



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



**ANÁLISIS DE ESFUERZOS TERMOMECAÑICOS A
UN PANEL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO UN
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PASIVO**

TESIS

Para obtener el grado de

Doctor en Ciencias en Ingeniería

Presenta

M. EN C. BRAYAN LEONARDO PÉREZ ESCOBAR

DIRECTOR

DR. ERIK RAMÍREZ MORALES

Cunduacán Tabasco, febrero de 2022



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO: DIR/DAIA/0201/2022
FECHA: 26 de enero de 2022
ASUNTO: Autorización de
impresión definitiva

M.C. BRAYAN LEONARDO PÉREZ ESCOBAR
PASANTE DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

**"ANÁLISIS DE ESFUERZOS TERMOMECAÑICOS A UN PANEL FOTOVOLTAICO
UTILIZANDO UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PASIVO"**


Para obtener el grado de **Doctor en Ciencias en Ingeniería** y en el cual ha tenido como Director de Tesis al Dr. Erik Ramírez Morales.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA


DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR

DIRECCIÓN

c.c.p. M.C. Juan Carlos Solís Cortazar – Jefe del Área de Posgrado de la DAIA
Archivo



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



JEFATURA DEL ÁREA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco a 25 de enero de 2022.

MEM/DCI/002/2022

PARA **DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ**
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE DOCTORADO

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

**"ANÁLISIS DE ESFUERZOS TERMOMECAÑICOS A UN PANEL FOTOVOLTAICO
UTILIZANDO UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PASIVO"**


Desarrollado por el **M.C. BRAYAN LEONARDO PÉREZ ESCOBAR**, del Doctorado en Ciencias en **Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.


COMITÉ SINODAL


DR. JOSÉ GUADALUPE FABIAN RIVERA TREJO
PRESIDENTE



DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
SECRETARIO


DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
VOCAL 1


DRA. LIZETH ROJAS PLANCO
VOCAL 2


DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES
VOCAL 3


DR. JUAN GABRIEL ÁLVAREZ RAMÍREZ
VOCAL 4


DR. ILDEFONSO ZAMUDIO TORRES
VOCAL 5

CARTA DE AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado denominada "ANÁLISIS DE ESFUERZOS TERMOMECAÑICOS A UN PANEL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PASIVO" de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa mas no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en este documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 26 días del mes de enero del año 2022.

AUTORIZÓ



M. en C. Brayan Leonardo Pérez Escobar

172D20006

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos.....	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	17
2.1 Demanda de la Energía en el Mundo.....	18
2.2 Efecto de la temperatura y la radiación en los paneles solares	19
2.3 Técnicas de transferencia de calor en los paneles fotovoltaicos	20
2.4 Análisis de Esfuerzos y Equilibrio.....	21
2.5 Condiciones de Frontera.....	24
2.6 Relaciones entre Deformación Unitaria-Desplazamiento.....	25
2.7 Relaciones Esfuerzo-Deformación Unitaria	26
2.8 Efectos por Temperatura.....	26
2.9 Formulación usando el Método del Elemento Finito	27
2.10 Cálculo de los Esfuerzos.....	30
2.11 Cálculo de los Esfuerzos Inducidos por Cambio de Temperatura.....	31
2.12 Sumario.....	33
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO.....	34
3.1 Procedimiento de Análisis	35
3.2 Análisis del Problema.....	35
CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	38
4.1 Evaluación de Resultados.....	39
4.2 Distribución de Temperatura.....	40
4.3 Distribución de esfuerzos	43
Conclusiones	51
Referencias.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. 1 Geometría considerada como enfriamiento pasivo	14
--	----

CAPÍTULO 2

Figura 2. 1 Producción de energía en el Sistema Eléctrico Nacional en el año 2017(Secretaría de Energía, 2017).....	19
Figura 2. 2 Cuerpo tridimensional	22
Figura 2. 3 Equilibrio de un volumen elemental	23
Figura 2. 4 Volumen elemental en la superficie	24
Figura 2. 5 Superficie elemental deformada	25
Figura 2. 6 Elemento tetraédrico	28
Figura 2. 7 Elemento maestro para funciones de forma	29
Figura 2. 8 Ley esfuerzo deformación unitaria en presencia de una deformación unitaria inicial	32

CAPÍTULO 3

Figura 3. 1 Condiciones de Frontera para el Panel.....	36
Figura 3. 2 Condiciones de frontera para el análisis estructural.....	37

CAPÍTULO 4

Figura 4. 1 Malla de la geometría.....	39
Figura 4. 2 Independencia de malla	40
Figura 4. 3 Distribución de temperatura con un EVA de 0.5 mm	41
Figura 4. 4 Distribución de temperatura con un EVA de 0.5 mm	41
Figura 4. 5 Distribución de temperatura con aletas rectangulares	42
Figura 4. 6 Distribución de temperatura con aletas triangulares	42
Figura 4. 7 Distribución de temperatura con aletas triangulares (5 cm x 7 cm x 30 cm, 1 mm de espesor)	43
Figura 4. 8 Distribución de esfuerzos en el panel	44
Figura 4. 9 Distribución de esfuerzos en el contacto eléctrico	44
Figura 4. 10 Distribución de esfuerzos en el contacto eléctrico con aletas de enfriamiento	45
Figura 4. 11 Distribución de esfuerzos en el panel con aletas	45
Figura 4. 12 Resultados de las temperaturas (a) y esfuerzos (b) estudiados en los casos	47
Figura 4. 13 Curva de fatiga para el contacto eléctrico	48
Figura 4. 14 Distribución del campo de temperaturas.....	49

Figura 4. 15 Distribución del campo de esfuerzos 50

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1 Descripción de cada una de las configuraciones estudiadas..... 14

CAPÍTULO 2

Tabla 2. 1 Conectividad 27

CAPÍTULO 3

Tabla 3. 1 Propiedades de materiales utilizadas 36

CAPÍTULO 4

Tabla 4. 1 Parámetros utilizados en el análisis 45

Tabla 4.2 Geometrías estudiadas 47

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como principal objetivo calcular esfuerzos termomecánicos en las conexiones internas de un panel fotovoltaico, generado por el funcionamiento de los sistemas de enfriamiento pasivos mediante el Método del Elemento Finito, bajo la normativa de la guía IEC 6121.

Con el objetivo de simular el fenómeno de transferencia de calor, y de conocer la distribución de temperatura en cada una de las partes del panel se realizó un modelo tridimensional y un análisis de transferencia de calor. Para lo anterior se consideraron condiciones de frontera como la temperatura ambiente, la radiación solar recibida y las pérdidas de calor por radiación.

Para el análisis estructural las condiciones de frontera que se establecieron fue considerar la aceleración gravitacional en el centro del panel, y la base se restringió para moverse a lo largo del eje axial.

Los resultados revelan un decremento de la temperatura máxima operacional de 3 °C cuando el espesor del encapsulante EVA disminuye de 0.5 a 0.2 mm y un decremento de hasta 21 °C con el uso de disipadores triangulares de aluminio (5 cm x 7cm x 30cm y 1 mm de espesor). Es decir, con la geometría triangular se presenta un 26.7 % de disminución de temperatura comparada con la geometría de aletas rectangulares propuestas por otros autores.

Con respecto a los esfuerzos, éstos permanecieron estables en configuraciones convencionales y con sistemas de enfriamiento rectangulares; por otro lado, aquellos diseños con aletas triangulares presentaron un incremento en un 50% sus esfuerzos principales máximos. Como resultado del análisis estructural se obtuvo el campo de esfuerzos resultantes y con ello se estableció la magnitud del esfuerzo máximo.

ABSTRACT

The main objective of this work was to calculate the thermomechanical stresses at the internal connections of a photovoltaic panel, generated by the operation of passive cooling systems using the Finite Element Method, under the standard of the IEC 6121 guide.

In order to simulate the heat transfer phenomenon, and to know the temperature distribution at each parts of the panel, a three-dimensional model and a heat transfer analysis were carried out. For the above, boundary conditions such as ambient temperature, received solar radiation and radiation heat losses were considered.

For the structural analysis, the boundary conditions that were considered were the gravitational acceleration in the center of the panel, and the base was restricted to move along the axial axis.

The results reveal a decrease at the maximum operational temperature of 3 ° C when the thickness of the EVA encapsulant decreases from 0.5 to 0.2 mm and a decrease of up to 21 ° C with the use of triangular aluminum heatsinks (5 cm x 7 cm x 30cm and 1mm thick). With the triangular geometry were a 26.7% of decrease in temperature compared to the rectangular fin geometry proposed by other authors.

Regarding the stress, these remained stable in conventional configurations and with rectangular cooling systems. On the other hand, those designs with triangular fins showed a 50% increase at their maximum main stresses. As a result of the structural analysis, the resulting stress field was obtained and with it the magnitude of the maximum stress was established.

SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS

I_{pv}	Corriente de fuga
I_D	Corriente en el diodo
D	Diodo
I	Corriente
V	Voltaje
A	Amper
dV	Diferencial de volumen
C	Coulomb
S	Esfuerzo alternante
E	Módulo de Young
dv	Diferencial de volumen
τ	Relación de deformación
∂	Derivada parcial
G	Módulo de rigidez
ν	Relación de Poisson
α	Coefficiente de expansión térmica [K ⁻¹]
Q	Razón de transferencia de calor
q	Razón de flujo de calor
β_R	Coefficiente de temperatura para la eficiencia de la celda (0.004-0.005 % / °C)
S_{alt}	Esfuerzos alternantes
T_c	Temperatura del módulo FV
γ	Coefficiente de la intensidad de la radiación para la eficiencia de la celda
P_m	Potencia máxima
G	Irradiación
P^*	Punto de máxima potencia

η_{pv}	Eficiencia del módulo medido con referencia a la temperatura de la celda
I_{sc}^*	Corriente de corto circuito
V_{oc}^*	Voltaje de circuito abierto
$N_{1,2}$	Función de forma tipo LaGrange
γ	Deformación angular
T_R	Temperatura de referencia de la celda 25 °C
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto
MPa	Mega Pascales
KPa	Kilo Pascales
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
CENACE	Centro Nacional Control de Energía
SFV	Sistema fotovoltaico
Si	Silicio
ϵ	Emisividad de la superficie del cuerpo
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
K	Conductividad térmica del material

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El desempeño de los SFV es con base principalmente en la radiación solar y la temperatura del ambiente, junto con otras condiciones ambientales del lugar. Para el caso de la radiación solar en México se considera que va desde los 5.6 hasta 6.1 kW/m²-día (*Energía Solar Fotovoltaica • Forbes-Especiales • Forbes México*, n.d.; Santiago et al., 2017). Esto implica una tendencia uniforme, sin embargo; la temperatura del ambiente en el país es muy variable ya que al tener distintos tipos de climas ésta no puede considerarse uniforme, con variaciones que van desde temperaturas medias de 10 °C hasta 26 °C en zonas donde la humedad media llega hasta un 95% y con precipitaciones medias desde 100 hasta 4,000 mm. Estas variaciones provocan que el desempeño de los SFV instalados a todo lo largo del país sea distinto, generando una incertidumbre en su productividad. Este hecho está demostrado, ya que se ha encontrado que la eficiencia media de conversión energética para SFV instalados en distintas partes del mundo y bajo distintos climas se encuentra dentro del 70–80% de su potencia nominal (Santiago et al., 2017). Por otro lado, hasta donde se tiene conocimiento, existen muy pocos estudios en la simulación numérica de parámetros eléctricos en sistemas fotovoltaicos interconectados, llevándose a cabo en este trabajo análisis de Elementos Finitos para poder conocer el comportamiento térmico-eléctrico de tales sistemas para poder plantear una solución al problema de sobrecalentamiento y deficiencia eléctrica.

1.2 Justificación

En la actualidad, los Sistemas Fotovoltaicos (SFV) en México muestran una eficiencia media de conversión energética entre el 60–70% de su potencia de diseño, debajo de la media internacional. Lo anterior es atribuido principalmente a que el coste medio de un SFV no justifica su eficiencia y su larga tasa de retorno de inversión (Schiro et al., 2017).

Para poder plantear una solución al problema de sobrecalentamiento y deficiencia eléctrica, en este trabajo se investigan los diferentes parámetros

físicos que afectan al arreglo fotovoltaico en su proceso de generación de energía eléctrica mediante el modelado por Solidworks y simulado de los parámetros eléctricos usando Ansys por el Método del Elemento Finito.

Los intercambiadores de calor o aletas de enfriamiento son parte del sistema de enfriamiento pasivo de los paneles fotovoltaicos, su principal propósito es disipar la energía en forma de calor cuando aumenta su temperatura operacional, de tal manera que el módulo se mantenga lo más cercano posible a su temperatura operacional, evitando así un decremento considerable en su potencia de salida. Se debe tomar en cuenta que las condiciones operacionales en condiciones normales de operación (NOC) establecen una temperatura ambiente operacional de 25 °C, una irradiación solar de 1000 W/m². Para evitar pérdidas considerables en las eficiencias, un sistema de enfriamiento pasivo (figura 2.2) se ha acoplado a dichos módulos o paneles fotovoltaicos, así como modificaciones de espesores en cada uno de los materiales que componen a dicho modelo. En la tabla 2.1 se muestran las configuraciones tomadas en cuenta para el análisis.

