UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO - CHILE

"Modelamiento Térmico por Elementos Finitos de Panel Fotovoltaico Monofacial y Bifacial"

CRISTIAN ANDRÉS FARÍAS GONZÁLEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Ph. D. RODRIGO BARRAZA VICENCIO
PROFESOR CORREFERENTE: Dr. DANILO ESTAY BARRIENTOS

ENERO 2020

Agradecimientos

A mis padres Julia y Sergio por haberme dado la posibilidad de estudiar, a Sabina por su ayuda todos estos años, a Catalina por motivarme a ser mejor persona, a Lucía por su apoyo y motivación en este proceso.

Agradezco también a todos los amigos que la vida universitaria me entregó, a cada uno de los profesores que tuve durante estos años, especialmente a Rodrigo por creer en mi.

Finalmente agradezco a Enrique por ser el mejor amigo que pude tener estos 8 años, este logro es también tuyo.

Resumen ejecutivo

Dentro de las energías renovables destaca el uso de la solar fotovoltaica para la generación de energía eléctrica mostrando un aumento considerable en su participación dentro de la matriz energética a nivel nacional e internacional, resulta necesario desarrollar políticas de operación y mantenimiento adecuadas con el fin de asegurar un correcto desempeño por parte de los paneles.

La temperatura de funcionamiento en paneles fotovoltaicos, y específicamente de las celdas que los componen, es un factor determinante en la energía eléctrica que se logra obtener a partir de su operación abriendo un importante campo de estudio, nace entonces la necesidad de generar modelos térmicos con el fin de entender cómo interactúan las condiciones de funcionamiento, materiales utilizados y geometría asociada al panel en dicha temperatura.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar los efectos de las condiciones medioambientales, específicamente el viento y la temperatura, sobre los gradientes térmicos generados en paneles fotovoltaicos policristalinos y bifaciales en conjunto con la subyacente fluctuación en su eficiencia de operación.

Se realizan simulaciones bajo diversas condiciones de operación para un panel fotovoltaico policristalino por medio de un modelo térmico en elementos finitos logrando así determinar los efectos de estas condiciones sobre la temperatura de operación en el panel, posteriormente se extiende este estudio a paneles bifaciales.

El modelo policristalino generado es validado utilizando los datos obtenidos de la estación meteorológica y los paneles fotovoltaicos montados en la azotea del campus san Joaquín de nuestra universidad ubicado en Avda. Vicuña Mackenna 3939, comuna de San Joaquín, Santiago.

Finalmente se desarrollan pruebas a partir del modelo generado estudiando el efecto que tiene tanto el ensuciamiento de los paneles como las sombras sobre estos.

Abstract

Among renewable energies, the use of photovoltaic solar energy for the generation of electricity shows a considerable increase in its share in the energy matrix at national and international level, it is necessary to develop appropriate operation and maintenance policies in order to ensure proper performance by the panels.

The operating temperature in photovoltaic panels, and specifically of the cells that compose them, is a determining factor in the electrical energy that is obtained from its operation opening an important field of study, the need to generate thermal models is born in order to understand how the operating conditions, composition and geometry associated with the panel interact in said temperature.

This paper aims to study the effects of environmental conditions, specifically wind and temperature, on the thermal gradients generated in polycrystalline and bifacial photovoltaic panels in conjunction with the underlying fluctuation in their operating efficiency. Simulations are carried out under various operating conditions for a polycrystalline photovoltaic panel using a finite element thermal model, thus determining the effects of these conditions on the operating temperature on the panel, later this study is extended to bifacial panels.

The polycrystalline model generated is validated using data obtained from the meteorological station and photovoltaic panels mounted on the roof of the San Joaquin campus of our university located in Avda. Vicuña Mackenna 3939, commune of San Joaquín, Santiago.

Finally, tests are developed based on the model generated by studying the effect of both the fouling of the panels and the shadows on them.

Glosario

G_b: radiación directa en la superficie W/m^2

G_{dh} : radiación difusa horizontal W/m^2

G_h : radiación global horizontal W/m^2

G_{STC} : valor de la irradiancia en condiciones estándar W/m^2

I_D: Corriente que circula a través de un diodo

I_{MP} : corriente de máxima potencia

$I_{pv,STC}$: corriente fotovoltaica en condiciones estándar A

I_{PV}: Corriente fovotoltaica

I_{SC} : corriente de corto circuito

K_i : coeficiente de temperatura de corto circuito A/K

P_{MP} : punto de máximo funcionamiento

R_P: Resistencia Shunt

T_{STC} : temperatura en condiciones estándar (298,15 K)

V_{MP} : voltaje de máxima potencia

V_{OC} : voltaje de circuito abierto

al : albedo, porcentaje de radiación incidente reflejado por una superficie

Efecto Joule: fenómeno asociado a la perdida de energía en forma de calor de los electrones presentes en una corriente eléctrica que atraviesa un medio.

F : factor de forma

FF : pendiente de la curva de potencia

Fotón: Partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética. Posee masa cero y viaja en el vacío a velocidad constante.

G : valor de la irradiancia W/m^2

Irradiancia: magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En unidades del sistema internacional se mide en W/m^2.

NOCT: Normal Operating Cell Temperature, temperatura de operación de la celda bajo STC.

Soiling: acumulación de suciedad sobre paneles solares generando perdida de potencia

STC: Standard Test Conditions, son condiciones normalizadas bajo las cuales se prueban paneles en la industria.

String: conjunto de celdas conectadas en serie sobre una misma columna dentro de un panel.

T : temperatura de la celda en K

θ: ángulo entre la radiación directa a la superficie y su normal

Reflectividad: porcentaje de radiación incidente que refreja una superficie, depende de su material.

Tabla de contenido

1 Introducción 11
2 Objetivos 12
2.1 Objetivo general 12
2.2 Objetivos específicos 12
3 Conceptos claves 13
3.1 Energía solar fotovoltaica 13
3.1.1 Radiación solar 13
3.1.2 Células fotovoltaicas 14
3.1.3 Paneles bifaciales 15
3.1.4 Modelo eléctrico de paneles 17
3.2 Modelos térmicos 18
3.3 Resistencia térmica de contacto 19
4 Estado del arte. 20
4.1 Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation 20
4.2 Finite Element Thermal Analysis of a Solar Photovoltaic Module 21
5 Modelo propuesto 22
5.1 Consideraciones del modelo 24
5.2 Condiciones de Borde 27
5.2.1 Radiación 27
5.2.2 Convección 28
5.2.3 Conducción 29
5.3 Simulación en Ansys 30
6 Validación 32
6.1 Método de validación 32
6.1.1 Consistencia hipótesis inicial 32
6.1.2 Validación con datos empíricos 40
6.2 Ecuación de predicción de temperatura en la celda 46
7 Modelo Bifacial 48
7.1 Geometría 48
7.2 Consideraciones del modelo 49
7.3 Condiciones de contorno 51
8 Objetivos de estudio 52

8.1 Prueba de sombreado 56
8.2 Efectos térmicos del soiling 59
9 Recomendaciones y trabajo futuro 62
9.1 Validación modelo bifacial 62
9.2 Variables para incorporar en futuros estudios 62
10 Conclusiones 63
11 Referencias bibliográficas 64

Índice de Tablas

Tabla 5-1: Propiedades panel modelado. 24
Tabla 6-1: detalle de las capas que componen el modulo y sus espesores respectivos 33
Tabla 8-1 propiedades físicas y ópticas de la arena de desierto caracterizada principalmente como arcilla y limo. 59

Índice de Figuras

Figura 3-1: Capas del panel fotovoltaico [3]. 14
Figura 3-2: Parámetros de curva I-V[4]. 15
Figura 3-3: La irradiancia reflejada impacta en la cara posterior del módulo FV bifacial [5], aumentando la producción de potencia entre un 5 a 30%. 16
Figura 3-4 [6] paneles bifaciales en operación, se destaca la posibilidad de ubicarlos sin un ángulo de inclinación. 16
Figura 3-5: Circuito eléctrico equivalente para celda fotovoltaica [7]. 17
Figura 4-1: Capas y secciones del panel. 21
Figura 4-2: resultados modelo Zhou. 21
Figura 5-1: Dimensiones generales panel modelo propuesto. 22
Figura 5-2: Dimensiones de las celdas del modelo. 23
Figura 5-3: Dimensiones del marco del modelo. 23
Figura 5-4: espesores de las distintas capas, zona central del modelo. 24
Figura 5-5: Flujos de energía, zona central modelo. 25
Figura 5-6: Flujos de energía, zona de interfaz modelo. 26
Figura 5-7: diagrama con parámetros de entrada para el modelo propuesto. 27
Figura 6-1: etapas de validación para el modelo propuesto. 32
Figura 6-2: vista superior del modulo, diferencia la zona de la celda y la de interfaz con las celdas adyacentes 33
Figura 6-3: vista superior de la celda, muestra los gradientes y patrones térmicos generados en la superficie 35
Figura 6-4: indica el plano en dónde se estudiarán los gradientes térmicos y específicamente la temperatura de celda. 36
Figura 6-5: gradiente térmico en el espesor de la celda, es posible observar una diferencia superior a un grado entre celda y superficie de vidrio. 36
Figura 6-6: distribución de temperatura obtenida par el plano lateral del modelo generado presenta la temperatura máxima y mínima obtenidas. 36
Figura 6-7: vista general sección de estudio 37
Figura 6-8: acercamiento a esquina del modelo, el circulo rojo presenta la zona evaluada. 37
Figura 6-9 Termografía, se presentan los principales puntos calientes dentro del modelo, se destacan los puntos de máxima temperatura en el panel y los valores obtenidos. 41
Figura 6-10 Simulación, se destacan los puntos de máxima temperatura en el panel y los valores obtenidos. 41
Figura 6-11: muestra los puntos del panel en que la temperatura sobrepasa la esperada (círculos blancos) y la temperatura del punto central del modelo (circulo celeste). 42
Figura 6-12: diagrama con las posiciones establecidas para los sensores de temperatura ubicados en la cara frontal y posterior del panel. 43
Figura 6-13: cara posterior del panel ensayado, se muestra la posición de los sensores 44
Figura 6-14: cara frontal del panel ensayado, se muestra la posición del sensor utilizado .. 44
Figura 6-15; diagrama resumen del proceso iterativo utilizado para simular las condiciones a estudiar en el modelo propuesto. 46
Figura 7-1: dimensiones y posición de las distintas capas que componen el panel, se detalla el material de cada una de las capas. 48
Figura 7-2:dimensiones celda fotovoltaica 49

Figura 7-3 flujos de energía modelo bifacial, zona central 50
Figura 7-4 flujos de energía modelo bifacial, zona de contorno 51
Figura 8-1: ejemplo de paneles sombreados en operación es importante considerar esta variable en su instalación. 56
Figura 8-2 consideraciones para el modelo sombreado, el color amarillo representa las celdas desconectadas y el color gris la celda sobre que por tanto percibe una baja irradiancia 57
Figura 8-3: panel sombreado, sin generación en celda sombreada 58
Figura 8-4: panel sombreado, generación interna en celda sombreada 58

1 Introducción

Durante las últimas décadas el uso de energía renovables en chile ha aumentado considerablemente, puntualmente la energía fotovoltaica alcanza en la actualidad sobre un 10% de la capacidad instalada en el país [1], dicha tendencia proyecta un aumento exponencial en los próximos años generando un importante campo de estudio y desarrollo asociado, el mantenimiento y operación de las plantas fotovoltaicas.

Una de las principales barreras presentes en el uso de tecnología solar fotovoltaica es la baja eficiencia desarrollada por los paneles, en promedio los paneles comerciales informan un 17% de eficiencia en condiciones estándar de testeo (STC) número que se ve afectado por diversos factores de operación entre los que destaca la temperatura a la cual opera la celda.

Temperaturas elevadas en la celda disminuyen considerablemente su eficiencia y vida útil, por consiguiente, resulta necesario analizar el efecto de variables de operación sobre dicha temperatura.

Este trabajo de título se enfoca en desarrollar modelos para estudiar la temperatura de operación de paneles en base a sus condiciones de operación, específicamente condiciones de viento y temperatura logrando así, desarrollar bases para el estudio y detección de fallas junto a un mejor entendimiento del funcionamiento general de paneles fotovoltaicos.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de título es desarrollar un modelo térmico en elementos finitos para paneles fotovoltaicos validado con datos empíricos y fijar las bases para el desarrollo de un modelo aplicado a paneles bifaciales con el fin de estudiar su comportamiento frente a variaciones en condiciones de operación.

2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos considerados en este trabajo son los siguientes:

- Analizar el estado del arte relevante
- Desarrollar un modelo en elementos finitos para un panel monofacial.
- Validar el modelo con datos empíricos tomados en campus san Joaquín
- Analizar y comparar en forma crítica los efectos de las condiciones de borde para paneles fotovoltaicos mono faciales y bifaciales.

3 Conceptos claves

3.1 Energía solar fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable, consiste en el proceso de obtención de electricidad a partir de la transformación directa de radiación proveniente desde el sol, esto es posible gracias a paneles que aprovechan la energía de fotones generando una diferencia de potencial capaz de mover cargas libres que posteriormente se canalizan en un circuito conductor estableciendo una corriente eléctrica.

3.1.1 Radiación solar

La radiación solar es el conjunto de ondas electromagnéticas emitidas por el sol debido a su temperatura, dichas ondas son portadas por fotones viajando a través del espacio hasta la atmosfera terrestre transportando una gran cantidad de energía. Es posible cuantificar dicha energía por medio de la irradiancia, siendo esta, la magnitud de radiación incidente por unidad de área, su unidad en sistema internacional es el W/m^2.

Dentro de la atmosfera es posible percibir tres tipos de radiación:

- Radiación directa: es la radiación que proviene directamente desde el sol sin verse afectada por la atmosfera.
- Radiación difusa: se origina a partir de la radiación solar dispersada por la atmosfera, su valor crece en días con presencia de nubosidad.
- Radiación reflejada: porción de radiación reflejada en la superficie terrestre. Este tipo de radiación se encuentra asociado al coeficiente de reflexión de la superficie conocido también como ***Albedo***, su valor varía entre 0 y 1 e indica que porcentaje de la radiación incidente es reflejado por la superficie siendo 1 equivalente a un 100%.

Estos tres tipos de radiación, en conjunto componen la radiación total o global percibida por una superficie, dependiendo de la inclinación de dicha superficie la irradiancia que efectivamente incide en ella varía. Se define entonces la radiación solar incidente en una superficie con un ángulo θ respecto a la horizontal [2].

$$G_\beta = G_b \cdot cos\theta + F_{A\rightarrow sky} \cdot G_{dh} + al \cdot F_{A\rightarrow ground} \cdot G_h \tag{3.1}$$

3.1.2 Células fotovoltaicas

Son dispositivos capaces de generar una corriente eléctrica a partir de radiación electromagnética, se componen por dos capas de material, una de tipo n (con impurezas capaces de donar electrones) y otra de tipo p (con impurezas capaces de recibir electrones), además se incluye un conductor externo que conecta ambas capas. Al iluminar la cara n los electrones de valencia obtienen la energía necesaria (1,5 ev) para abandonar esta capa generando un flujo de electrones libres que viajan hasta los contactos de la celda.

Debido a lo frágiles que son las celdas y conectores resulta necesario protegerlos para su uso en intemperie, además de darles rigidez estructural, normalmente se utiliza un polímero transparente para encapsular, una cubierta trasera para aislar y un vidrio frontal para proteger la celda encapsulada, el cual posee también la capacidad de filtrar gran parte de la radiación UV, el tipo de vidrio utilizado tiene la particularidad de poseer una baja reflectividad permitiendo así aprovechar de mejor manera la energía disponible. El conjunto de celda, encapsulante, marco, conectores y cubiertas se conoce como panel fotovoltaico.

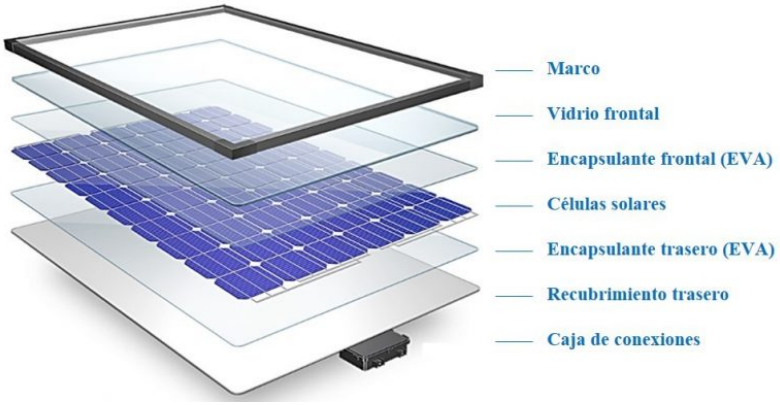

Figura 3-1: Capas del panel fotovoltaico [3].

El desempeño de una celda de caracteriza a partir de su correspondiente curva I-V donde se presenta gráficamente las posibles combinaciones de voltaje y corriente que esta puede entregar. Se describen a continuación los principales parámetros relacionados con dicha curva.

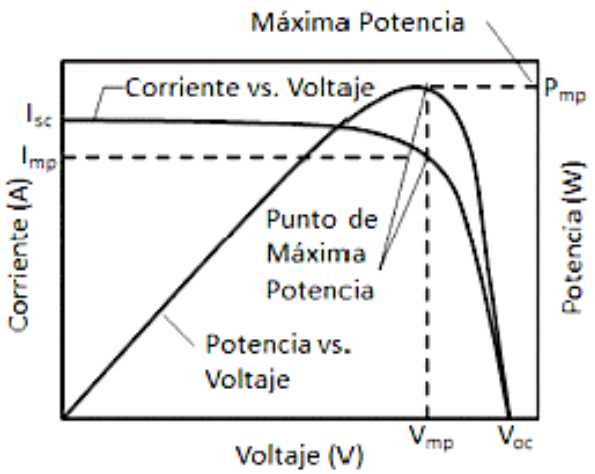

Figura 3-2: Parámetros de curva I-V[4].

- Corriente de corto circuito (I_{SC}): Hace referencia a la máxima corriente que se puede obtener en el panel, debe ser medida sin ninguna resistencia de por medio provocando un cortocircuito en el panel y voltaje nulo.
- Voltaje de circuito abierto (V_{OC}): Tensión máxima disponible, se mide a corriente cero en condiciones de circuito abierto.
- Factor de forma (FF): Es la pendiente la curva de potencia, indica la calidad del panel, entre más cerca se encuentre del valor uno mayor será la potencia que el panel puede entregar.
- Punto de potencia máxima (P_{MP}): Punto de funcionamiento para el cual la potencia entregada es máxima, se obtiene como el producto entre la corriente de corto circuito, el voltaje de circuito abierto y el factor de forma.
- Voltaje y corriente de máxima potencia (V_{MP}, I_{MP}): Indican la tensión y corriente respectivamente a las que se logra la máxima potencia.

