Sistema estructural (NSE 3-10 Tabla 1-1): Marcos de acero estructural
$R = 3.5$	Factor modificador de respuesta sísmica (NSE 3-10 1.6.1 y Tabla 1-1)
$C_d = 2.5$	Factor de incremento del desplazamiento elástico (NSE 3-10 1.6.3 y Tabla 1-1)
$\rho = 1.3/1.0$	Factor de redundancia $X=1.3, Y=1.0$
LRFD	Método utilizado

Ilustración 18. Especificaciones estructurales

ESPECIFICACIONES DE SITIO	
VALOR	PARÁMETRO Y/O OBSERVACIONES
Io = 4	Índice de sismicidad. (NSE 2-10 4.2.1)
Scr = 1.65 S1r = 0.60	Ordenadas espectrales del sismo extremo considerado en el basamento de roca en el sitio de interés. (NSE 2-10 4.3.3.1)
D	Clase de sitio. (NSE 2-10 4.5)
Fa = 1 Fv = 1.5	Coefficientes de sitio. (NSE 2-10 Tabla 4.3.3.5 y 4.3.3.6)
Tipo B	Fuente sísmica (falla de Mixco) a tres kilómetros aproximadamente (NSE 2-10 Tabla 4-5)
Na = 1.08 Nv = 1.17	Factores de falla cercana. (Interpolando tablas 4-6 y 4-7)

Ilustración 19. Especificaciones de sitio

CÓDIGOS	
ACI 318-11	Concreto
IBC 2012/AGIES NSE 2-10	Parámetros sísmicos
ASCE 7-10/AGIES NSE 2-10	Cargas
AISC 360-10 / AISC 341-16	Acero
AGIES NSE 1-10	Generalidades, administración de las normas y supervisión técnica.
AGIES NSE 2-10	Demandas estructurales, condiciones de sitio y niveles de protección
AGIES NSE 3-10	Diseño estructural de edificaciones

Ilustración 20. Codigos

CARGAS	
CARGAS MUERTAS DE CUBIERTA	
6 kgf/m ²	CINDU SCC-18 o SCC-20 Cal. 24
5 kgf/m ²	Instalaciones Electricas
6 kgf/m ²	Polines de techo y forro
10 kgf/m ²	Sistema contra incendio
27 kgf/m ²	Total carga muerta de cubierta
CARGA DE VIENTO	
C	Exposicion (NSE 2-10 5.2.1.2)
Vs =100 km/hr =27.8 m/s	Velocidad basica del viento (NSE 2-10 5.11, Figura 5-1)
qs=48 kgf/m ²	Presion basica (NSE 2-10 Tabla 5.3.2)
St=35%	Pendiente de techo
Ic=1	Factor de importancia por viento (NSE 2-10 5.3.1)
Cq1=0.7 Cq2=0.8 Cq3=0.5	Coeficiente de presion (NSE 2-10 Tabla 5-2) Valor negativo indica empuje hacia el interior
OTRAS CARGAS	
34 kgf/m ²	20 mm Tefra distribuida en el techo (dato indicado por el cliente)
25 kgf/m ²	25 mm Profundidad estimada de agua sobre el techo hasta la entrada del sistema del drenaje
50 kgf/m ²	Carga viva de cubierta NSE 2-10 Tabla 3-1
19 kgf/m ²	Panel solar

Ilustración 21. Cargas

Cubiertas livianas (Inciso 3.3 (h))

Techos de láminas, tejas, cubiertas plásticas, lonas, etc. (aplica a la estructura que soporta la cubierta final)	50 ^{l/m²}	135
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------	-----

Ilustración 22. Carga viva en cubierta

Determinación Solicitaciones

$$W_{CM} := CM \cdot Ancho + W_{pp} + W_{SDP} = 80.898 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

$$W_{CV} := CV \cdot Ancho + W_{TEFRA} + W_{AGUA} = 128.075 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

$$W_W := Viento \cdot Ancho$$

Cubiertas Isótropas (Índice 3.3 IN)

Techos de los nos, tejas, cubiertas o dólmenes, laminas, etc. (verificar la estructura que soporte la cubierta fría)