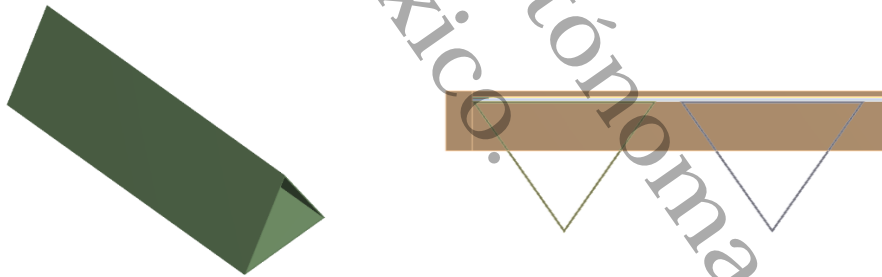


Figura 1. 1 Geometría considerada como enfriamiento pasivo

Tabla 1.1 Descripción de cada una de las configuraciones estudiadas

Geometría	Diseño de Aletas	Número de aletas
1	Panel Convencional	Panel Convencional
2	Rectangular	51 de 30 cm x 10 cm x 0.005 cm
3	Rectangular	14 de 1 m x 10 cm x 0.005 cm . EVA 5e-4 m, TEDLAR 4 e-4 m

4	Triangular	14 de 5 cm x 5 cm x 1 m, EVA 5e-4 m, 5e-4 m, TEDLAR 4e-4 m
5	Triangular	14 de 5 cm x 5 cm x 1 m, TEDLAR 2 e-4 m, EVA 2e-4m, 2e-4 m
6	Triangular	14 de 5cm x 5 cm x 1 m, EVA 4e-4m, TEDLAR 5 e-4 m
7	Triangular	14 de 5 cm x 5 cm x 1 m, EVA 3 e-4 m, 3 e-4 m, TEDLAR 5 e-4 m
8	Triangular	24 de 1 m x 10 cm x 5 cm, TEDLAR 4e ⁻⁴ m, EVA 5e ⁻⁴ m, 5 e ⁻⁴ m
9	Triangular	36 de 5 x 5 x 30 cm, EVA 2e ⁻⁴ m, TEDLAR 5 e ⁻⁴
10	Triangular	48 de 5 x 5x 30 cm
11	Triangular	48 de 5 x 5 x 30 cm, TEDLAR 5e ⁻⁴ m, EVA 6 e ⁻⁴ m, 6e ⁻⁴ m
12	Triangular	48 de 5 x 5 x 30 cm, TEDLAR 5e ⁻⁴ m, EVA 4 e ⁻⁴ m, 4e ⁻⁴ m
13	Triangular	48 de 5 x 5 x 30 cm, EVA 3e ⁻⁴ m, 2 e ⁻⁴ m, TEDLAR 5e ⁻⁴ m
14	Triangular	48 de 5 x 5 x 30 cm, TEDLAR 5e ⁻⁴ m, EVA 6e ⁻⁴ m, 6e ⁻⁴ m
15	Triangular	51 de 5 x 5x 30 cm, EVA, TEDLAR 5e ⁻⁴ m
16	Triangular	51 de 5 x 5 x 30 cm, TEDLAR 5 e ⁻⁴ m, EVA 2e ⁻⁴ m
17	Triangular	51 de 5 x 5 x 30 cm, EVA TEDLAR 5e ⁻⁴ m
18	Triangular	53 de 5 x 5 x 30 cm, EVA de 2e ⁻⁴ m, TEDLAR 5 e ⁻⁴ m
19	Triangular	54 de 5 x 5 x 30 cm, EVA 2e ⁻⁴ m, TEDLAR 5e ⁻⁴ m

En el presente trabajo se plantean investigar los diferentes parámetros físicos que afectan al arreglo fotovoltaico en su proceso de generación de energía eléctrica, lo anterior mediante el modelado y simulado de los parámetros eléctricos. Para realizar el modelado del arreglo fotovoltaico se propone utilizar el paquete computacional Solidworks y para la simulación numérica Ansys, debido al tipo de algoritmo que utiliza para la resolución del problema físico mediante el Método del Elemento Finito.

En el primer capítulo se provee la introducción de la investigación llevada a cabo, su justificación y los objetivos alcanzados. En el capítulo 2 se presenta el marco teórico que comprende toda la información necesaria acerca de los paneles solares, las formas de trabajo del elemento finito y su aplicación en la obtención de los esfuerzos. En el capítulo 3, se explica a detalle las actividades realizadas para alcanzar los objetivos desarrollados en este trabajo. El capítulo 4 presenta

los resultados obtenidos durante la investigación, además de la discusión de cada uno de ellos. Por último, se encuentran las conclusiones y trabajos futuros.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Aplicar la metodología del Elemento Finito (MEF) para evaluar los esfuerzos en un panel fotovoltaico utilizando sistemas de enfriamiento pasivo bajo condiciones críticas de operación.

1.3.2 Específicos

1. Estudiar las fallas presentes en el SFV mediante el estudio de sus pérdidas por medio de modelos de predicciones, su origen y la determinación de su impacto ponderado dentro del rendimiento del SFV.
2. Encontrar las zonas donde se presentan los esfuerzos más críticos mediante la simulación numérica.
3. Generar un modelo tridimensional del SFV y realizar mediante un método numérico análisis de parámetros que afectan la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.
4. Comparar los resultados obtenidos de esfuerzos con aletas rectangulares vs triangulares.
5. Determinar mediante la regla de Miner la tasa de envejecimiento que presentan dichos sistemas por un determinado tiempo de operación.
6. Determinar parámetros óptimos para la generación de energía eléctrica con los SFV en climas trópicos húmedos.
7. Comparar los resultados numéricos de la radiación solar directa vs difusa

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Demanda de la Energía en el Mundo

En México, de 2012 a 2018 la producción de energía cayó en un 33.12 %, lo cual el 82.9 % correspondió a combustibles fósiles (Secretaría de Energía, 2018; International Energy Agency, 2021c). A medida que crece la población, cada vez más las personas en el mundo disfrutan de un estilo de vida que requieren mayores cantidades de energía. Según la agencia internacional de energía (International Energy Agency, 2021), en su escenario de referencia, la demanda mundial de petróleo evolucionará de 84 millones de barriles al día en 2005 a 116 millones de barriles diarios en 2030, es decir, se incrementará un 38% más en ese periodo, que es un reto colosal en términos de inversiones, en particular en un contexto de declinación de las reservas y las plataformas de producción de petróleo. Por todo lo anterior, es urgente el uso racional de la energía y la sustitución de los combustibles fósiles por otros tipos de energía (energías renovables), particularmente la energía solar fotovoltaica.

Las energías renovables han demostrado en gran medida mantenerse a pesar de las caídas energéticas mundiales debido a la pandemia. En general, las energías renovables crecieron un 3 % en el 2020 y se espera para el 2021 incrementen un 17 % la producción de energía mediante sistemas fotovoltaicos (International Energy Agency, 2021a). La energía solar y en particular la solar fotovoltaica representan una buena opción para la generación de energía, ya que está exento del consumo de combustibles fósiles y no contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero (IEA, 2016) La energía solar fotovoltaica se define como la transformación de la radiación solar de forma directa en energía eléctrica mediante el uso de una celda solar ó un SFV. Los sistemas fotovoltaicos se han implementado ampliamente en las tecnologías de potencia eléctrica (Hasan & Parida, 2016), uno de los principales inconvenientes es el costo de fabricación y la baja producción de energía que entregan (Abd-Elhady et al., 2016; Abderrezek & Fathi, 2017; Raugei & Frankl, 2009).

La figura 2.1 muestra la producci3n de energa el3ctrica en el pa3s por tipo de generaci3n durante el a3o 2020, con un total de 264,607.57 GWh (SENER, 2020)

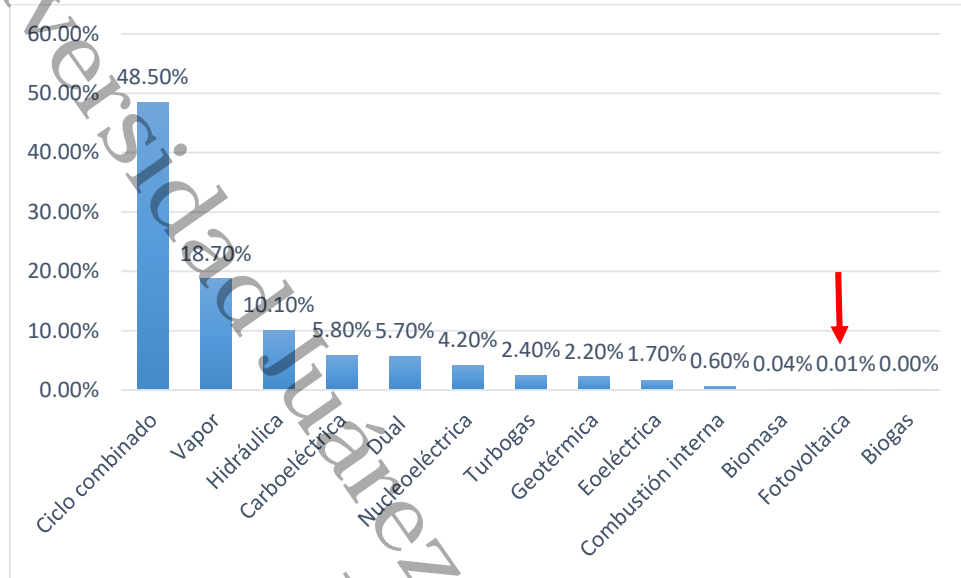


Figura 2. 1 Producci3n de energa en el Sistema El3ctrico Nacional en el a3o 2017 (Secretar3a de Energ3a, 2017)

Para la determinaci3n del funcionamiento 3ptimo de los SFV existen retos t3cnicos por estudiar entre los que se encuentran: los protocolos de seguridad, envejecimiento del sistema, el continuo y preciso monitoreo del da3o acumulado en sus componentes el3ctricos, el conocimiento acerca de la apariencia, geometr3a de fallas y defectos, material deteriorado (envejecimiento), estudios de la radiaci3n solar recibida en la superficie del panel, la temperatura de operaci3n, la p3rdida de calor del panel, entre otros (Kant et al., 2016).

2.2 Efecto de la temperatura y la radiaci3n en los paneles solares

Las variables que se han presentado mayores p3rdidas en los sistemas fotovoltaicos directamente ser3an la temperatura ambiente y la radiaci3n solar, las cuales est3n siendo estudiadas para poder comprender el funcionamiento de una celda solar.

El aumento en la temperatura ambiente a la que son expuestos los paneles solares y en especial su celda fotovoltaica hace que la tensión se reduzca en el circuito abierto según el valor

$$\frac{dV_{oc}}{dT_c} \dots\dots\dots 2.1$$

Donde T_c es la temperatura de la celda, dependiente de la temperatura ambiente y la radiación solar. La forma de calcular esta temperatura de celda depende de las características constructivas del módulo que encapsula a la celda. Si no hay información específica por parte del fabricante, para toda celda de silicio cristalino es habitual emplear el valor $dV_{oc}/dT_c = -2.3 \frac{mV}{^\circ C}$ (Perpiñan Lamigueiro, 2012).

En la industria de la energía solar, hay dos principales formas de energía solar, las cuales son: Irradiación global horizontal y Irradiación normal directa (Program, 2020)(John A. Duffi, 2013). Donde la Irradiación global horizontal se refiere a las ondas cortas de radiación solar recibidas por una superficie horizontal y la Irradiación normal directa se refiere a las ondas cortas de radiación solar recibida por una superficie normal al sol.

2.3 Técnicas de transferencia de calor en los paneles fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos pueden ser clasificados de acuerdo a sus parámetros como sistemas de flujo de fluidos en:

- a) Convección natural como, por ejemplo: superficies extendidas o aletas de enfriamiento.
- b) Convección forzada, como, por ejemplo: sistemas de enfriamiento a base de agua, materiales con cambios de fase, nanofluidos, refrigerantes etc (Abdelrazik et al., 2018; Sathe & Dhoble, 2017a).

Existen diversas configuraciones en cuanto a sistemas de enfriamiento de paneles fotovoltaicos, entre los principales estudios se puede mencionar los estudios realizados por Hamzeh y Mohammad. Los cuales llevaron a cabo un estudio con módulos fotovoltaicos corrugados como método de enfriamiento

pasivo (solo aire) encontrando hasta un 17 % de eficiencia (Duwairi & Qasem, 2019). Samaneh et al. realizaron un análisis experimental acoplando un calentador solar con un panel fotovoltaico, pudiendo aumentar la eficiencia de conversión eléctrica hasta un 12.8 % en convección natural (Fakouriyán et al., 2019). Finalmente, Teo et al. realiza un acople de aletas variando la velocidad del aire a través de ellas (sistema activo) alcanzando una eficiencia eléctrica de hasta 13 % (Teo et al., 2012). Por lo tanto, el uso de sistemas de enfriamiento pasivo ha sido estudiado ampliamente desde su punto de vista térmico y permite así, la posibilidad de continuar la investigación en el campo de los sistemas de enfriamiento, pero ahora considerando los efectos que provocan dichas superficies.

