

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA
GENERACIÓN ELÉCTRICA Y PÉRDIDAS EVAPORATIVAS
DE UN SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO FLOTANTE E
HIDROELÉCTRICO EN EL ECUADOR**

**ANÁLISIS Y MODELACIÓN MATEMÁTICA, EN FUNCIÓN
DEL BALANCE TÉRMICO, Y ANÁLISIS PARAMÉTRICO
UN SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO FLOTANTE E
HIDROELÉCTRICO.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO/A
MECÁNICO/A**

DENNYS DANIELA LEMA CABASCANGO

dennys.lemma@epn.edu.ec

DIRECTOR: SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

santiago.vaca@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2022

CERTIFICACIONES

Yo, DENNYS DANIELA LEMA CABASCANGO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



DENNYS DANIELA LEMA CABASCANGO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DENNYS DANIELA LEMA CABASCANGO, bajo mi supervisión.



SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DENNYS DANIELA LEMA CABASCANGO

SANTIAGO DAVID VACA JIMENEZ

AGRADECIMIENTO

Enteramente agradecida con Dios por bendecirme con salud y vida permitiéndome culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres, Daniel Lema y María Cabascango por su amor, confianza y apoyo a lo largo de todo este tiempo, ya que gracias a ello he tenido la oportunidad de lograr este objetivo.

A mis Hermanos y demás familiares quienes me han demostrado su cariño y apoyo con palabras de aliento en momentos de dificultad.

Finalmente expresar mi agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional por su labor en la formación de profesionales de gran valor.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	1
1.4 Marco teórico	2
2 METODOLOGÍA.....	6
1.1 Esquema del balance térmico del sistema	6
2.1 Fuentes de calor	7
2.2 Condiciones de borde del sistema	9
2.3 Especificaciones técnicas y configuración del FV	13
2.4 Condiciones de estudio	14
2.5 Cálculo de variables.....	16
2.6 Conducción de calor en el panel fotovoltaico	19
2.7 Modelo matemático del sistema.....	20
2.8 Traslado del modelo matemático a Matlab.....	26
2.9 Análisis paramétrico del sistema.....	28
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
3.1 Estudio paramétrico	37
3.2 Discusión.....	38
3.3 Conclusiones.....	39
3.4 Recomendaciones.....	40
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
5 ANEXOS.....	44
ANEXO I	44
ANEXO II	45
ANEXO III	46
ANEXO IV.....	50

ANEXO V	51
ANEXO VI	58
ANEXO VII	59

RESUMEN

Los sistemas híbridos compuestos por sistemas fotovoltaicos flotantes e hidroeléctricos vienen de un concepto moderno que busca generar energía limpia, a través de la combinación de los sistemas fotovoltaicos existentes ligados a una estructura que les permita flotar en los reservorios hidroeléctricos.

El sistema fotovoltaico también se beneficia de esta interacción, ya que las celdas fotovoltaicas disminuyen su eficiencia cuando su temperatura de operación se eleva. Entonces, al existir una diferencia de temperaturas entre el panel fotovoltaico y el agua del reservorio, un intercambio de calor sucede. Este intercambio permite que las celdas fotovoltaicas experimenten una disminución de temperatura interior lo que a su vez mejorará la eficiencia de los paneles.

En el desarrollo de este componente se busca realizar el análisis teórico del balance térmico del sistema para conocer la temperatura que alcanzan las celdas fotovoltaicas en el interior del panel, bajo determinadas condiciones físicas y geométricas.

Sabiendo que la refrigeración de los paneles permite el incremento en su eficiencia, se desarrolló un modelo matemático que permitió conocer las variables y entender su efecto en la variación de la temperatura de la celda fotovoltaica.

Finalmente, se obtuvo que las variables que tienen mayor impacto en el comportamiento térmico del panel fotovoltaico flotante son la radiación incidente, el ángulo de inclinación del panel con respecto al reservorio, el ángulo cenital y velocidad del viento. Se usaron los datos meteorológicos The National Renewable Energy Laboratory (NREL) para la simulación del modelo térmico del panel y se obtuvo una temperatura de 43.2°C a una radiación 875 W/m² en la celda fotovoltaica.

PALABRAS CLAVE: Panel fotovoltaico, flotante, modelo, matemático, balance energético.

ABSTRACT

Hybrid systems composed of floating photovoltaic and hydroelectric systems come from a modern concept that seeks to generate clean energy, through the combination of existing photovoltaic systems linked to a structure that allows them to float in hydroelectric reservoirs.

The photovoltaic system also benefits from this interaction since the photovoltaic cells decrease their efficiency when their operating temperature rises. Then, as there is a temperature difference between the photovoltaic panel and the reservoir water, a heat exchange occurs. This heat exchange allows the photovoltaic cells to experience a decrease in internal temperature, which in turn will improve the efficiency of the panels.

In the development of this component, the aim is to carry out the theoretical analysis of the thermal balance of the system to know the temperature reached by the photovoltaic cells inside the panel, under certain physical and geometric conditions.

Knowing that the cooling of the panels allows an increase in their efficiency, a mathematical model was developed that allowed knowing the variables and understanding their effect on the variation in the temperature of the photovoltaic cell.

Finally, it was found that the variables that have the greatest impact on the thermal behavior of the floating photovoltaic panel are incident radiation, the angle of inclination of the panel with respect to the reservoir, the zenith angle and wind speed. Meteorological data from The National Renewable Energy Laboratory (NREL) were used for the simulation of the thermal model of the panel and a temperature of 43.2°C was obtained at a radiation of 875 W/m² in the photovoltaic cell.

KEYWORDS: Photovoltaic panel, floating, model, mathematical, energy balance.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En este componente se realiza un modelamiento matemático de un panel fotovoltaico flotante a través del análisis teórico del balance energético del sistema. Para esto se consideran las pérdidas por convección y radiación con el ambiente. El modelo matemático se desarrolla a través del método implícito de diferencias finitas y se lo pasa al lenguaje de programación MATLAB para su análisis y posterior realizar un análisis paramétrico.

1.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento térmico de un sistema fotovoltaico flotante en el Ecuador.

1.2 Objetivos específicos

1. Recopilar información sobre el efecto y el balance térmico en un panel fotovoltaico.
2. Realizar un balance térmico entre el panel fotovoltaico flotante, el ambiente y el espejo de agua del reservorio.
3. Desarrollar un modelo matemático de la transferencia de calor en lenguaje de programación de MATLAB.
4. Realizar un análisis paramétrico considerando las variables más relevantes del sistema.

1.3 Alcance

El desarrollo del componente se desarrolló dentro de 4 etapas, dándose su inicio con una indagación y compendio de información sobre los paneles fotovoltaicos, el efecto térmico relacionado al sistema, el balance térmico (transferencia de calor por radiación y convección) y desarrollos previos de modelos matemáticos, esta información sirvió como base para la ejecución del componente.

En la segunda etapa, se realizó el análisis del balance térmico, para ello fue necesario considerar los parámetros de las condiciones físicas y meteorológicas de entrada que intervienen dentro del planteamiento de las ecuaciones de transferencia de calor del sistema.

En la tercera etapa se desarrolló un modelo matemático del sistema, dentro del cual se consideraron todas las variables de entrada que intervienen en la segunda etapa.

En la etapa final se realizó un análisis paramétrico con la finalidad de mostrar una comparación, relación y efecto que tienen las principales variables en el sistema. Para esto

se pasó el modelo matemático a un programa tipo *m* en Matlab, lo que permitió modificar las variables a estudiar.

1.4 Marco teórico

Primera Ley de la termodinámica

Se conoce más comúnmente como el principio de conservación de la energía y plantea que, dentro de un proceso, la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma. Por ende, cualquier tipo de energía, sea esta grande o pequeña, debe considerarse dentro de un balance en el sistema (Çengel, 2013).

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energía que} \\ \text{entra al sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energía que} \\ \text{sale del sistema} \end{array} \right) = (\text{Cambio de energía del sistema})$$

Mecanismos de transferencia de calor

La dirección del flujo de calor se da desde una región con mayor temperatura a una de menor temperatura. Dentro de un sistema puede transferirse de tres formas:

Conducción: la transferencia de calor por conducción ocurre en sólidos, líquidos y gases, se da en regiones adyacentes que se encuentran a diferentes temperaturas. En una capa plana la transferencia de calor por conducción es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y es inversamente proporcional al espesor de dicha capa (Çengel, 2013).

$$\dot{Q}_{cond} = -k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Ecuación 1.1. Conducción de calor.

Donde, \dot{Q}_{cond} es la razón de conducción de calor, k es la conductividad térmica, ΔT diferencia de temperatura y Δx espesor.

Convección: la transferencia de calor por convección ocurre entre una superficie sólida y una líquida o gaseosa. Comprende el movimiento de la masa de un fluido y la conducción entre el fluido y la superficie sólida. Es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el medio. Se expresa a través de la ley de enfriamiento de Newton (Çengel, 2013).

$$\dot{Q}_{conv} = hA (T_s - T_\infty)$$

Ecuación 1.2. Convección de calor.

Donde, \dot{Q}_{conv} razón de transferencia de calor por convección, h coeficiente de transferencia de calor por convección, A área superficial de transferencia, T_s temperatura de la superficie y T_∞ temperatura del fluido.

Radiación: es la emisión de energía en forma de calor que realiza la materia a través de ondas electromagnéticas. No necesita de un medio de transferencia, como sucede en la conducción y convección (Çengel, 2013). La razón de radiación se expresa a través de la siguiente expresión matemática lineal de la transferencia de calor por radiación entre dos superficies (Duffie et al., 2020).

$$\dot{Q}_{rad} = A h_{rad} (T_2 - T_1)$$

Ecuación 1.3. Radiación de calor.

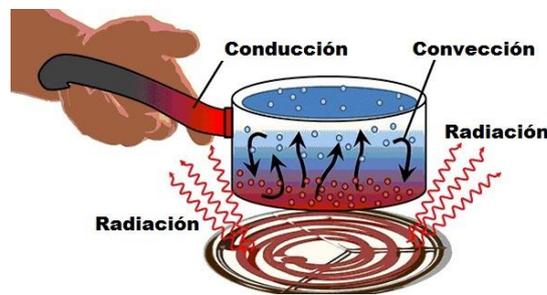


Figura 1.1. Mecanismos de transferencia de calor, (Coluccio, 2022).

Radiación solar

La radiación solar es la energía proveniente del sol que se propaga en el espacio a través de ondas electromagnéticas. Esta energía no llega de manera constante a la superficie de la tierra, por lo tanto, la cantidad de radiación varía a lo largo el día porque depende de la estación, nubosidad, reflectancia y el ángulo de incidencia. La radiación que recibe un metro cuadrado de superficie horizontal se denomina radiación global y es la suma de la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada (Duffie & Beckman, 1982).

La Figura 1.2 muestra un esquema gráfico de cómo se distribuyen las radiaciones en la superficie de un panel fotovoltaico.

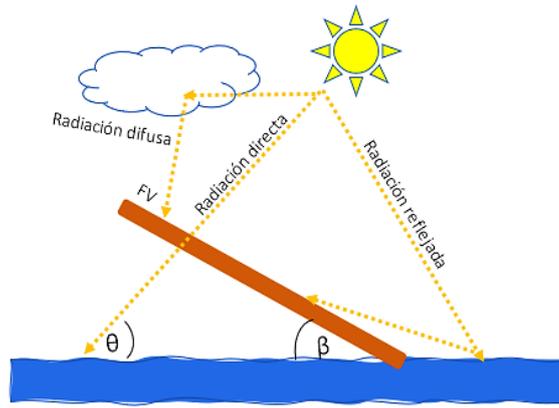


Figura 1.2. Tipos de radiación incidente en un panel fotovoltaico, (Propia).

Se conoce como *Radiación Directa* a la radiación solar que no experimenta cambios de dirección desde que ingresa a la atmósfera hasta llegar a la superficie de la tierra.

La *radiación Difusa* es la que llega a la superficie de la tierra después de haber modificado su dirección al dispersarse en la atmósfera.