3.1.3 Paneles bifaciales

Son un tipo especial de panel fotovoltaico, poseen la particularidad de poder aprovechar la radiación incidente en ambas capas de la célula entregando una mejor eficiencia que un panel monofacial. Presentan un encapsulado similar al de su contraparte, pero difiere en su capa posterior, en este caso se reemplaza la cubierta trasera aislante por una lámina de vidrio similar a la frontal con el fin de permitir el paso a la luz y aprovechar la energía incidente.

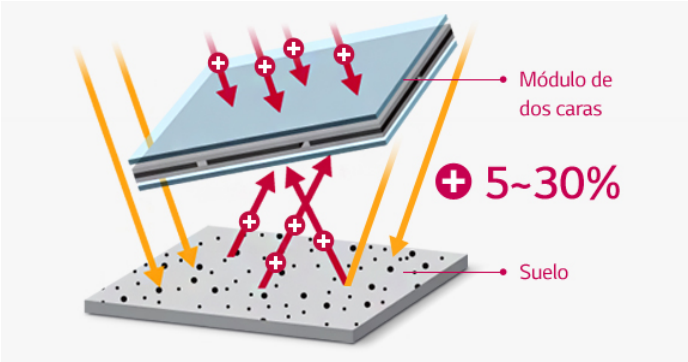

Figura 3-3: La irradiancia reflejada impacta en la cara posterior del módulo FV bifacial [5], aumentando la producción de potencia entre un 5 a 30%.

Debido a su particularidad en necesario poner atención en la superficie sobre la que se posiciona debido a que el material de esta determinará el albedo y por tanto la radiación que logra reflejar conformando así, en conjunto con las otras componentes de radiación a la que se vea expuesta esta cara del panel, la irradiancia sobre la capa posterior y por consiguiente el flujo de energía extra sobre la celda.

Otro punto que destacar con relación a este tipo de paneles son las distintas configuraciones posibles, dependiendo del albedo y radiación difusa existente resulta útil variar el ángulo y lo orientación del panel fuera de los limites conocidos habituales para paneles de tipo monofacial, la generación extra por la capa posterior logra compensar y eventualmente superar, la perdida de energía asociada a la falta de perpendicularidad del panel con la radiación directa.

Figura 3-4: paneles bifaciales en operación [6], se destaca la posibilidad de ubicarlos sin un ángulo de inclinación.

3.1.4 Modelo eléctrico de paneles

Uno de los métodos mediante los cuales es posible modelar el comportamiento de un panel fotovoltaico es modelando los efectos eléctricos asociados por medio de un circuito equivalente.

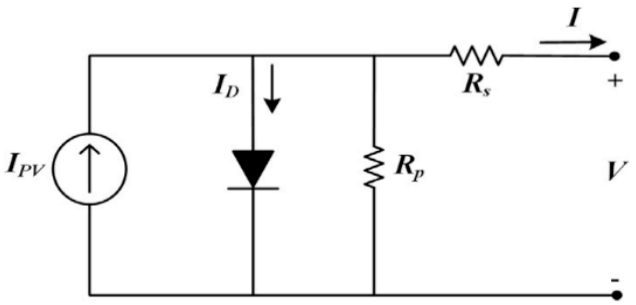

Figura 3-5: Circuito eléctrico equivalente para celda fotovoltaica [7].

En condiciones de baja irradiancia es posible aproximar el comportamiento eléctrico de una celda al de un diodo, a medida que la irradiancia aumenta se genera en la celda una corriente asociada al efecto fotoeléctrico la cual es posible representar mediante una fuente de corriente denominada corriente fotovoltaica (I_{PV}). El circuito formado entre las celdas presenta perdidas asociadas al paso de la corriente por los distintos conductores necesarios para su distribución, estas pérdidas se representan a través de la resistencia (R_S), existen también perdidas asociadas a la propia fabricación de la celda y sus posibles imperfecciones representadas mediante la resistencia R_P, conocida también como resistencia Shunt. Finalmente es posible obtener un potencial V entre los terminales del módulo fotovoltaico que junto a la corriente de salida I determinaran la potencia eléctrica aprovechable.

El parámetro inicial para el modelo es la corriente fotovoltaica la cual es posible determinar a partir de parámetros propios de la celda y condiciones de operación mediante la ecuación 3.2 [7].

$$I_{ph} = I_{pv,STC}\frac{G}{G_{STC}}[1 + K_i(T - T_{STC})] \tag{3.2}$$

A partir de ecuaciones básicas de teoría de circuitos y las ecuaciones que rigen el comportamiento de un diodo en conjunto con la ecuación 3.2 es posible obtener la siguiente expresión para determinar la corriente efectiva entregada por el módulo.

$$I = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{V+R_sI}{nV_T}} - 1\right) - \frac{V + R_sI}{R_{SH}} \tag{3.3}$$

3.2 Modelos térmicos

Un campo importante en el estudio de tecnología fotovoltaica es generar modelos capaces de representar la relación entre la temperatura de operación de un panel y la eficiencia que este desarrolla, ambas variables se encuentran directamente relacionadas por la temperatura a la cual opera la celda. Debido a la configuración física propia del panel resulta extremadamente difícil monitorear directamente esta temperatura, es debido a esto que se generan modelos capaces de predecir los gradientes térmicos dentro del panel con el fin de obtener, a partir de condiciones de operación, una temperatura de celda y su correspondiente eficiencia asociada.

Los modelos térmicos existentes se dividen principalmente en dos categorías [8].

- Modelo estacionario: considera que debido a la inercia térmica del panel y la mínima variación de los parámetros de operación del panel en cortos plazos de tiempo es posible asumir estos cómo constantes, Si las tasas de variación de las pérdidas de calor globales en el entorno del módulo fotovoltaico son pequeñas, se puede suponer que la tasa de transferencia de calor desde el módulo fotovoltaico el ambiente es estable y las temperaturas en cada punto del módulo fotovoltaico son constantes durante el corto período de tiempo.
- Modelo Transiente: modelo que incorpora la variable tiempo considerando su efecto sobre las condiciones de operaciones. Por lo tanto, este enfoque es más realista, considerando la naturaleza de un sistema fotovoltaico y podría proporcionar una predicción más precisa del cambio de las temperaturas operativas del módulo fotovoltaico durante un período de tiempo, especialmente si hay una rápida fluctuación de la radiación solar dentro de un período corto de intervalos de tiempo.

Cada uno de estos modelos se subdivide a su vez en dos posibles métodos de cálculo, estos son el método explicito, donde se predice directamente el valor de la temperatura de celda; y los métodos implícitos, donde la temperatura de celda se obtiene a través de ecuación que utilizan este valor en un proceso iterativo.

Enfocándonos en los modelos transientes se tiene la siguiente ecuación para obtener la temperatura de celda enunciada por Jakhrani y Othman [8]:

$$T_c = T_a + \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}}\right)\left(\frac{9{,}5}{5{,}7 + 3{,}8V_w}\right)\left(T_{NOCT} - T_{a,NOCT}\right)\left(1 - \eta_{m,ref}\right) \qquad (3.4)$$

3.3 Resistencia térmica de contacto

Comúnmente en los análisis de transferencia de calor se aproxima un contacto perfecto en la interfaz entre dos capas de solido por lo que no existe variación de temperatura en esta zona, en la realidad debido a la estructura de los materiales siempre existirá rugosidad en su superficie presentando valles y montes microscópicos, al poner dos materiales en contacto bajo presión algunos de los montes entrarán en contacto perfecto pero existirán zonas en las que coincidan dos valles por lo que existirá un pequeño colchón de aire aislante entre las superficies.

La transferencia de calor entre ambas superficies deberá entonces considerar la resistencia que oponen al flujo de calor estos pequeños colchones aislantes dentro de los cuales existirán fenómenos principalmente de convección, se define entonces un coeficiente denominado conductancia térmica por contacto [9].

$$h_c = \frac{\dot{Q}/A}{\Delta T_{interfase}} \quad \frac{W}{m^2 \cdot °C} \qquad (3.5)$$

Donde;

$\dot{Q}$ es la transferencia de calor considerando contacto solido y brechas
A es el área de contacto
$\Delta T_{interfase}$ es la diferencia de temperatura entre las caras

Esta se relaciona con la resistencia térmica por contacto a través de la siguiente igualdad.

$$R_C = \frac{1}{\mathrm{h_C}} \ \frac{m^2 \cdot °C}{W} \tag{3.6}$$

Cuando se analiza la transferencia de calor en un medio que consta de dos o más capas, lo primero que se necesita saber es si la resistencia térmica por contacto es significativa o no. Se puede responder esta pregunta al comparar las magnitudes de las resistencias térmicas de las capas con los valores típicos de la resistencia térmica por contacto los cuales se encuentran en el rango de 0,000005 a 0,0005 m^2 °C/W [9].

4 Estado del arte.

4.1 Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation

Estudio publicado el año 2014 por investigadores de la School of Energy Science and Engineering, China [10]. Presenta un modelo en elementos finitos para una única celda encapsulada enfocando sus resultados en la distribución de temperatura obtenida en dirección del espesor de dicha celda.

El modelo de basa en la afirmación de que la radiación incidente sobre el módulo se distribuye como generaciones internas en cada capa del arreglo, provocando que solo una parte de la energía logre llegar a la celda. La energía que logra atravesar la capa de encapsulante adyacente a la celda se distribuye, por una parte, en generación interna de calor mientras que la otra da origen a la corriente eléctrica y respectiva potencia desarrollada. Se obtiene un valor efectivo de eficiencia para la celda calculado cómo la razón entre la irradiancia que logra incidir finalmente en esta y la potencia eléctrica desarrollada.

Otro punto importante respecto a este modelo es la geometría utilizada, se diferencia el área central donde se posiciona la celda y los bordes de unión adyacentes limitando la geometría al punto medio de dicha interfaz. Se reconoce entonces la zona central del modelo, en donde se ubica la celda, y la zona exterior en cuya capa central se encuentra la porción de encapsulante que se posiciona entre dos celdas dentro de un panel.

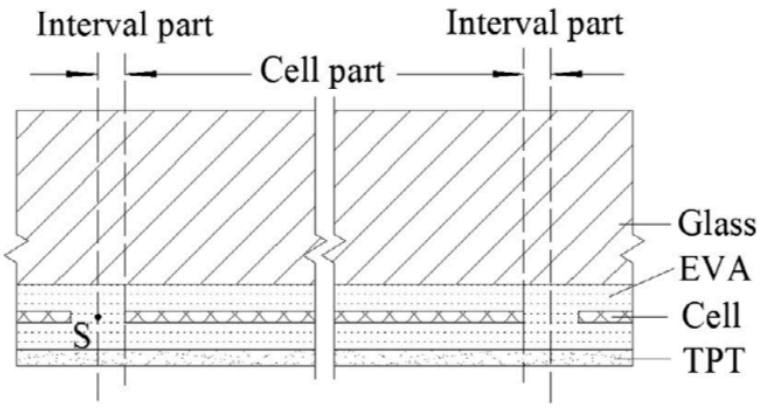

Figura 4-1: Capas y secciones del panel.

Dentro de los resultados obtenidos de este estudio destaca la distribucion de temperatura en el espesor del modulolas temperaturas presentadas según se indica son extraidas en tres zonas del modelo: centro, esquina y punto medio del borde.

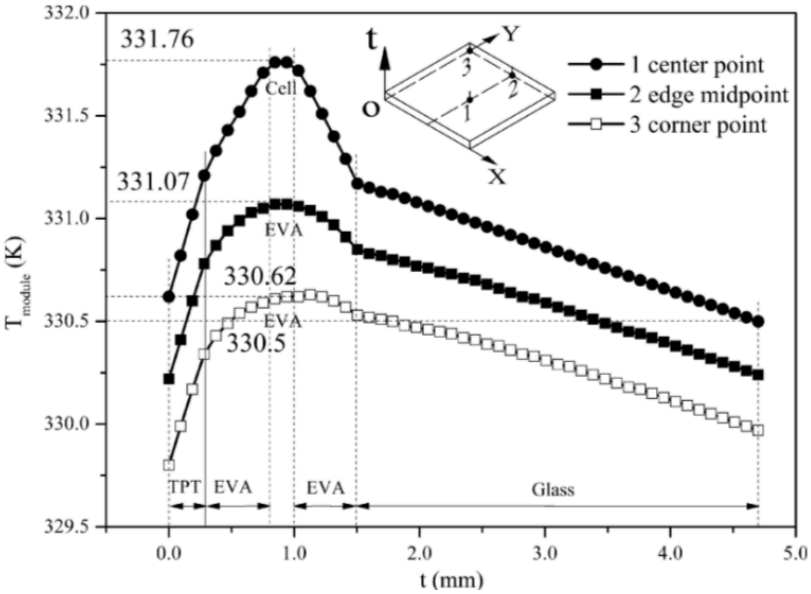

Figura 4-2: resultados modelo Zhou.

4.2 Finite Element Thermal Analysis of a Solar Photovoltaic Module

Estudio publicado por la *National University of Singapore* [11], presenta un modelo en elementos finitos para un panel solar de 72 celdas policristalinas incluyendo su marco de aluminio. El modelo realizado se basa tambien en asumir que la parte de irradiacion solar no reflejada por el vidrio y que no se convierte en electricidad se distribuye cómo energía termica en cada una de las capas.

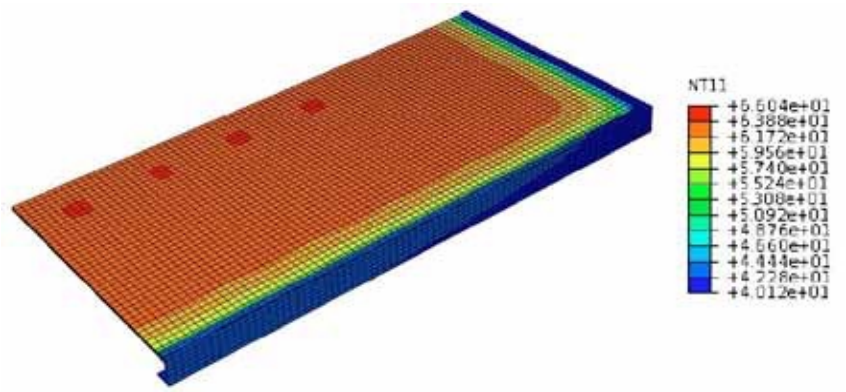

Figura 4-1: distribución de temperatura en panel fotovoltaico

Los resultados aquí obtenidos se enfocan en estimar una temperatura efectiva de celda a partir de sucesivas simulaciones; se presenta ademas la distribucion de temperatura en un plano del panel y una vista general de este.

5 Modelo propuesto

Se considera para este modelo un panel solar policristalino encapsulado. Dentro de la geometría propuesta para el estudio se incluye junto al panel un marco de aluminio que sirve como soporte mecánico para montaje, la geometría propuesta es la siguiente:

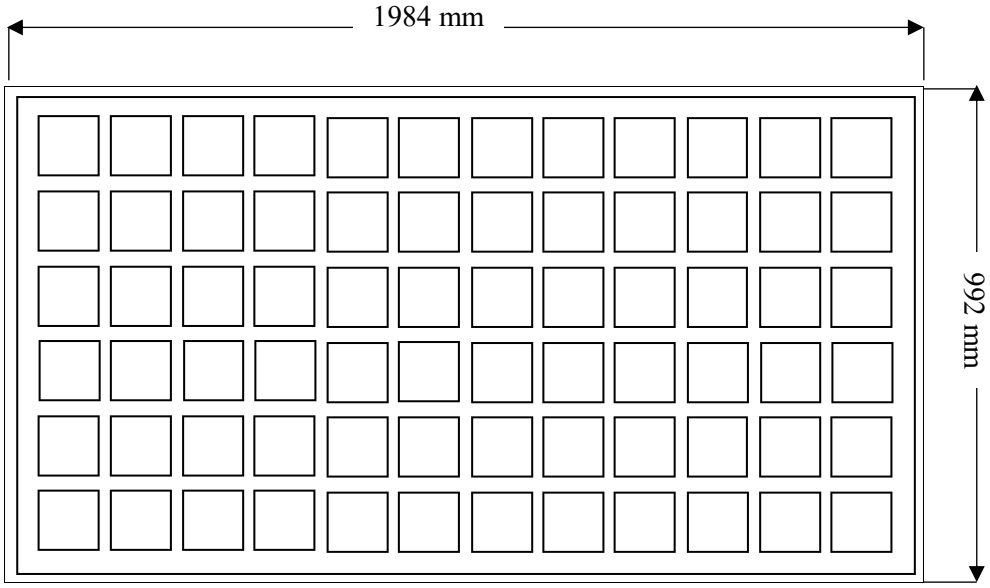

Figura 5-1: Dimensiones generales panel modelo propuesto.

El modelo presenta un total de 72 celdas uniformemente distribuidas.

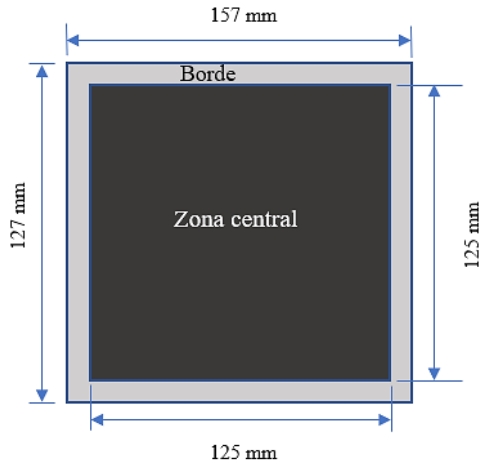

Figura 5-2: Dimensiones de las celdas del modelo.

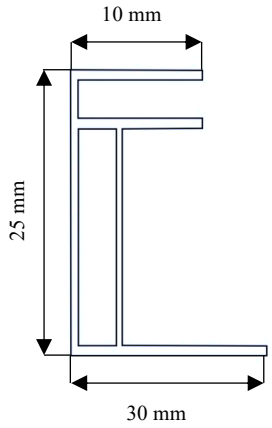

Figura 5-3: Dimensiones del marco del modelo.

Se consideran también las distintas capas que componen el panel y su respectivo material, la primera está formada por una placa de vidrio transparente, esta se encuentra en contacto directo con el ambiente funcionando como protección y soporte de la celda; la siguiente capa es el encapsulante que rodea la celda, este se compone de EVA (Etil Vinil Acetato), un polímero utilizado con el fin de proteger y aislar la celda del medioambiente, evitar fracturas y servir cómo unión entre capas además se ubicarse entre celdas adyacentes dentro del panel; a continuación se encuentra la celda con la cual es posible transformar la radiación en energía eléctrica, debido a lo delicado de su composición es necesario protegerla de cualquier tipo de contacto con el medioambiente; detrás de la celda existe una sección con encapsulante (debido a que su objetivo es rodearla completamente) y finalmente encontramos una lámina de TPT (tedlar-poliester-tedlar), es un compuesto opaco cuya función es reflejar la radiación que trasmitida de las capas anteriores con el fin de que esta vuelva a incidir en la celda.