2.4 Análisis de Esfuerzos y Equilibrio

Como se menciona anteriormente, es de gran importancia poder conocer los efectos mecánicos que presentan las superficies extendidas actuando como sistemas de enfriamiento pasivos en los paneles fotovoltaicos. Dado lo anterior, se deben conocer las ecuaciones gobernantes que permiten conocer los esfuerzos debido a los gradientes de temperatura. En la figura 2.2, se muestra un cuerpo tridimensional que ocupa un volumen V y tiene una superficie S . Los puntos en el cuerpo están identificados por las coordenadas x, y, z . La frontera del cuerpo se restringe a la región donde se especifica el desplazamiento. Sobre una parte de la frontera se aplica una fuerza distribuida por unidad de área T , llamada también tracción. Debido a la acción de la fuerza se deforma el cuerpo. La deformación en un punto $x (= [x, y, z] T)$ está definida por las tres componentes de su desplazamiento:

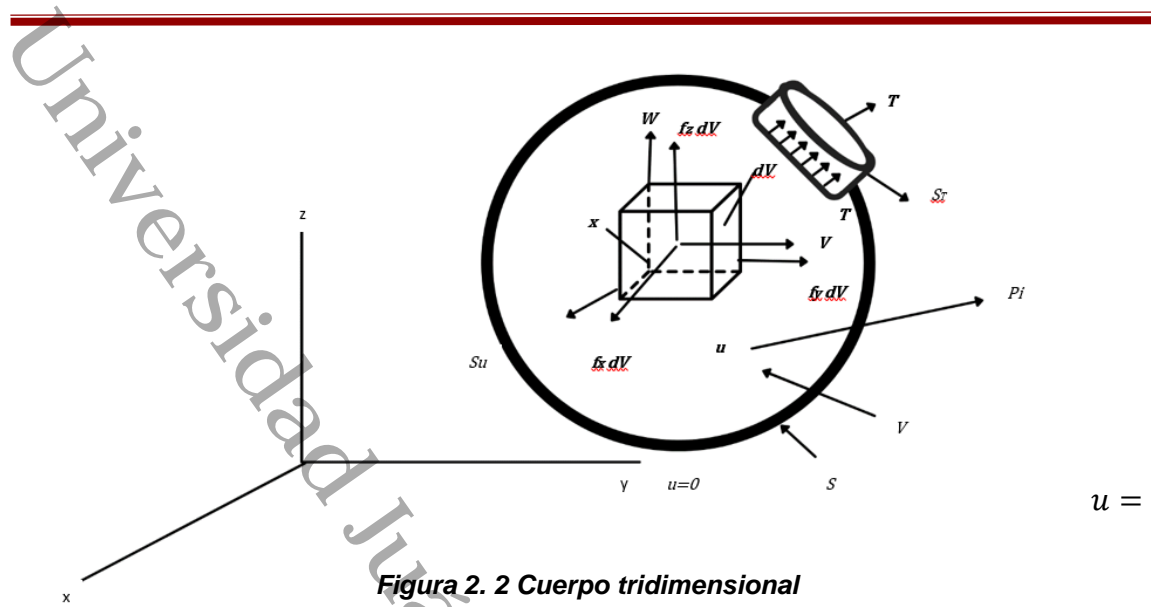


Figura 2. 2 Cuerpo tridimensional

$$[u, v, w]^T \dots\dots\dots 2.7$$

La fuerza distribuida por unidad de volumen, por ejemplo, el peso por unidad de volumen, es el vector f dado por:

$$f = [f_x f_y f_z]^T \dots\dots\dots 2.88$$

En la figura 2.3 se muestra la fuerza de cuerpo actuando sobre el volumen elemental dV . La tracción superficial T puede darse por el valor de sus componentes en puntos sobre la superficie

$$T = [T_x T_y T_z]^T \dots\dots\dots 2.9$$

Ejemplos de tracción son las fuerzas de contacto distribuidas y la acción de la presión. Una carga F actuando en un punto i se representa por sus tres componentes.

$$P_i = [P_x P_y P_z]^T \dots\dots\dots 2.10$$

En la figura 2.3 se muestran esfuerzos que actúan sobre el volumen elemental dV . Cuando el volumen dV "se contrae" a un punto, el tensor de esfuerzo se representa colocando sus componentes en una matriz simétrica (3x3). Sin embargo, los esfuerzos se representan por medio de sus seis componentes

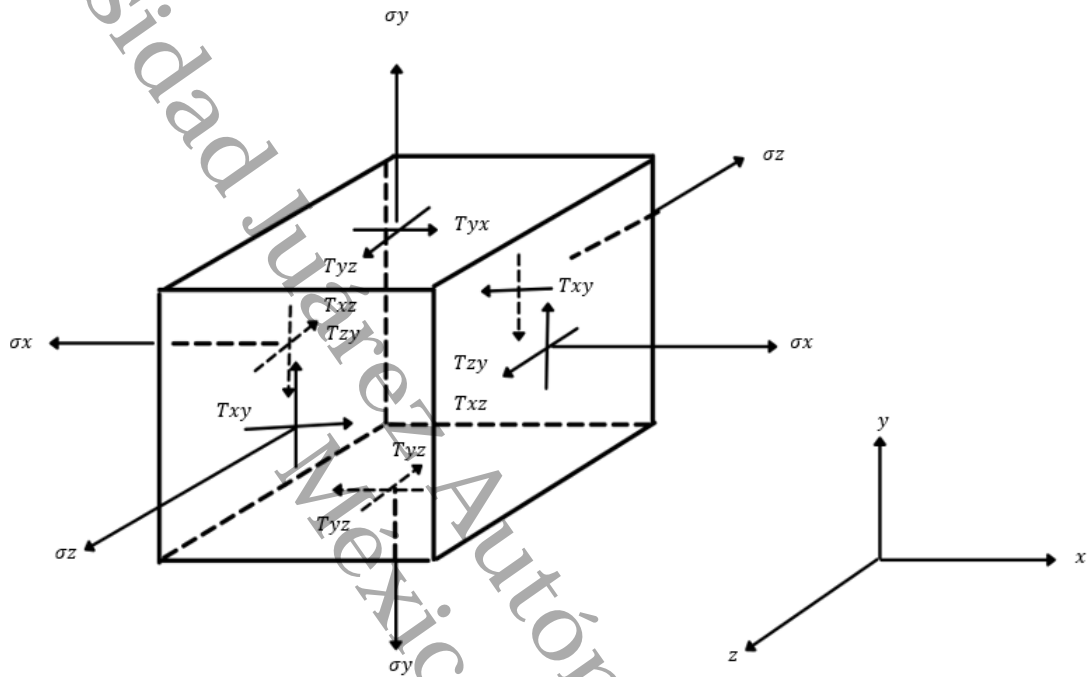


Figura 2. 3 Equilibrio de un volumen elemental

independientes como sigue:

$$\sigma = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{yz} \tau_{xz} \tau_{xy}]^T \dots\dots\dots 2.11$$

Donde $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ son esfuerzos normales y $\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ son esfuerzos cortantes. Consideremos el equilibrio del volumen elemental de la figura 2.2. Primero obtenemos las fuerzas sobre las caras multiplicando los esfuerzos por las áreas correspondientes. Escribimos $\sum F_x = 0, \sum F_y = 0$ y $\sum F_z = 0$, y recordando que $dV = d_x d_y d_z$, obtenemos las ecuaciones de equilibrio:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = 0 \dots\dots\dots 2.12$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = 0 \dots\dots\dots 2.13$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0 \dots\dots\dots 2.14$$

2.5 Condiciones de Frontera

Refiriéndose a la figura 2.2, se puede ver que hay condiciones de desplazamiento en la frontera y condiciones de carga en la superficie. Si u se especifica sobre parte de la frontera denotada por S_u , tenemos:

$$u = 0 \text{ sobre } S_u \dots\dots\dots 2.15$$

También podemos considerar condiciones de frontera tales como $\mathbf{u} = \mathbf{a}$, donde \mathbf{a} es un desplazamiento. Consideremos ahora el equilibrio del tetraedro elemental ABCD, mostrado en la figura 2.4, donde DA, DB, y DC son paralelas a los ejes x , y , y z , respectivamente, y dA es el área definida por los vértices ABC. Si $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]^T$ es la normal unitaria a dA , entonces el área BCD = $n_x dA$, el área ADC = $n_y dA$ y el área ADB = $n_z dA$. La consideración del equilibrio a lo largo de los tres ejes coordenados da:

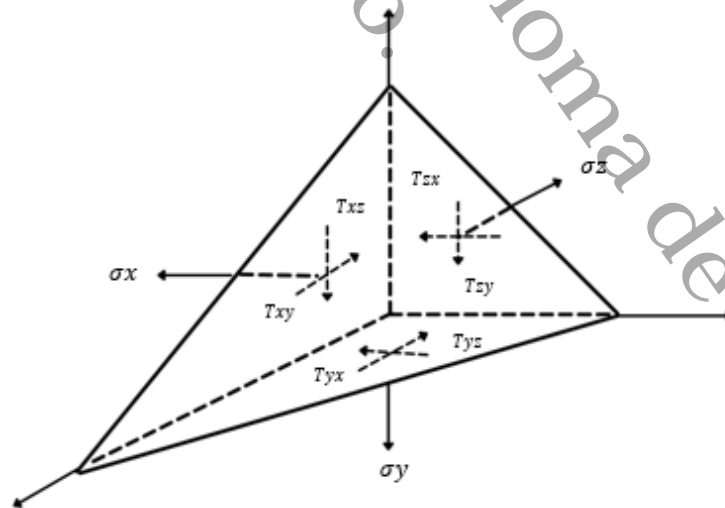


Figura 2. 4 Volumen elemental en la superficie

$$T_x \dots\dots\dots 2.16$$

$$\begin{aligned} &\sigma_x n_x + \\ &\tau_{xy} n_y + \\ &\tau_{xz} n_z = \end{aligned}$$

$$\tau_{xy}n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz}n_z = T_y \dots\dots\dots 2.17$$

$$\tau_{xz}n_x + \tau_{yz}n_y + \sigma_z n_z \dots\dots\dots 2.18$$

Estas condiciones deben satisfacerse sobre la frontera S_T , donde se aplican las tracciones. En esta descripción, las cargas puntuales deben tratarse como cargas distribuidas sobre áreas pequeñas pero finitas.

2.6 Relaciones entre Deformación Unitaria-Desplazamiento

Las deformaciones unitarias en una forma vectorial que corresponden a los esfuerzos se representan como:

$$\epsilon = [\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z \gamma_{yz} \gamma_{xz} \gamma_{xy}]^T \dots\dots\dots 2.19$$

Donde $\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z$ son las deformaciones unitarias normales y $\gamma_{yz} \gamma_{xz} \gamma_{xy}$ son las deformaciones angulares unitarias cortantes.

La figura 2.5 da la deformación de la cara $d_x - d_y$ para pequeñas deformaciones, que serán las consideradas aquí. Tomando en cuenta también las otras caras,

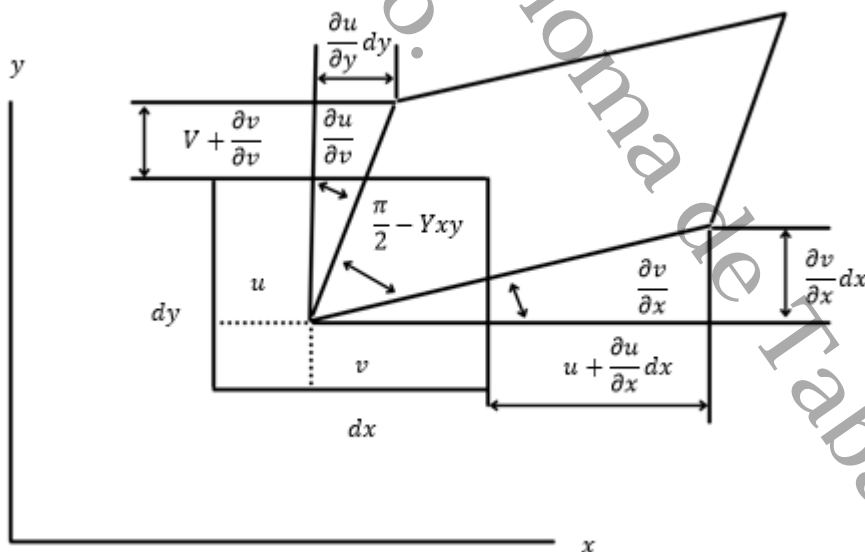


Figura 2. 5 Superficie elemental deformada

Se puede escribir:

$$\epsilon = \left[\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^T \dots\dots\dots 2.20$$

Estas relaciones entre deformaciones unitarias se cumplen para deformaciones pequeñas.

2.7 Relaciones Esfuerzo-Deformación Unitaria

Para materiales elásticos lineales, las relaciones esfuerzo-deformación unitaria provienen de la ley de Hooke generalizada. Para materiales isotrópicos (materiales que presentan las mismas propiedades en todas sus direcciones), las dos propiedades del material son el módulo de Young (o módulo de elasticidad) E y la relación de Poisson ν . Si se considera un cubo elemental dentro del cuerpo, la ley de Hooke da:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \dots\dots\dots 2.21$$

$$\epsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \dots\dots\dots 2.22$$

$$\epsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \dots\dots\dots 2.23$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \dots\dots\dots 2.24$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \dots\dots\dots 2.25$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \dots\dots\dots 2.26$$

El módulo de corte (o módulo de rigidez) G, está dado por:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots 2.27$$

2.8 Efectos por Temperatura

Si se conoce el aumento de temperatura $\Delta T(x, y, z)$ con respecto al estado original, entonces se puede obtener fácilmente la deformación asociada. Para materiales isotrópicos, el aumento de temperatura ΔT ocasiona una deformación unitaria uniforme que depende del coeficiente de dilatación lineal α del material.