Finalmente, la *Radiación Reflejada*, es la radiación que es reflejada por la superficie terrestre y está en función del coeficiente de reflexión de la superficie (Duffie & Beckman, 1982).

Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas se basa en aproximaciones matemáticas en donde se puede reemplazar ecuaciones diferenciales por ecuaciones de diferencias. Esto significa que las aproximaciones de diferencia finita son algebraicas y relacionan los valores de la variable dependiente con los valores de sus puntos vecinos (Cervantes, 2005).

La Figura 1.3 muestra la comparación entre una derivada aproximada por diferencias finitas (segmento continuo) y una derivada analítica (segmento punteado) (Cervantes, 2005).

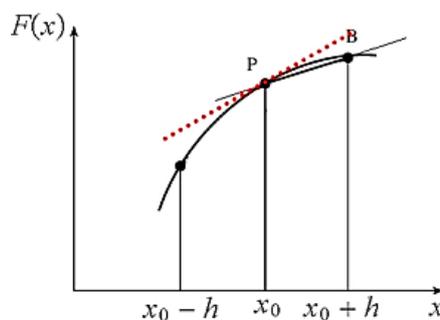


Figura 1.3. Incrementos infinitesimales de una ecuación, (Cervantes, 2005).

La solución por diferencias finitas comprende básicamente tres pasos que son: discretización, aproximación de la ecuación diferencial y solución de las ecuaciones de diferencia.

Discretización

En este paso se busca representar el dominio de una función en una malla de nodos (como se muestra en la Figura 1.4) con la finalidad de convertir a la ecuación diferencial junto con sus condiciones de frontera en un sistema de ecuaciones.

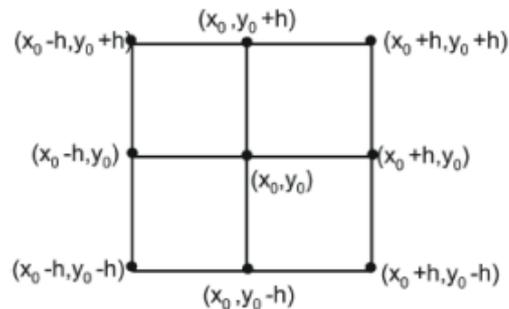


Figura 1.4. Mallado de una función, (Ureña, 2009).

La aproximación de la ecuación diferencial

En este paso se debe aproximar la ecuación diferencial general del sistema por una nueva ecuación de diferencia, en cada punto de la malla (Cervantes, 2005).

La solución por el método implícito

Los problemas de diferencias finitas pueden resolverse a través de método explícito o por el método implícito, sin embargo, las soluciones explícitas presentan inconvenientes relacionados con la estabilidad es decir que los errores pueden amplificarse al avanzar el tiempo. El método implícito supera este inconveniente usando algoritmos más complejos (Chapra & Canale, 2007).

El método implícito de diferencias finitas supera las dificultades de estabilidad que poseen los métodos explícitos usando algoritmos más complejos. En lugar de obtener ecuaciones diferenciales parciales con una sola incógnita, la derivada espacial se aproxima en un nivel de tiempo futuro $t+1$, que, al sustituirse en una ecuación diferencial parcial, permite que la ecuación final este en función de varias incógnitas. Este nuevo sistema de ecuaciones que se obtiene debe resolverse simultáneamente, generalmente, a través de recursos computacionales (Chapra & Canale, 2007).

2 METODOLOGÍA

En este reporte se propone un modelo matemático que permita simular una respuesta térmica de un panel fotovoltaico (FV) que trabaja en condiciones ambientales que cambian continuamente. Este modelo abarca el balance de radiación solar incidente, que permite obtener cuantitativamente la cantidad de energía absorbida por el FV, y el modelo de los flujos de calor dentro del FV y su interacción con el entorno.

1.1 Esquema del balance térmico del sistema

Balance Energético del sistema

El balance energético de un sistema viene dado por la ecuación.

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} + \dot{E}_{generada} = \dot{E}_{almacenada}$$

Ecuación 2.1. Balance de energía.

Para el planteamiento del balance energético se toma como referencia la Figura 2.1, donde se muestra gráficamente las entradas y salidas de energía del FV.

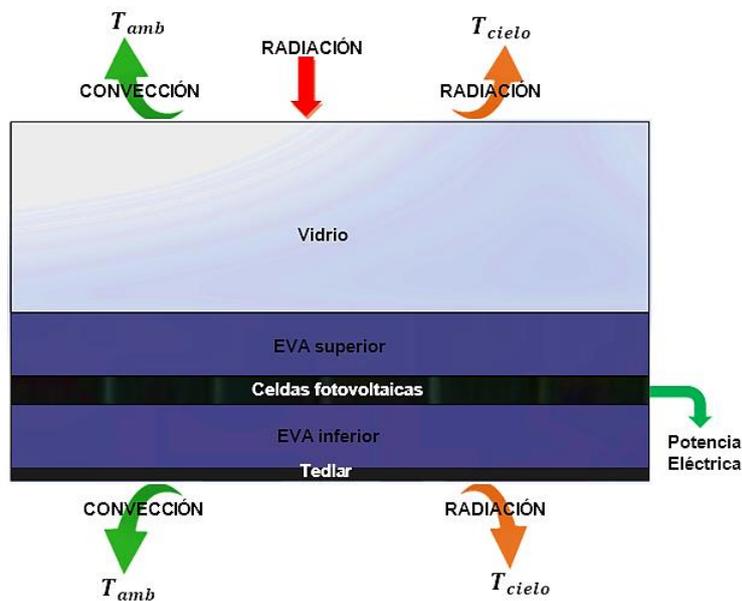


Figura 2.1. Esquema del balance energético del FV, (Propia).

Se consideran pérdidas por convección y radiación en la parte superior (vidrio) e inferior (tedlar) del FV.

2.1 Fuentes de calor

Radiación incidente en el FV

La radiación absorbida total (S) es el resultado de la interacción de las 3 componentes de la radiación Figura 1.2 suponiendo que las radiaciones difusa y reflejada son isotrópicas (Gea et al., 2006).

Para el cálculo de la radiación absorbida total (S), se consideran estas 3 componentes de la radiación incidente, usando la ecuación descrita en el trabajo de Duffie et al. (2020).

$$S = (\tau\alpha)_n M \left[R_b G_b K_b + G_d K_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + G \rho_r K_r \frac{1 - \cos \beta}{2} \right]$$

Ecuación 2.2. Radiación total absorbida.

En donde, $(\tau\alpha)_n$ es el producto de la trasmisividad del vidrio y absortividad del FV a incidencia normal, R_b la relación entre el haz incidente en el FV inclinado y el haz en el plano horizontal. G_b es el fujo de radiación directa en el plano horizontal, G_d es el flujo de radiación difusa en el plano horizontal y G es la radiación global. K_b , K_d y K_r son los modificadores del ángulo de incidencia para las radiaciones directa, difusa y reflejadas, M es la masa de aire que se define como la relación entre la masa de aire que el haz la radiación tiene que atravesar en un momento y lugar determinados a la masa de aire que atravesaría el haz de radiación si el sol estuviera directamente encima como determina De Soto et al (2006).

Finalmente, β es el ángulo de inclinación del panel con respecto a la superficie horizontal del reservorio, ρ_r es la reflectividad del agua del reservorio.

El producto de la trasmisividad del vidrio y absortividad se obtiene usando la ecuación planteada por Duffie et al. (2020).

$$\tau\alpha(\theta_j) = e^{(-KLe/\cos \theta_{rf,j})} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\theta_{rf,j} - \theta_j)}{\sin^2(\theta_{rf,j} + \theta_j)} + \frac{\tan^2(\theta_{rf,j} - \theta_j)}{\tan^2(\theta_{rf,j} + \theta_j)} \right) \right]$$

Ecuación 2.3. Transmisividad y asbortividad.

El ángulo de refracción puede calcularse a partir de la ley de Snell como se muestra en la Ecuación 2.4, donde n_1 es el índice de refracción del aire, n_2 es el índice de refracción del vidrio.

$$n_1 \sin(\theta_j) = n_2 \sin(\theta_{rf,j})$$

Ecuación 2.4. Ley de Snell para el ángulo de refracción.

$$K_{\tau\alpha,j} = \frac{\tau\alpha(\theta_j)}{(\tau\alpha)_n}$$

Ecuación 2.5. Coeficiente de extinción de acristalamiento.

Donde, $K_{\tau\alpha,j}$ es el coeficiente de extinción de acristalamiento correspondiente a cada ángulo θ_j , L_e se define como el espesor del acristalamiento.

El producto de la transmisividad del vidrio y asbortividad $(\tau\alpha)_n$ para una incidencia normal se calcula con el ecuación de Duffie et al. (2020).

$$(\tau\alpha)_n = e^{(-KL_e)} \left[1 - \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \right]$$

Ecuación 2.6. Transmisividad y asbortividad a incidencia normal.

Los ángulos de incidencia (θ_b, θ_d y θ_r) hacen referencia a los ángulos de incidencia de G_b y G_d y de reflectividad. Se determinan a través de las relaciones planteadas por Duffie et al. (2020) y Sánchez Barroso et al. (2016).

$$\theta_b = 90 - (\beta + \theta)$$

Ecuación 2.7. Ángulo de incidencia de G_b .

$$\theta_d = 59.7 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2$$

Ecuación 2.8. Ángulo de incidencia de G_d .

$$\theta_r = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2$$

Ecuación 2.9. Ángulo de incidencia de la radiación reflejada.

Donde, θ_b es el ángulo de incidencia de la radiación directa en el plano horizontal, θ_d es el ángulo de incidencia de la radiación difusa en el plano horizontal y θ_r es el ángulo de incidencia de la radiación reflejada en el reservorio, el ángulo de incidencia (θ) de la radiación directa G con la superficie del reservorio se determina con la Ecuación 2.10 tomada del trabajo de Sánchez Barroso et al. (2016).

$$\theta = 90 - \varphi + \delta$$

Ecuación 2.10. Ángulo de incidencia de G con la superficie del reservorio.

Siendo, φ la latitud del lugar donde se encuentra la instalación del FV y δ es la declinación que viene dada por la ecuación planteada en el trabajo de Duffie et al. (2020).

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + d}{365}\right)$$

Ecuación 2.11. Ángulo de Declinación.

Donde, d es en número del día del año.

La masa de aire se calcula con la Ecuación 2.12 que se toma del trabajo de Duffie et al. (2020).

$$M = \sum_0^4 a_i (AM)^i$$

Ecuación 2.12. Sumatoria de la masa de aire.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z) + 0.5057(96.080 - \theta_z)^{-1.634}}$$

Ecuación 2.13. Masa de aire en función de i .

Donde, AM es la masa de aire y a_i son constantes para diferentes materiales fotovoltaicos en células de silicio monocristalino, θ_z es el ángulo cenital (ángulo entre el sol y la vertical).

La relación R_b es determinada por la ecuación planteada en el trabajo de Sánchez Barroso et al. (2016).

$$R_b = \frac{\sin(\theta + \beta)}{\sin(\theta)}$$

Ecuación 2.14. Relación del ángulo de inclinación e incidencia.

2.2 Condiciones de borde del sistema

Esquema de la sección transversal del panel fotovoltaico

La radiación incidente al FV no es transformada completamente en energía eléctrica, porque parte de esta radiación es absorbida por las diferentes capas que componen el panel fotovoltaico.

En este trabajo se consideran como pérdidas la disipación de calor del FV por convección con el ambiente y, radiación con el cielo y con el reservorio en la superficie del tedlar. Esto se observa en la Figura 2.2.