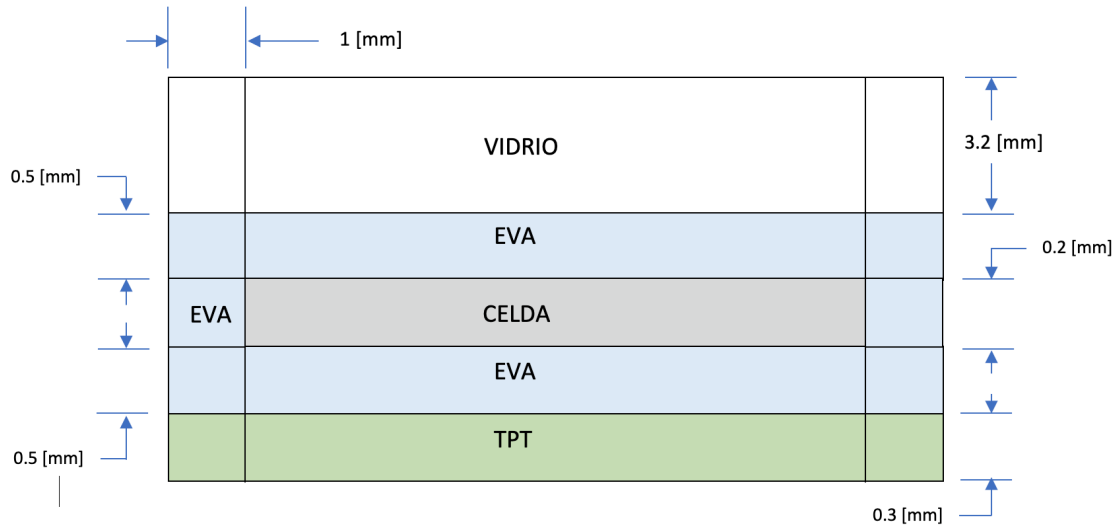

Figura 5-4: espesores de las distintas capas, zona central del modelo.

Las medidas y características para el modelo generado se basan en un panel existente de la marca ASTRONERGY el cual se encuentra montado y operativo en el campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María ubicado en Avda. Vicuña Mackenna 3939, comuna de San Joaquín, Santiago. Se presenta a continuación un cuadro resumen con las principales especificaciones técnicas del panel.

Tabla 5-1: Propiedades panel modelado.

Modelo	ASM6612P310
Potencia nominal	310 Wp
Eficiencia	16,0%
NOCT	46±2°C
Dimensiones celda	156x156 mm

Cada una de las capas que componen el panel están compuestas de distintos materiales por lo que resulta necesario especificar las propiedades termo físicas de cada uno con el fin de ingresar posteriormente al modelo estos parámetros.

5.1 Consideraciones del modelo

El comportamiento térmico del modelo se basa en asumir que la irradiancia global incidente en la celda se distribuye por una parte en generación eléctrica asociada a una respectiva potencia en los terminales del panel gracias a la célula fotovoltaica y por otro lado en generaciones térmicas asociadas a la energía absorbida por cada capa determinada por sus

propiedades ópticas. Esta generación interna se traduce en el aumento de temperatura observado en los paneles por lo cual el modelo presentado se enfoca en representar la variación y comportamiento de dicha temperatura en el volumen del panel. Se cumple entonces la siguiente relación asociada a la distribución de energía:

$$G_{total} = (1 - \eta_{celda})G_{total} + \sum Q_{gen} \tag{5.1}$$

Para el caso de la generación interna Q_{gen} en cada una de las capas se toman en consideración las propiedades ópticas del material utilizando la siguiente ecuación [10]:

$$Q = \frac{(1 - \eta_c) \cdot G \cdot \alpha \cdot A}{V} \tag{5.2}$$

η_c es la eficiencia eléctrica de la celda

G es la irradiancia solar incidente en el cuerpo

A el área de la capa

V el volumen de la capa

α es la absortividad del material

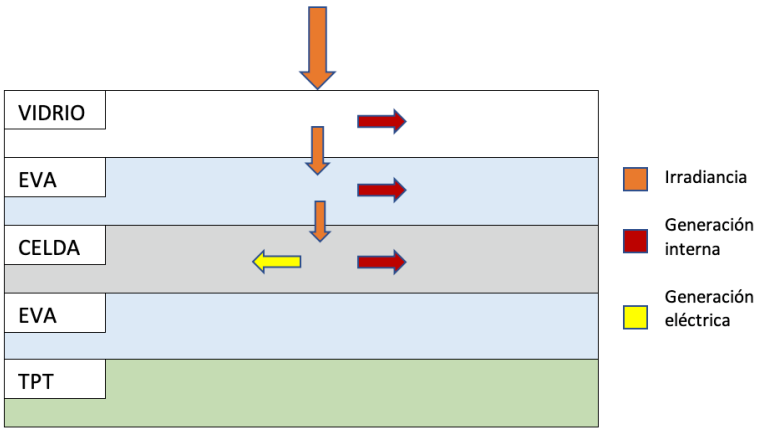

Figura 5-5: Flujos de energía, zona central modelo.

La absortividad de cada sección determina que parte de la radiación incidente es absorbida, debido a que la radiación incidente para cada capa será distinta de la total es necesario obtener la irradiancia efectiva a partir de transmisividad de la capa anterior. Debido a la baja transmisividad de la celda las capas debajo de esta no consideran irradiancia alguna quedando entonces con generación nula; en cuanto a la celda la irradiancia incidente se

traduce tanto en generación interna como la generación eléctrica proporcionada por el módulo solar. La Figura 5-5 representa gráficamente el flujo de energía dentro del módulo.

Ocurre un fenómeno particular en las secciones pertenecientes a la interfaz de dos celdas, debido a que en esta zona hay una capa de EVA en el centro y no la celda, la radiación incidente logra atravesar todas las capas hasta llegar a la cubierta posterior por lo que habrá generación interna en cada capa, en la Figura 5-6 es posible observar el flujo de radiación en la interfaz entre dos celdas adyacentes.

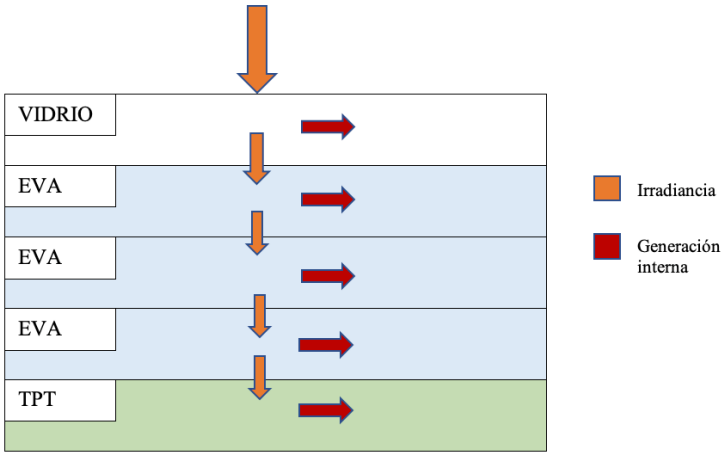

Figura 5-6: Flujos de energía, zona de interfaz modelo.

Las propiedades ópticas de cada material que compone las distintas capas se encuentran detalladas en la tabla **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, estos parámetros son ingresados al modelo con el fin de obtener por medio de la ecuación 5.2 la generación interna en cada capa y poder modelar también la radiación desde el panel al ambiente.

Tabla 5-2: propiedades ópticas de los materiales

Material	Absortividad	Reflectividad	Transmisividad	Emisividad
Vidrio	$4{,}00 \times 10^{-2}$	$4{,}00 \times 10^{-2}$	$9{,}20 \times 10^{-1}$	$8{,}50 \times 10^{-1}$
EVA	$8{,}00 \times 10^{-2}$	$2{,}00 \times 10^{-2}$	$9{,}00 \times 10^{-1}$	
Celda	$9{,}00 \times 10^{-1}$	$8{,}00 \times 10^{-2}$	$2{,}00 \times 10^{-2}$	
TPT	$1{,}28 \times 10^{-1}$	$8{,}60 \times 10^{-1}$	$1{,}20 \times 10^{-2}$	$9{,}00 \times 10^{-1}$

La figura Figura 5-7 muestra un diagrama resumen con los parámetros de entrada para el modelo propuesto, es importante destacar que este logra obtener los gradientes

térmicos para una determinada condición de operación conocida por lo que no es un modelo predictivo de temperatura.

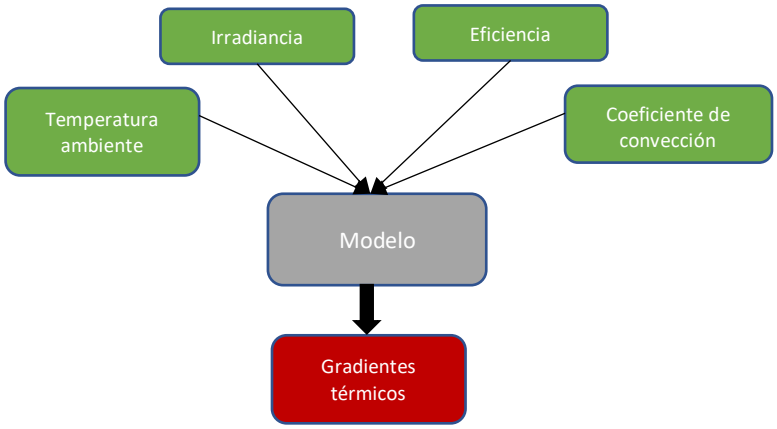

Figura 5-7: diagrama con parámetros de entrada para el modelo propuesto.

5.2 Condiciones de Borde

Las condiciones de borde aplicadas al modelo detallan las consideraciones aplicadas a los fenómenos de transferencia de calor asociados al modelo. En primera instancia se define radiación y convección, posteriormente se detallan los alcances relacionados a la conducción dentro del modelo.

5.2.1 Radiación

La radiación es el fenómeno de transferencia de calor que ocurre entre dos cuerpos a diferentes temperaturas, si bien se encuentra asociado al estado energético de las partículas únicamente existirá un flujo neto de calor en caso de haber un gradiente térmico. La transferencia de calor neta por radiación entre dos cuerpos se obtiene a partir de la siguiente formula [9]:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot F \cdot \sigma \cdot (T_{ent} - T_c) \tag{5.3}$$

ε es la emisividad del cuerpo
F el factor de forma asociado
σ la constante de Steffan-Boltzman

La emisividad indica una proporción de cuanta energía emite un cuerpo según su material, para nuestro caso de estudio resulta relevante la emisividad de las capas del panel

en contacto con el ambiente las cuales son vidrio por la capa frontal, TPT por la parte trasera y Aluminio para el marco que rodea el panel; los valores de emisividad y las distintas propiedades ópticas para cada uno de estos materiales se presentan en *Tabla 5-2*.

Finalmente es necesario establecer las temperaturas involucradas, si bien el modelo busca estimar temperaturas es posible fijar temperatura de las superficies que rodean al panel, como primera aproximación es posible asumir la temperatura del cielo y del suelo como temperatura ambiente [2].

5.2.2 Convección

Debido a que el panel se encuentra en contacto con aire es necesario analizar los fenómenos de convección asociados, convección natural debido a las corrientes ascendentes generadas por masas de aire caliente producto de la elevada temperatura del panel y convección forzada asociada al efecto del viento sobre el panel. Se busca un coeficiente de convección total que logre englobar ambos fenómenos, en la literatura en general se plantean diversas relaciones para obtener este coeficiente utilizando como variable de entrada la temperatura del viento y como condición previa su dirección relativa al panel, a continuación, se presentan distintas relaciones relevantes.

La elección de uno de estos coeficientes para ser aplicado en el modelo dependerá principalmente de las condiciones de operación bajo las cuales opera el panel ensayado . Para una primera aproximación se asume viento en dirección a la cara frontal del panel a una velocidad constante, si bien es poco probable tener ráfagas de viento a velocidad constante en condiciones ambientales es posible trabajar con un promedio debido a la inercia térmica del panel. Finalmente, el coeficiente de convección utilizado será el siguiente [12].

$$h_{conv} = 5{,}67 + 3{,}86\, v \tag{5.4}$$

Esta relación entrega directamente, a partir de la velocidad del viento, el coeficiente de convección para la cara frontal del panel, en cuanto a la cara posterior del panel se utiliza un coeficiente de convección igual a la mitad del obtenido para la cara frontal debido a que la transferencia de calor será considerablemente menos en la superficie que no se enfrenta directamente al viento.

Habiendo fijado las condiciones de transferencia de calor para el modelo la siguiente condición de contorno es establecer las condiciones de radiación solar bajo la cual se encontrará el panel modelado, se considera para este modelo el flujo de energía total por metro cuadrado que llega al módulo por lo que se trabajará con la radiación global, este valor será incorporado como un flujo constante sobre la cara frontal del panel.

5.2.3 Conducción

Los fenómenos de conducción asociados al modelo se desarrollan a partir de las consideraciones propias del software ANSYS, este requiere cómo parámetro las propiedades termo físicas de los materiales. El software permite adicionalmente evaluar como parámetro la conductancia en la interfaz de los distintos cuerpos con el fin de representar las posibles resistencias térmicas de contacto que puedan influir en el modelo.

No fue posible obtener valores certeros de resistencias térmicas por contacto para el panel modelado por lo que se opta por sensibilizar el parámetro con el fin de evaluar si resulta o no significativo para una primera aproximación.

Se grafican a continuación las temperaturas de celda obtenidas para distintos valores de conductancia en la zona de contacto entre capas; irradiancia, temperatura ambiente, temperatura del aire y coeficiente de convección se mantuvieron constantes en las distintas pruebas.

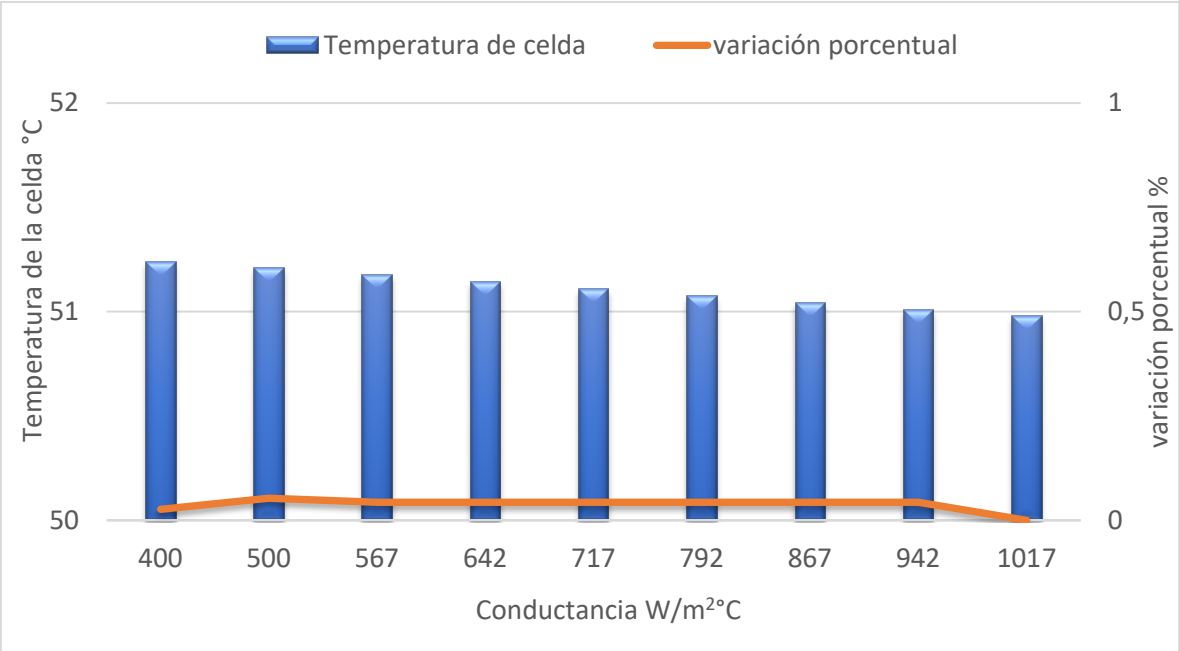

Gráfico 5-1: muestra las variaciones en la temperatura de celda provocadas por variaciones en la conductancia entre capas, a medida que esta última aumenta la variación porcentual de temperatura baja de 0,5%.

El Gráfico 5-1 muestra cómo a medida que se aumenta la conductancia entre las capas la temperatura de la celda también disminuye debido a que mejora la transferencia de calor en todo el cuerpo. La variación porcentual de temperatura (línea naranja) representa el porcentaje de variación para la temperatura frente a la variación unitaria de la conductancia, este parámetro permite notar cómo al utilizar una conductancia sobre 50 W/m^{2}°-C el efecto de las resistencias por contacto sobre la temperatura de la celda es inferior a un 3% y sobre 200 el efecto se vuelve nulo para esta situación. En general los valores de conductancia típicos entre superficies en contacto varían entre 2.000 y 200.000 W/m^{2}C [9], rango en el cual el modelo presenta sensibilidad nula al parámetro. Debido a los resultados descritos se decide no considerar la resistencia por contacto en el modelo para una primera aproximación.

5.3 Simulación en Ansys

Con el fin de generar resultados que permitas identificar visualmente gradientes y distribuciones de temperatura de manera simple y cómoda se utiliza el software de simulación por elementos finitos ANSYS.

La simulación del modelo propuesto se realiza en base a la suposición de que el panel alcanza un estado estacionario considerando la baja fluctuación en la radiación durante pequeños lapsos de tiempo y principalmente en la inercia térmica del panel, debido a esto se utiliza el módulo THERMAL STEADY del programa. Inicialmente se incorporaron al programa las características térmicas de los distintos materiales presentes en el módulo solar.

Posteriormente se genera la geometría del problema, resulta necesario para el correcto funcionamiento de la simulación establecer cada una de las secciones como cuerpos independientes diferenciando tanto entre zonas como entre cada capa, se obtienen un total de 72 cuerpos, se genera un mallado cuadrado refinándolo en la interfaz de cada una de las capas con el fin de obtener resultados precisos asociados a su interacción.

Se ingresan al programa las generaciones internas para cada cuerpo calculadas a partir de la irradiancia considerada y un valor de eficiencia inicial el cual será iterado posteriormente a partir de la ecuación 3.2, se incorporan también al modelo las condiciones de contorno descritas en la sección anterior estableciendo temperatura ambiente, velocidad del viento y temperatura inicial del módulo, esta ultima se asume como uniforme en todos los cuerpos e igual a la temperatura ambiente.