Se supone que α , representa el cambio en longitud por un incremento de temperatura unitaria, es constante dentro del intervalo de variación de la temperatura. Esta deformación unitaria tampoco genera ningún esfuerzo cuando el cuerpo tiene libertad para deformarse. La deformación unitaria por temperatura se representa como una deformación unitaria lineal:

$$\epsilon_0 = [\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0, 0, 0] \dots\dots\dots 2.30$$

Entonces, las relaciones esfuerzo-deformación unitaria son:

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_0) \dots\dots\dots 2.31$$

En el esfuerzo plano, tenemos:

$$\epsilon_0 = [\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0]^T \dots\dots\dots 2.32$$

En la deformación unitaria plana, la restricción de que $\epsilon_z = 0$ conduce a una ϵ_0 diferente:

$$\epsilon_0 = (1 + \nu)[\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0]^T \dots\dots\dots 2.33$$

Para que el esfuerzo plano y la deformación unitaria plana (Tirupathi, C., y Ashok, 1999)., note que:

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]^T \text{ y } \epsilon = [\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}]^T \dots\dots\dots 2.34$$

2.9 Formulación usando el Método del Elemento Finito

La metodología de Elemento Finito permite conocer con más exactitud los esfuerzos causados en las fibras internas del material, debido a que se divide el volumen de la superficie en estudio en tetraedros de cuatro nodos. A cada nodo se le asigna un número y se leen las coordenadas x, y, z. En la figura 2.6 se muestra un elemento típico e. La conectividad puede ser definida como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1 Conectividad

Elemento	Nodos			
Número	1	2	3	4
e	1	J	K	L

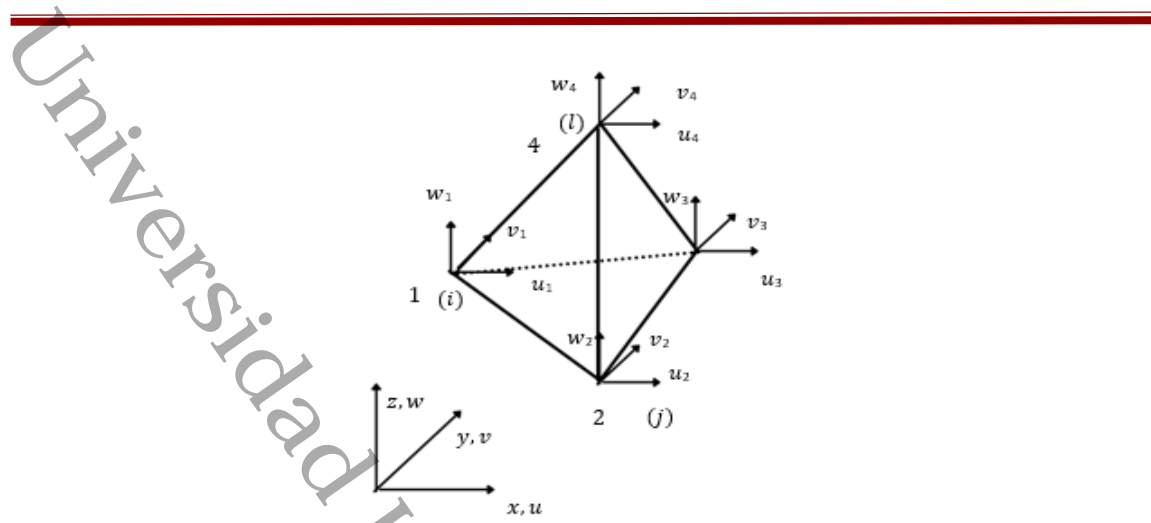


Figura 2. 6 Elemento tetraédrico

A cada nodo local i se le asignan los tres grados de libertad $q_{3i-2}, q_{3i-1}, q_{3i}$. Los vectores de desplazamiento del elemento y global son entonces:

$$q = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_{12}]^T \dots\dots\dots 2.36$$

$$q = [Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_{12}]^T \dots\dots\dots 2.37$$

Donde N es el número total de grados de libertad de la estructura, a razón de tres por nodo. Se definen las cuatro funciones de forma tipo La Grange N_1, N_2, N_3, N_4 , donde la función de forma N_i tiene un valor de 1 en el nodo i y es cero linealmente hasta 1 en el nodo 1. Usando el elemento maestro mostrado en la figura 2.7, se puede definir las funciones de forma como:

$$N_1 = \xi N_2 = \eta N_3 = \zeta N_4 = 1 - \xi \dots\dots\dots 2.38$$

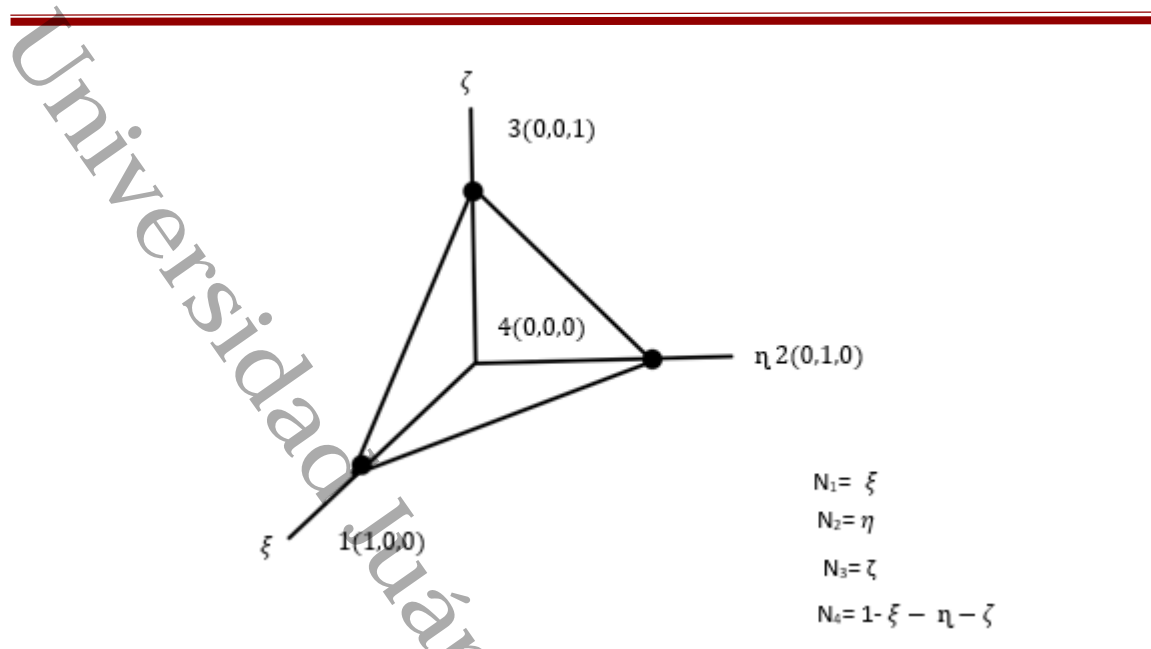


Figura 2. 7 Elemento maestro para funciones de forma

Los desplazamientos u, v, w en x pueden escribirse en términos de los valores nodales desconocidos como $u = Nq$

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots 2.39$$

Es fácil ver que las funciones de forma dadas por la ecuación 2.38 pueden usarse para definir las coordenadas x, y, z del punto en el que se interpolan los desplazamientos u, v, w . La transformación isoperimétrica está dada por:

$$x = N_1x_1 + N_2x_2 + N_3x_3 + N_4x_4 \dots\dots\dots 2.40$$

$$y = N_1y_1 + N_2y_2 + N_3y_3 + N_4y_4 \dots\dots\dots 2.41$$

$$z = N_1z_1 + N_2z_2 + N_3z_3 + N_4z_4 \dots\dots\dots 2.42$$

Que, al sustituir los valores N_i dados por la ecuación 2.38 y usar la notación $x_{ij} = x_i - x_j, y_{ij} = y_i - y_j, z_{ij} = z_i - z_j$ conduce a:

$$x = x_4 + x_{14}\xi + x_{24}\eta + x_{34}\zeta \dots\dots\dots 2.43$$

$$y = y_4 + y_{14}\xi + y_{24}\eta + y_{34}\xi \dots\dots\dots 2.44$$

$$z = z_4 + z_{14}\xi + z_{24}\eta + z_{34}\xi \dots\dots\dots 2.45$$

Siendo así las ecuaciones utilizadas en la metodología del método para determinar los esfuerzos de la siguiente manera.

2.10 Cálculo de los Esfuerzos

Después de resolver las ecuaciones anteriores, pueden obtenerse los desplazamientos q nodales del elemento. Como $\sigma = D\epsilon$ y $\epsilon = Bq$, los esfuerzos del elemento están dados por:

$$\sigma = D\epsilon \dots\dots\dots 2.57$$

Los tres esfuerzos principales pueden calcularse usando las relaciones dadas abajo. Las tres invariantes del tensor esfuerzo (3x3) son:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \dots\dots\dots 2.58$$

$$I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 \dots\dots\dots 2.59$$

$$I_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{yz}\tau_{xz}\tau_{xy} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2 \dots\dots\dots 2.60$$

Definimos:

$$a = \frac{I_1^2}{3} - I_2 \dots\dots\dots 2.61$$

$$b = -2\left(\frac{I_1}{3}\right)^3 + \frac{I_1 I_2}{3} - I_3 \dots\dots\dots 2.62$$

$$c = 2\sqrt{\frac{a}{3}} \dots\dots\dots 2.63$$

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1}\left(\frac{3b}{ac}\right) \dots\dots\dots 2.64$$

Los esfuerzos principales están dados por:

$$\sigma_1 = \frac{l_1}{3} + c \cos \theta \dots\dots\dots 2.65$$

$$\sigma_2 = \frac{l_1}{3} + c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \dots\dots\dots 2.66$$

$$\sigma_3 = \frac{l_1}{3} + c \cos \left(\theta + \frac{4\pi}{3} \right) \dots\dots\dots 2.67$$

Las ecuaciones antes descritas permiten conocer la distribución de esfuerzos tanto en la superficie como en la parte interna del material, obteniendo así la información deseada.

2.11 Cálculo de los Esfuerzos Inducidos por Cambio de Temperatura.

Si se conoce la distribución de temperatura en un sistema o cuerpo, entonces la deformación unitaria debido a este cambio de temperatura puede tratarse como una deformación unitaria inicial ϵ_0 , dada como:

$$\epsilon_0 = \alpha \Delta T \dots\dots\dots 2.68$$

donde α es el coeficiente de dilatación térmica. Note que un gradiente de temperatura positivo implica una elevación en la temperatura. La ley de esfuerzo-deformación unitaria en presencia de ϵ_0 se muestra en la figura 2.8. De esta figura, se puede notar que la relación esfuerzo-deformación unitaria está dada por:

$$\sigma = E(\epsilon - \epsilon_0) \dots\dots\dots 2.69$$

La energía de deformación unitaria por unidad de volumen, u_0 , es igual al área sombreada en la figura 2.9 y se especifica de la siguiente manera:

$$u_0 = \frac{1}{2} \sigma(\epsilon - \epsilon_0) \dots\dots\dots 2.70$$

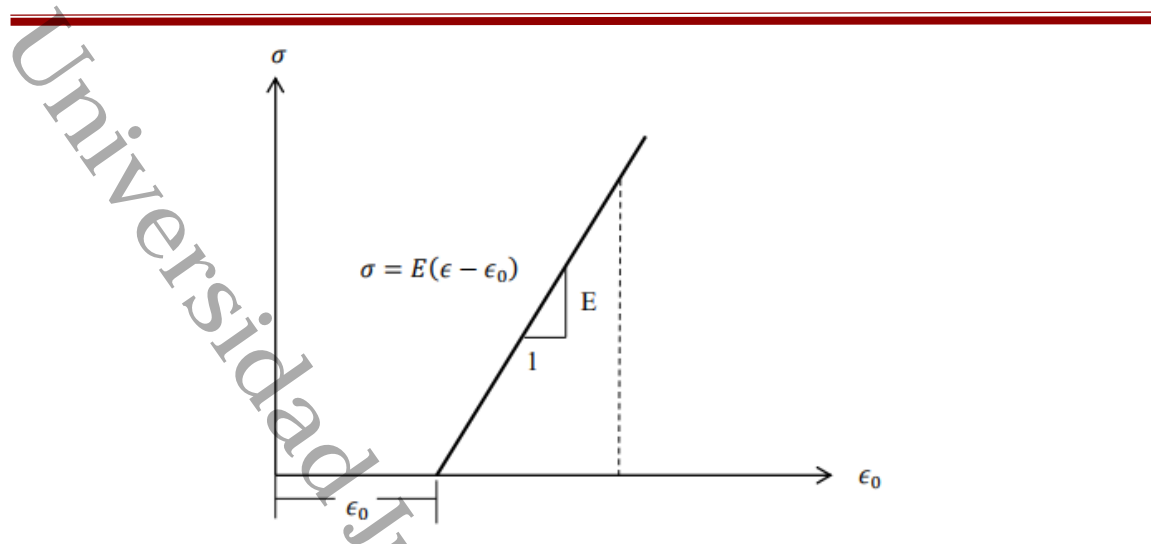


Figura 2. 8 Ley esfuerzo deformación unitaria en presencia de una deformación unitaria inicial