20 F11

1.11

$$W_U := \begin{bmatrix} 1.4 \cdot W_{CM} \\ 1.2 \cdot W_{CM} + 0.5 \cdot W_{CV} \\ 1.2 \cdot W_{CM} + 1.6 \cdot W_{CV} \\ 1.2 \cdot W_{CM} - 1.3 \cdot W_W + 0.5 \cdot W_{CV} \\ 0.9 \cdot W_{CM} - 1.3 \cdot W_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.111 \\ 1.58 \\ 2.962 \\ 0.861 \\ -0.005 \end{bmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_u := \frac{\max(\max(W_U), \text{abs}(\min(W_U))) \cdot L^2}{8} = 2.633 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_U := \max(\max(W_U), \text{abs}(\min(W_U))) \cdot \frac{L}{2} = 402.714 \text{ kgf}$$

$$\delta_{CV} := \frac{5 \cdot W_{CV} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} = 0.074 \text{ cm}$$

$$\delta_{CM_{CV}} := \frac{5 \cdot (W_{CV} + W_{CM}) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_x} = 0.121 \text{ cm}$$

Ilustración 23. Deflexión máxima

Determinación capacidad a momento flexionante

$$C_b = \begin{bmatrix} 1.14 \\ 1.30 \\ 1.45 \\ 1.52 \end{bmatrix} \quad K L = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \\ 0.33 \\ 0.25 \end{bmatrix} \cdot L$$

$$\phi_b = 0.90 \text{ (LRFD)} \quad \Omega_b = 1.67 \text{ (ASD)}$$

$$\sigma_{xy}(n) = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K L_n}{r_y}\right)^2}$$

$$\sigma_x(n) = \frac{1}{A \cdot r_o^2} \cdot \left(G \cdot J + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{K L_n^2} \right)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xy}(0) \\ \sigma_{xy}(1) \\ \sigma_{xy}(2) \\ \sigma_{xy}(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11.240 \\ 44.960 \\ 103.215 \\ 179.842 \end{bmatrix} \text{ ksi}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x(0) \\ \sigma_x(1) \\ \sigma_x(2) \\ \sigma_x(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20.225 \\ 63.68 \\ 138.751 \\ 237.498 \end{bmatrix} \text{ ksi}$$

$$F_e(n) = \frac{C_b \cdot \pi^2 \cdot A}{S_e} \cdot \sqrt{\sigma_{xy}(n) \cdot \sigma_x(n)}$$

$$\begin{bmatrix} F_e(0) \\ F_e(1) \\ F_e(2) \\ F_e(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25.616 \\ 103.667 \\ 258.606 \\ 468.166 \end{bmatrix} \text{ ksi}$$

$$F_c(n) = \begin{cases} \text{if } F_e(n) > 2.78 F_y \\ \left| \begin{array}{l} F_c \leftarrow F_y \\ \text{if } 0.56 F_y < F_e(n) < 2.78 F_y \\ F_c \leftarrow \frac{10}{9} \cdot F_y \cdot \left(1 - \frac{10 \cdot F_y}{36 F_e(n)} \right) \end{array} \right. \\ \text{if } F_e(n) \leq 0.56 F_y \\ \left| \begin{array}{l} F_c \leftarrow F_e(n) \\ F_c \end{array} \right. \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} F_c(0) \\ F_c(1) \\ F_c(2) \\ F_c(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25.616 \\ 48.112 \\ 50 \\ 50 \end{bmatrix} \text{ ksi} \quad S_e = 3.348 \text{ in}^3$$

$$\phi M_n = 0.9 \cdot S_e \cdot \begin{bmatrix} F_c(0) \\ F_c(1) \\ F_c(2) \\ F_c(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 889.292 \\ 1670.263 \\ 1735.791 \\ 1735.791 \end{bmatrix} \text{ kgf} \cdot \text{m} \quad M_u = 268.51 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_u}{\phi M_n} = \begin{bmatrix} 0.302 \\ 0.161 \\ 0.155 \\ 0.155 \end{bmatrix}$$