Cómo primer punto previo a la revisión de los resultados obtenidos se evalúa la convergencia del mallado utilizado con el fin de garantizar que existe concordancia por parte del modelo y el proceso de simulación aplicado.

Se plantea la variación de los parámetros respectivos a la malla realizando simulaciones consecutivas sin variar los datos de entrada del modelo, manteniendo por tanto el régimen de funcionamiento para el panel modelado. Específicamente se reduce el tamaño máximo de elemento con el fin de encontrar un tamaño dentro del rango en que los resultados obtenidos para el modelo se vuelven independientes de dicho tamaño asegurando así la convergencia e independencia de los resultados frente al tamaño de elemento finito.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos para distintos tamaños de elemento simulando en condiciones STC.

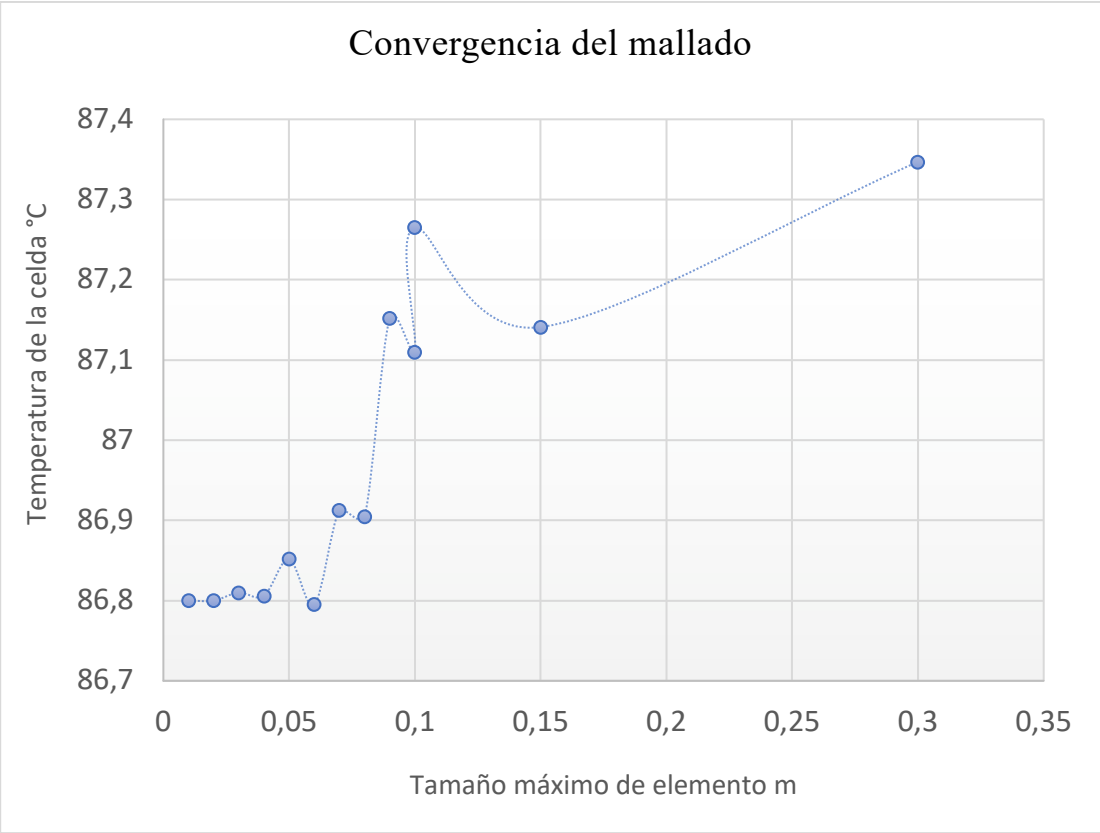

Gráfico 5-2: variaciones en la temperatura de celda frente a distintos tamaños de elementos en el mallado, frente a elementos de tamaño inferior a 0,05m la malla se vuelve estable.

Es posible observar en el Gráfico 5-2 cómo al utilizar elementos de tamaño cercano a 0,1 m existen considerables variaciones en los resultados obtenidos, si bien estas variaciones son inferiores a un grado es necesaria su consideración al estudiar gradientes térmicos dentro del paneles. Tamaños de elemento inferiores a 0,03 m asegurar mínimas fluctuaciones entre los resultados obtenidos, y por tanto, aseguran la congruencia entre los resultados obtenidos para distintas casos simulados.

6 Validación

6.1 Método de validación

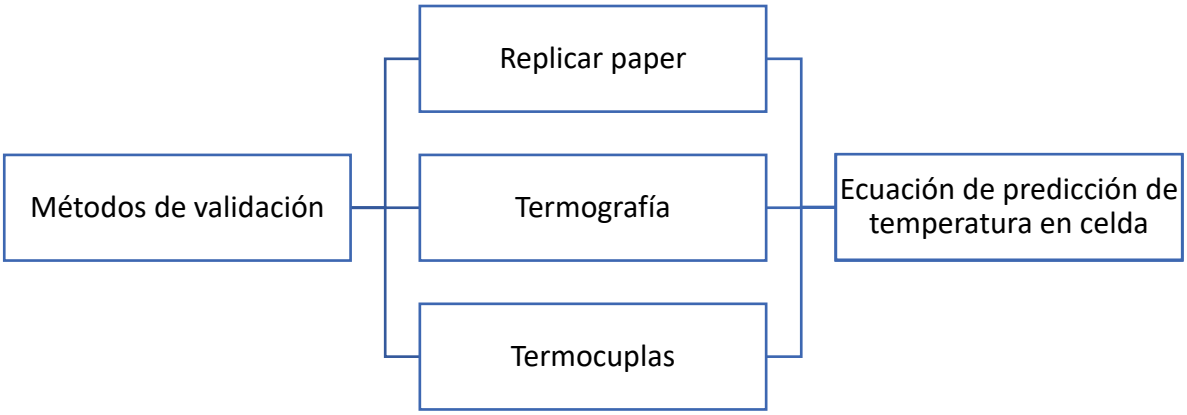

Figura 6-1: etapas de validación para el modelo propuesto.

6.1.1 Consistencia hipótesis inicial

Cómo primer método de validación se busca replicar los resultados obtenidos en el documento del año 2014 titulado "Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation" con el fin de evaluar la hipótesis de la absorción de energía en las capas, si bien la geometría de este estudio no es la propuesta para el modelo desarrollado se utiliza el mismo principio de distribución de energía.

6.1.1.1 Geometría

Para la geometría se considera una celda solar policristalina encapsulada que llamaremos en adelante módulo, dicho módulo considera la interfaz entre dos celdas adyacentes las cuales se encuentran uniformemente espaciadas dentro de un panel, obtenemos entonces la configuración presentada en la Figura 6-2.

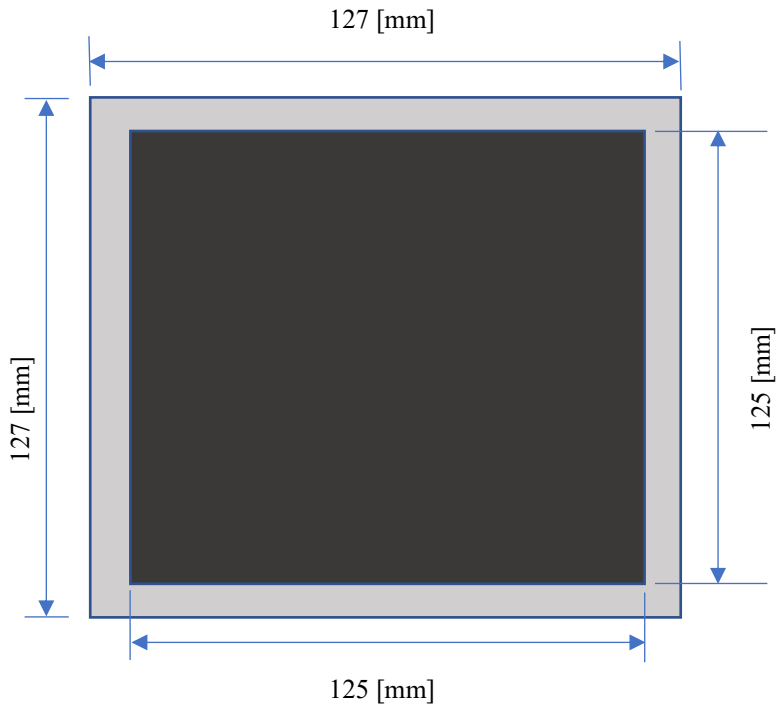

Figura 6-2: vista superior del modulo, diferencia la zona de la celda y la de interfaz con las celdas adyacentes

La distribución, componentes y espesores para cada una de las capas son semejantes a los ya presentados en el modelo propuesto, puntualmente dichos espesores son resumidos en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1: detalle de las capas que componen el modulo y sus espesores respectivos

Material	Vidrio	EVA superior	Celda	EVA inferior	TPT
Espesor [mm]	3,2	0,5	0,2	0,5	0,3

El modelo propuesto por Zhou presenta dos zonas de estudio, la zona de la celda (ubicada en el centro del modelo) y la zona de contorno (ubicada en los bordes del modelo) correspondiendo esta última a la sección de interfaz entre celdas adyacentes. Cada zona cuenta con las cinco capas características previamente detalladas variando únicamente su capa central, siendo EVA para los contornos y la celda para la zona central.

6.1.1.2 Consideraciones del modelo

El comportamiento térmico del modelo se basa en asumir que la irradiancia total, considerada como 1000 W/m^2 para este caso, se distribuye entre la generación eléctrica y

generaciones térmicas asociadas a la energía absorbida por cada capa determinada por sus propiedades ópticas cumpliendo entonces con la relación presentada en la ecuación 5.2, la simulación se realiza de manera similar al modelo iterativo expuesto 5.7.

6.1.1.3 Condiciones de contorno

El módulo modelado se encuentra expuesto a condiciones ambientales por lo que se encuentra afectado por radiación y convección, si bien estos fenómenos ocurren en toda la capa exterior del modulo para el modelo planteado por Zhou se asumen adiabáticos los bordes por lo que los procesos de transferencia de calor mencionados son aplicados únicamente en las capas superior e inferior, vidrio y TPT respectivamente. Se entrega la emisividad del vidrio y TPT siendo posible calcular la transferencia de calor por radiación por medio del software *ANSYS* mientras que, para la convección, se obtiene el coeficiente de trasferencia de calor en la capa superior a partir de la siguiente ecuación [12].

$$h = 5.82 + 4.07\, v \qquad (6\text{-}1)$$

Siendo v la velocidad del viento. Para la parte posterior del módulo el coeficiente de transferencia de calor por convección se considera como la mitad del obtenido para la parte frontal debido a que normalmente la parte posterior no se encuentra tan bien enfriada como la parte frontal [11], estableciendo la velocidad del viento como 1 $^{m}/_{s}$ se obtienen los siguientes coeficientes de convección.

$$h_{conv,sup} = 9.89\, {}^{W}/_{m^2K} \qquad (6\text{-}2)$$

$$h_{conv,inf} = 4.945\, {}^{W}/_{m^2K} \qquad (6\text{-}3)$$

6.1.1.4 Resultados obtenidos y análisis

Se detallan a continuación los resultados obtenidos el replicar le modelo propuesto por Zhou y realizar simulaciones de este en el modulo Thermal Steady de ANSYS, se generan distintos planos para pruebas de temperatura en tres secciones del modelo (centro, esquina y borde).

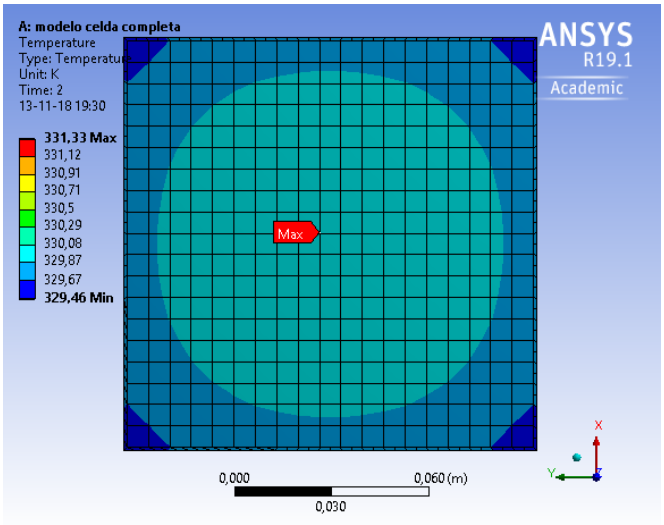

Figura 6-3: vista superior de la celda, muestra los gradientes y patrones térmicos generados en la superficie

La**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 6-3 muestra una vista superior del modelo (vidrio), podemos ver como la mayor temperatura se alcanza en el centro del modelo y decae hacia los extremos siendo mínima en las esquinas. Analizamos a continuación la distribución de temperatura en el espesor del modelo para la sección del plano central.

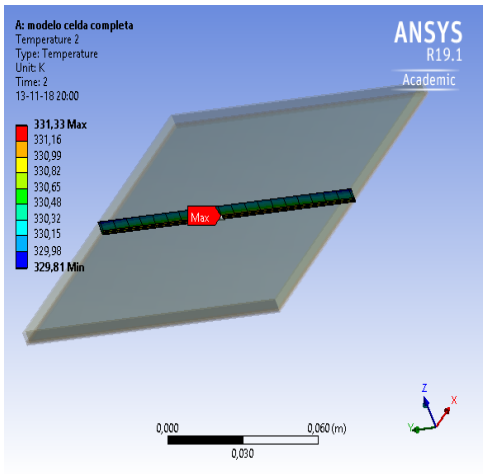

Figura 6-4: indica el plano en dónde se estudiarán los gradientes térmicos y específicamente la temperatura de celda.

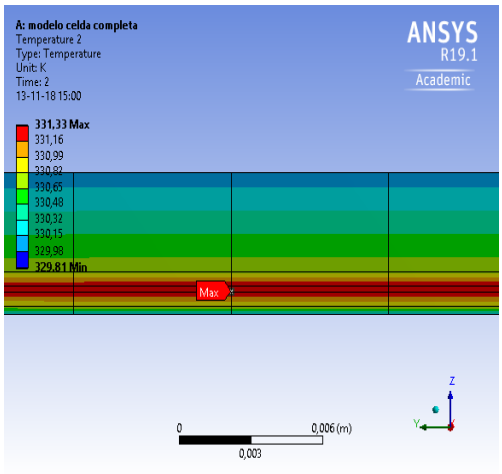

Figura 6-5: gradiente térmico en el espesor de la celda, es posible observar una diferencia superior a un grado entre celda y superficie de vidrio.

La Figura 6-4 muestra la posición del plano mostrado en la Figura 6-5, dicha figura se encuentra orientada de igual manera que la Figura 6-4 por lo que si recorremos en el eje Z en sentido positivo iremos desde TPT hasta el vidrio. La temperatura en este plano es mayor en la sección donde se encuentra la celda, decae de igual manera a través del EVA llegando a su valor mínimo en el extremo del vidrio y TPT debido a las condiciones de borde de modelo (radiación y convección). Continuando con los resultados nos enfocamos en el contorno del modelo.

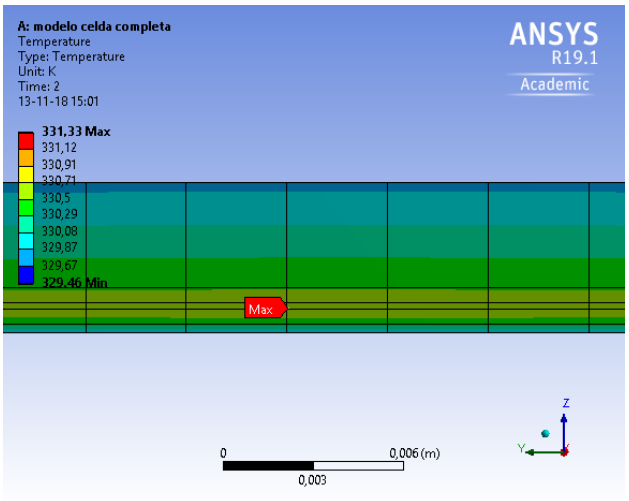

Figura 6-6: distribución de temperatura obtenida par el plano lateral del modelo generado presenta la temperatura máxima y mínima obtenidas.

En la Figura 6-6 se presenta la misma distribución vista en la Figura 6-5 pero en este caso es para el borde del modelo. La máxima temperatura alcanzada en esta sección es menor a la obtenida en el plano central debido a que estamos en la zona de contorno descrita inicialmente por lo que en la posición del eje z donde debería estar la celda vemos el encapsula (EVA) de la interfaz entre dos módulos, este debido a sus propiedades termo físicas alcanza una temperatura menor a la obtenida en la celda. La temperatura decae hacia los extremos alcanzando valores mínimos en la zona superior e inferior.

Con el fin de observar como varía la temperatura en las zonas más frías analizamos las imágenes para una de las aristas del modelo.

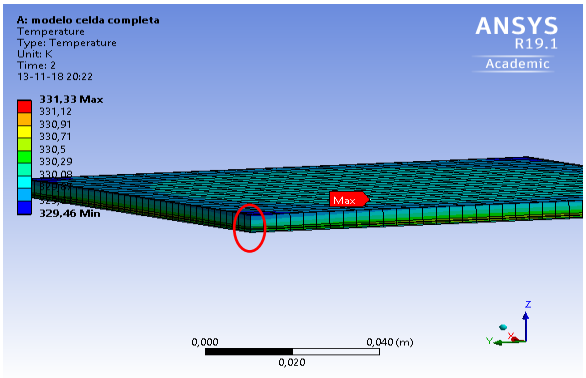

Figura 6-7: vista general sección de estudio

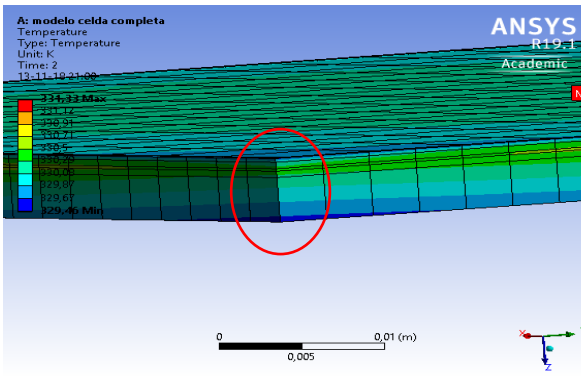

Figura 6-8: acercamiento a esquina del modelo, el circulo rojo presenta la zona evaluada

El circulo rojo presente tanto en la figura Figura 6-7 como la Figura 6-8 señala nuestra tercera sección de estudio, podemos ver como la temperatura decae más rápidamente llegando a valores inferiores que el resto del modelo, esta arista es parte de la zona de contorno descrita en un inicio por lo que el punto de mayor temperatura es el EVA, específicamente el que rodea a la celda.