Utilizando la ecuación 2.69, se puede deducir que la ecuación 2.70 da:

$$u_0 = \frac{1}{2} (\epsilon - \epsilon_0)^T E (\epsilon - \epsilon_0) \dots \dots \dots 2.71$$

La energía unitaria total U en el sistema se obtiene integrando u_0 sobre el volumen de tal sistema:

$$U = \int \frac{1}{2} (\epsilon - \epsilon_0)^T E (\epsilon - \epsilon_0) A dx \dots \dots \dots 2.72$$

Para un sistema modelado usando elementos lineales unidimensionales, la ecuación anterior toma la forma:

$$U = \sum_e \frac{1}{2} A_e \frac{l_e}{2} \int_{-1}^1 (\epsilon - \epsilon_0)^T E_e (\epsilon - \epsilon_0) d\xi \dots \dots \dots 2.73$$

Se nota que $\epsilon = Bq$, por lo tanto:

$$U = \sum_e \frac{1}{2} q^T \left(E_e A_e \frac{l_e}{2} \int_{-1}^1 B^T B d\xi \right) q - \sum_e q^T E_e A_e \frac{l_e}{2} \epsilon_0 \int_{-1}^1 B^T d\xi + \sum_e \frac{1}{2} E_e A_e \frac{l_e}{2} \epsilon_0^2 \dots 2.74$$

Si la energía de deformación anterior es examinada, se puede notar que el primer término en el lado derecho de la ecuación de la matriz de rigidez de un elemento y que el último término es un término constante y no es de importancia, ya que es cancelado en las ecuaciones de equilibrio, la cual se obtiene haciendo $d\Pi/dQ = 0$. AL conocer las ecuaciones que rigen el comportamiento térmico-

mecánico en los materiales, se procede a encontrar los resultados del comportamiento térmico debido a los sistemas pasivos.

2.12 Sumario

Este capítulo tiene la finalidad de dar a conocer las características de los sistemas fotovoltaicos, las estadísticas de generación de energía y el consumo a nivel mundial. Aunado a esto, cuenta con la teoría utilizada por elemento finito en la resolución de ecuaciones para encontrar los esfuerzos inducidos por cambio de temperatura, que es de gran relevancia en el estudio de los sistemas fotovoltaicos. Esto constituye un gran aporte para el caso de estudio que se ha planteado en esta investigación. Para un correcto análisis se deben de conocer la importancia de los sistemas a nivel mundial.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DEL CASO DE ESTUDIO

3.1 Procedimiento de Análisis

Inicialmente se realizó a detalle un análisis térmico, siguiendo la siguiente metodología, para lo cual se desarrolla el análisis en 2 pasos:

1. Análisis térmico-estable, este con el fin de conocer la distribución de temperatura en condiciones estables de temperatura, considerando la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad del aire, así como el proceso de convección que se presenta en dicho proceso.
2. Análisis estructural estable, el cual involucra los gradientes de operación obtenidos en el paso anterior y de esta manera encontrar el máximo esfuerzo que se presenta en la conexión eléctrica.

3.2 Análisis del Problema

Con el fin de minimizar los gradientes de temperatura antes mencionados, se emplean en los paneles fotovoltaicos un intercambiador de calor como el caso del presente trabajo. Con este tipo de geometría se busca que el gradiente de temperatura sea lo menos posible, sin embargo, debido a este cambio de temperatura, se presenta una disminución sumamente crítica de producción de energía (la cual está en función de la posición y condiciones del SFV), entregando una potencia mucho menor a la de diseño y generando un alto precio por Watt (Hernandez-Perez et al., 2020).

Para el caso 1 se tiene: Se analiza primeramente la distribución de temperatura en la superficie del panel fotovoltaico, con las siguientes condiciones de frontera.

Condiciones de frontera para el análisis térmico son 3:

- 1) La temperatura inicial del panel es de 28 °C
- 2) La siguiente condición en la temperatura ambiente inicial, de 25 °C
- 3) La tercera condición de frontera es la radiación solar recibida (para este caso se está considerando el valor teórico de 1000 W/m² (Kant et al., 2016) con un coeficiente teórico de película de 20W/m², así como las pérdidas por radiación.

La figura 3.1 muestra dichas condiciones.

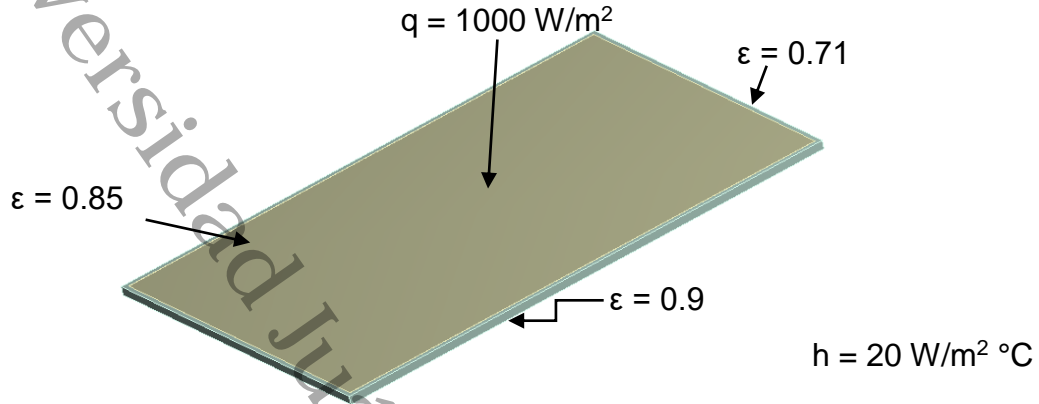


Figura 3. 1 Condiciones de Frontera para el Panel

En todos los casos, el elemento seleccionado para el análisis fue Solid 90. Este puede ser aplicado a un análisis tridimensional térmico estable o transitorio, así como para el caso de un estudio estable estructural. El material del panel es de aluminio, silicio para las celdas solares, vidrio fotovoltaico para la parte frontal del panel, EVA (ethylene vinyl acetate) como encapsulante y Tedlar como portector posterior. La tabla 3.1 muestra los valores de las propiedades de tales materiales.

Tabla 3. 1 Propiedades de materiales utilizadas

Material	Espesor (mm)	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad kg/m ³	Coficiente de expansión térmica 1/°C	Calor específico J/kg °c	Módulo de Young GPa	Relación de Poisson	Resistencia la tensión GPa
Vidrio	3	1.8	2500	9 e-6	795	0.7	0.2	-
Silicio	0.35	148	2330	-	677	168	0.3	-
EVA	0.5	0.35	960	0.73 e-6	2090	2.1	0.4	0.00435
Tedlar	0.1	0.2	2700	0.73 e-6	1000	2.1	0.4	0.1 MPa
Aluminio	35	209.3	2698.4	0.24 e-6	900	70	0.33	2330
Aire		0.025	-		-			

Para el caso 2 tenemos: Se utiliza la distribución de temperatura obtenida en el análisis anterior para así poder ligarlo a un análisis estructural, las condiciones de frontera utilizadas fueron las siguientes (ver figura 3.2).

Condiciones de frontera para el análisis estructural:

- 1) La base del panel se restringe axial y longitudinalmente
- 2) La aceleración de la gravedad al centro del panel

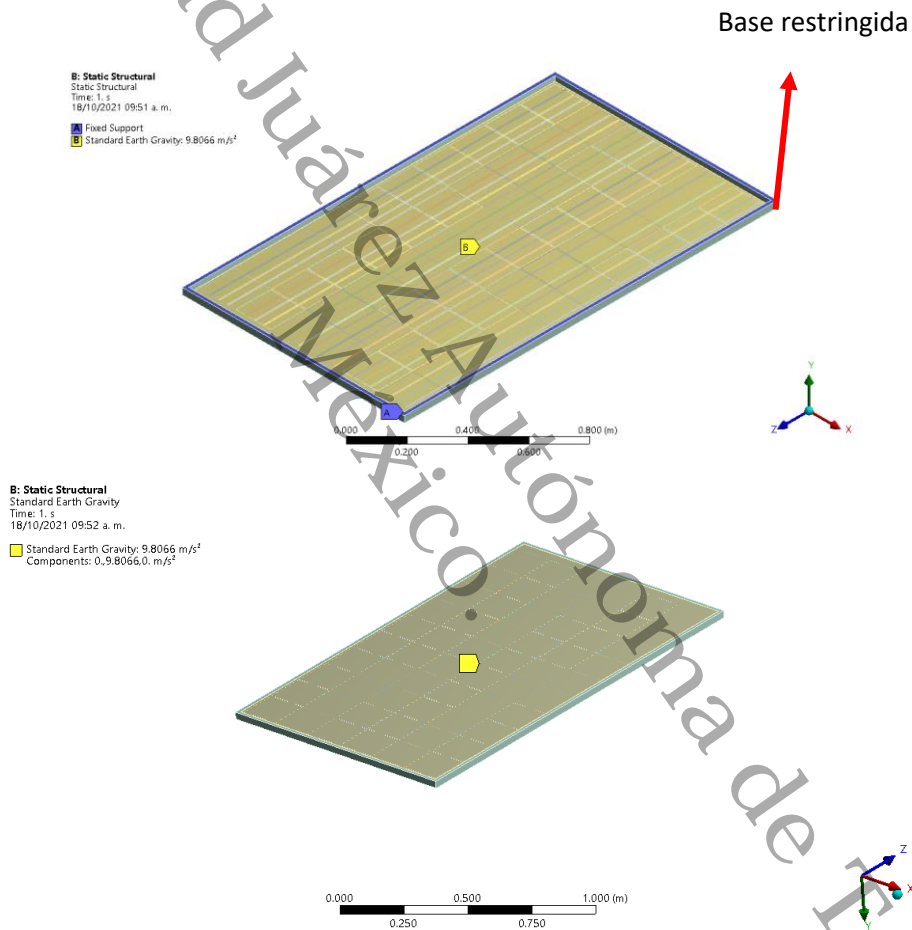


Figura 3. 2 Condiciones de frontera para el análisis estructural

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas en el programa Ansys, las cuales son los gradientes de temperatura en sus puntos máximos y mínimos, así como también las distribuciones de esfuerzos y sus puntos críticos.

4.1 Evaluación de Resultados

Para ambos casos (térmico estable y estructural) el elemento seleccionado para el análisis de Elementos Finitos fue un Solid90. Este puede ser aplicado en un análisis térmico en estado transitorio o estable, así como estructural. La malla utilizada para el análisis del panel fotovoltaico tiene 432,000 nodos y 25, 000 elementos figura (4.1), la figura 4.2 muestra la independencia de malla, cuando los elementos alcanzan un promedio de 25, 000 elementos, la curva comienza a estabilizar y es óptima para ambos casos, térmico y estructural.

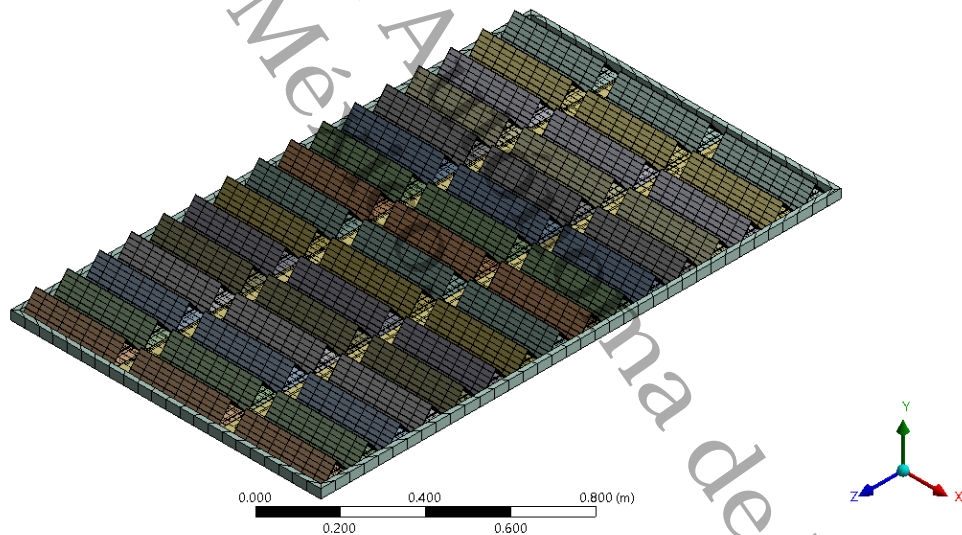


Figura 4. 1 Malla de la geometría

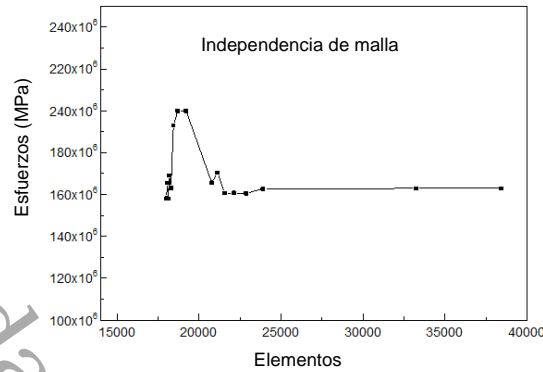


Figura 4. 2 Independencia de malla

Validando los resultados mediante la independencia de malla antes descrita, se procede a determinar los parámetros de estudio como son: distribución de temperatura y esfuerzos.