Ilustración 24. Determinación capacidad a momento flexionante

Determinación capacidad a cortante

$$h := H - 2 \cdot t - 2 \cdot R = 0.187 \text{ m}$$

$$k_v := 1$$

$$F_v := \begin{cases} \text{if } \frac{h}{t} \leq \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} \\ \quad \left\| \frac{0.60 \cdot F_y}{\left(\frac{h}{t}\right)} \right. \\ \text{if } \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} < \frac{h}{t} \leq 1.51 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} \\ \quad \left\| \frac{0.6 \cdot \sqrt{E \cdot k_v} \cdot F_y}{\left(\frac{h}{t}\right)} \right. \\ \text{if } \frac{h}{t} > 1.51 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_v}{F_y}} \\ \quad \left\| \frac{0.904 \cdot E \cdot k_v}{\left(\frac{h}{t}\right)^2} \right. \end{cases} = 7.531 \text{ ksi}$$

$$\phi V_n := 0.95 \cdot F_v \cdot h \cdot t = 6.596 \text{ kip}$$

$$\frac{V_U}{\phi V_n} = 0.135$$

Revisión Deflexiones

$$\text{if } \left(\delta_{CV} < \frac{L}{240}, \text{"Cumple"}, \text{"No Cumple"} \right) = \text{"Cumple"}$$

$$\text{if } \left(\delta_{CM_{CV}} < \frac{L}{180}, \text{"Cumple"}, \text{"No Cumple"} \right) = \text{"Cumple"}$$

Ilustración 25. Determinación capacidad a cortante

ILUSTRACIONES DE VIGA

Diseño de viga

Revisión de compacidad

$$bf_2tf(Viga) < 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1$$

$$h_tw(Viga) < 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0$$

Determinación de la capacidad axial

$$K := 1$$

$$KL_rViga := \max\left(\frac{K \cdot L_{Viga}}{r_x(Viga)}, \frac{K \cdot L_{Viga}}{r_y(Viga)}\right) = 355.065$$

$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{KL_rViga^2} = 2.27 \text{ ksi}$$

$$F_{cr} := \text{if}\left(KL_rViga \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}}, 0.658 \cdot \left(\frac{F_y}{F_e}\right) \cdot F_y, 0.877 \cdot F_e\right) = 1.991 \text{ ksi}$$

$$\phi P_{nViga} := 0.9 \cdot F_{cr} \cdot A_g(Viga) = 29.029 \text{ kip}$$

Ilustración 26. Revisión de compacidad

Determinación de capacidad a flexión

$$c := 1$$

$$L_p := 1.76 \cdot r_y(Viga) \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4.733 \text{ ft}$$

$$r_{tsViga} := \sqrt{\frac{I_y(Viga) \cdot C_w(Viga)}{S_x(Viga)}} = 1.716 \text{ in}$$

$$L_r := 1.95 \cdot r_{tsViga} \cdot \frac{E}{0.7 \cdot F_y} \cdot \sqrt{\frac{J(Viga) \cdot c}{S_x(Viga) \cdot h_o(Viga)}} + \sqrt{\left(\frac{J(Viga) \cdot c}{S_x(Viga) \cdot h_o(Viga)}\right)^2 + 6.76 \cdot \left(\frac{0.7 \cdot F_y}{E}\right)^2} = 13.895 \text{ ft}$$

$$\phi := 0.9$$

$$M_p := F_y \cdot Z_x(Viga)$$

$$\phi M_n(Lb) := \begin{cases} \phi M_n - 0 & \text{if } Lb < L_p \\ \phi M_n - \phi \cdot F_y \cdot Z_x(Viga) & \text{if } L_p < Lb < L_r \\ \phi M_n - \phi \cdot \min\left(C_b \cdot \left(M_p - (M_p - 0.7 \cdot F_y \cdot S_x(Viga)) \cdot \left(\frac{Lb - L_p}{L_r - L_p}\right)\right), F_y \cdot Z_x(Viga)\right) & \text{if } Lb > L_p \wedge Lb < L_r \\ \phi M_n - \phi \cdot F_{cr} \cdot S_x(Viga) & \text{if } Lb \geq L_r \end{cases}$$

$$\phi M_{nViga} := \phi M_n(Lb_{Viga}) = 164.591 \text{ kip} \cdot \text{ft}$$

Ilustración 27. Determinación de capacidad a flexión

Determinación de la capacidad a corte

$$Aw_{Viga} := t_w(Viga) \cdot d(Viga) = 9.322 \text{ in}^2 \quad h := h_{tw}(Viga) \cdot t_w(Viga) = 21.567 \text{ in}$$

$$k_v := 5.34$$

$$C_v := \begin{cases} \text{if } h_{tw}(Viga) \leq 1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} \\ \quad \left\| C_v \leftarrow 1 \right. \\ \text{if } h_{tw}(Viga) > 1.37 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} \\ \quad \left\| C_v \leftarrow \frac{1.51 \cdot k_v \cdot E}{(h_{tw}(Viga))^2 \cdot F_y} \right. \\ \text{if } 1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} < h_{tw}(Viga) \leq 1.37 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}} \\ \quad \left\| C_v \leftarrow \frac{1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{F_y}}}{h_{tw}(Viga)} \right. \end{cases} = 1$$