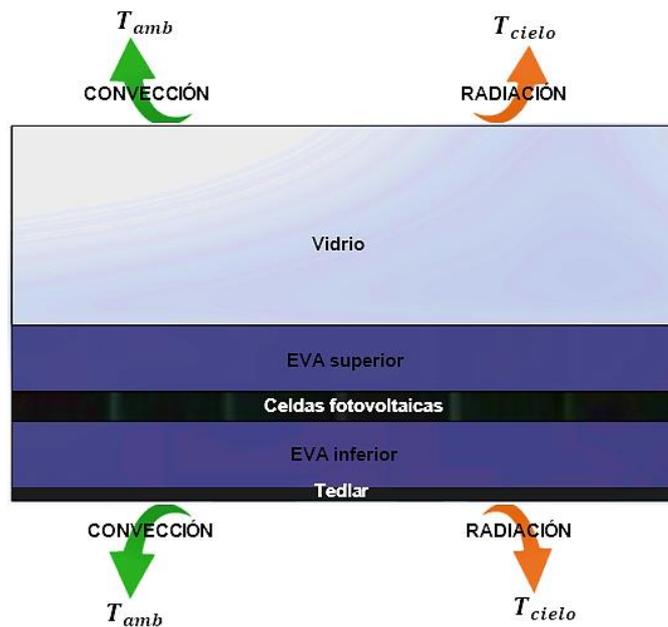


Figura 2.2. Esquema de las pérdidas de Calor del FV, (Propia).

Convección

La transferencia de calor por convección se puede calcular a partir de una variedad de técnicas disponibles en la literatura tal como lo establece Notton et al. (2005). Sin embargo, la técnica elegida depende principalmente de la configuración del sistema. De esta manera, se considera que el modo de transferencia de calor por convección en un panel fotovoltaico estacionario sucede a través de convección libre.

$$h_{conv,libre} = \frac{Nu_{libre} \times k_{aire}}{L_{PV}}$$

Ecuación 2.15. Coeficiente de convección libre.

Donde, Nu es el número de Nusselt, k_{aire} es la conductividad térmica del aire y L_{PV} es la longitud del panel fotovoltaico.

El número de Nusselt para convección libre se determina usando las ecuaciones usadas por Usama Siddiqui et al. (2012).

$$Nu_{libre} = \begin{cases} 0.76 Ra^{1/4} & \text{para } 10^4 < Ra < 10^7 \\ 0.15 Ra^{1/3} & \text{para } 10^7 < Ra < 3 \times 10^{10} \end{cases}$$

Ecuación 2.16. Número de Nusselt para convección libre.

Donde, Ra es el número adimensional de Rayleigh, y Pr es el número de Prandtl. Su valor viene dado por las correlaciones empíricas de Çengel (2013).

$$Gr = \frac{g \beta_{aire} (T_{sup} - T_{amb}) L_{pV}^3}{\nu^2}$$

Ecuación 2.17. Número de Grashof.

$$Ra = Gr \times Pr$$

Ecuación 2.18. Número de Rayleigh.

$$\beta_{aire} = \frac{1}{T_{film}}$$

Ecuación 2.19. Coeficiente de expansión térmica.

Donde, ν es viscosidad cinemática del aire, β_{aire} coeficiente de expansión térmica, T_{sup} es la temperatura del vidrio o del tedlar del FV, T_{amb} es la temperatura ambiente.

Si bien la temperatura superficial frontal es dependiente de la temperatura alcanzada por las celdas fotovoltaicas, esta se puede determinar tal como recomienda Armstrong & Hurley (2010).

$$T_{sup,frontal} = T_{base} + \frac{S}{1000} \Delta T$$

Ecuación 2.20. Temperatura superficial frontal.

En este caso también es necesario asumir que la temperatura del tedlar es igual a la temperatura ambiente, entonces la temperatura del vidrio sería mayor que la temperatura del tedlar.

Donde, T_{base} es la temperatura superficial del tedlar, ΔT es la diferencia de temperatura entre el vidrio y el tedlar a una radiación solar de 1000 W/m².

De acuerdo con las recomendaciones de Çengel (2013), el número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies inclinadas debe usarse el producto de $g \cos(90 - \beta)$ en lugar de g cuando $0^\circ < (90 - \beta) < 60^\circ$.

Las propiedades tabuladas del aire para el cálculo del número de Nusselt deben obtenerse siempre a una temperatura de película, que se define como:

$$T_{film} = \frac{T_{sup} + T_{amb}}{2}$$

Ecuación 2.21. Temperatura de película.

La ecuación general para la transferencia de calor por convección se establece en la Ecuación 1.2, que reescribiendo en los términos requeridos se tiene:

$$Q_{conv,sup} = h_{conv,sup}(T_{sup} - T_{amb})$$

Ecuación 2.22. Transferencia de calor por convección en el vidrio del FV.

De la misma manera se realiza el procedimiento para el cálculo de la transferencia de calor por convección del tedlar.

Radiación

En la transferencia de calor por radiación de la superficie del panel fotovoltaico intervienen dos componentes de pérdida entre la superficie del cielo y el vidrio del FV, y entre la superficie del reservorio y el tedlar del FV.

Tomando la Ecuación 1.3 se realiza el cálculo del coeficiente de radiación.

$$h_{rad} = \frac{\sigma (T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)A_1}{\varepsilon_2 A_2}}$$

Ecuación 2.23. Coeficiente de radiación entre dos superficies.

Si las áreas A_1 y A_2 no son iguales el valor numérico de h_{rad} depende del área usada (Duffie et al., 2020), el término $\frac{(1-\varepsilon_2)A_1}{\varepsilon_2 A_2}$ de esta ecuación se omite porque el área del cielo y el reservorio es muy grande en comparación con el FV, $A_2 \gg A_1$.

Trasladando las ecuaciones de h_{rad} a la aplicación puntal de este trabajo de tiene:

$$h_{rad,sup/cielo} = \frac{\sigma (T_{sup}^2 + T_{cielo}^2)(T_{sup} + T_{cielo})}{\frac{1 - \varepsilon_{sup}}{\varepsilon_{sup}} + \frac{1}{F_{sup-cielo}}}$$

Ecuación 2.24. Coeficiente de radiación entre el cielo y el vidrio del FV.

$$h_{rad,inf/reservorio} = \frac{\sigma (T_{inf}^2 + T_{reservorio}^2)(T_{inf} + T_{reservorio})}{\frac{1 - \varepsilon_{inf}}{\varepsilon_{inf}} + \frac{1}{F_{inf-reservorio}}}$$

Ecuación 2.25. Coeficiente de radiación entre el reservorio y el tedlar del FV.

Donde, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, ε_{sup} es la emisividad del vidrio del FV, ε_{inf} es la emisividad del tedlar del FV, T_{sup} y T_{inf} son las temperaturas de del vidrio y tedlar del

FV respectivamente, T_{cielo} y $T_{reservorio}$ son las temperaturas del cielo y el reservorio respectivamente, $F_{sup-cielo}$ y $F_{inf-reservorio}$ son factores de vista F.

La temperatura del cielo se calcula a través de la expresión de Swinbank (1963).

$$T_{cielo} = 0.0552 \times T_{amb}^{1.5}$$

Ecuación 2.26. Temperatura del cielo.

Los factores F se definen en Aly et al. (2018) y dependen del ángulo de inclinación del FV.

$$F_{sup-cielo} = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)$$

Ecuación 2.27. Factor F entre el vidrio y el cielo.

$$F_{inf-reservorio} = \frac{1}{2}(\pi - \cos \beta)$$

Ecuación 2.28. Factor F entre el tedlar y el reservorio.

Para el cálculo de h_{rad} se realiza la sumatoria de la Ecuación 2.24 y la Ecuación 2.25:

$$h_{rad} = h_{rad,sup-cielo} + h_{rad,inf-reservorio}$$

Ecuación 2.29. Coeficiente de radiación total del FV.

2.3 Especificaciones técnicas y configuración del FV

La Tabla 2.1 muestra las propiedades físicas y materiales de cada una de las capas que compone el panel fotovoltaico.

Tabla 2.1. Propiedades y materiales del panel fotovoltaico BP 350.

CAPA DEL FV	Espesor, L_e [$10^{-3}m$]	Conductividad térmica, k [W/mK]	Densidad, ρ [kg/m^3]	Calor específico, C_p [J/kgK]
Vidrio frontal	3	1.8	3000	500
Encapsulante superior de Etileno Vinil acetato (EVA)	0.5	0.35	960	2090
Celdas fotovoltaicas	0.225	148	2330	677
EVA inferior	0.5	0.35	960	2090
Tedlar	0.1	0.2	1200	1250

Fuente: (Armstrong & Hurley, 2010).

Para las características geométricas del FV se toma como referencia el modelo de Sunpower (2020) como se muestra en la Figura 2.3.

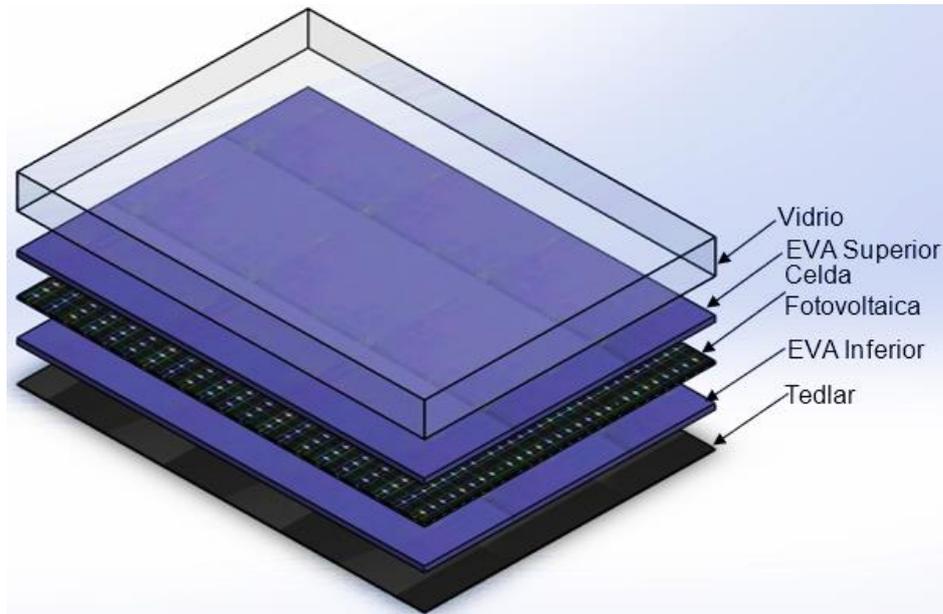


Figura 2.3. Esquema físico del panel fotovoltaico, (Propia).

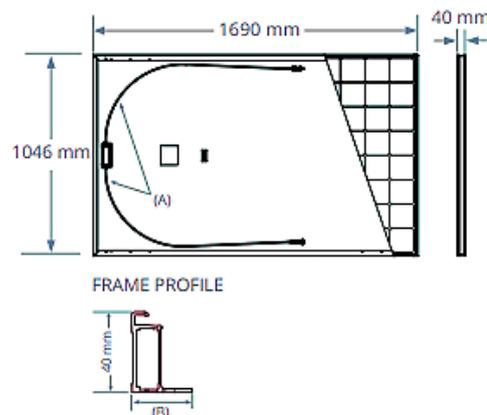


Figura 2.4. Características geométricas del panel fotovoltaico, (Sunpower, 2020).

En función del esquema se asume que el área convectiva, el área de la célula fotovoltaica y el área de absorción son iguales. La emisividad del vidrio y del tedlar se considera constante.

2.4 Condiciones de estudio

En el modelo planteado en este documento intervienen distintas variables que son necesarias para establecer la temperatura alcanzada por las celdas fotovoltaicas de FV, los valores de estas variables se establecen en las siguientes secciones.

Asimismo, es necesario establecer un referente real que permita obtener datos meteorológicos a través del uso de la herramienta de The National Renewable Energy Laboratory (NREL) que se encuentran en el ANEXO I, en este caso se toma la hidroeléctrica Paute Mazar ubicada en el límite de las provincias Azuay y Cañar. Los datos corresponden a las radiaciones (G_d, G_b y G) ángulo cenital, velocidad del viento, temperatura ambiente del día 36 del año 2020 en un horario de 6:00 am a 18:00 pm.