4.2 Distribución de Temperatura

En la figura 4.3 se muestran los resultados del análisis térmico cuando un flujo de calor máximo está actuando sobre la superficie del panel y con una temperatura ambiente máxima. Con respecto a la figura 4.3 vs 4.4, se puede ver el campo de temperatura casi uniforme sobre todo el panel, excepto en la zona identificada, un decremento considerable de 3°C resultó al momento de disminuir el espesor del EVA a 0.2 mm. Es importante tener presente que es una capa delgada si es comparada con espesor normal de 0.5 mm (Harb et al., 2020) y que podría conducir a un contacto directo con los otros materiales (silicio, Tedlar), pero con los avances en la mejora de los materiales este problema podría ser resuelto (Ali et al., 2019)

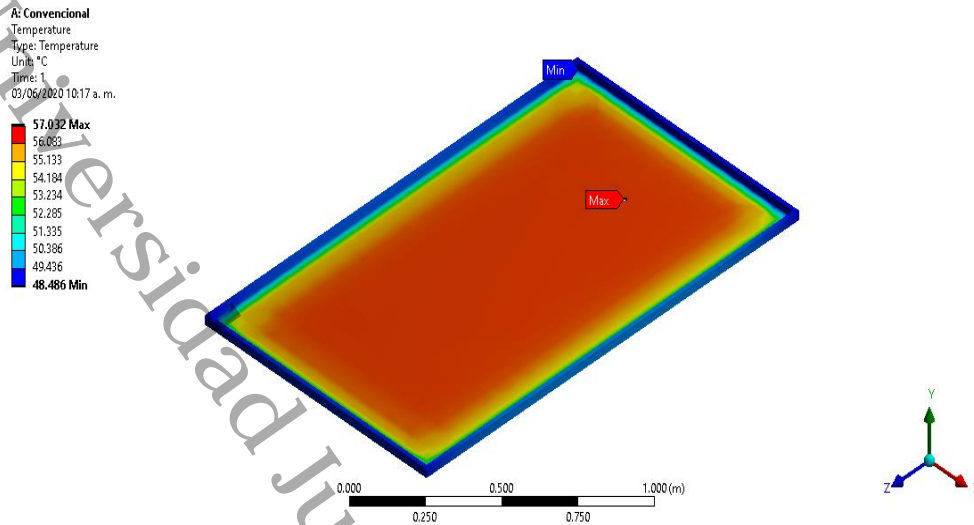


Figura 4. 3 Distribución de temperatura con un EVA de 0.5 mm

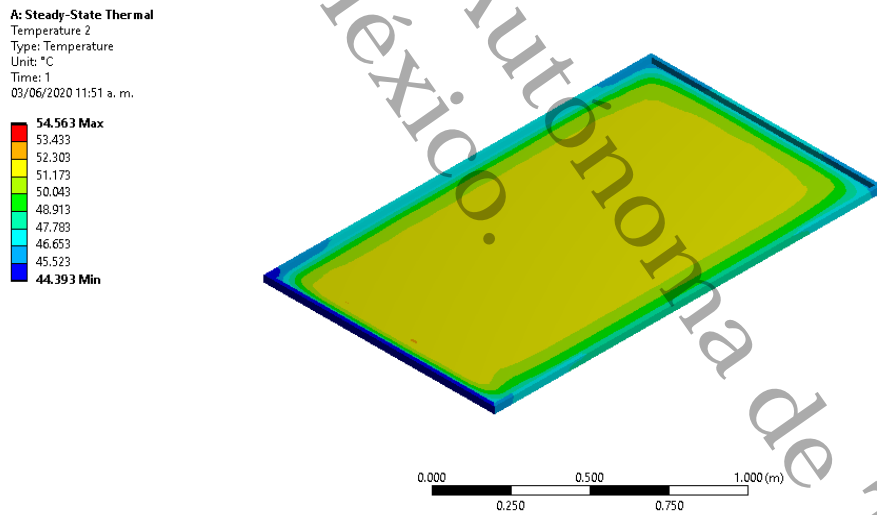


Figura 4. 4 Distribución de temperatura con un EVA de 0.5 mm

La figura 4.5 muestra esquemáticamente la distribución de temperatura usando una aleta rectangular (0.30 cm x 0.10 cm x 0.005 cm), teniendo un campo de temperatura máximo y mínimo de 44.095 °C y 33.27 °C, respectivamente.

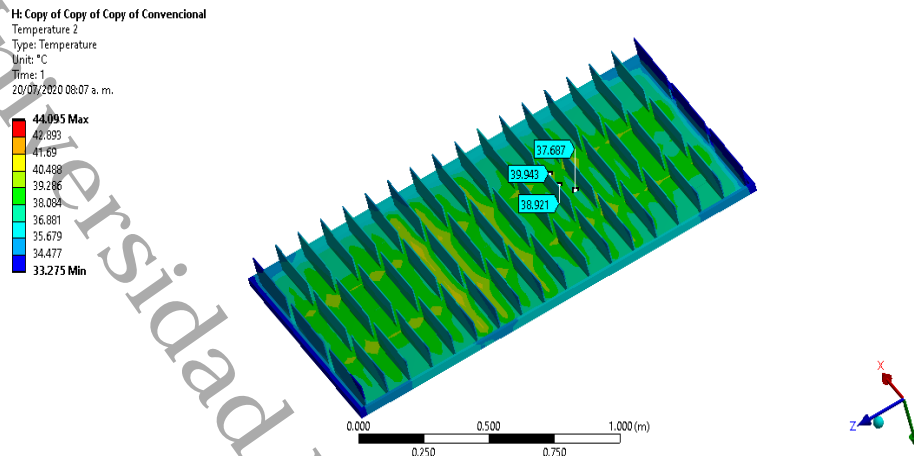


Figura 4. 5 Distribución de temperatura con aletas rectangulares

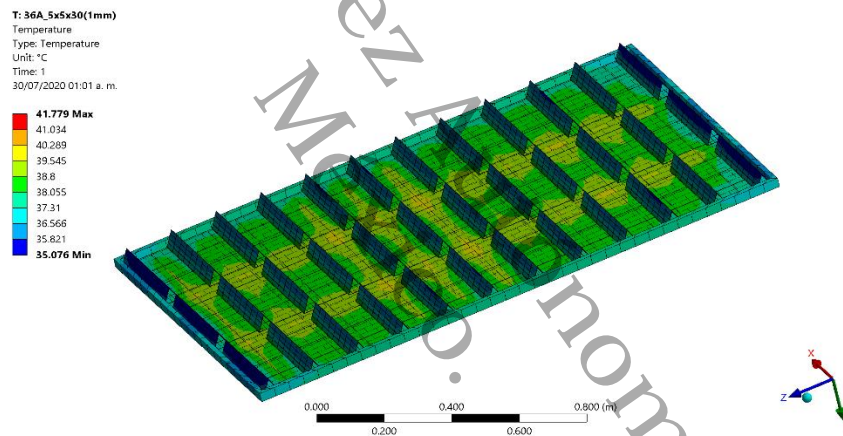


Figura 4. 6 Distribución de temperatura con aletas triangulares

Comparando la figura 4.5 con la 4.6 se muestra una disminución considerable de 2.3 °C en su temperatura máxima posterior del panel y permanece casi constante, mientras que en la figura 4.5 presenta un ligero incremento de 2 °C.

Se puede observar la respuesta de las aletas triangulares de aluminio (5 cm x 5 cm x 30 cm, 1 mm de espesor) como disipador de calor, cuando el flujo de calor está actuando directamente en la parte frontal de todo el panel.

Con respecto a la figura 4.7, una considerable reducción de 5.08 °C en su máxima temperatura operacional puede ser visto al momento de usar aletas triangulares

de 5 cm de base x 7 cm de altura, 30 cm de largo y un espesor de 1 mm, la parte posterior permanece casi estable a 34 °C. Este diseño podría ser una opción, sin embargo, al momento de aumentar la altura de las aletas tiende a entrar en equilibrio térmico con el medio y por lo tanto la transferencia de calor disminuye. Por lo que se tendría que mejorarse para ser una opción de diseño. Las distribuciones de temperatura anteriores se encuentran en acuerdo con el trabajo realizado por (Nizetić et al., 2016).

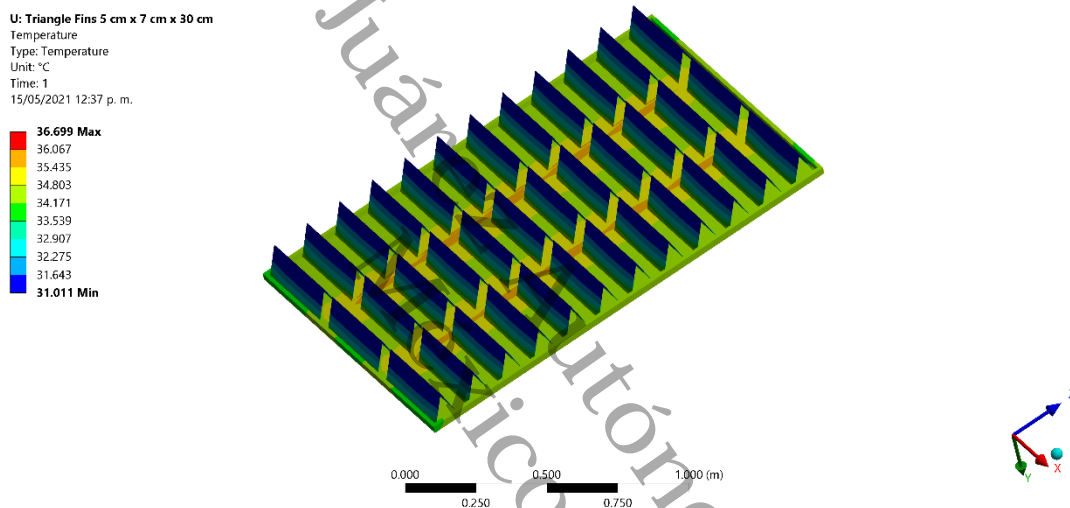


Figura 4. 7 Distribución de temperatura con aletas triangulares (5 cm x 7 cm x 30 cm, 1 mm de espesor)

4.3 Distribución de esfuerzos

El campo de esfuerzos principales resultantes para las condiciones de frontera de la sección 3.2 se muestra en la figura 4.8. En esta se puede observar que, para todo el panel, en términos generales, se presenta un esfuerzo de Von Mises promedio de 26 MPa. Por otro lado, se puede observar que en la capa interna del modelo es dónde se presenta la condición más crítica, con un esfuerzo máximo de 119.57 MPa. Esto implica que, será la zona más afectada de un panel fotovoltaico bajo condiciones extremas de operación. Los extremos presentan los esfuerzos más bajos, debido a la posibilidad de expandirse.

Si se compara la figura 4.8 con la 4.10, se puede observar un incremento considerable en los esfuerzos equivalentes. Esto debido a que las aletas en la parte posterior del panel restringen el libre movimiento provocando el aumento de los esfuerzos termomecánicos.

La figura 4.11 muestra la zona crítica para los esfuerzos, en la cual puede observarse un incremento de 60MPa si es comparada con la figura 4.9.