Ilustración 28. Determinación de la capacidad a corte

$$V_u := \frac{W \cdot L_{Viga}}{2} = 3036.356 \text{ kgf}$$

$$Esf_comb := \text{if} \left(\frac{P_u}{\phi P_n Viga} \geq 0.2, \frac{P_u}{\phi P_n Viga} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_u}{\phi M_n Viga} \right), \frac{P_u}{2 \cdot \phi P_n Viga} + \left(\frac{M_u}{\phi M_n Viga} \right) \right) = 0.664$$

$$\frac{V_u}{\phi V_n Viga} = 0.027$$

Ilustración 29. Resistencia crítica

ILUSTRACIONES DE COLUMNA

$$col := "W24x62" \quad L_{col} := 13.2 \text{ m}$$

Revisión de compacidad

$$bf_{2tf} < 0.56 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1$$

$$h_{tw} < 1.49 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0$$

Determinación de la capacidad axial

+

$$K := 1$$

$$KL_{r_{col}} := \max\left(\frac{K \cdot L_{col}}{r_x}, \frac{K \cdot L_{col}}{r_y}\right) = 376.583$$

$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{KL_{r_{col}}^2} = 2.018 \text{ ksi}$$

$$F_{cr} := \text{if}\left(KL_{r_{col}} \leq 4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}}, 0.658 \left(\frac{F_y}{F_e}\right) \cdot F_y, 0.877 \cdot F_e\right) = (1.22 \cdot 10^7) \text{ Pa}$$

$$\phi P_{n_{col}} := 0.9 \cdot F_{cr} \cdot A_g = 28.993 \text{ kip}$$

Ilustración 30. Determinación de la capacidad axial de la columna

Determinación de la capacidad a flexión

$$Cb := 1.67 \quad c := 1$$

$$Lp := 1.76 \cdot r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{Fy}} = 1.486 \text{ m}$$

$$rts_{col} := \sqrt{\frac{\sqrt{I_y \cdot C_w}}{S_x}} = 0.044 \text{ m}$$

$$Lr := 1.95 \cdot rts_{col} \cdot \frac{E}{0.7 \cdot Fy} \cdot \sqrt{\frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_o} + \sqrt{\left(\frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_o}\right)^2 + 6.76 \cdot \left(\frac{0.7 \cdot Fy}{E}\right)^2}} = 4.389 \text{ m}$$

$$\phi := 0.9$$

$$Mp := Fy \cdot Z_x$$

$$\phi Mn(Lb) := \left\{ \begin{array}{l} \phi Mn \leftarrow 0 \\ \text{if } Lb < Lp \\ \left\| \begin{array}{l} \phi Mn \leftarrow \phi \cdot Fy \cdot Z_x \end{array} \right\| \\ \text{if } Lb > Lp \wedge Lb < Lr \\ \left\| \begin{array}{l} \phi Mn \leftarrow \phi \cdot \min \left(Cb \cdot \left(Mp - (Mp - 0.7 \cdot Fy \cdot S_x) \cdot \left(\frac{Lb - Lp}{Lr - Lp} \right) \right), Fy \cdot Z_x \right) \end{array} \right\| \\ \text{if } Lb \geq Lr \\ \left\| \begin{array}{l} Fcr \leftarrow \frac{Cb \cdot \pi^2 \cdot E}{\left(\frac{Lb}{rts_{col}} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + 0.078 \cdot \frac{J \cdot c}{S_x \cdot h_o} \cdot \left(\frac{Lb}{rts_{col}} \right)^2} \\ \phi Mn \leftarrow \phi \cdot Fcr \cdot S_x \end{array} \right\| \\ \phi Mn \end{array} \right.$$

$$\phi Mn_{col} := \phi Mn(L_{col}) = (1.623 \cdot 10^4) \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Ilustración 31. Determinación de la capacidad a flexión de la columna