Condiciones de estudio para el cálculo de la radiación incidente

La Tabla 2.2 muestra el valor de las variables necesarias para todas las ecuaciones referentes al cálculo de la radiación incidente en el FV, al considerar los datos del ANEXO I en horario de 13:00 pm.

Tabla 2.2. Valores de las variables para el cálculo de la radiación incidente.

Variable	Valor	Unidad	Fuente
n_1	1	[1]	Valor promedio según la tabla 5.1.1 de Duffie et al. (2020).
n_2	1.526	[1]	
β	14	°	Valor obtenido Figura 3.1
d	36	[1]	Valor asumido (día del año)
φ	-2.580	[1]	Latitud correspondiente de la hidroeléctrica Paute Mazar (NREL, 2020)
G_d	126	W/m^2	(NREL, 2020), ANEXO I.
G_b	984	W/m^2	
G	1076	W/m^2	
θ_z	15.16	°	(NREL, 2020), ANEXO I.
K	4	m^{-1}	valor que corresponde a un vidrio transparente según De Soto et al. (2006).
L_e	3	mm	Tabla 2.1 de este documento
ρ_r	0.2	[1]	Valor que corresponde a una calidad de aguas verdes Domínguez (2003).
a_0	0,935823	[1]	Valor de las constantes para diferentes materiales fotovoltaicos en células de silicio monocristalino (Fanney et al., 2002).
a_1	0,054289	[1]	
a_2	-0,00867	[1]	
a_3	0,000527	[1]	
a_4	-0,00001	[1]	
T_{amb}	24.6	°C	(NREL, 2020), ANEXO I.
ΔT	3	°C	Tabla 1 del trabajo de King et al. (2004), para un panel fotovoltaico de rack abierto con una composición de vidrio/célula fotovoltaica/lámina de polímero.
T_{base}	24.6	°C	Valor asumido debido a que el recubrimiento trasero del FV no tiene una incidencia directa de la radiación.

Fuente: Propia

Condiciones de estudio para el cálculo de la convección

La Tabla 2.3 muestra el valor de las variables necesarias para todas las ecuaciones referentes al cálculo de la convección, al considerar los datos del ANEXO I en horario de 13:00 pm.

Tabla 2.3. Condiciones de estudio para la convección.

Variable	Valor	Unidad	Fuente
V_w	2.5	m/s	(NREL, 2020), ANEXO I.
ΔT	3	$^{\circ}C$	Tabla 1 del trabajo de King et al. (2004), para un panel fotovoltaico de rack abierto con una composición de vidrio/célula fotovoltaica/lámina de polímero.
T_{base}	24.6	$^{\circ}C$	Valor asumido debido a que el recubrimiento trasero del FV no tiene una incidencia directa de la radiación.
L_{PV}	1.046	m	Figura 2.4 de este documento.

Fuente: Propia

Condiciones de estudio para el cálculo de la radiación

La Tabla 2.4 muestra el valor de las variables necesarias para todas las ecuaciones referentes al cálculo de la radiación, al considerar los datos del ANEXO I en horario de 13:00 pm.

Tabla 2.4. Condiciones de estudio para la radiación.

Variable	Valor	Unidad	Fuente
σ	$5.67e10^{-08}$	W/m^2K^4	(Çengel, 2013)
ϵ_{sup}	0.91	[1]	Datos tomados del trabajo de Armstrong (2010)
ϵ_{inf}	0.85	[1]	
$T_{reservorio}$	13.7	$^{\circ}C$	Se toma como referencia la temperatura anual registrada en la hidroeléctrica Paute Molino Embalse Amaluza, ya que se ubican en el mismo cantón (CELEC EP, 2011).

Fuente: Propia

2.5 Cálculo de variables

Los cálculos que se muestran en este apartado corresponden únicamente a los datos del ANEXO I en horario de 13:00 pm, los valores que se obtienen usando los datos de los horarios faltantes se encuentran en el ANEXO II.

Cálculo de la radiación incidente en el FV

La Tabla 2.5 muestra los valores calculados de los ángulos de incidencia correspondientes a las 3 radiaciones incidentes necesarios para el cálculo de la radiación incidente S .

Tabla 2.5. Valores obtenidos de diferentes parámetros.

Parámetro	Valor	Unidad
δ	-16.402	°
θ	76.178	°
θ_b	-0.178	°
θ_d	58.050	°
θ_r	82.425	°
$\theta_{rf,b}$	-0.117	°
$\theta_{rf,d}$	33.893	°
$\theta_{rf,r}$	40.653	°
$\tau\alpha(\theta_b)$	0.946	[1]
$\tau\alpha(\theta_d)$	0.903	[1]
$\tau\alpha(\theta_r)$	0.507	[1]
$(\tau\alpha)_n$	0.946	[1]
K_b	1.000	[1]
K_d	0.955	[1]
K_r	0.536	[1]

Fuente: Propia

La Tabla 2.6 muestra los valores obtenidos para el cálculo de la masa de aire M de la Ecuación 2.12.

Tabla 2.6. Valores obtenidos para la masa de aire.

$AM = 1.530$		
i	a_i	$a_i(AM)^i$
0	0.935823	0.9358
1	0.054289	0.0562
2	-0.008677	-0.0093
3	0.000527	5.85×10^{-04}
4	-0.000011	-1.26×10^{-05}
M	0.983	

Fuente: Propia

Finalmente se obtiene el valor de la radiación total reemplazando los valores obtenidos en la Tabla 2.5 y Tabla 2.6 en la Ecuación 2.2.

$$S = 875W/m^2$$

Cálculo para la convección entre el vidrio y el tedlar del FV

La Tabla 2.7 muestra los resultados de las variables necesarias para el cálculo del coeficiente de convección libre y forzada entre el vidrio y del tedlar del FV y el ambiente, al considerar los datos del ANEXO I en horario de 13:00 pm.

Tabla 2.7. Cálculo de las variables de la convección del vidrio y del tedlar del FV.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Unidad
$T_{sup,frotal}$	27.225	T_{tedlar}	24.6	$^{\circ}C$
T_{film}	25.913	T_{film}	24.6	$^{\circ}C$
$k_{aire,vf}$	0.026	$k_{aire,tedlar}$	0.025	W/mK
$\mu_{aire,vf}$	1.85×10^{-05}	$\mu_{aire,tedlar}$	1.84×10^{-05}	kg/ms
$\nu_{aire,vf}$	1.57×10^{-05}	$\nu_{aire,tedlar}$	1.56×10^{-05}	m^2/s
Pr_{vf}	0.729	Pr_{tedlar}	0.729	
$\beta_{aire,vf}$	0.0386	$\beta_{aire,tedlar}$	0.041	$1/^{\circ}C$
$Gr_{aire,vf}$	4.61×10^{09}	$Gr_{aire,tedlar}$	0	
$Ra_{aire,vf}$	3.36×10^{09}	$Ra_{aire,tedlar}$	0	
Nu_{libre}	224.746	Nu_{libre}	0	
$h_{conv,vidrio\ frontal}$	5.49	$h_{conv,tedlar}$	0	W/m^2K

Fuente: Propia

Finalmente, el coeficiente de radiación total es la suma de $h_{conv,vidrio\ frontal}$ y $h_{conv,tedlar}$

$$h_{conv,total} = 5.49 \frac{W}{m^2K}$$

Cálculo para el coeficiente de radiación entre el vidrio y el cielo.

La Tabla 2.8 muestra los resultados de las variables necesarias para el cálculo del coeficiente de radiación entre el vidrio del FV y el ambiente, al considerar los datos del ANEXO I en horario de 13:00 pm.

Tabla 2.8. Cálculo de las variables de la radiación en el vidrio del FV y el cielo.

Parámetro	Valor	Unidad
T_{cielo}	28.360	$^{\circ}C$
$F_{sup-cielo}$	0.985	[1]
$h_{rad,sup/cielo}$	0.0044	W/m^2K

Fuente: Propia

Cálculo del coeficiente de radiación entre el tedlar y el reservorio.

La Tabla 2.9 muestra los resultados de las variables necesarias para el cálculo del coeficiente de radiación entre el tedlar del FV y el ambiente, al considerar los datos del ANEXO I en horario de 13:00 pm.

Tabla 2.9. Cálculo de las variables de la radiación del tedlar del FV y el reservorio.

Parámetro	Valor	Unidad
$F_{inf-reservorio}$	1.086	[1]
$h_{rad,inf/reservorio}$	0.0016	W/m^2K

Fuente: Propia

Finalmente, el coeficiente de radiación total es la suma de $h_{rad,sup/cielo}$ y $h_{rad,inf/reservorio}$

$$h_{rad} = 0.006 \frac{W}{m^2K}$$

2.6 Conducción de calor en el panel fotovoltaico

Ecuación general de la conducción de calor

La conducción que se da a lo largo de la sección transversal del FV viene dada por la ecuación.

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(k \frac{dT}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(k \frac{dT}{dz} \right) + \dot{E}_{gen} = \rho C \frac{dT}{dt}$$

Ecuación 2.30. Conducción de calor en una placa.

Donde, $\frac{d}{d(x,y,z)} \left(\frac{dT}{d(x,y,z)} \right)$ es la variación de la temperatura a lo largo de los ejes (x, y, z), k es la conductividad térmica, \dot{E}_{gen} es la energía generada, ρ es la densidad, C es la capacidad calorífica y $\frac{dT}{dt}$ es la variación de la temperatura con respecto al tiempo.

Se debe considerar que:

- La transferencia de calor por conducción se da en una sola dirección, y para fines prácticos se considera la dirección x.
- El análisis se realiza a través de un análisis en estado transitorio.
- En las capas interiores del panel se considera un estado adiabático.
- No existe generación de calor por conducción.

Con lo cual reescribiendo la Ecuación 2.30 para la conducción de calor bajo las consideraciones anteriores se tiene:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = \rho C \frac{dT}{dt}$$

Ecuación 2.31. Conducción de calor unidireccional.

2.7 Modelo matemático del sistema

Método de diferencias finitas

El método de diferencias finitas a través del método explícito permite desarrollar los términos de la Ecuación 2.31 de manera independiente, como lo establece Chapra & Canale (2007).

Ya que en la ecuación de calor por conducción del FV interviene una segunda derivada en la dirección espacial x , es preferible representar esta segunda derivada como una diferencia finita centrada de tal manera que:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dT}{dx} \right) = \frac{d^2T}{dx^2} \approx \frac{T(x + \Delta x, t) + T(x - \Delta x, t) - 2T(x, t)}{\Delta x^2} = \frac{T_{k+1}^t + T_{k-1}^t - 2T_k^t}{\Delta x^2}$$

Ecuación 2.32. Descomposición de $\frac{d^2T}{dx^2}$ en diferencias finitas.

Donde, T_{k+1}^t es la temperatura del nodo superior en un determinado tiempo, T_{k-1}^t es la temperatura del nodo inferior en un determinado tiempo, T_k^t es la temperatura del nodo analizado en un determinado tiempo.

Por otra parte, el término de la primera derivada con respecto al tiempo debe aproximarse a través de una diferencia finita hacia delante, como se establece en Chapra & Canale (2007).

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{T(x, t + \Delta t) - T(x, t)}{\Delta t} = \frac{T_k^{t+\Delta t} - T_k^t}{\Delta t}$$

Ecuación 2.33. Descomposición de $\frac{dT}{dt}$ en diferencias finitas.

Donde, $T_k^{t+\Delta t}$ es la temperatura del nodo analizado en un nuevo tiempo $t + \Delta t$, Δt es el incremento del tiempo.

La Ecuación 2.32 y Ecuación 2.33 deben ser calculadas en el mismo instante por lo que es necesario realizar un esquema de tiempo implícito donde del tiempo previo t se reemplaza por un nuevo tiempo $t + \Delta t$ en la Ecuación 2.33, $t + \Delta t = t + 1$, quedando:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dT}{dx} \right) = \frac{T_{k+1}^{t+1} - 2T_k^{t+1} + T_{k-1}^{t+1}}{\Delta x^2}$$

Ecuación 2.34. Aproximación de t a $t+1$.