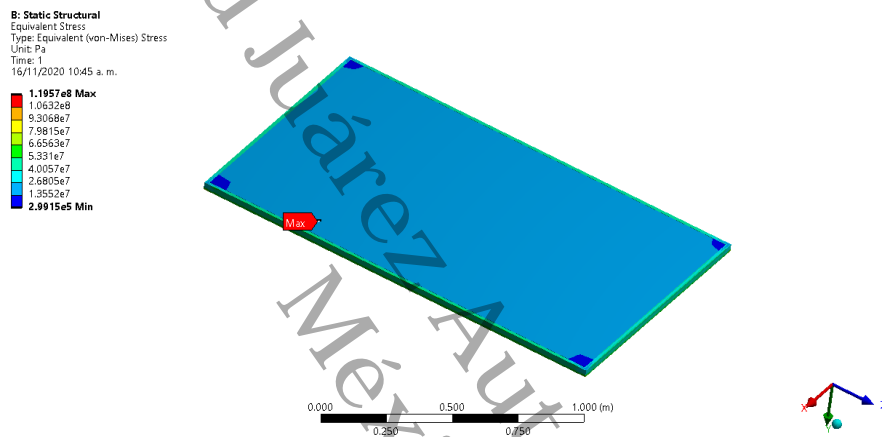


Figura 4. 8 Distribución de esfuerzos en el panel

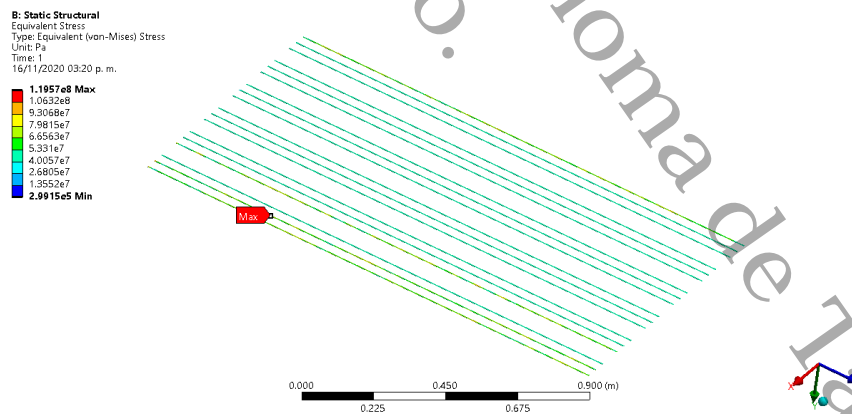


Figura 4. 9 Distribución de esfuerzos en el contacto eléctrico

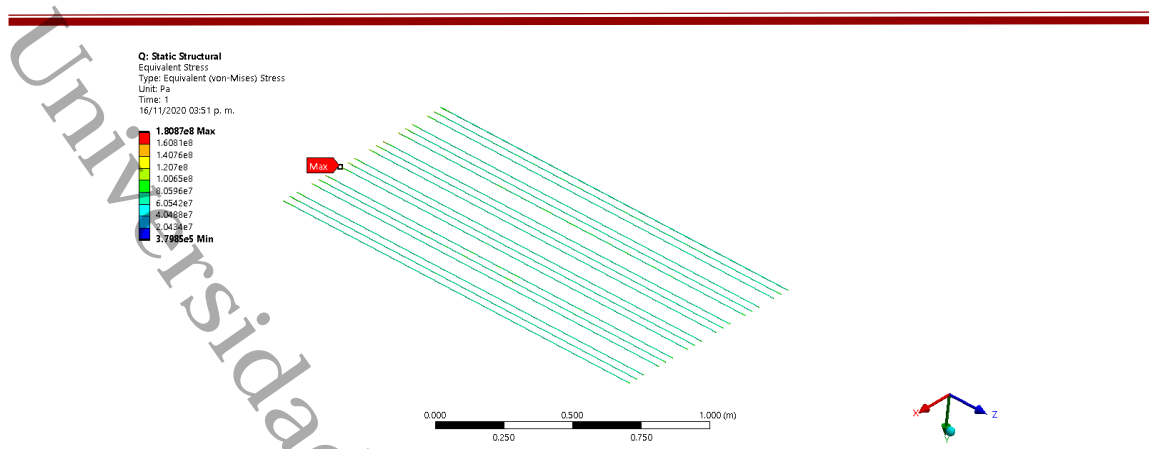


Figura 4. 10 Distribución de esfuerzos en el contacto eléctrico con aletas de enfriamiento

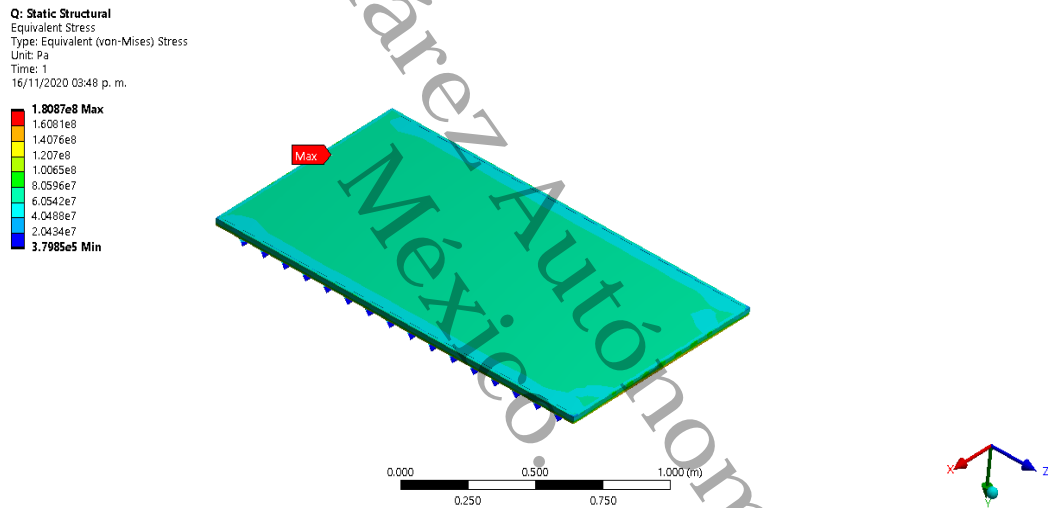


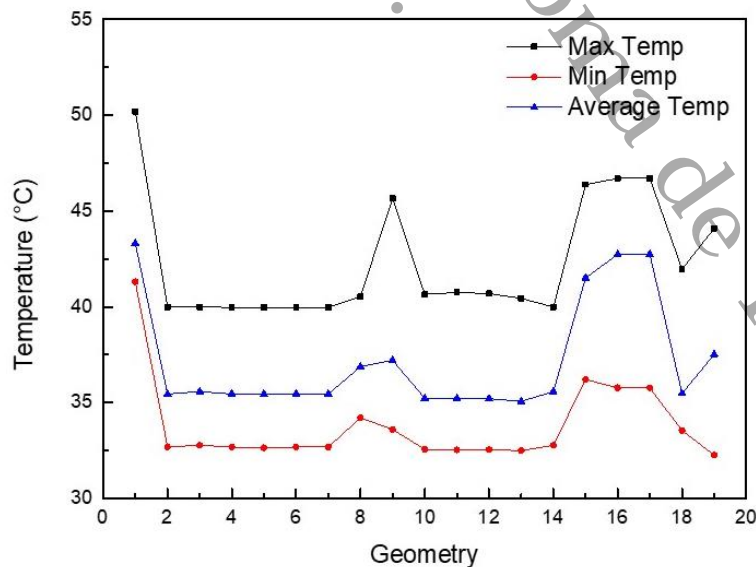
Figura 4. 11 Distribución de esfuerzos en el panel con aletas

Tabla 4. 1 Parámetros utilizados en el análisis

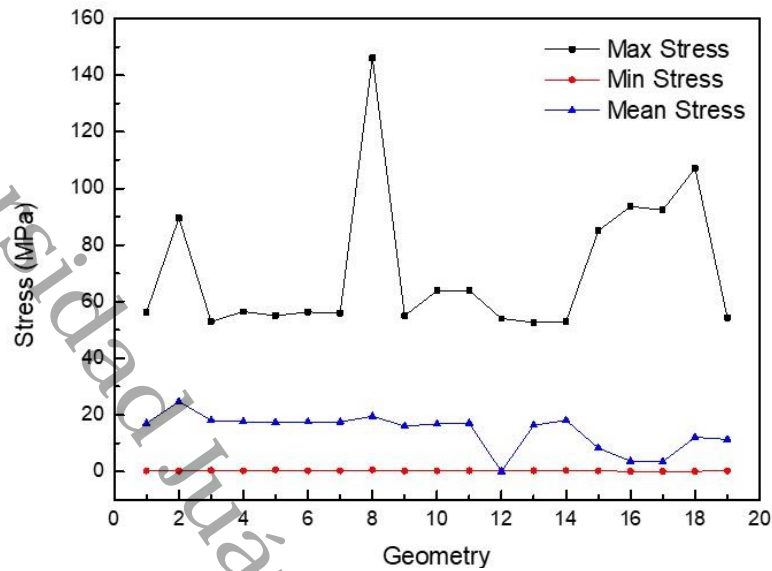
Parámetros	Valores
Convección	20 W/m ² °C @ 30 °C
Radiación	0.85 @ 30 °C
Radiación 2	0.90 @ 30 °C
Radiación 3	0.71 @ 30 °C
Flujo de calor	1000 W/m ²

La figura 4.12 muestra los resultados obtenidos sobre la parte posterior y la tabla 4.1 muestra los parámetros utilizados.

En las figuras 4.12 a y 4.12 b, pueden verse 19 geometrías estudiadas en los diferentes casos que se muestran en la tabla 4.2. Inicialmente, el panel convencional tiene una temperatura y esfuerzos máximos de 50.19 °C y 56.3 MPa, respectivamente. Seguidamente, un arreglo de 51 aletas de 5 cm x 5 cm x 1 m y 1 mm de espesor fueron evaluadas, lográndose una disminución de casi 10 °C debido al aumento del área de transferencia de calor por convección natural, mientras los esfuerzos permanecen estables. Después, las aletas triangulares mantuvieron una temperatura constante, pero un incremento notable en los esfuerzos puede verse en la geometría 8, esto por las restricciones que las aletas ejercen al material y por ende generan e incrementan los esfuerzos termo-mecánicos. De la geometría 10 a la 14, se presentó un arreglo de 48 aletas triangulares, presentando una temperatura promedio de 40 °C y un máximo esfuerzo de 63.87 MPa. Finalmente, un esfuerzo de 107.11 MPa fue presentado con el arreglo de 53 aletas triangulares de 5 cm x 5 cm x 30 cm y 1 mm de espesor.



a) Distribución de temperaturas



b) Distribución de esfuerzos

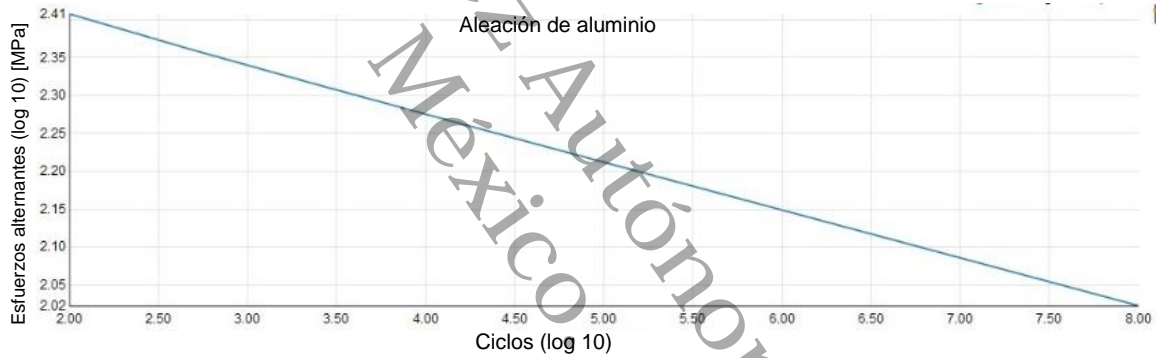
Figura 4. 12 Resultados de las temperaturas (a) y esfuerzos (b) estudiados en los casos

Tabla 4.2 Geometrías estudiadas

GEOMETRÍA	ALETAS	NUMERO DE ALETAS
1	Panel convencional	Panel convencional
2	Rectangular	51 aletas of 30 cm × 10 cm × 0.005 cm
3	Rectangular	14 aletas of 1 m × 10 cm × 0.005 cm EVA 5×10^{-4} m, TEDLAR 4×10^{-4} m
4	Triangular	14 aletas of 5 cm × 5 cm × 1 m, EVA 5×10^{-4} m, 5×10^{-4} m, TEDLAR 4×10^{-4} m
5	Triangular	14 aletas of 5 cm × 5 cm × 1 m, TEDLAR 2×10^{-4} m, EVA 2×10^{-4} m, 2×10^{-4} m
6	Triangular	14 aletas of 5 cm × 5 cm × 1 m, EVA 4×10^{-4} m, TEDLAR 5×10^{-4} m
7	Triangular	14 aletas of 5 cm × 5 cm × 1 m, EVA 3×10^{-4} m, 3×10^{-4} m, TEDLAR 5×10^{-4} m
8	Triangular	24 aletas of 1 m × 10 cm × 5 cm, TEDLAR 4×10^{-4} m, EVA 5×10^{-4} m, 5×10^{-4} m
9	Triangular	36 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, EVA 2×10^{-4} m, TEDLAR 5×10^{-4} m
10	Triangular	48 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm
11	Triangular	48 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, TEDLAR 5×10^{-4} m, EVA 6×10^{-4} m, 6×10^{-4} m
12	Triangular	48 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, TEDLAR 5×10^{-4} m, EVA 4×10^{-4} m, 4×10^{-4} m

13	Triangular	48 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, EVA 3×10^{-4} m, 2×10^{-4} m, TEDLAR 5×10^{-4} m
14	Triangular	48 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, TEDLAR 5×10^{-4} m, EVA 6×10^{-4} m, 6×10^{-4} m
15	Triangular	51 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, EVA, TEDLAR 5×10^{-4} m
16	Triangular	51 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, TEDLAR 5×10^{-4} m, EVA 2×10^{-4} m
17	Triangular	51 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, EVA TEDLAR 5×10^{-4} m
18	Triangular	53 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, EVA de 2×10^{-4} m, TEDLAR 5×10^{-4} m, 28 holes.
19	Triangular	54 aletas of 5 cm × 5 cm × 30 cm, EVA 2×10^{-4} m, TEDLAR 5×10^{-4} m

La tabla 4.2 muestra cada una de las geometrías y arreglos estudiados en el análisis. Como puede observarse, se utilizaron 8 arreglos de aletas diferentes, así como la variación de cada una las capas que conforman el panel fotovoltaico, obteniéndose los resultados mostrados en la figura 4.12 y antes descritos.