Habiendo obtenido las distribuciones de temperatura en las tres zonas de estudio se procede a generar un gráfico que muestre dicha distribución en base a valores discretos tomados desde una línea perpendicular a la superficie del módulo en cada sección.

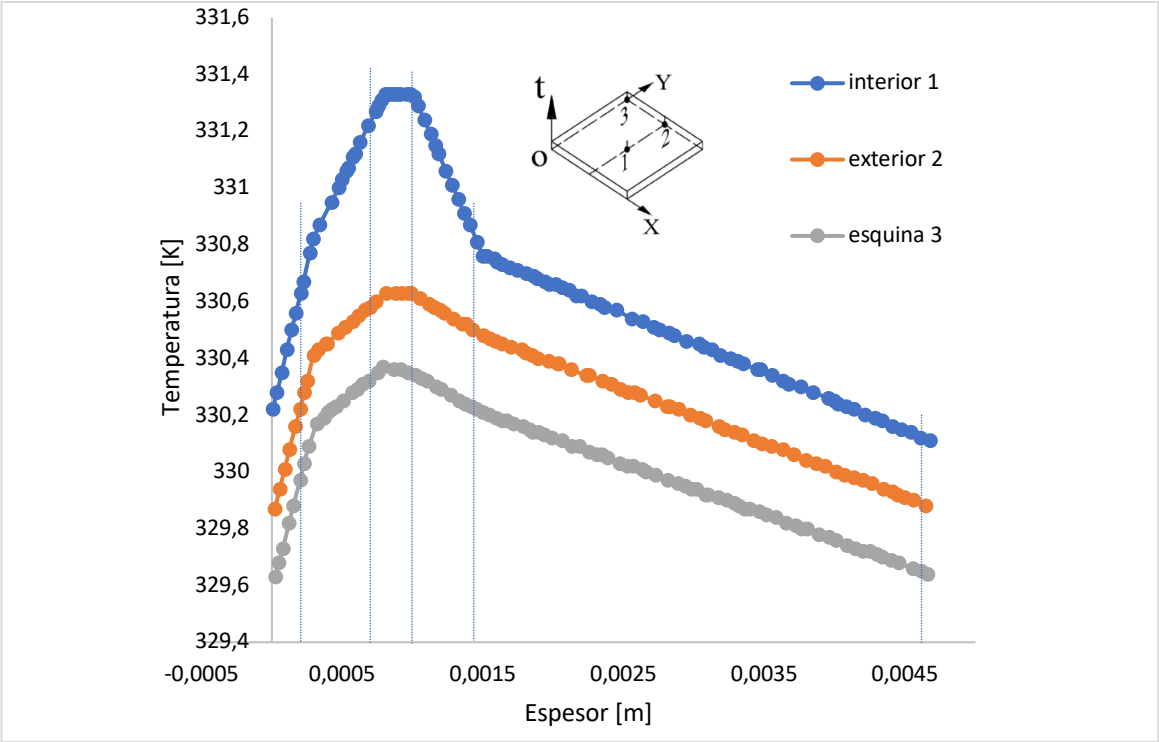

Gráfico 6-1: perfiles de temperatura obtenidos para cada una de las zonas descritas, es posible observar una diferencia superior a un grado comparando la celda y la superficie del módulo.

Las líneas verticales en el gráfico indican cual es la capa correspondiente partiendo desde TPT en la izquierda hasta vidrio a la derecha, la temperatura máxima para el modelo se alcanza en el centro de la celda y la mínima en los extremos de la arista siendo 331,33[K] y 329,46[K] respectivamente.

6.1.1.5 Comparativa con resultados esperados

Se extraen a partir del grafico presentado en el documento el conjunto de puntos que lo forman con el fin de tener un modelo para comparar los resultados obtenidos, se presenta a continuación la distribución de temperatura para la sección central del modulo tanto para el modelo desarrollado como la obtenida a partir de los puntos del grafico presente en el documento.

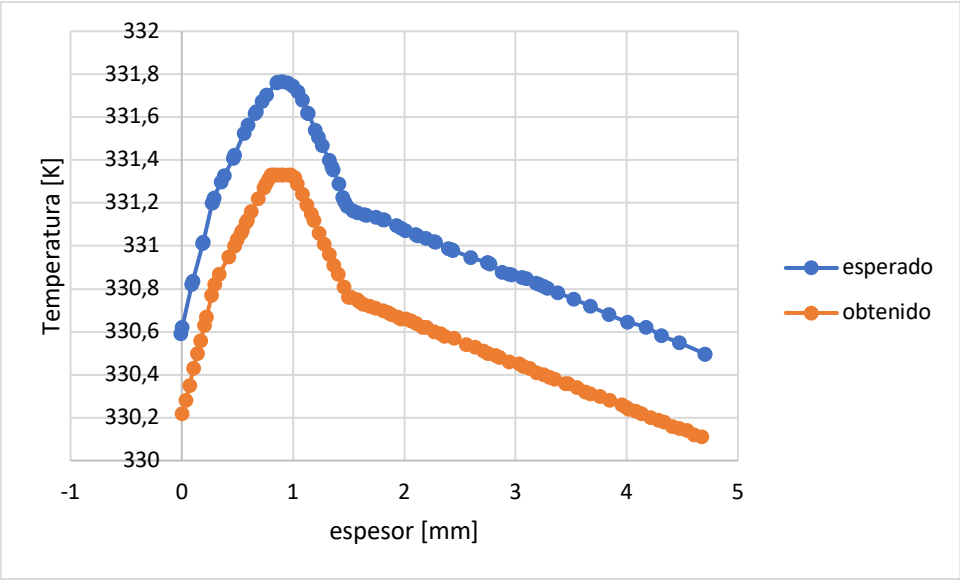

Gráfico 6-2: comparación entre el resultado obtenido con el modelo propuesto (naranjo) y los valores presentados por el estudio analizado (azul).

Podemos ver que, si bien se obtuvo una distribución muy similar, esta difiere de 0,4[k] del resultado esperado.

6.1.1.6 Observaciones

Finalmente se plantean algunos puntos erróneos o sobre los que no se obtuvo información detallada además de algunas consideraciones para tener a futuro.

- La generación interna de calor para la capa de encapsulante sobre la celda indicada en el documento examinado presenta un error en su orden de magnitud, el valor de 1,47x10 debería ser de $1{,}47 \times 10^2$
- Los valores de generación interna entregados en la tabla presente en el documento estudiado para la zona de contorno no se condicen con la formula ahí presentada o con la explicación de sus variables
- No existe mayor explicación sobre la relación presentada para los coeficientes de convección frontal y trasero, si bien se indica que normalmente la parte posterior se encuentra menos refrigerada no existe mayor explicación de porqué el posterior equivale a la mitad del superior

- No fue posible verificar el origen de la ecuación 3 para obtener el coeficiente de convección a partir de la velocidad del viento debido a que esta relación proviene de un documento protegido al cual no fue posible acceder
- Si bien dentro de las configuraciones en el módulo THERMAL STEADY de ANSYS el tipo de contacto fue considerado como “bonded” en la interfaz de dos materiales distintos y como “no separation” en la interfaz de dos cuerpos con el mismo material no existe mayor análisis sobre las resistencias de contacto entre las distintas capas
- Debido a que no fue posible calcular directamente los valores para las generaciones internas en la zona de contorno y considerando que los valores obtenidos para zona central eran levemente mayores a los expuestos en el documento por las cifras significativas y unidades utilizadas (los valores aparecen truncados) se espera que el modelo tenga una temperatura levemente mayor, si bien dicho aumento de temperatura reduciría la brecha con la curva esperada queda pendiente revisar las consideraciones ya mencionadas con el fin de obtener los resultados esperados o por el contrario validar completamente este nuevo modelo.

6.1.2 Validación con datos empíricos

El siguiente paso para la validación del modelo propuesto es comparar los resultados obtenidos de la simulación con datos empíricos, cómo primera opción se utilizan imágenes obtenidas por medio de termografía con el fin de validar la distribución de temperaturas sobre la cara frontal del panel, posteriormente se posicionan termocuplas capaces de registrar temperatura superficial con elevada precisión tanto en la cara posterior del panel cómo en la cara frontal con el fin de validar temperaturas puntuales entregadas por el modelo y los gradientes térmicos generados en el espesor del panel.

Debido a que los parámetros necesarios para el modelo se obtienen a partir de las condiciones ambientales bajo las cuales se realizan las validaciones, se detallan a continuación estos parámetros y cómo serán obtenidos.

Potencia electrica: se obtiene a partir de los datos registrados en un datalloger conectado a un microinversor con el cual trabaja el panel ensayado

Radiacion global: se obtiene a partir de los datos que registran un conjunto de piranometros incluyendo irradiancia directa en el plano en que se encuentra el panel y radiacion difusa percibida en su punto de ubicación.

Temperatura ambiente y velocidad del viento: obtenidos desde estación meteorologica.

6.1.2.1 Termografia

La termografía es una herramienta utilizada para medir la distribución térmica de un cuadro determinado. Las cámaras térmicas detectan la radiación en el rango IR emitida por los objetos, asignándoles una escala de colores según la cantidad de radiación IR que estos emiten.

Con el fin de obtener la distribución de temperaturas en la cara frontal de panel se obtienen fotografías por medio una cámara infrarroja bajo determinadas condiciones de irradiancia, velocidad de viento y temperatura ambiente. Posteriormente se evalúan estas condiciones en el modelo propuesto y se comparan los resultados obtenidos, la imagen x muestra un ejemplo de los resultados obtenidos.

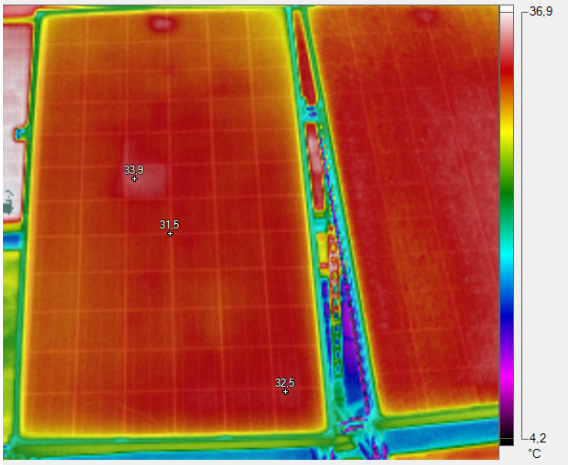

Figura 6-9 Termografía, se presentan los principales puntos calientes dentro del modelo, se destacan los puntos de máxima temperatura en el panel y los valores obtenidos.

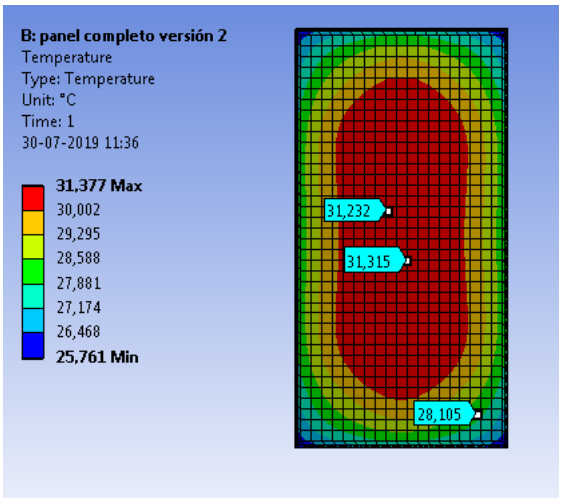

Figura 6-10 Simulación, se destacan los puntos de máxima temperatura en el panel y los valores obtenidos.

Es posible observar en principio una distribución similar para ambos resultados, el centro del panel es el punto de mayor temperatura mientras esta decae hacia los bordes siendo específicamente el marco de aluminio el punto más frío.

Si bien los resultados obtenidos a partir del modelo muestran una distribución simétrica disminuyendo la temperatura desde el centro a los bordes la termografía revela ciertos puntos calientes dentro del panel.

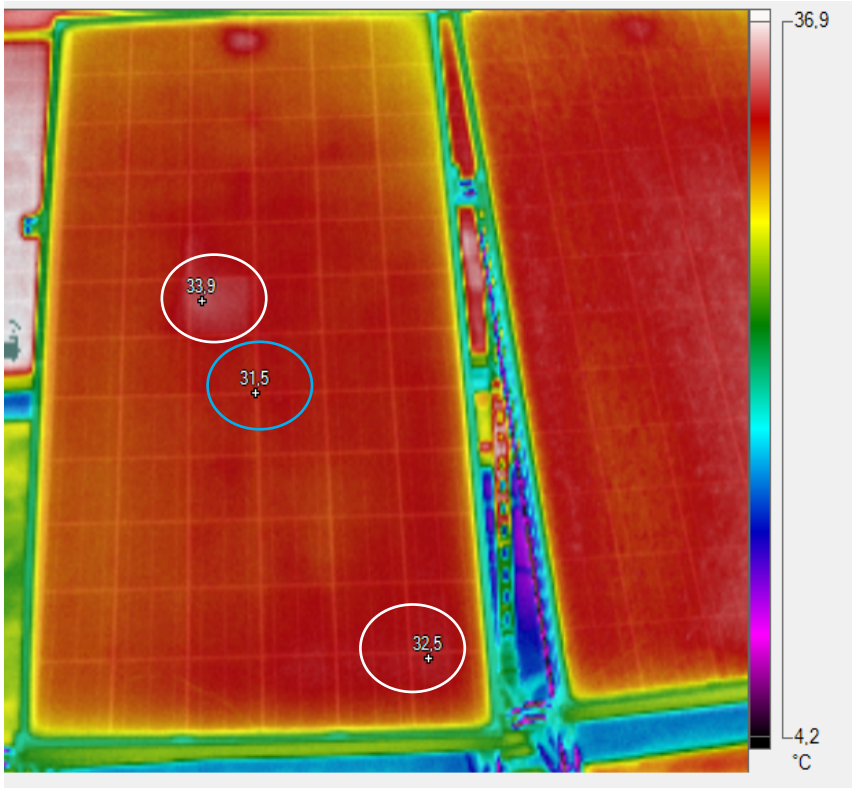

Figura 6-11: muestra los puntos del panel en que la temperatura sobrepasa la esperada (círculos blancos) y la temperatura del punto central del modelo (circulo celeste).

El circulo azul muestra el punto central del panel donde se esperaría registrar la mayor temperatura, 31.315ºC según el modelo. Si bien la temperatura registrada difiere en menos de 2 decimas de grado con la esperada, se registran puntos con una mayor temperatura dentro del panel alcanzando diferencias de hasta 2 grados.

Estos puntos de mayor temperatura señalados en los círculos blancos exponen un punto a considerar para futuros trabajos a partir del modelo, ya que si bien este presenta una buena aproximación del régimen de operación de un panel es necesario incorporar efectos

puntuales que pueden ocurrir sobre los paneles ensayados desatacando los puntos de conexión eléctrica en la parte posterior de los paneles y, en general, cualquier tipo de sensor que pueda ser adosado generando una alza de temperatura local, por otro lado es importante considerar el efecto que tendrá sobre la sección inferior de los paneles su proximidad al suelo, la reflexión en la superficie provocará un aumento en la irradiancia percibida por el panel debido al aumento en la componente reflejada. En términos generales cualquier perturbación o cuerpo próximo al panel provocará variaciones locales de temperatura las cuales deben ser incorporadas en el modelo con el fin de obtener una mejor aproximación

6.1.2.2 Termistores

Los termistores son sensores capaces de registrar temperaturas con una elevada precisión, operan por conducción de calor por lo que requieren ser posicionados en contactos con la superficie cuya temperatura se desea medir.

Los equipos utilizados para este ensayo fueron posicionados siguiendo la distribución presentada a continuación

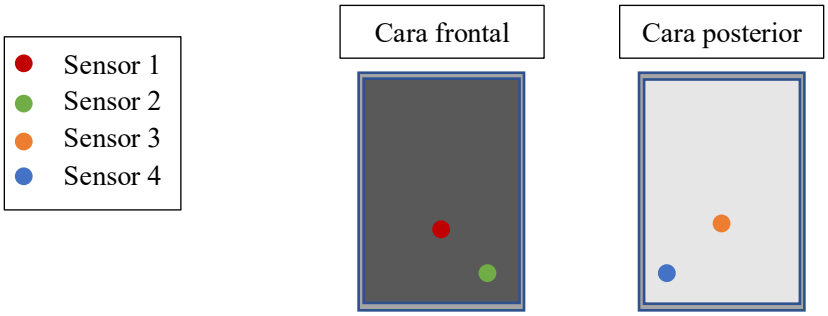

Figura 6-12: diagrama con las posiciones establecidas para los sensores de temperatura ubicados en la cara frontal y posterior del panel.

La metodología utilizada consiste en registrar los valores de temperatura para distintos puntos del panel cada un minuto a lo largo de 96 Hrs con el fin de obtener, en conjunto al resto de variables anteriormente descritas, distintas condiciones de operación en las cuales testear el modelo desarrollado para posteriormente comparar las temperaturas superficiales obtenidas con las esperadas.

Se obtuvo un universo de más de 2000 posibles combinaciones en régimen de operación para el panel por lo que se seleccionan 350 escenarios representativos para validar el modelo propuesto considerando que debido a la inercia térmica del panel los cambios de temperatura en este no son instantáneos por lo que se necesita cierto rango de tiempo para que el panel encuentre un punto de equilibrio térmico y eléctrico. Se presentan a continuación los resultados obtenidos para el proceso de validación planteado.