En la Figura 2.5 se muestra una referencia de la distribución de los nodos en la malla 1D, estos nodos se ubicarán indistintamente a lo largo del espesor del FV por lo que resulta necesario realizar un balance de energía para cada nodo de manera individual. Sin embargo, debido a que el FV está compuesto por varias capas de diferentes materiales, y propiedades, se debe realizar un balance energético para abarcar todas estas condiciones. Por esta razón se realiza un balance energético en 3 nodos representativos que son: nodo de la superficie del vidrio, tedlar y en los nodos interiores del FV.

Formación de nodos

Para la formación de la malla 1D en el FV, se necesita establecer el dominio (espesor del FV= e) y dividirlo en pequeños segmentos (nodos) luego se realiza un balance de energía en cada uno de los nodos formados para obtener la distribución de temperatura en el sistema.

Los espesores, así como las propiedades de cada material que conforma el FV se encuentra detallado en la Tabla 2.1.

La malla se forma a lo largo del espesor del FV y consiste en k puntos nodales distribuidos a lo largo del eje x , el nodo inicial de la malla se establece en la parte inferior (tedlar) del FV, es decir en el tedlar/ambiente, cada nodo se identifica mediante un número de coordenadas x_k donde, $1 \leq x_k \leq k$ y $x_k = k\Delta x$, Δx es la distancia de separación entre dos nodos y su valor viene dado por la siguiente relación:

$$\Delta x = \frac{e}{k}$$

Ecuación 2.35. Distancia entre nodos.

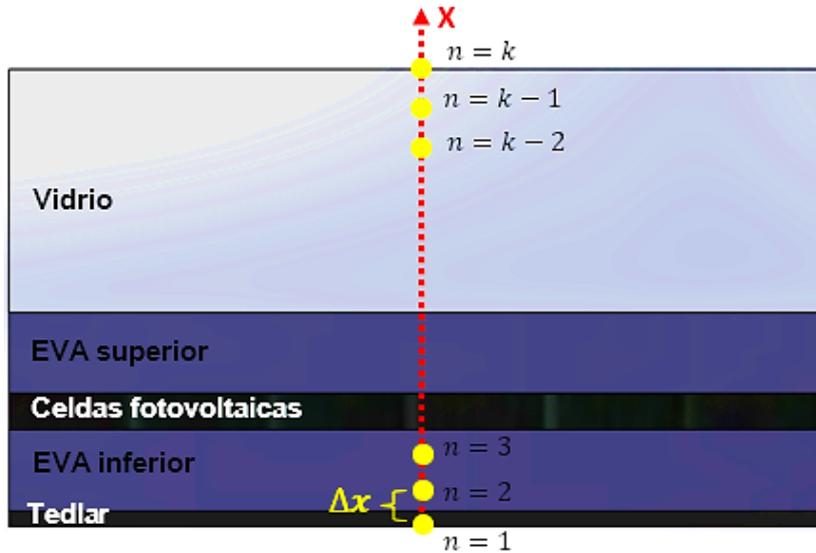


Figura 2.5. Malla 1D de la sección transversal del FV, (Propia).

Generación del modelo matemático

Balance de energía en el nodo del vidrio

Sabiendo que existe un intercambio de energía entre el FV y el ambiente que lo rodea, el balance de energía planteado asume que toda la energía térmica ingresa al nodo en la superficie. Entonces, para los nodos de los contornos ($n=k$ y $n=1$) se debe incluir los intercambios de calor con el ambiente por convección y radiación, y con el FV por conducción. Finalmente, la ecuación discretizada del nodo en el límite superior se realiza en la mitad del volumen formado entre el nodo límite ($n=k$) y el nodo adyacente a este ($n=k-1$).

La Figura 2.6 muestra el volumen de control que se usa para realizar el balance de energía en el nodo final de la superficie del vidrio.

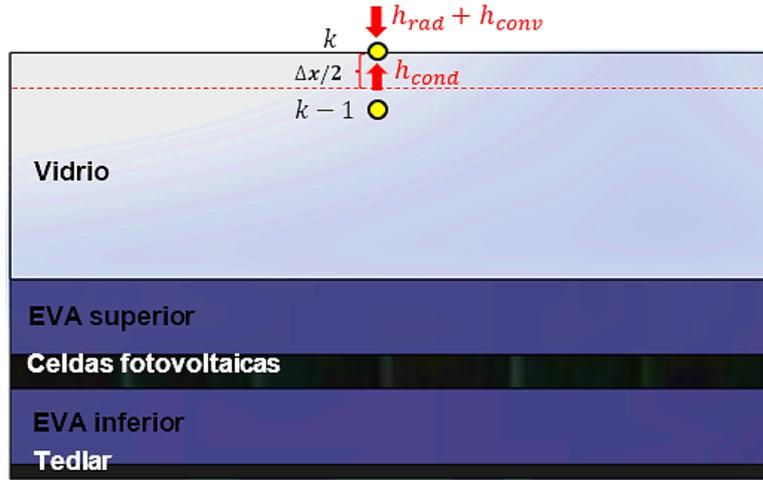


Figura 2.6. Balance de energía en el nodo superior del FV, (Propia).

Partiendo de la Ecuación 1.1 y con las condiciones asumidas se tiene que:

$$\dot{E}_{entrada,k} = \dot{E}_{almacenada,k}$$

Ecuación 2.36. Balance de energía en el nodo k .

Tomando el término $\dot{E}_{entrada,k}$ reescribiendo en función del calor se tiene la Ecuación 2.37.

$$\dot{E}_{entrada,sup} = Q_{cond,sup} + Q_{conv,sup} + Q_{rad,sup}$$

Ecuación 2.37. Energía que entra en el nodo k .

Reemplazando las definiciones de calor para convección, conducción y radiación se tiene la Ecuación 2.38.

$$\dot{E}_{entrada,k} = k \left(\frac{T_{k-1}^{t+1} - T_k^{t+1}}{\Delta x} \right) + h_{conv,sup} (T_{amb} - T_k^{t+1}) + h_{rad,sup/cielo} (T_{cielo} - T_k^{t+1})$$

Ecuación 2.38. Energía que entra en el nodo k en diferencias finitas.

La energía almacenada en el nodo $n=k$ es:

$$\dot{E}_{almacenada,k} = \rho C \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T_k^{t+1} - T_k^t}{\Delta t} \right)$$

Ecuación 2.39. Energía almacenada en el nodo k .

De manera que al reemplazar la Ecuación 2.38 y Ecuación 2.39 en la Ecuación 2.36 y despejando la temperatura en el nodo se obtiene:

$$T_k^t = \frac{2}{\rho C} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \left[T_k^{t+1} \left(\frac{\rho C \Delta x}{2 \Delta t} + \frac{k}{\Delta x} + h_{conv,sup} + h_{rad,sup/cielo} \right) - T_{k-1}^{t+1} \left(\frac{k}{\Delta x} \right) - (T_{amb} h_{conv,sup} + T_{cielo} h_{rad,sup/cielo}) \right]$$

Ecuación 2.40. Temperatura en el nodo k .

Balance de energía en el nodo del tedlar

El balance de energía para el nodo inferior se muestra en la Figura 2.7, la ecuación discretizada del nodo en el límite inferior se realiza en la mitad del volumen formado entre el nodo límite ($n=1$) y el nodo adyacente a este ($n=2$).

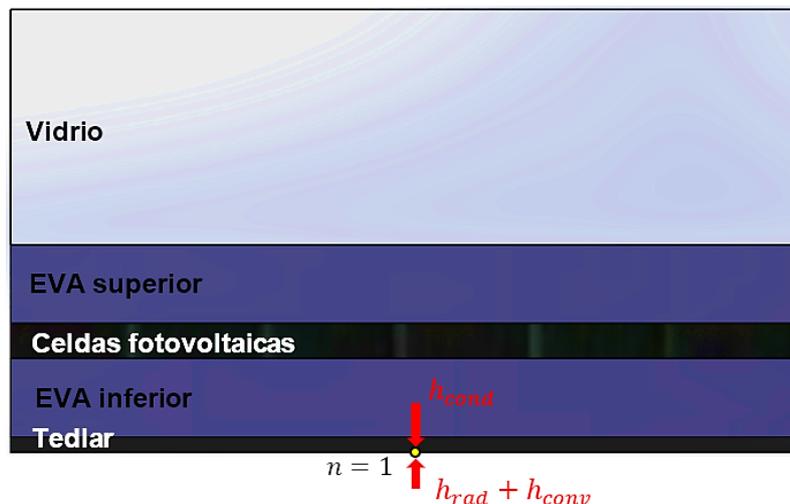


Figura 2.7. Balance de energía en el nodo inferior, (Propia).

Se realiza el balance de energía en el primer nodo, con la diferencia que en este nodo no existe energía generada, por lo tanto, la Ecuación 1.1 queda:

$$\dot{E}_{entrada,1} = \dot{E}_{almacenada,1}$$

Ecuación 2.41. Balance de energía en el nodo 1.

Tomando el término $\dot{E}_{entrada,1}$ reescribiendo en función del calor se tiene la Ecuación 2.42, reemplazando las definiciones de calor para convección, conducción y radiación se tiene la Ecuación 2.43.

$$\dot{E}_{entrada,1} = Q_{cond,inf} + Q_{conv,inf} + Q_{rad,inf}$$

Ecuación 2.42. Energía que entra en el nodo 1.

$$\dot{E}_{entrada,1} = k \left(\frac{T_{k+1}^{t+1} - T_k^{t+1}}{\Delta x} \right) + h_{conv,inf} (T_{amb} - T_k^{t+1}) + h_{rad,inf/reservorio} (T_{reservorio} - T_k^{t+1})$$

Ecuación 2.43. Energía que entra en el nodo 1 en diferencias finitas.

La energía almacenada en el nodo $n=k$ es:

$$\dot{E}_{almacenada,1} = \rho C \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T_k^{t+1} - T_k^t}{\Delta t} \right)$$

Ecuación 2.44. Energía almacenada en el nodo 1.

De manera que al reemplazar la Ecuación 2.43 y Ecuación 2.44 en la Ecuación 2.41 y despejando la temperatura en el nodo k de obtiene:

$$T_k^t = \frac{2}{\rho C} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \left[T_k^{t+1} \left(\frac{\rho C \Delta x}{2 \Delta t} + \frac{k}{\Delta x} + h_{conv,inf} + h_{rad,inf/reservorio} \right) - T_{k+1}^{t+1} \left(\frac{k}{\Delta x} \right) - (T_{amb} h_{conv,inf} + T_{reservorio} h_{rad,inf/reservorio}) \right]$$

Ecuación 2.45. Temperatura en el nodo 1.

Balance energético en los nodos interiores

En el balance de energía para los nodos interiores del FV se toma como volumen de control un incremento espacial completo Δx , además como ya se mencionó con anterioridad dentro del FV no existe generación de calor por lo tanto el intercambio de calor en los nodos interiores solo se da por conducción.

Por lo tanto, el balance de energía general en los nodos interiores tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{E}_{entrada,n} = \dot{E}_{almacenada,n}$$

Ecuación 2.46. Balance de energía en el nodo n .

Donde, n hace referencia a cualquier nodo interior del FV.

$$k_{k+1/2} \left(\frac{T_{k+1}^{t+1} - T_k^{t+1}}{\Delta x} \right) - k_{k-1/2} \left(\frac{T_k^{t+1} - T_{k-1}^{t+1}}{\Delta x} \right) = \rho_k C_k \Delta x \left(\frac{T_k^{t+1} - T_k^t}{\Delta t} \right)$$

Ecuación 2.47. Balance de energía en el nodo n .

$$T_k^t = T_k^{t+1} - \left(\frac{\Delta t}{\rho_k C_k \Delta x} \left[k_{k+1/2} \left(\frac{T_{k+1}^{t+1} - T_k^{t+1}}{\Delta x} \right) - k_{k-1/2} \left(\frac{T_k^{t+1} - T_{k-1}^{t+1}}{\Delta x} \right) \right] \right)$$

Ecuación 2.48. Temperatura en el nodo n .