Ciclos	Esfuerzos alternantes (Mpa)
100	255.6
464.2	230
2154	208
10000	188.5
46420	171
2.15E+05	155.2
1.00E+06	140.9
4.64E+06	127.9
2.15E+07	116.1
1.00E+08	105.4

Figura 4. 13 Curva de fatiga para el contacto eléctrico

La figura 4.13 muestra una gráfica de curva a la fatiga para un material de aluminio la cual se utiliza para determinar los ciclos permisibles para cualquier material bajo cargas críticas. Sin embargo, los esfuerzos alternantes de acuerdo al código ASME sección III son calculados entre el promedio del máximo esfuerzo en operación y el mínimo.

Para lo cual en este caso se muestra en la figura 4.11, el esfuerzo máximo es de 180.87 MPa y el esfuerzo mínimo sería 0 MPa, ya que es cuando se encuentra fuera de operación.

Por lo tanto, siguiendo lo establecido por el código, se tiene la ecuación 4.1 como:

$$S_{alt} = \frac{180.87 \times 10^6 - 0}{2} = 90.43 \text{ MPa} \dots \dots \dots 4.1$$

Teniendo así, un esfuerzo alternante inferior al mínimo requerido por la curva de fatiga de la figura 4.13 de 105.4 MPa. Concluyendo que el nivel de esfuerzos obtenidos no representa daño alguno desde el punto de vista macroscópico (Zhang et al., 2021).

Con respecto al objetivo específico 7, se tiene el siguiente resultado:

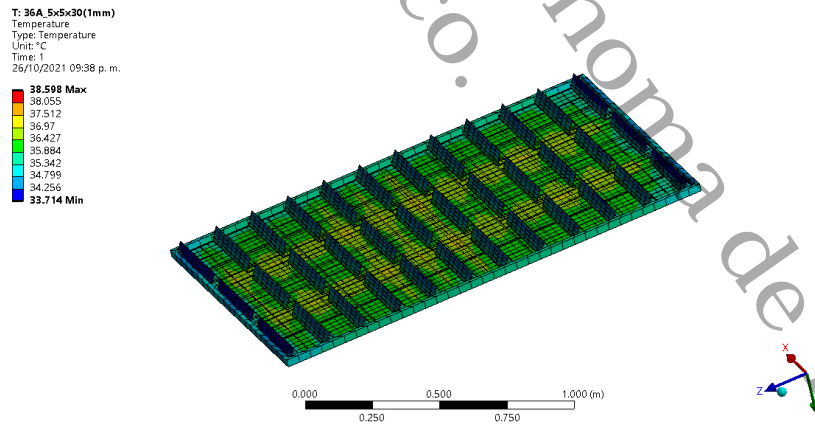


Figura 4. 14 Distribución del campo de temperaturas

La figura 4.14 muestra el resultado de la distribución del campo de temperaturas utilizando una radiación solar difusa de 725W/m² de acuerdo a (Sathe & Dhoble, 2017b)(Harb et al., 2020)(Ali et al., 2019), Se puede observar una disminución de

temperatura si es comparada con la imagen 4.6, esto debido a que la cantidad del flujo de calor recibida es menor, por lo que de acuerdo a la teoría de transferencia de calor este resultado es de esperarse.

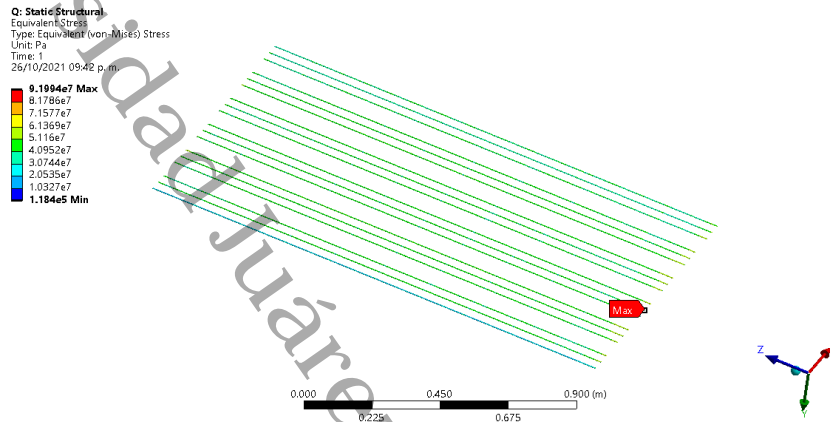


Figura 4. 15 Distribución del campo de esfuerzos

En la figura 4.15 se puede visualizar un esfuerzo máximo de 91.99 MPa, lo cual es una disminución considerable de casi el 50 % si es comparada con la imagen 4.10. Lo cual es el mismo caso que sucede con el análisis térmico de la figura 4.14. Al ser un campo de temperatura menor, los desplazamientos disminuyen y así mismo los esfuerzos termo-mecánicos.

Conclusiones

Como puede ser visto, el principal objetivo encontrar los gradientes de esfuerzos inducidos por los cambios de temperatura en la superficie del panel fotovoltaico con el fin de aumentar la potencia de salida, disminuir el precio de producción de energía eléctrica y aumentar la vida operacional de las celdas fotovoltaica. Detallar la conclusión en conjunto con el objetivo general

Para poder lograrlo, se utilizaron aletas en la parte posterior del panel funcionando como un disipador de calor. Debido a esto el material se restringió para poder moverse libremente, lo que resultó en la aparición de los esfuerzos termo-mecánicos.

El esfuerzo máximo cuando existe la configuración de 36 aletas como disipador de calor es de 146.11 MPa, resultando así en el más crítico caso analizado. Cabe destacar, que, aunque el uso de aletas como disipadores de calor puede reducir considerablemente la temperatura operacional del panel, la aparición de micro grietas puede ser inducidas debido a los altos esfuerzos termo-mecánicos, disminuyendo considerablemente la potencia de salida e incrementando el precio de la misma.

Para asegurar que el panel se encuentra en condiciones operacionales optimas, las recomendaciones de las guías IEC 61215 deben ser tomadas en cuenta. Algunas de las cuales son: el monitoreo de la temperatura y los ciclos térmicos

Las manufacturas de los intercambiadores de calor podrían hacerse para llevar a cabo un análisis experimental y así poder comparar los resultados numéricos versus experimental.

Referencias

- Abd-Elhady, M. S., Fouad, M. M., & Khalil, T. (2016). Improving the efficiency of photovoltaic (PV) panels by oil coating. *Energy Conversion and Management*, 115, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.040>
- Abdelrazik, A. S., Al-Sulaiman, F. A., Saidur, R., & Ben-Mansour, R. (2018). A review on recent development for the design and packaging of hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95(December 2017), 110–129. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.013>
- Abderrezek, M., & Fathi, M. (2017). Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. *Solar Energy*, 142, 308–320. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.040>
- Ali, A. H., Ibrahim, S. I., Jawad, Q. A., Jawad, R. S., & Chaichan, M. T. (2019). Effect of nanomaterial addition on the thermophysical properties of Iraqi paraffin wax. *Case Studies in Thermal Engineering*, 15(August). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100537>
- Alvarado, R. (2015). *Manual para la evaluación técnica-económica de: "Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red apoyados a través del Programa de Fideicomiso de Riesgo Compartido"*. 120. https://energypedia.info/images/6/67/GIZ_Manual_SF_Interconectados_Red_2015.pdf
- Çelik, A., Yaman, H., Turan, S., Kara, A., Kara, F., Zhu, B., Qu, X., Tao, Y., Zhu, Z., Dhokia, V., Nassehi, A., Newman, S. T., Zheng, L., Neville, A., Gledhill, A., Johnston, D., Zhang, H., Xu, J. J., Wang, G., ... Dutta, D. (2018). No Title. *Journal of Materials Processing Technology*, 1(1), 1–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252><http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252>
- Colinge Jean-Pierre, C. C. A. (2012). *Physics of Semiconductor Devices*. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
- Duwairi, H., & Qasem, M. (2019). Corrugating photovoltaic modules enhances thermal efficiency and power output. *Solar Energy*, 188(June), 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.018>
- Energía, Secretaría de. (2018). *Balance Nacional de Energía*.
- Energía, Secretaría de. (2017). *Prospectiva de Energías Renovables*.
- Energía solar fotovoltaica • Forbes-Especiales • Forbes México*. (n.d.).
-

-
- Retrieved October 21, 2021, from <https://www.forbes.com.mx/energia-solar-fotovoltaica/>
- Fakouriyán, S., Saboohi, Y., & Fathi, A. (2019). Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production. *Renewable Energy*, *134*, 1362–1368. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.054>
- Harb, A. E. M. A., Radwan, A., Elsayed, K., Sedrak, M., & Ahmed, M. (2020). Influence of varying the Ethylene-Vinyl Acetate layer thicknesses on the performance of a polycrystalline silicon solar cell integrated with a microchannel heat sink. *Solar Energy*, *195*(December 2019), 592–609. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.082>
- Hasan, M. A., & Parida, S. K. (2016). An overview of solar photovoltaic panel modeling based on analytical and experimental viewpoint. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.087>
- Hernandez-Perez, J. G., Carrillo, J. G., Bassam, A., Flota-Banuelos, M., & Patino-Lopez, L. D. (2020). A new passive PV heatsink design to reduce efficiency losses: A computational and experimental evaluation. *Renewable Energy*, *147*, 1209–1220. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.088>
- IEA. (2016). Key Renewable Trends. Excerpt from "Renewables Information. *Renewables Trends*, *12*. <http://www.iea.org/t&c%0Ahttp://www.iea.org/t&c/termsandconditions/%0Ahttp://www.iea.org/t&c%0Ahttp://www.iea.org/t&c/termsandconditions/%0Ahttps://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyRenewablesTrends.pdf>
- INEGI. (2021). *Climatología*. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- International Energy Agency. (2021a). Global Energy Review 2021. *Global Energy Review 2020*, 1–36. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0031107-401d-4a2f-a48b-9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.pdf>
- International Energy Agency. (2021b). *Key World Energy Statistics 2013*. 1–82.
- International Energy Agency. (2021c). *Prospectiva del Sector Eléctrico 2012-2026*.
- John A. Duffi, W. A. B. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. In *Clinics in Laboratory Medicine* (Vol. 9, Issue 2). John Wiley & Sons, Inc. [https://doi.org/10.1016/s0272-2712\(18\)30627-9](https://doi.org/10.1016/s0272-2712(18)30627-9)
- Jordehi, A. R. (2016). Parameter estimation of solar photovoltaic (PV) cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *61*, 354–371.
-

-
- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.049>
- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., & Biwole, P. H. (2016). Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. *Solar Energy*, 140, 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.006>
- Mesa, J. D., Escobar Mejía, A., & Hincapié Isaza, R. A. (2009). *Analysis and description of the photovoltaic effect in the zone*. 42, 327–332.
- Nižetić, S., Grubišić- Čabo, F., Marinić-Kragić, I., & Papadopoulos, A. M. (2016). Experimental and numerical investigation of a backside convective cooling mechanism on photovoltaic panels. *Energy*, 111, 211–225. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.103>
- Penick, T., Louk, B., & Penick, T. (1998). Photovoltaic Power Generation by Prepared by. *Power*. <http://www.e-renewables.com/documents/Solar/Photovoltaic Power Generation.pdf>
- Perpiñan Lamigueiro, O. (2012). *E S Fotovoltaica*. <http://procomun.wordpress.com/documentos/libroesf>
- Photovoltaics - Historical Development*. (n.d.). Retrieved October 11, 2021, from <https://www.pvresources.com/en/introduction/history.php>
- Program, E. S. M. A. (2020). Global Photovoltaic Power Potential by Country. In *Global Photovoltaic Power Potential by Country* (Issue June). <https://doi.org/10.1596/34102>
- Puig, P., & Jofra, M. (n.d.). *Energía Solar Fotovoltaica*.
- Raugei, M., & Frankl, P. (2009). Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks. *Energy*, 34(3), 392–399. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.01.001>
- Santiago, R. S. (PROMÉXICO), Emmanuel, N. (PROMÉXICO), Joscha, R. (GIZ), Hermilio, O. N. (GIZ), Manuel, M. F. (IER), Karla, C. V. (IER), Miriam, A. (IER), & G., K. (2017). La industria solar fotovoltaica y fototérmica en México. *ProMéxico*, 172. <https://www.promexico.mx/documentos/biblioteca/industria-solar.pdf>
- Sathe, T. M., & Dhoble, A. S. (2017a). A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(March), 645–672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.075>
- Sathe, T. M., & Dhoble, A. S. (2017b). A review on recent advancements in photovoltaic thermal techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(February), 645–672. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.075>
- Schiro, F., Benato, A., Stoppato, A., & Destro, N. (2017). Improving photovoltaics efficiency by water cooling: Modelling and experimental
-

approach. *Energy*, 137, 798–810.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.164>

SENER. (2018). Nueva Era de la Energía en México. *Alianza Energética*, 102.

SENER. (2020). *Anexo II*.

Teo, H. G., Lee, P. S., & Hawlader, M. N. A. (2012). An active cooling system for photovoltaic modules. *Applied Energy*, 90(1), 309–315.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.017>

Zhang, Y., Liu, Q., Hou, J., Ni, Y., Yu, Y., Jaubert, J. N., Lajoie-Mazenc, E., Boyère, E., Thomas, M., & Zuo, H. (2021). Experimental study on micro-crack initiation in photovoltaic polycrystalline silicon wafer. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 123(October).
<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105539>