Determinación de la capacidad a corte

$$Aw_{col} := t_w \cdot d = 0.007 \text{ m}^2$$

$$h := h_{tw} \cdot t_w = 0.547 \text{ m}$$

$$k_v := 5.34$$

$$C_v := \begin{cases} \text{if } h_{tw} \leq 1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{Fy}} \\ \quad \parallel C_v \leftarrow 1 \\ \text{if } h_{tw} > 1.37 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{Fy}} \\ \quad \parallel C_v \leftarrow \frac{1.51 \cdot k_v \cdot E}{(h_{tw}(col))^2 \cdot Fy} \\ \text{if } 1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{Fy}} < h_{tw} \leq 1.37 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{Fy}} \\ \quad \parallel C_v \leftarrow \frac{1.1 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{Fy}}}{h_{tw}(col)} \end{cases}$$

$$\phi := \text{if} \left(h_{tw} \leq 2.24 \cdot \sqrt{\frac{E}{Fy}}, 1, 0.9 \right) = 1$$

$$\phi Vn_{col} := \phi \cdot 0.6 \cdot Fy \cdot Aw_{col} \cdot C_v = (1.387 \cdot 10^5) \text{ kgf}$$

Ilustración 32. Determinación de la capacidad a corte

$$Esf_{comb} := \text{if} \left(\frac{Pu}{\phi Pn_{col}} \geq 0.2, \frac{Pu}{\phi Pn_{col}} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{Mu}{\phi Mn_{col}} \right), \frac{Pu}{2 \cdot \phi Pn_{col}} + \left(\frac{Mu}{\phi Mn_{col}} \right) \right) = 0.591$$

$$\frac{Vu}{\phi Vn_{col}} = 0.022$$

$$\frac{Pu}{\phi Pn_{col}} = 0.231$$

$$\frac{Mu}{\phi Mn_{col}} = 0.405$$

Ilustración 33. Resultado de la capacidad de la columna

XIV. GLOSARIO

Flujo luminoso: Magnitud que expresa la energía luminosa emitida o recibida por un cuerpo en la unidad de tiempo.

Carga crítica de pandeo: la carga crítica de Euler es la carga de compresión a la que un elemento esbelto se doblará o pandeará repentinamente.

Flexión: representa el estado límite de servicio que generalmente rige las dimensiones de las vigas de concreto reforzado.

Resistencia al corte: es la capacidad para soportar una carga por unidad de área y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm².

Deflexiones: es la distancia vertical medida entre el eje neutro de la viga. Esto tiene unos límites. En carga viva debe ser menor a $L/240$ y en una combinación de carga viva y muerta debe ser menor a $L/180$.

Compacidad del ala y del alma: se refiere a la capacidad de estas partes del perfil para resistir pandeo local bajo diferentes tipos de esfuerzos, como flexión, compresión a corte, antes de alcanzar su resistencia total. El ala de la viga soporta esfuerzos de flexión. En cambio, el alma de la viga resiste esfuerzos cortantes y contribuye con la flexión.

Pandeo lateral-torsional: modo de falla en el cual la viga sometida a flexión tiende a alabearse fuera del plano de cargas debido a la compresión en sus fibras superiores y a la falta de contención lateral.

Módulos fotovoltaicos: se componen de células fotovoltaicas, que convierten la luz solar en electricidad de corriente continua durante las horas del día.

Paneles solares: convierten la radiación solar en calor.

Inversores: son dispositivos electrónicos que se encargan de transformar la corriente continua en corriente alterna para que se pueda utilizar sin ocasionar daños.

Tensión crítica de pandeo en el eje menor: es el esfuerzo axial máximo que puede soportar un elemento estructural antes de inestabilizarse lateralmente alrededor de su eje menor de inercia.

Tensión crítica torsional: es la tensión a la cual un elemento estructural comienza a fallar por inestabilidad torsional.

Capacidad flexionante: es la capacidad de una sección transversal para resistir momentos flectores antes de alcanzar su resistencia última.

Resistencia crítica a flexión: es el momento máximo que una sección puede resistir sin experimentar inestabilidad por pandeo lateral

Momento nominal: es el momento resistente teórico de una sección estructural calculado según las propiedades geométricas y mecánicas del material.

Deflexiones: desplazamientos laterales o verticales que experimenta un elemento estructural bajo cargas.

Parámetros sísmicos:

Na: factor de aceleración sísmica correspondiente a la zona geográfica

Scs: coeficiente sísmico del suelo

Scd: coeficiente de amplificación sísmica para el diseño

Svd: coeficiente de amplificación sísmica para largo plazo