2.8 Traslado del modelo matemático a Matlab

El traslado del modelo matemático a lenguaje de cálculo técnico se realiza a través de Mathworks, (2019), de acuerdo con la siguiente metodología:

1. Determinación del ángulo de inclinación del FV, al cual se obtiene una mayor radiación incidente, el código de detalla en el ANEXO III.
2. Una vez obtenido el ángulo de inclinación se realiza el cálculo de la radiación incidente bajo las condiciones de entrada de: $\beta, G_d, G_b, G, \theta_z, d$ y V_w
3. Se obtiene las condiciones de borde del sistema para convección y radiación con datos de entrada $T_{amb}, T_{tedlar}, T_{reservorio}$. En este punto son necesarios los datos de constantes como densidad del aire, calor específico, etc., mismos que se obtienen de la tabla A-15 de (Çengel, 2013) (ANEXO IV).
4. Procedimiento de implementación numérica del método implícito de diferencias finitas:
 - Definir las propiedades y dimensiones para cada capa del FV e importar los valores de las condiciones de entrada del paso 2.
 - Establecer los parámetros de diferencias finitas: número de nodos n en i , paso dt , para el tiempo t en j , para obtener el campo térmico $T(i(n), j(t))$.
 - Debido a que se obtienen n ecuaciones con n incógnitas el sistema debe resolverse simultáneamente y al tratarse de ecuaciones algebraicas el sistema se reduce a un sistema lineal de la forma $[A]\{T\} = \{D\}$, donde A ($n \times n$) es la matriz de coeficientes adyacentes a una temperatura desconocida, D ($n \times 1$) es el vector de valores conocidos que se encuentran junto a una temperatura conocida o desconocida, y T ($n \times 1$) son los valores de temperaturas desconocidas.
 - Establecer la matriz A ($n \times n$) de coeficientes adyacentes a una temperatura desconocida.

$$[A]\{T\} = \{D\}$$

Ecuación 2.49. Sistema de ecuaciones lineales.

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_n & b_n & c_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & b_n & c_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{k-1} & b_{k-1} & c_{k-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_k & b_k \end{bmatrix} x\{T\} = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_n \\ d_{k-1} \\ d_k \end{Bmatrix}$$

Ecuación 2.50. Descomposición del sistema de ecuaciones lineales.

- Los valores de las constantes de la matriz A , se describen en la Tabla 2.10. Estas ecuaciones forman parte del balance energético en los nodos correspondientes.

Tabla 2.10. Designación de ecuaciones para las variables de la matriz A .

Variable	Ecuación	Nodo
a_1	0	
b_1	$\frac{2\Delta t}{\rho C_p \Delta x} \left[\frac{\rho C_p \Delta x}{2\Delta t} + \frac{k}{\Delta x} + h_{conv,inf} + h_{rad,inf/reservorio} \right]$	1
c_1	$\frac{2\Delta t}{\rho C_p \Delta x} \left[\frac{\rho C_p \Delta x}{2\Delta t} - \frac{k}{\Delta x} \right]$	
a_n	$\frac{\Delta t}{\rho C_p \Delta x} \left[\frac{\rho C_p \Delta x}{2\Delta t} + \frac{2k}{\Delta x} \right]$	
b_n	$\frac{\Delta t}{\rho C_p \Delta x} \left[-\frac{k}{\Delta x} \right]$	n
c_n	$\frac{\Delta t}{\rho C_p \Delta x} \left[-\frac{k}{\Delta x} \right]$	
a_k	$\frac{2\Delta t}{\rho C_p \Delta x} \left[\frac{\rho C_p \Delta x}{2\Delta t} + \frac{k}{\Delta x} + h_{conv,sup} + h_{rad,sup/cielo} \right]$	
b_k	$\frac{2\Delta t}{\rho C_p \Delta x} \left[\frac{\rho C_p \Delta x}{2\Delta t} - \frac{k}{\Delta x} \right]$	k
c_k	0	

Fuente: Propia

- Reescribiendo la matriz triangular A como producto de dos matrices triangulares de la forma:

$$\begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_n & b_n & c_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_n & b_n & c_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{k-1} & b_{k-1} & c_{k-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_k & b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \alpha_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \alpha_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \alpha_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_n \\ \gamma_n \\ \gamma_n \\ \gamma_n \\ \gamma_k \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.51. Descomposición de la matriz A por el método de Thomas.

- A través del método de Thomas se reemplaza la matriz A con los valores de las variables de la Ecuación 2.52 y Ecuación 2.53.

$$\alpha_1 = \frac{c_1}{b_1} \qquad \gamma_1 = \frac{d_1}{b_1}$$

Ecuación 2.52. Variables del nodo 1.

$$\alpha_n = \frac{c_n}{b_n - \alpha_{n-1} * a_n} \qquad \gamma_n = \frac{d_n - \gamma_{n-1} * a_n}{b_n - \alpha_{n-1} * a_n}$$

Ecuación 2.53. Variables del nodo k .

- Inicializar el campo térmico $T (n \times t)$ y calcular la matriz T a través de las siguientes relaciones:

$$\gamma_k = T_k^{t+\Delta t} \qquad T_n^{t+\Delta t} = \gamma_n + \alpha_n * T_{n+1}^{t+\Delta t}$$

Ecuación 2.54. Variables del campo térmico T .

El código a detalle se encuentra en el ANEXO V.

El campo térmico T , para la celda fotovoltaica se muestra en el ANEXO VI.

El campo térmico T , para el vidrio se muestra en el ANEXO VII.

2.9 Análisis paramétrico del sistema

Selección del modelo de comparación

El modelo matemático de comparación seleccionado es el desarrollado por King et al (2004). Este modelo considera condiciones ambientales del FV, lo que permitirá considerar las pérdidas de calor y la intervención de las variables de geometría dentro del modelo.

Variables del modelo térmico de comparación

El modelo King et al (2004) determina la temperatura de la celda fotovoltaica a través de la siguiente ecuación:

$$T_c = T_m + \frac{E}{E_o} \Delta T$$

Ecuación 2.55. Modelo de estándar NOCT.

Donde, T_c es la temperatura en la celda fotovoltaica, T_m es la temperatura de la superficie del tedlar, E es la radiación incidente, E_o es la radiación solar de referencia en el módulo del FV y ΔT es la diferencia de temperatura de la superficie del tedlar y la celda fotovoltaica a una radiación de 1000 W/m^2 .

$$T_m = E \cdot (e^{a+b \cdot WS}) + T_a$$

Ecuación 2.56. Temperatura de la superficie del tedlar del modelo estándar.

Donde, a es el coeficiente determinado empíricamente que establece el límite superior para la temperatura del módulo a bajas velocidades del viento y alta radiación solar, b es el coeficiente determinado empíricamente que establece la velocidad a la que la temperatura del módulo cae a medida que aumenta la velocidad del viento, WS es la velocidad del viento medida a una altura estándar de 10 m (m/s), y T_a es la temperatura ambiente.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la Figura 3.1 se muestra la variación de radiación incidente absorbida por el panel a diferentes ángulos de inclinación del panel con respecto a la horizontal del reservorio, donde se puede apreciar que la radiación incidente varía según la inclinación que tome el FV, además la mayor captación de radiación se produce cuando el ángulo de inclinación alcanza los 14° .

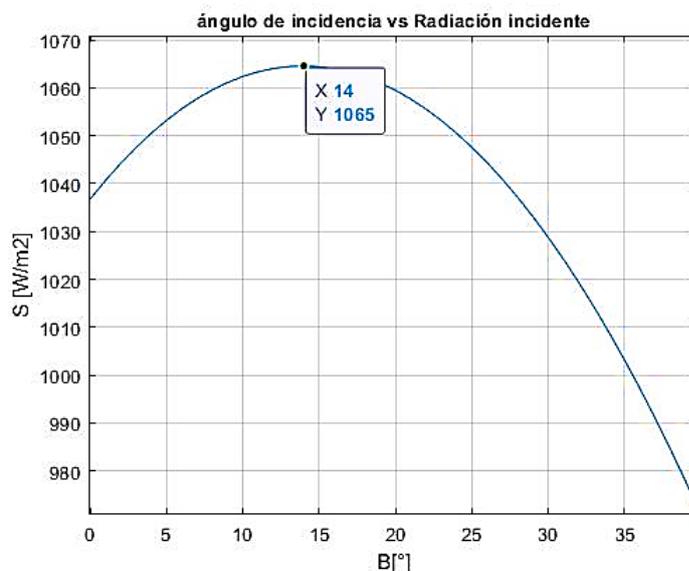


Figura 3.1. Ángulo de incidencia, (propia).

La Figura 3.2 muestra la variación de la radiación incidente (S) del FV y la velocidad del viento (V_w) en un horario de 6:00 am a 18:00 pm, donde, los valores más bajos de radiación incidente 0 W/m^2 y 102.9 W/m^2 se obtienen a las 6:00 am y 18:00 pm respectivamente. Se obtienen los mayores valores de radiación en el intervalo de 9:00 am hasta las 15:00 pm, la mayor radiación se registra a las 12:00 pm con un valor de 884.6 W/m^2 . La velocidad del viento registra sus valores más bajos, 0.9 m/s y 0.6 m/s , a las 6:00 am y 18:00 pm respectivamente. El intervalo donde se registran los valores más altos es de 8:00 am a 13:00 pm siendo 3.2 m/s a las 10:00 am el valor más alto, a partir de este valor la velocidad disminuye.

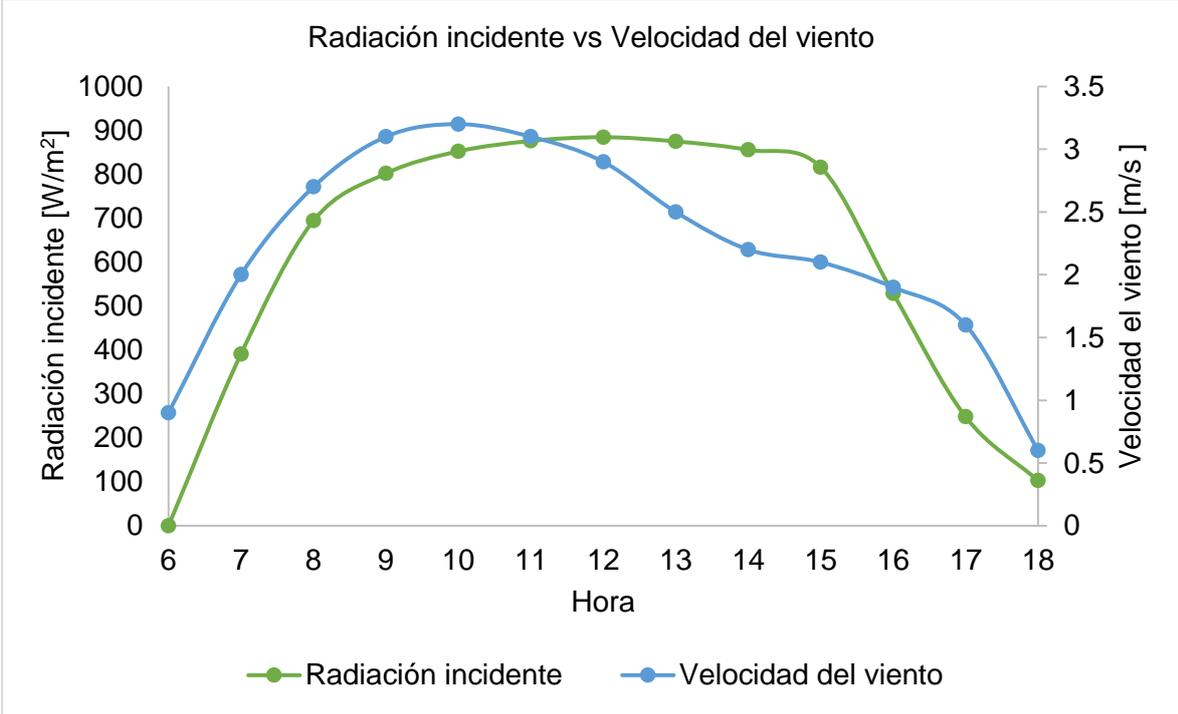


Figura 3.2. Radiación incidente vs Velocidad del viento, (Propia).