Figura 6-13: cara posterior del panel ensayado, se muestra la posición de los sensores

Figura 6-14: cara frontal del panel ensayado, se muestra la posición del sensor utilizado

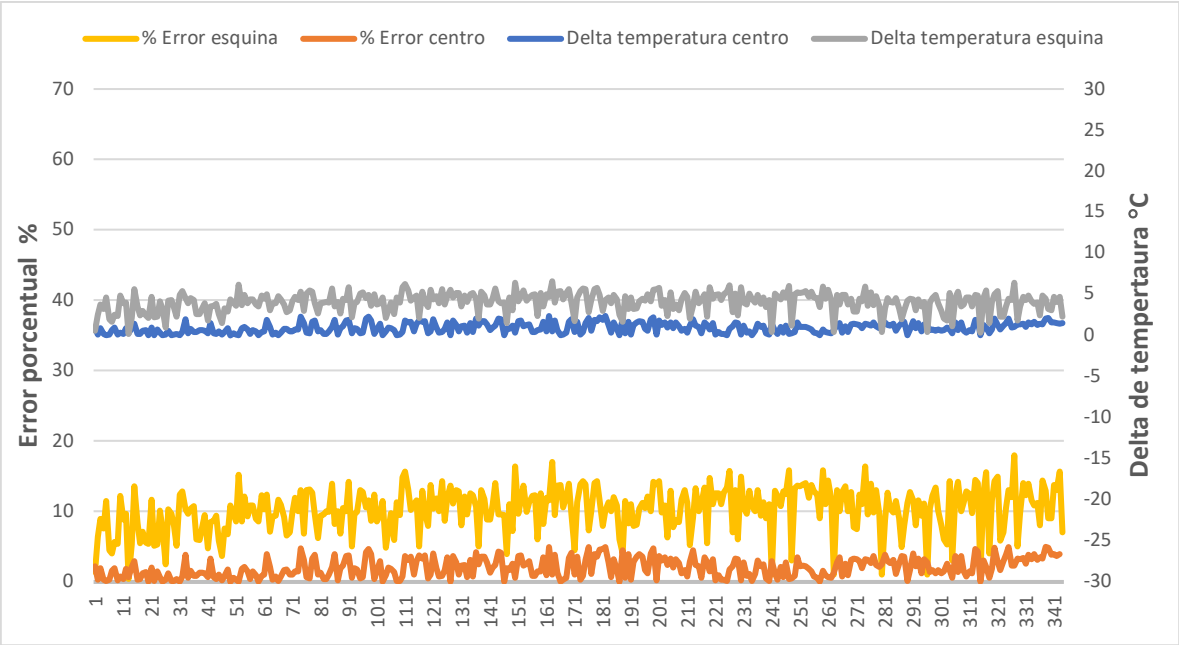

Gráfico 6-3; variación porcentual y diferencias de temperaturas obtenidas en las pruebas de validación del modelo, los resultados presentan un error porcentual inferior al 5%.

Se comparan los valores de temperatura medidos en el panel con los obtenidos a partir del modelo en la misma posición elegida para los sensores, la curva en color azul muestra la diferencia entre el valor registrado por el sensor 1 y la temperatura obtenida por el modelo, es posible afirmar que el este difiere cómo máximo en 3 °C del valor medido en la superficie del panel lo que equivale a un error inferior al 5% (curva azul). Para el caso de sensor posicionado en la esquina inferior del panel la curva en color amarillo presenta diferencias de hasta 6°C equivalentes a un 16% de error. Al igual que con la termografía en posible observar los efectos tanto del suelo como del panel posicionado al costado del modulo ensayado sobre la temperatura en sección más próxima a estos, en necesario incorporar cualquier tipo de perturbación en secciones puntuales del panel para obtener mejores resultados en futuras simulaciones.

En general es posible afirmar que si bien el modelo presenta diferencias que pueden alcanzar un 16% con los valores de temperatura reales del panel presenta una buena aproximación considerando que cómo máximo, y puntualmente en una de las esquinas, existen deltas de temperatura de tan sólo 6°C y para el caso de la zona central del modelo este valor se reduce a un máximo de 3°C.

6.2 Ecuación de predicción de temperatura en la celda

Con el fin de realizar simulaciones en el modelo propuesto y considerando que este puede únicamente representar una condición de operación conocida se propone vincularlo a la ecuación 3.2 con el fin de realizar iteraciones y poder obtener una predicción de temperatura para condiciones propuestas.

Una vez que el programa entrega las temperaturas correspondientes a partir de una eficiencia dada se realiza las validaciones e iteraciones respectivas a partir de la ecuación x con el fin de obtener la eficiencia real del modulo bajo las condiciones de operación simuladas ya que si bien la generación interna de cada cuerpo dependerá únicamente de la irradiancia y sus propiedades ópticas, los flujos de calor y, por tanto, sus temperaturas en estado estacionario, dependerán de como varían las condiciones de contorno determinando a su vez la eficiencia, generación interna y temperatura de la celda.

Se sigue entonces el siguiente algoritmo para obtener una correcta distribución de temperatura:

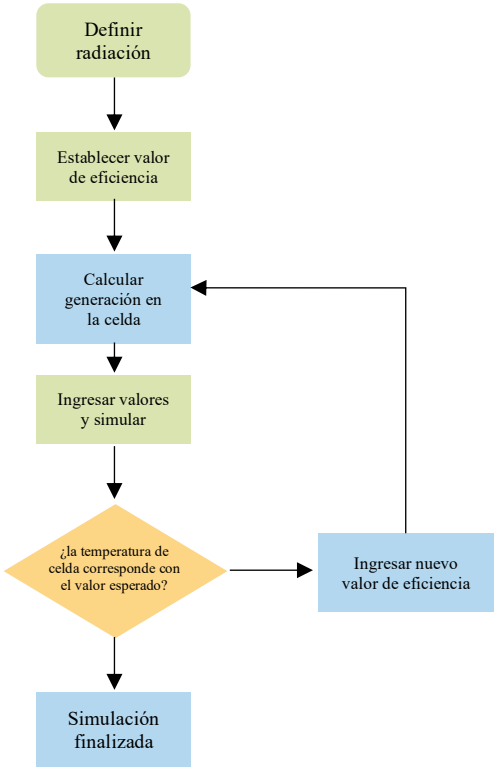

Figura 6-15; diagrama resumen del proceso iterativo utilizado para simular las condiciones a estudiar en el modelo propuesto.

Debido a que las validaciones anteriormente descritas evaluaron únicamente el modelo planteado bajo condiciones conocidas se propone un nuevo método de validación para la ecuación de predicción de temperatura utilizada, este consiste en plantear distintas combinaciones de parámetros conocidos y comparar los resultados de temperatura obtenidos con el modelo y los entregados por la ecuación propuesta, si bien esta metodología no valida completamente la ecuación, en comparación a un proceso realizado con datos empíricos, únicamente se busca que esta sea consistente con el modelo para realizar iteraciones y obtener resultados simulados quedando la validez de estos sujeta a la validación ya presentada para el modelo propuesto.

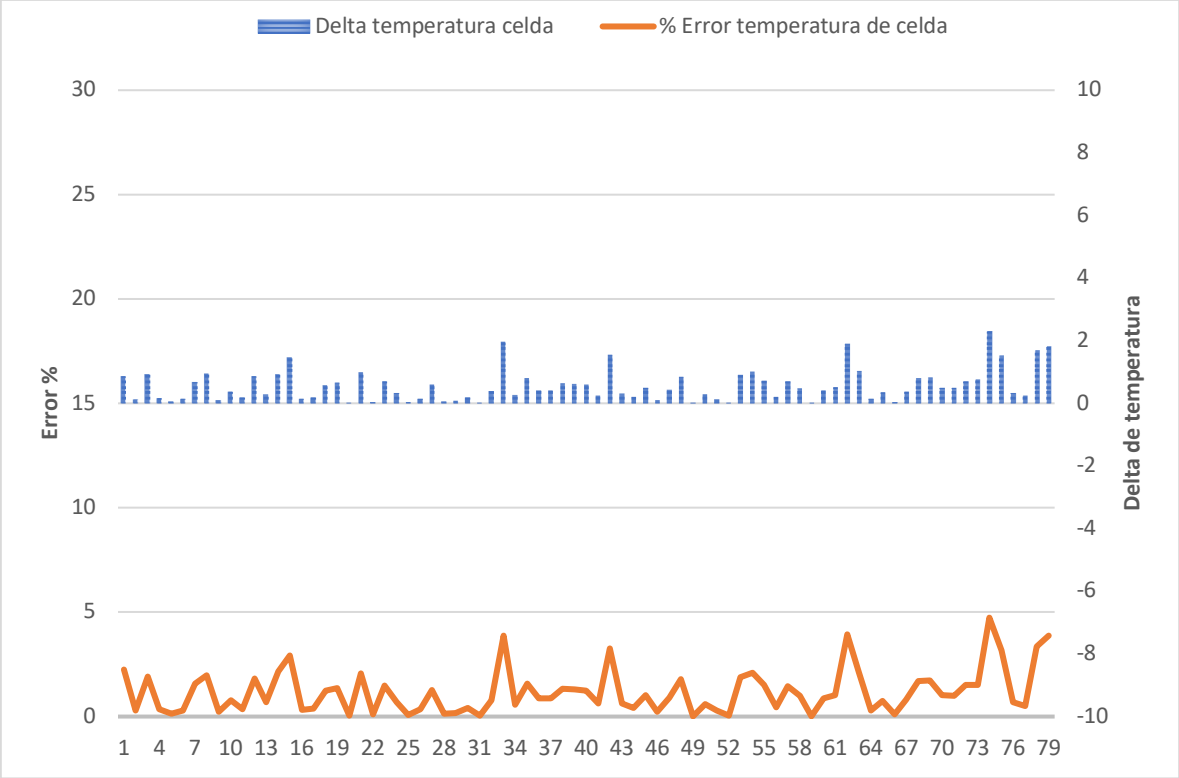

Gráfico 6-4: variación porcentual y diferencias de temperaturas obtenidas al comparar los resultados obtenidos con la ecuación de predicción y el modelo propuesto.

El *Gráfico 6-4* muestra los resultados obtenidos para los distintos casos propuestos, las barras azules muestran los deltas de temperatura obtenidos al comparar los resultados entregados por el modelo y los entregados por la ecuación de predicción, es posible afirmar que las diferencias no superan los 3 grados lo que se traduce en un error máximo de 5% (línea naranja).

Cabe destacar que los puntos de máximo error se producen para situaciones en donde existe baja irradiancia, valores inferiores a 500 W/m2 provocan inestabilidad en la ecuación de predicción, a pesar de esto de considera que un error de 5% sigue asegurando una buena aproximación por lo que es posible asumir congruencia entre la ecuación de predicción y el modelo propuesto.

7 Modelo Bifacial

Se presenta a continuación una propuesta para modelo térmico de paneles fotovoltaicos bifaciales en base al modelo previamente validado para paneles monofaciales.

7.1 Geometría

La geometría propuesta para el panel bifacial considera un panel bifacial con 72 celdas posicionadas en filas de 6 al igual que en el modelo propuesto anteriormente, en este caso el encapsulado varía una de sus capas quedando con la siguiente configuración:

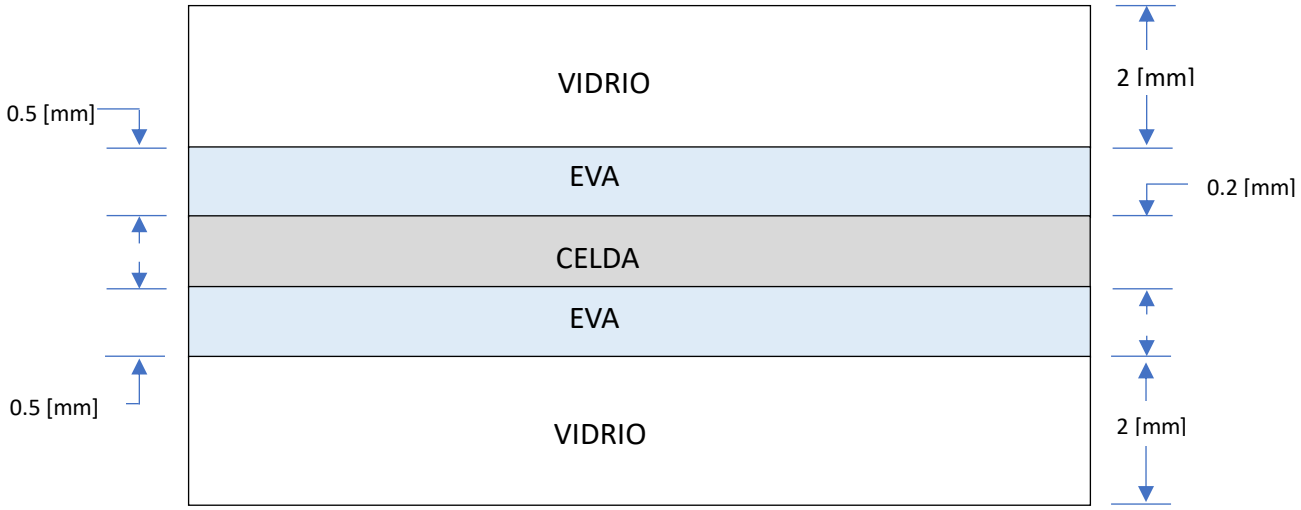

Figura 7-1: dimensiones y posición de las distintas capas que componen el panel, se detalla el material de cada una de las capas.

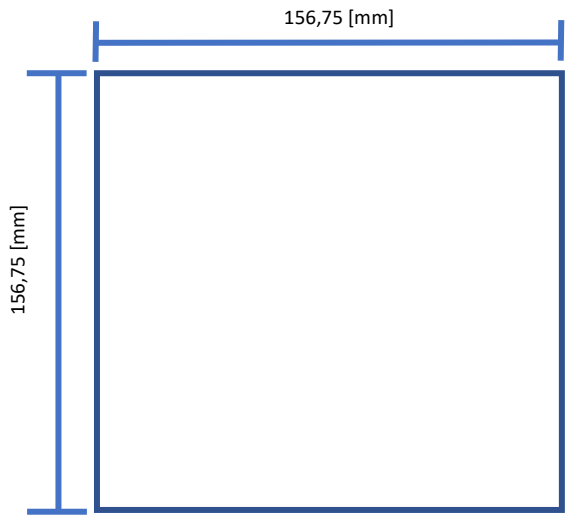

Figura 7-2:dimensiones celda fotovoltaica

7.2 Consideraciones del modelo

A partir del modelo ya propuesto se extiende el análisis al modelo bifacial, se asume una generación de calor en cada una de las capas a partir de la absortividad del material, al igual que en el modelo monofacial se diferencia la sección central del modelo con los bordes debido a que este no posee celda en su capa central y por tanto no existe una barrera de baja transmisividad que impida a la radiación llegar al otro extremo junto con la ausencia de energía consumida en generación eléctrica.

Se presenta inicialmente la zona central del modelo *Figura 7-3* con sus respectivos flujos asociados a la radiación incidente

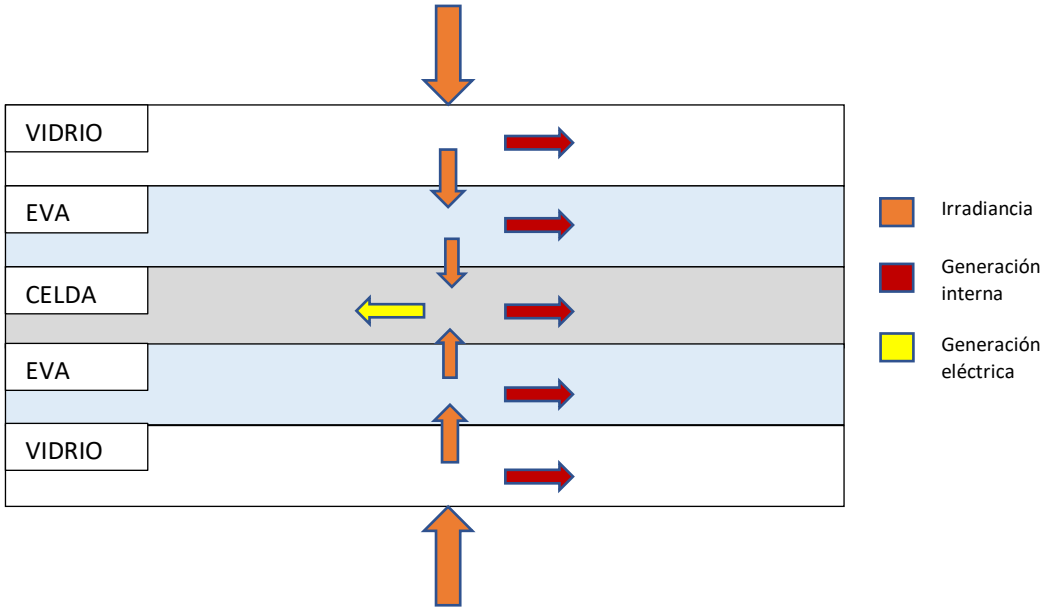

Figura 7-3 flujos de energía modelo bifacial, zona central

Debido a que este tipo de tecnología es capaz de aprovechar la radiación incidente por ambas caras se añade al modelo un flujo de energía que ingresa por la cara posterior hasta la celda asociado a generaciones de calor tanto en la capa de vidrio como la de EVA posteriores determinadas por las propiedades ópticas de estos materiales.

Para la generación eléctrica y de calor en la celda es necesario considerar el flujo total que ingresa a esta por lo que se considera la suma de los flujos superior e inferior dentro del calculo asociado.

Se analiza posteriormente la sección comprendida por la interfaz entre las distintas celdas y el borde del modelo en general, debido a que esta zona no cuenta en celda en su sección central no es posible analizar de manera independiente los flujos por cada cara del panel, resulta necesario entonces plantear los flujos por cada cara y el efecto combinado sobre cada capa del panel. Se propone entonces la distribución presentada en la *Figura 7-4*.

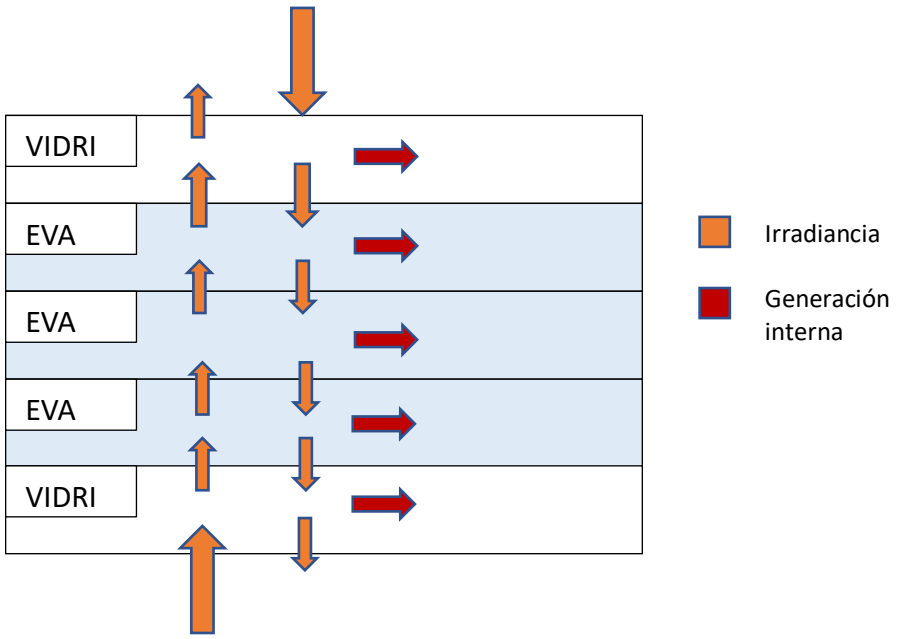

Figura 7-4 flujos de energía modelo bifacial, zona de contorno

Cada uno de los flujos de energía incidentes sobre las caras de la celda se divide en una porción transmitida, reflejada y absorbida por las capas, es esta ultima porción la que presenta una diferencia respecto al modelo monofacial planteado, en este caso la generación interna será obtenida a partir de la irradiancia transmitida por las capas superior e inferior a la capa analizada aumentando por tanto las generaciones obtenidas respecto al modelo previo las cuales serán calculadas utilizando la ecuación 5.2 ya descrita. Otro punto importante que destacar en esta zona del modelo es que debido a la ausencia de TPT y la transmisividad del vidrio parte de la luz saldrá por el extremo opuesto del panel por lo que es necesario añadir un flujo de salida en dentro del modelo el cual será obtenido a partir de la correspondiente transmisividad de los materiales sobre el flujo original de entrada.