La Figura 3.3 muestra la variación de la radiación incidente del FV y el ángulo cenital en un horario de 6:00 am a 18:00 pm. La curva de radiación incidente tiene las mismas características de la Figura 3.2. La curva del ángulo cenital experimenta un decrecimiento desde las 6:00 am hasta las 12:00 pm. En este intervalo, el valor más alto 96.2° se registra a las 6:00 am y el valor más bajo 14.8° a las 12:00 pm, y a partir de este punto la curva se torna creciente alcanzando un valor de 82.3° a las 18:00 pm.

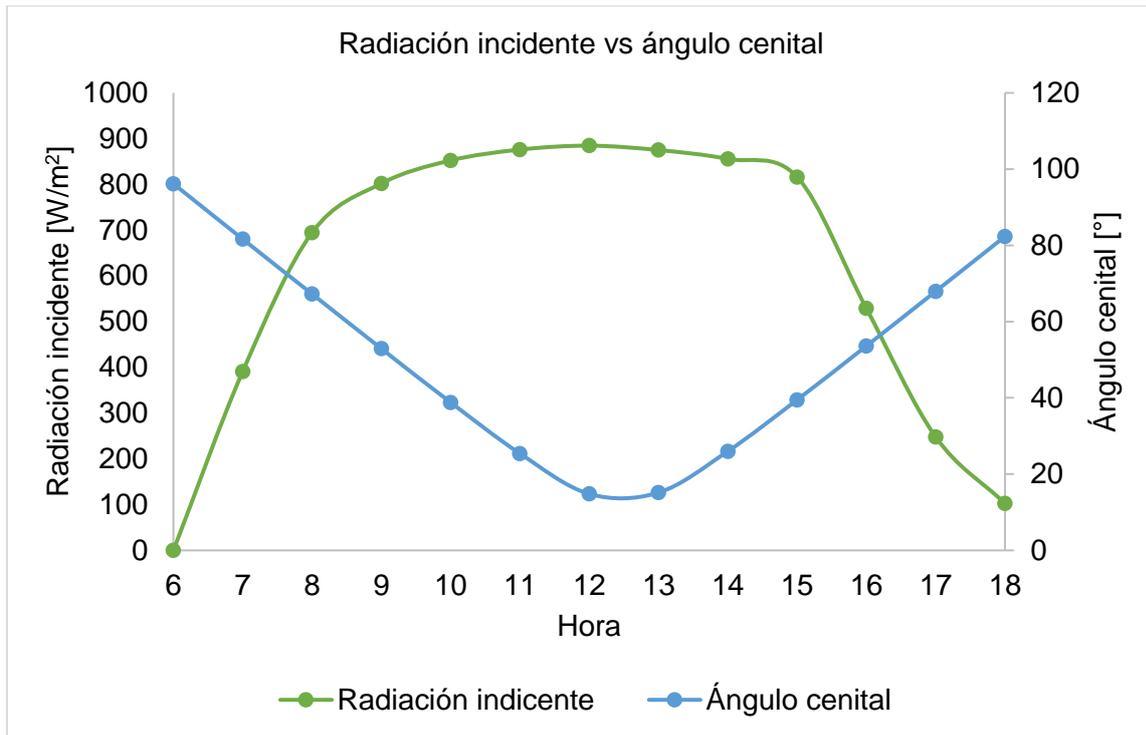


Figura 3.3. Radiación incidente vs ángulo cenital, (Propia).

La Figura 3.4 muestra la variación de la radiación incidente y el coeficiente de convección del PV en horario de 6:00 am a 18:00 pm. La curva de radiación es la misma obtenida en la Figura 3.2. La curva del coeficiente de convección experimenta un crecimiento de 6:00 am a 8:00 am con un valor de 0 W/m²K y 5.6 W/m²K respectivamente, y a partir de este punto el coeficiente de convección alcanza valores similares hasta las 15:00 pm. En este intervalo, el mayor valor registrado de 5.7 W/m²K ocurre a las 9:00 am, a partir de las 15:00 pm la curva experimenta un decrecimiento donde el valor más bajo registrado es 3.1 W/m²K a las 18:00 pm.

La Figura 3.5 muestra la variación de la radiación incidente y el coeficiente de radiación del PV en horario de 6:00 am a 18:00 pm, la curva de radiación es la misma obtenida en la Figura 3.2. La curva del coeficiente de radiación tiene una tendencia similar que la curva del coeficiente de convección. Sin embargo, los valores alcanzados son significativamente mayores. La curva del coeficiente de radiación experimenta un crecimiento de 6:00 am a 9:00 am con un valor de $2.59 \cdot 10^{-03}$ W/m²K y $4.39 \cdot 10^{-03}$ W/m²K respectivamente, y a partir de este punto el coeficiente de convección alcanza valores similares hasta las 15:00 pm en este intervalo el mayor valor registrado de $5.89 \cdot 10^{-03}$ W/m²K ocurre a las 14:00 pm, a partir de las 15:00 pm la curva experimenta un decrecimiento donde el valor más bajo registrado es $3.34 \cdot 10^{-03}$ W/m²K a las 18:00 pm.

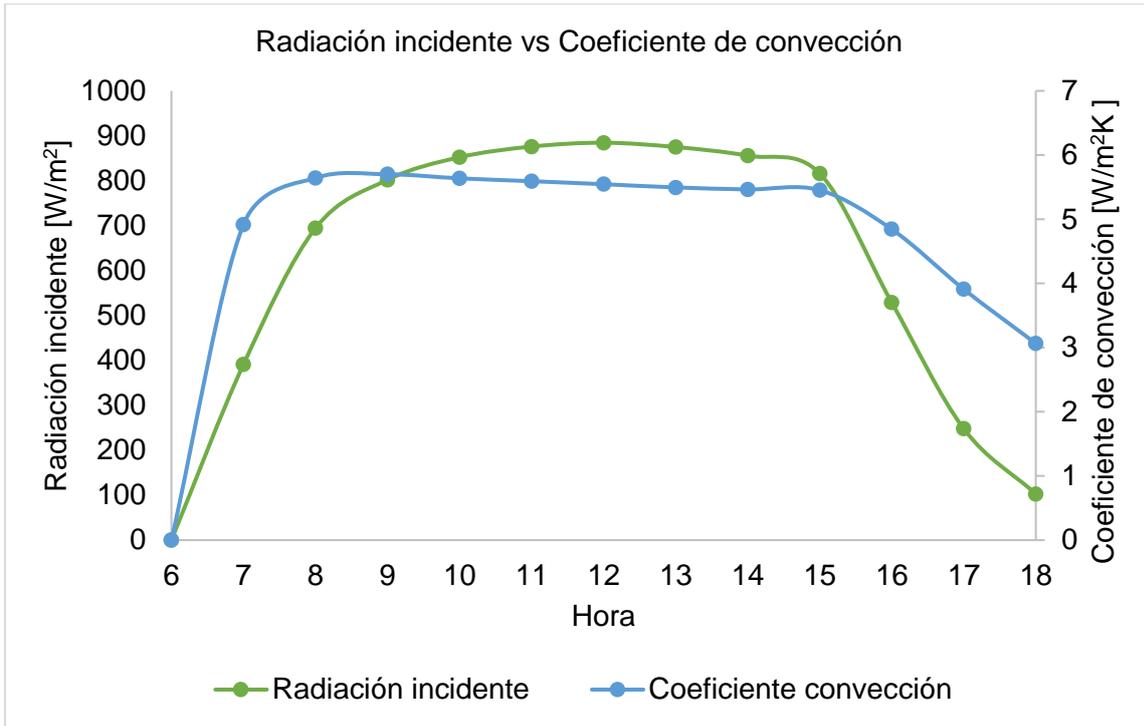


Figura 3.4. Coeficiente de convección vs radiación incidente, (Propia).

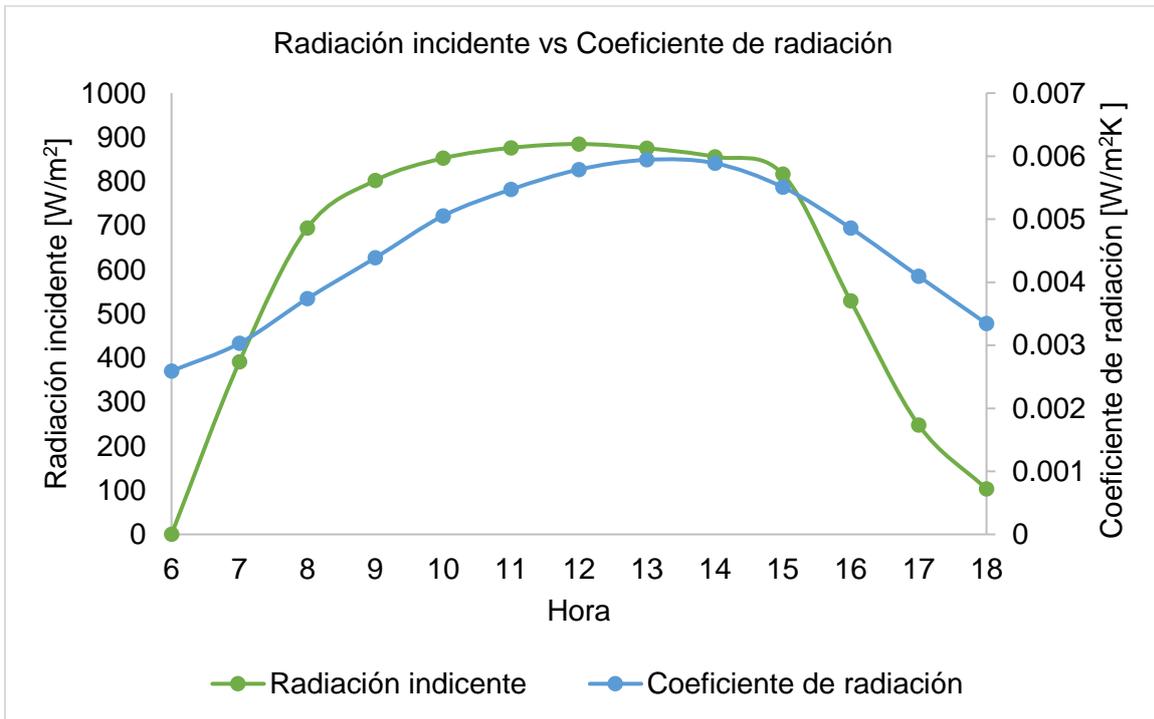


Figura 3.5. Coeficiente de radiación vs radiación incidente, (Propia).

Para las curvas de temperatura del vidrio y celda fotovoltaica vs ángulo cenital de la Figura 3.6 y Figura 3.7 respectivamente, la curva del ángulo cenital experimenta un decrecimiento desde las 6:00 am hasta las 12:00 pm. El valor más alto alcanzado en este intervalo es de

96.2° que se registra a las 6:00 am y el valor más bajo 14.8° a las 12:00 pm, y a partir de este punto la curva se torna creciente y alcanza un valor de 82.3° a las 18:00 pm.

La curva de la temperatura del vidrio del FV experimenta un crecimiento desde las 6:00 am hasta las 13:00 pm, donde, el valor de temperatura inicial del vidrio es 14.7°C y crece hasta alcanzar un valor máximo de 60.5 °C a las 13:00 pm, a partir de esta hora la curva decrece y finalmente alcanza un valor de 18.6 °C a las 18:00 pm.

La curva de la temperatura de la celda fotovoltaica del FV también es creciente desde las 6:00 am hasta las 13:00 pm, con un valor de temperatura inicial de 14.7°C a las 6:00 am y pico máximo es de 43.2 °C a las 13:00 pm, la curva decrece hasta las 18:00 pm con un valor final de 19.6 °C.