7.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno aplicadas sobre el modelo propuesto son semejantes a las descritas para el modelo monofacial considerando radiación y convección en cada una de las caras. Debido a que en condiciones de operación los paneles bifaciales pueden operar fuera de la inclinación regular de un panel policristalino es importante considerar el coeficiente de convección utilizado dependiendo de la dirección, velocidad y ángulo del viento respecto a la cara del panel.

Como ya se mencionó debido a las características propias de este panel se añaden flujos de calor desde el panel al exterior en la zona de intersección entre celdas asociados a la luz transmitida entre un lado y otro del panel junto a los respectivos flujos de entrada asociados a la irradiancia sobre cada cara.

8 Objetivos de estudio

Habiendo validado el modelo propuesto se procede a evaluar el efecto que tendrá sobre un panel en funcionamiento la variación de los distintos factores externos a los que se ve sometido haciendo especial énfasis en el efecto del viento y tu temperatura sobre la temperatura de operación y correspondiente eficiencia de un panel.

El primero de los estudios realizados a partir del modelo consiste en evaluar el efecto de la variación en la temperatura de celda asociada a una variación en el coeficiente de convección del panel. Un determinado coeficiente de convección condiciona el flujo de calor que existe entre el panel y el ambiente, a medida que se genera un aumento en este coeficiente el panel cede energía térmica al ambiente a una tasa mayor provocando una disminución en la temperatura de celda.

El gráfico x presenta distintas curvas de comportamiento asociadas a una respectiva irradiancia sobre el panel mostrando la temperatura promedio en las celdas centrales en función de un determinado coeficiente de convección.

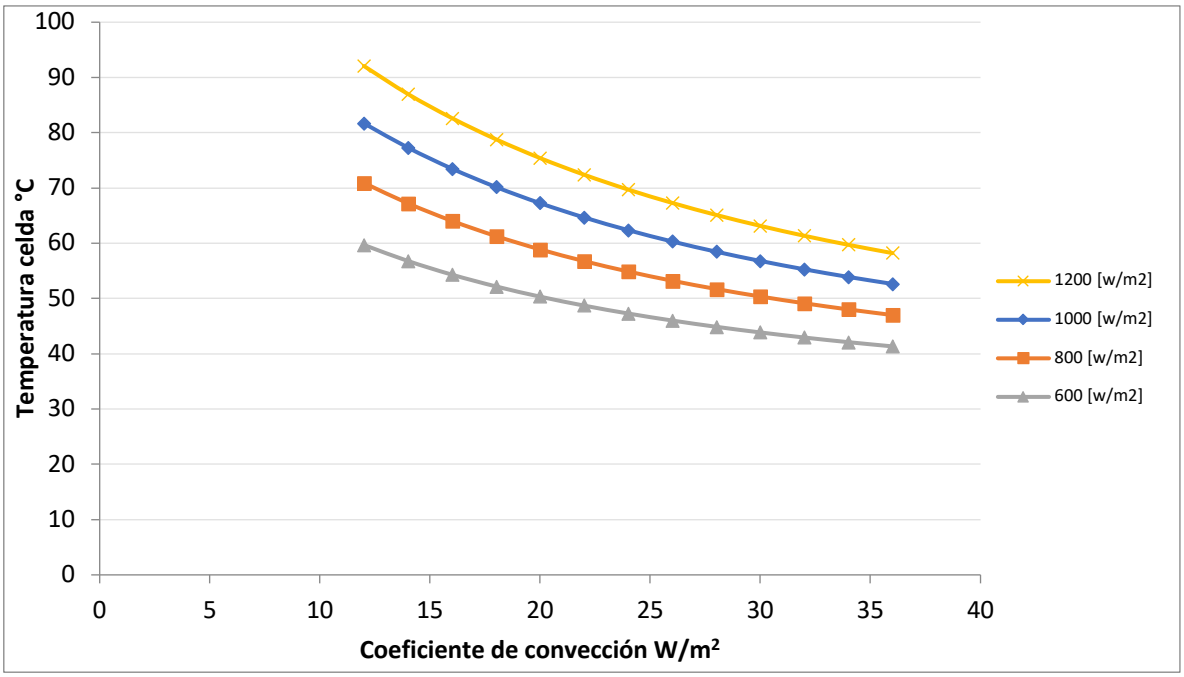

Gráfico 8-1: temperatura de celda en función del coeficiente de convección para distintas condiciones de irradiancia.

Es posible señalar que un aumento de 5 w/m^2 en el coeficiente de convección puede generar una caída de hasta 5 grados en la temperatura de celda, considerando que la formulación de este coeficiente se encuentra determinada por la ecuación x es factible relacionar la velocidad del viento pudiendo señalar entonces que un aumento de 1,5 m/s genera una disminución de temperatura en la celda de aproximadamente 5 grados.

A medida que aumenta la irradiancia sobre el panel la velocidad del viento a al que se encuentra expuesto y, por consiguiente, el coeficiente de convección asociado, cobra mayor importancia dentro de la temperatura de celda, si bien siempre presenta un efecto considerable este se intensifica en condiciones de alta radiación.

Se extiende a continuación el análisis previamente desarrollado a paneles bifaciales, con el fin de estudiar específicamente los efectos de la convección sobre esta configuración se realizan pruebas para determinadas velocidades y temperaturas de viento manteniendo constante la irradiancia sobre el panel y variando el coeficiente de bifacialidad que este posee, aumentando por consiguiente la irradiancia sobre la cara posterior.

El Gráfico x muestra los resultados obtenidos en las correspondientes simulaciones, la curva azul y naranja muestran el cambio de temperatura en la celda para velocidades de viento de 1 y 3 m/s respectivamente, el coeficiente de convección para la cara posterior se

considera cómo la mitad del obtenido para la cara frontal (ecuación x), posteriormente se evalúa el efecto que tendría un mismo coeficiente de convección por ambas caras del panel (curva gris), finalmente las curvas amarilla y celeste presentan los efectos de la variación en la temperatura del viento para una misma velocidad y mismas consideraciones aplicadas al coeficiente de convección en cada cara.

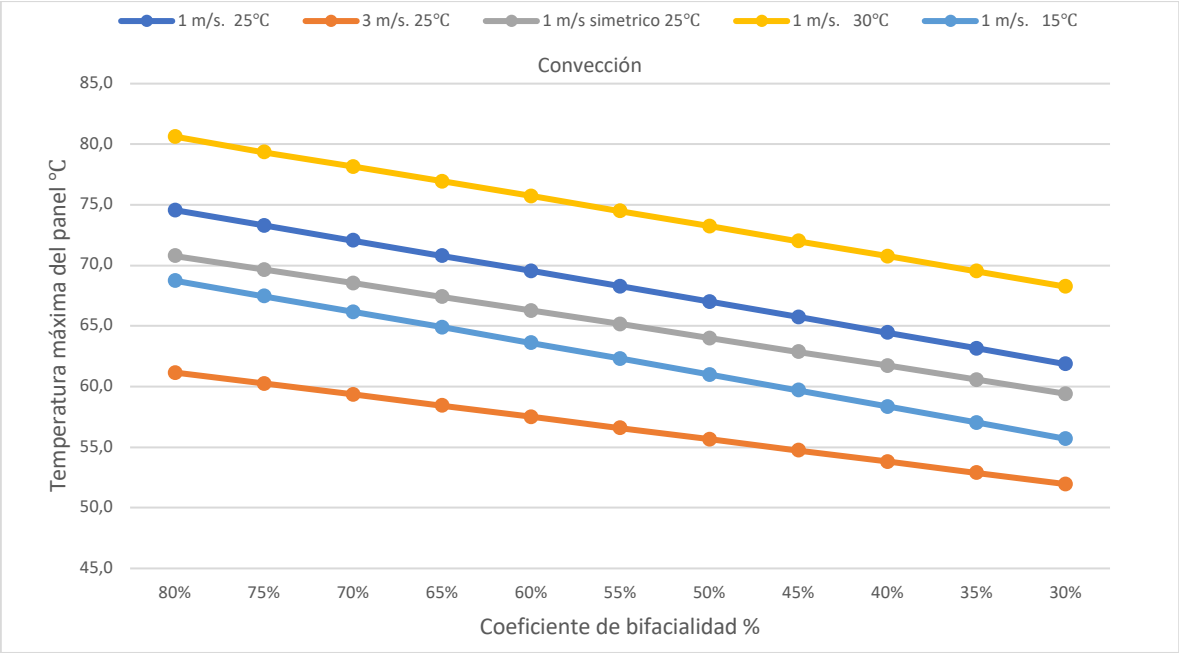

Gráfico 8-2:temperatura máxima del panel bifacial en función del coeficiente de bifacialidad para distintas condiciones de variables ambientales (temperatura, velocidad del viento)

Se procede a continuación a evaluar los gradientes de temperatura presentes en el espesor del panel, si bien dicho espesor es muy pequeño en comparación a las dimensiones generales del panel los gradientes que aquí se generan determinan la temperatura efectiva en la celda y, por consiguiente, la eficiencia obtenida en el panel. Es meritorio evaluar el comportamiento de cada uno de los materiales que componen el panel y cómo se desarrollan en estos los fenómenos de transferencia de calor, específicamente la conducción en las capas.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos al evaluar ambos modelos bajo una determinada condición de operación detallando la temperatura obtenida en la sección central de cada panel en función del espesor. Se considera como espesor cero la superficie trasera en contacto con el ambiente. La leyenda del grafico cuenta con la siguiente estructura para facilitar su comprensión:

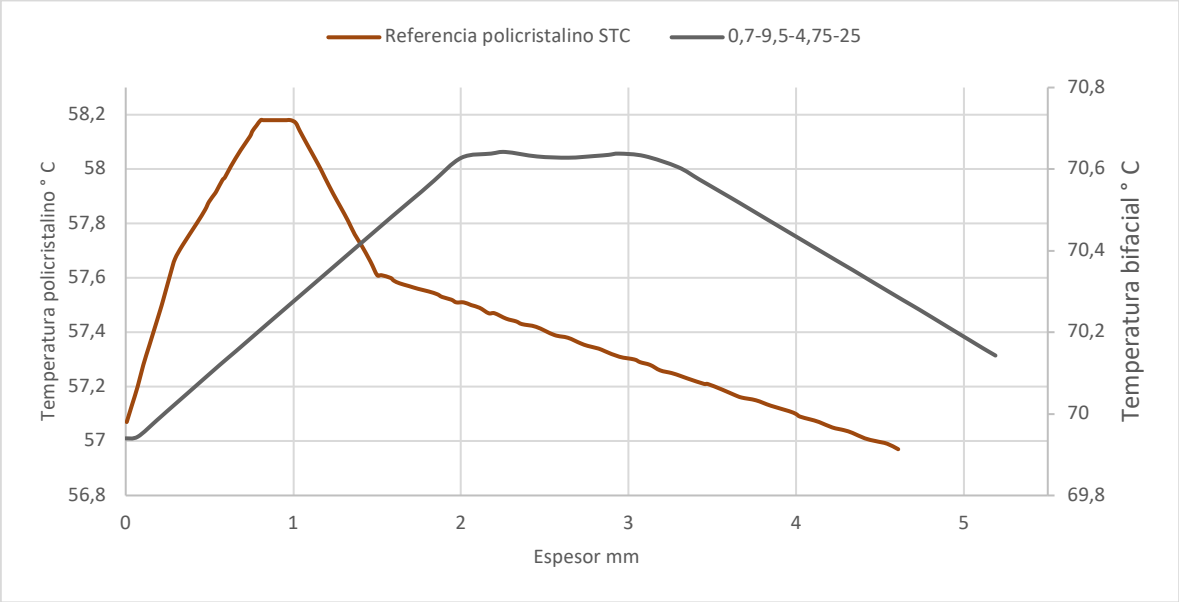

Gráfico 8-3: gradiente de temperatura en el espesor de un panel bifacial en comparación a un panel policristalino.

La curva en color gris indica los resultados obtenidos para el modelo de panel bifacial fijando un coeficiente de bifacialidad de 0.7, la máxima temperatura del panel fue obtenida en la zona central del modulo, específicamente en la celda alcanzando una temperatura superior a 70.6º mientras que la temperatura mínima obtenida fue de 69.9 grados en la cara posterior.

Si bien la transferencia de calor por convección es mayor en la cara frontal del panel la irradiancia a la que se encuentra expuesto provoca una temperatura de superficie mayor a la cara posterior debido a que esta se encuentra expuesta tan solo a un 70% de dicha irradiancia.

La curva en color rojo presente los resultados obtenidos para el modelo de panel bifacial bajo las mismas condiciones ensayadas sobre el modelo bifacial tomando en consideración que para el caso de panel policristalino no se considera un coeficiente de bifacialidad; para el modelo policristalino la temperatura de celda obtenida fue de 58.1 grado, 12.4 grados menos a la obtenida en la celda bifacial, esto evidencia la capacidad reflectiva que posee la lamina de TPT que conforma la parte posterior de los paneles policristalinos, el

permitir el paso de luz pos esta capa ocasiona un considerable aumento de temperatura en el panel. Es posible observar además la rápida caída de temperatura en la capa posterior del panel policristalino en comparación a su contraparte bifacial, las propiedades térmicas del TPT aportan también en la transferencia de calor hacia el exterior favoreciendo la disminución de temperatura del módulo.

8.1 Prueba de sombreado

A continuación, se evalúa el efecto térmico provocado por uno de los problemas de operación más recurrentes en paneles fotovoltaicos, el sombreado.

Dicho fenómeno se ocasiona cuando se interpone algún elemento entre la fuente de irradiancia y el panel, o una sección de este, provocando una considerable disminución en la electricidad generada. Debido a que disminuye la irradiancia sobre una o varias celdas estas disminuyen la diferencia de potencial generada y su corriente asociada, debido a la estructura de la conexión entre las distintas celdas que componen el panel disminuir la corriente generada por una de estas incide directamente en el funcionamiento de las celdas que se encuentran conectadas en su misma fila provocando incluso la desconexión completa del string.

Figura 8-1: ejemplo de paneles sombreados en operación es importante considerar esta variable en su instalación.

Se plantea entonces evaluar esta situación en el modelo propuesto simulando la desconexión de uno de los string debido al sombreado de la celda inferior derecha señalada en la imagen

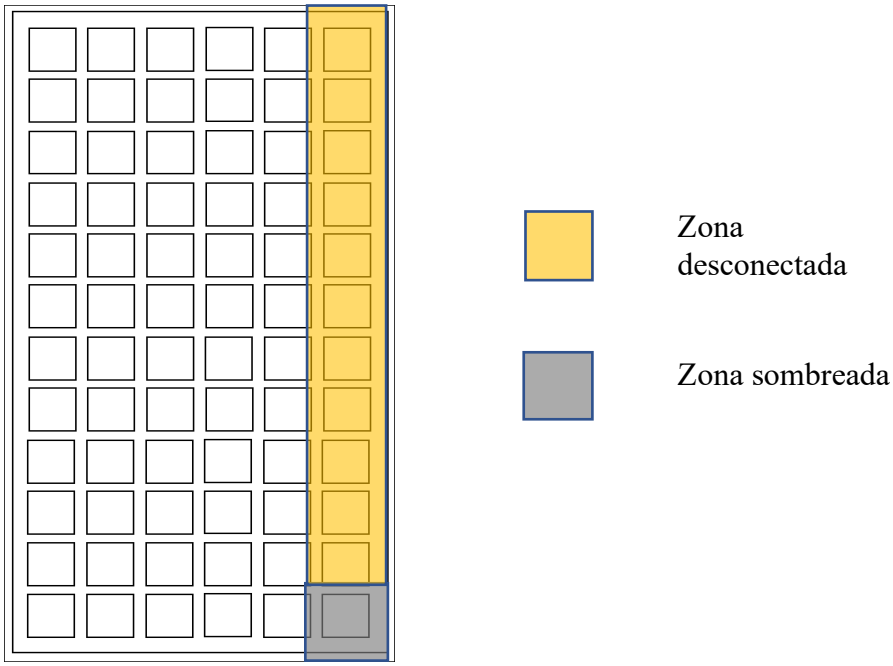

Figura 8-2 consideraciones para el modelo sombreado, el color amarillo representa las celdas desconectadas y el color gris la celda sobre que por tanto percibe una baja irradiancia

Se evalúa entonces el efecto de la irradiancia sobre las celdas sin generación, para el caso de las celdas superiores y, debido a perciben la misma irradiacia que las celdas no afectadas se presume un aumento considerable en su temperatura asociado a la energía remanente que no se está transformando en electricidad. Para el caso de la celda sombreada, considerando que no percibe irradiancia se esperaría una baja temperatura, si bien esta sería superior al ambiente debería ser inferior a la temperatura del resto de las celdas.

En la practica el efecto que ocurre sobre la celda sombreada, por el contrario de lo que se espera en base a los alcances de este trabajo, es un aumento de temperatura debido a que si el conjunto de celdas deja de producir electricidad pasan a consumirla y, por consiguiente, existe un aumento de temperatura asociado al efecto Joule considerando la celda como resistencia. En caso de poseer un diodo de protección para el string es posible evitar este fenómeno.

Se simularon dos situaciones, la *Figura 8-3* muestra el comportamiento térmico del panel para el caso en no se incluye generación interna de calor asociada a la disipación de energía provocada por el consumo eléctrico de la celda sombreada; la *Figura 8-4* por su parte presenta el comportamiento térmico del panel incorporando la disipación de energía eléctrica por el consumo de las celdas en el string desconectado.

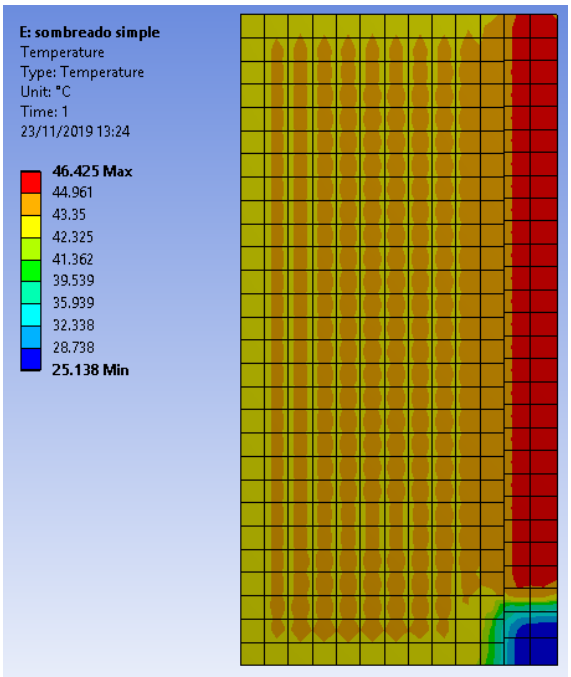

Figura 8-3: panel sombreado, sin generación en celda sombreada

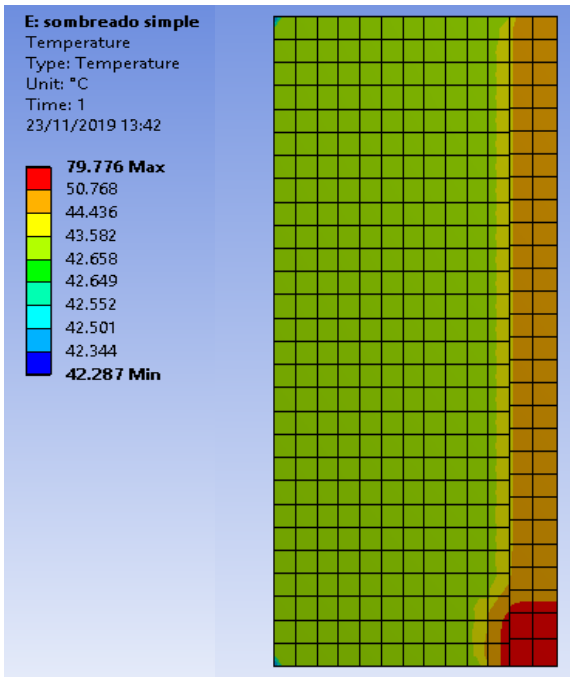

Figura 8-4: panel sombreado, generación interna en celda sombreada

Se evalúan las temperaturas obtenidas en el primero de los casos *Figura 8-3* a lo ancho del panel para el plano frontal (superficie expuesta del vidrio) y el plano de la celda (superficie frontal de la celda). Es posible corroborar el aumento local de temperatura en el string apagado obteniendo una diferencia de 2,5 °C respecto a la celda opuesta en el panel según un eje de simetría vertical. Dicha relación se conserva para el vidrio que mantiene un gradiente de aproximadamente 0,4 grados con el plano de la celda.

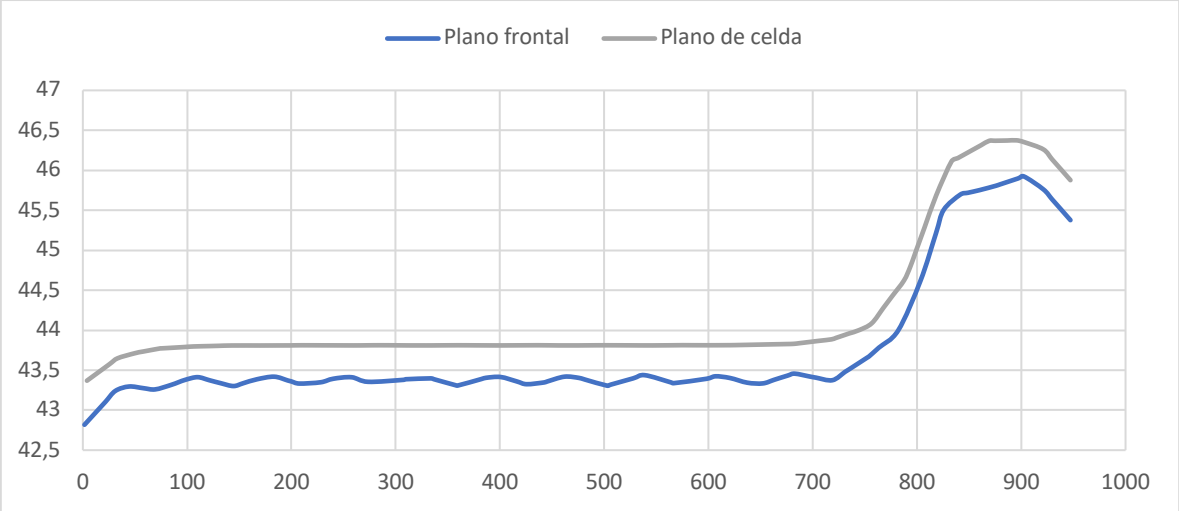

Gráfico 8-4: variación de temperatura a lo ancho del panel

8.2 Efectos térmicos del soiling

Finalmente, y a partir del modelo previamente desarrollado y validado, se evalúa el efecto térmico de la acumulación de soiling en un panel en funcionamiento. La acumulación de suciedad sobre paneles puede tener un impacto significativo en el rendimiento de sistemas fotovoltaicos, en particular en áreas con gran cantidad de polvo y precipitaciones bajas o inexistentes como en el Desierto de Atacama.

Con el fin de incorporar la variable de ensuciamiento se modela una capa de polvo sobre el panel como una cubierta regular de 50 μm, si bien las partículas de polvo no forman una capa regular se evalúa en el modelo la disminución en la radiación incidente sobre la celda asociada a la transmisividad de dicha capa de polvo. Considerando además que dicha irradiancia se considera como un valor constante por metro cuadrado sobre el panel se considera valida la aproximación de una capa regular de polvo.

El siguiente paso es la caracterización del polvo en base a sus propiedades físicas y ópticas con el fin de incorporar estas variables al modela, en la tabla x se presentan los valores utilizados para dichas propiedades.

Tabla 8-1 propiedades físicas y ópticas de la arena de desierto caracterizada principalmente como arcilla y limo.

Material	Absortividad	Transmisividad	Emisividad	Conductividad térmica W/m K	Densidad kg/m^3
Polvo	0,1[13]	0,89[13]	0,9[14]	0,28[15]	1600[16]

Habiendo incorporado al modelo las variables anteriormente descritas se presentan a continuación los resultados obtenidos destacando específicamente la variación obtenida en la temperatura dentro del espesor del panel.

El panel simulado bajo condiciones de soiling presenta una menos temperatura promedio que el panel en condiciones normales de operación, en el Gráfico 8-5 es posible observar una diferencia de 5 grados en la zona de la celda y de 4 para la sección superficial, es posible observar además que bajo condiciones de soiling disminuyen considerablemente las diferencias de temperatura dentro del panel obteniendo una temperatura uniforme con variaciones inferiores a 0,1 grados.

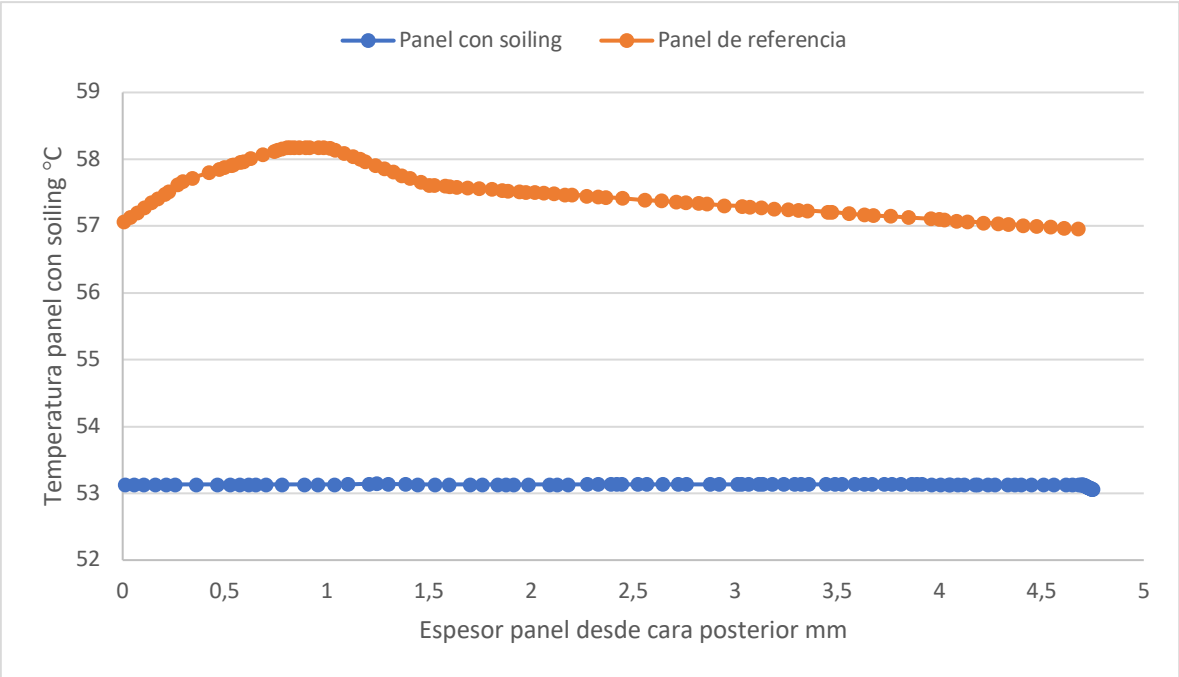

Gráfico 8-5: comparativa entre la distribución obtenida para el panel con soiling y el panel limpio.

Con el fin de obtener un análisis más preciso de los gradientes obtenidos en el panel con soiling se presenta el Gráfico 8-6 dónde es posible observar que si bien las variaciones de temperatura son inferiores a un grado existe un notorio decaimiento de la temperatura en la capa de polvo superficial, se mantiene además el peak de temperatura en la sección de la celda pero, para este caso, existe también un alza de temperatura en la sección central de la capa de vidrio.

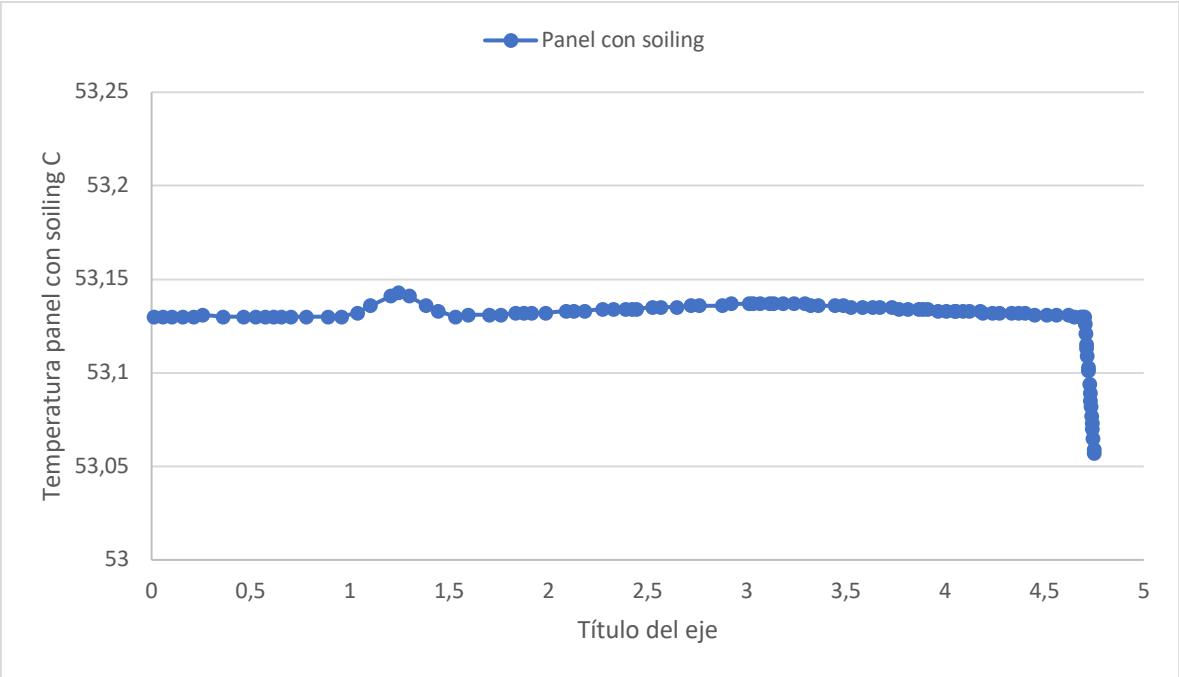

Gráfico 8-6: variaciones de temperatura en el espesor de panel con soiling.

El soiling por tanto tiene principalmente dos efectos desde el punto de vista térmico. En primer lugar, disminuye la irradiancia efectiva sobre el vidrio debido a que esta se encuentra disminuida en función de la transmisividad del polvo, sin duda esto genera una considerable disminución en la potencia que logran desarrollar los paneles.

Si bien la simulación con soiling presentó una temperatura promedio menor a un panel en condiciones normales, lo que traería asociado un aumento en la eficiencia del panel al trabajar a menor temperatura, dicho aumento de eficiencia no compensa las perdidas de potencia debido a la disminución en la irradiancia efectiva sobre el panel.

Cómo segundo efecto principal el soiling forma una capa que disminuye las perdidas de calor desde el panel al ambiente, tanto por convección como radiación. Estas perdidas son el principal sistema de enfriamiento dentro del panel y genera el perfil característico de temperatura dentro de este. La baja conductividad del polvo frente al vidrio genera una capa aislante entre el ambiente y la superficie del panel evitando el adecuado enfriamiento de la capa de vidrio provocando el aumento local de temperatura obtenido.

9 Recomendaciones y trabajo futuro

9.1 Validación modelo bifacial

Se plantea cómo propuesta de continuidad la validación del modelo bifacial desarrollado con datos empíricos.

Dicha validación deberá incluir mediciones puntuales simultaneas de temperatura por medio de termocuplas o sensores de alta precisión en contacto con la superficie de vidrio tanto frontal como posterior para distintas posiciones dentro del panel generando así un mapa para contrastar con los valores obtenidos por medio del modelo.

Resulta necesario además posicionar pirómetros capaces de monitorear la irradiancia percibida por el panel en cada una de las caras obteniendo así los flujos de energía y el porcentaje de bifacialidad asociado.

Debido a que es posible operar un panel bifacial en un amplio rango para el ángulo de inclinación respecto a la horizontal se sugiere desarrollar un modelo de convección sensible a dicho parámetro obteniendo así un coeficiente de convección con una adecuada precisión para cada ángulo de inclinación a evaluar.

9.2 Variables para incorporar en futuros estudios

Se presentan a continuación parámetros propuestos para considerar en el desarrollo futuro de modelos térmicos en todo tipo de paneles.

- Acoplar un modulo de estudio para la convección desarrollando modelos predictivos que integren variables de temperatura, dirección y velocidad de viento para obtener coeficientes de convección dinámicos.
- Evaluar nuevos métodos y procedimientos para validación con mediciones directas de temperatura en celda
- Estudiar deformación térmica de los paneles y sus efectos en el desempeño de las celdas
- Precisar valor de resistencia de contacto para la interfaz de las distintas capas que componen el panel
- Acoplar el modelo en elementos finitos a otro tipo de modelos para realizar pruebas predictivas por medio de iteración.

10 Conclusiones

El modelo térmico desarrollado en este trabajo permite simular un amplio campo de configuraciones y condiciones de operación para distintas tecnologías fotovoltaicas con una considerable precisión limitada mayormente por la capacidad de procesamiento que se posea con el fin de generar mallados más finos. El principio físico bajo el cual se desarrolla el modelo logró obtener resultados considerablemente certeros obteniendo errores inferiores a un 5% en las etapas de validación.

El modelo demostró además poseer un gran potencial para desarrollar pruebas que incluyan diversos factores enfocados a la temperatura de operación del panel. Permite evaluar sistemas de enfriamiento para paneles, flujos puntuales de calor y genera una base solida para el desarrollo de modelos que evalúen la transferencia de calor por convección considerando posición de paneles, temperatura y velocidad de viento.

Específicamente a partir de las pruebas desarrolladas fue posible verificar el efecto de las condiciones medioambientales a las que se exponen los paneles sobre su temperatura de operación, variar la velocidad del viento en un metro por segundo puede disminuir hasta en 5 grados la temperatura de un panel con diferencias de hasta dos grados entre la superficie exterior de este y la celda.

Fue posible corroborar además que factores como irradiancia o temperatura ambiente inciden directamente en la temperatura del panel manteniéndose esta ultima a una temperatura promedio hasta 40 grados superior que el ambiente bajo condiciones de irradiancia de 100 w/m^2 y velocidades de viento bajo3 m/s, estas diferencias sin duda se pueden incrementar si no se considera una adecuada ventilación del panel y se expone a elevada radiación, lo que si bien genera una mayor potencia desarrollada provocada disminuciones considerables de eficiencia y aumento en la degradación de los paneles.

11 Referencias bibliográficas

1. Energía, C.N.d. 2019; Available from: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/.
2. Armstrong, S. and W. Hurley, *A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions.* Applied Thermal Engineering, 2010. **30**(11-12): p. 1488-1495.
3. Solar, A. *Capas de un panel fotovoltaico* 2017; Available from: http://as-iberica.com/blog/enemigos-la-fotovoltaica-ii-delaminacion/.
4. Eliseo, S., *Curva I-V.* 2016.
5. Solar, A., *bifacial Panel.*
6. GmbH, Ö.S., *Bifacial Park.*
7. Chin, V.J., Z. Salam, and K. Ishaque, *Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review.* Applied Energy, 2015. **154**: p. 500-519.
8. Jakhrani, A., et al., *Comparison of solar photovoltaic module temperature models.* World Applied Sciences Journal, 2011. **14**(3): p. 1-8.
9. Yunus A. Cengel, A.J.G., *Transferencia de calor y masa*. sexta ed. 2014.
10. Zhou, J., et al., *Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation.* Solar Energy, 2015. **111**: p. 97-103.
11. Lee, Y. and A.A. Tay, *Finite element thermal analysis of a solar photovoltaic module.* Energy Procedia, 2012. **15**: p. 413-420.
12. Notton, G., et al., *Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences.* Applied thermal engineering, 2005. **25**(17-18): p. 2854-2877.
13. Mainini, A.G., et al., *Transparent multilayer ETFE panels for building envelope: thermal transmittance evaluation and assessment of optical and solar performance decay due to soiling.* Energy Procedia, 2014. **48**: p. 1302-1310.
14. Axiomet. *Factores de emisividad*. 2019; Available from: https://axiomet.eu/es/es/page/1346/Factores-de-emisividad-_-su-influencia-en-la-medicion-de-la-temperatura-es/.
15. Smits, K.M., et al., *Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage–wetting cycles.* Vadose Zone Journal, 2010. **9**(1): p. 172-180.
16. Olivares, D., et al., *Characterization of soiling on PV modules in the Atacama Desert.* Energy Procedia, 2017. **124**: p. 547-553.