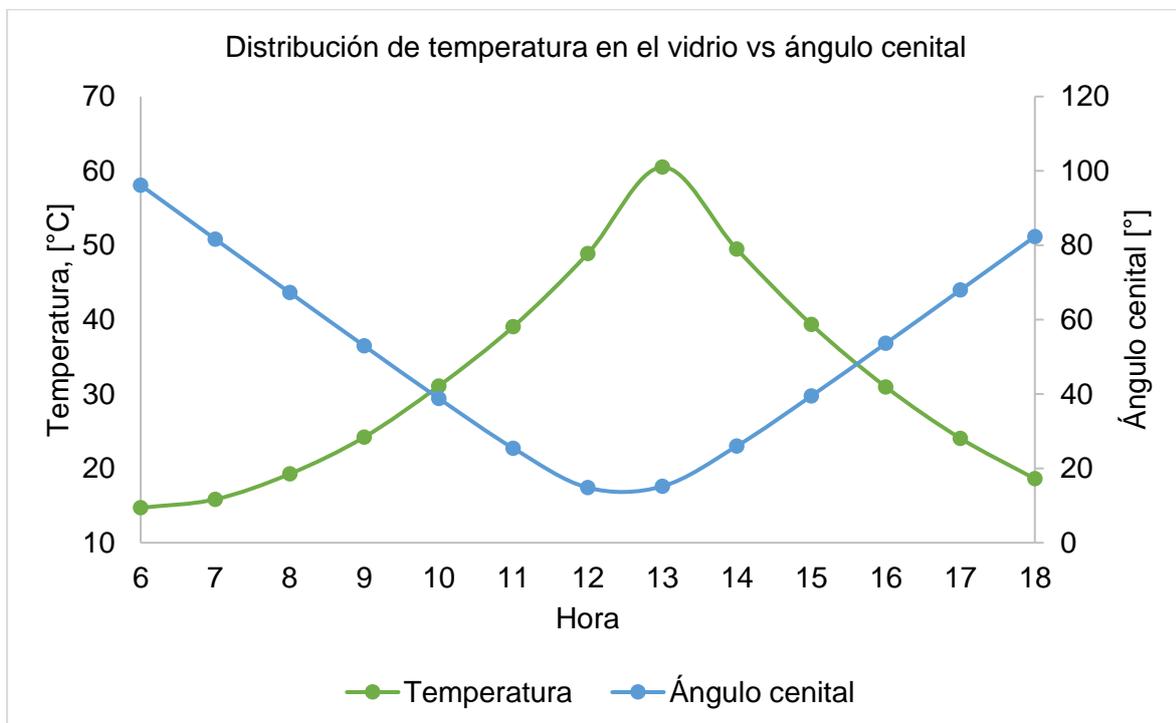


Figura 3.6. Distribución de temperatura en el vidrio vs ángulo cenital, (Propia).

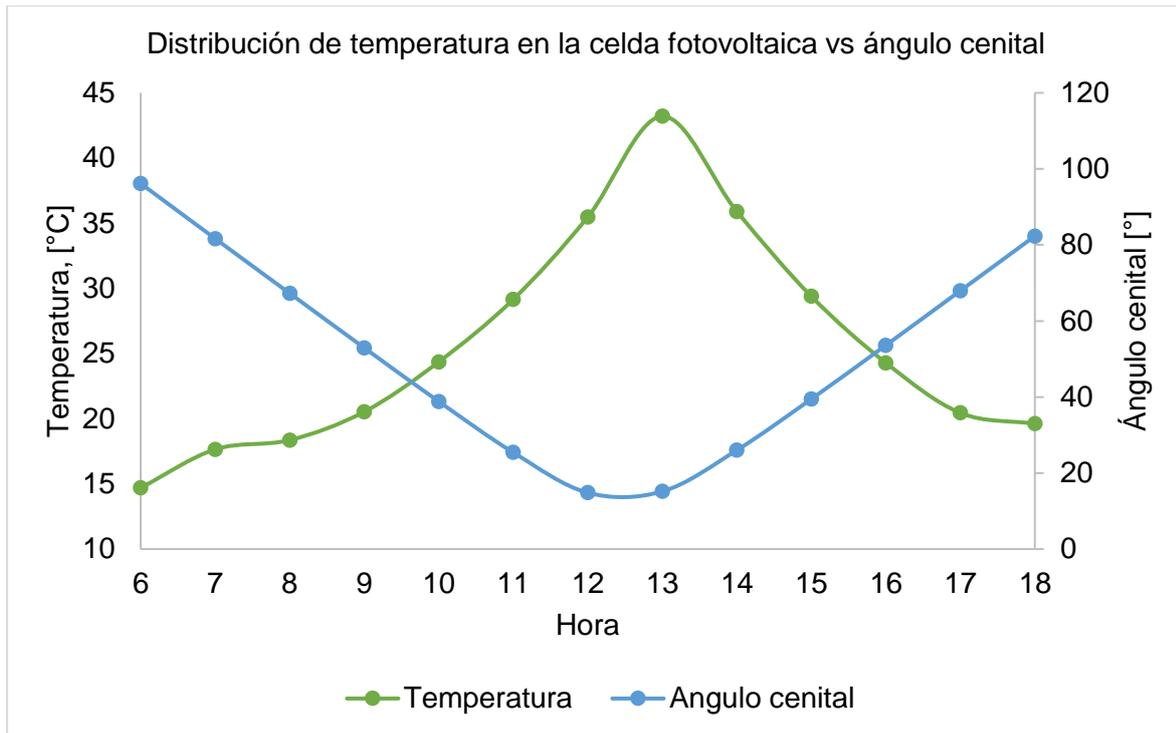


Figura 3.7. Distribución de temperatura en la celda fotovoltaica vs ángulo cenital, (Propia).

En las Figuras 3.8 y 3.9 se muestran las curvas de temperatura del vidrio y celda fotovoltaica vs velocidad del viento, respectivamente, la curva de la velocidad del viento experimenta una tendencia creciente desde las 6:00 am hasta las 10:00 am, donde, el valor más bajo es 0.9 m/s a las 6:00 am y el pico es de 3.2 m/s a las 10:00 am a partir de esta hora la curva decrece y finalmente alcanza un valor de 0.6 m/s a las 18:00 pm.

La temperatura en el vidrio y la celda fotovoltaica tienen una distribución tipo campana y alcanzan el pico máximo (60.5 °C y 43.2°C) cuando la curva del viento decrece.

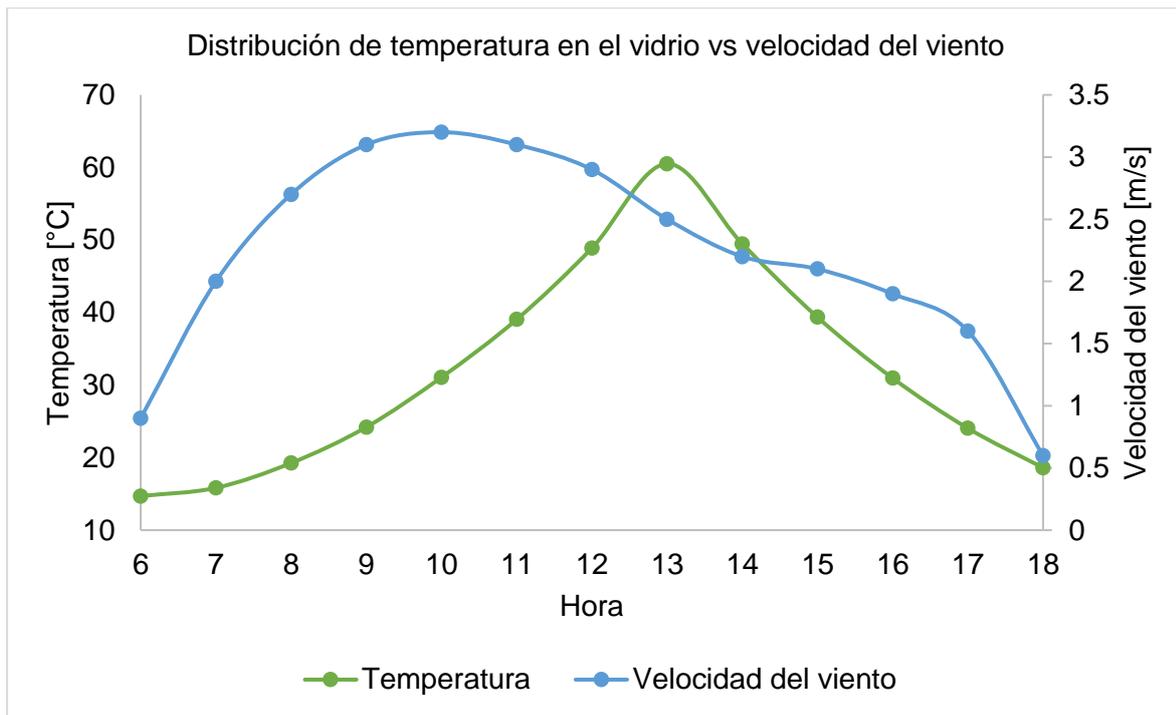


Figura 3.8. Distribución de temperatura en el vidrio vs velocidad del viento, (Propia).

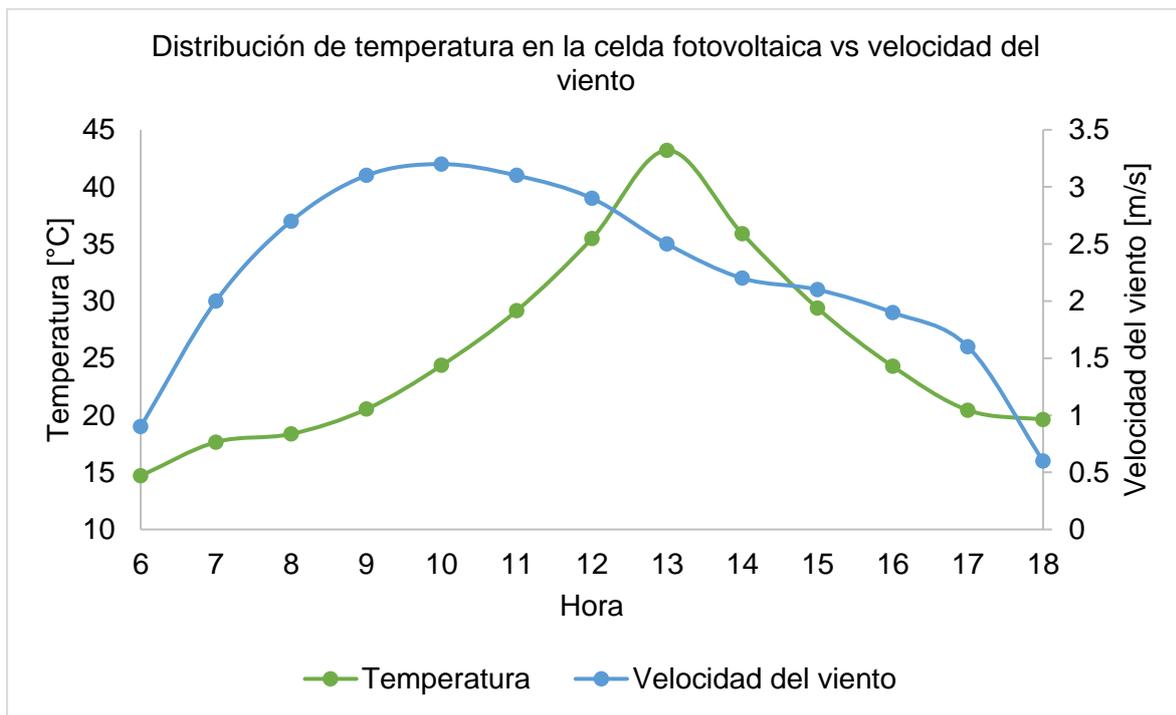


Figura 3.9. Distribución de temperatura en la celda fotovoltaica vs velocidad del viento, (Propia).

La Figura 3.10 muestra el comportamiento térmico de la celda fotovoltaica al cambio de radiación, donde a mayor radiación la temperatura incrementa alcanzando su punto máximo a una radiación de 875 W/m² a las 13:00 pm, a pesar de que la mayor radiación es 884.6 W/m² a las 12:00 pm.

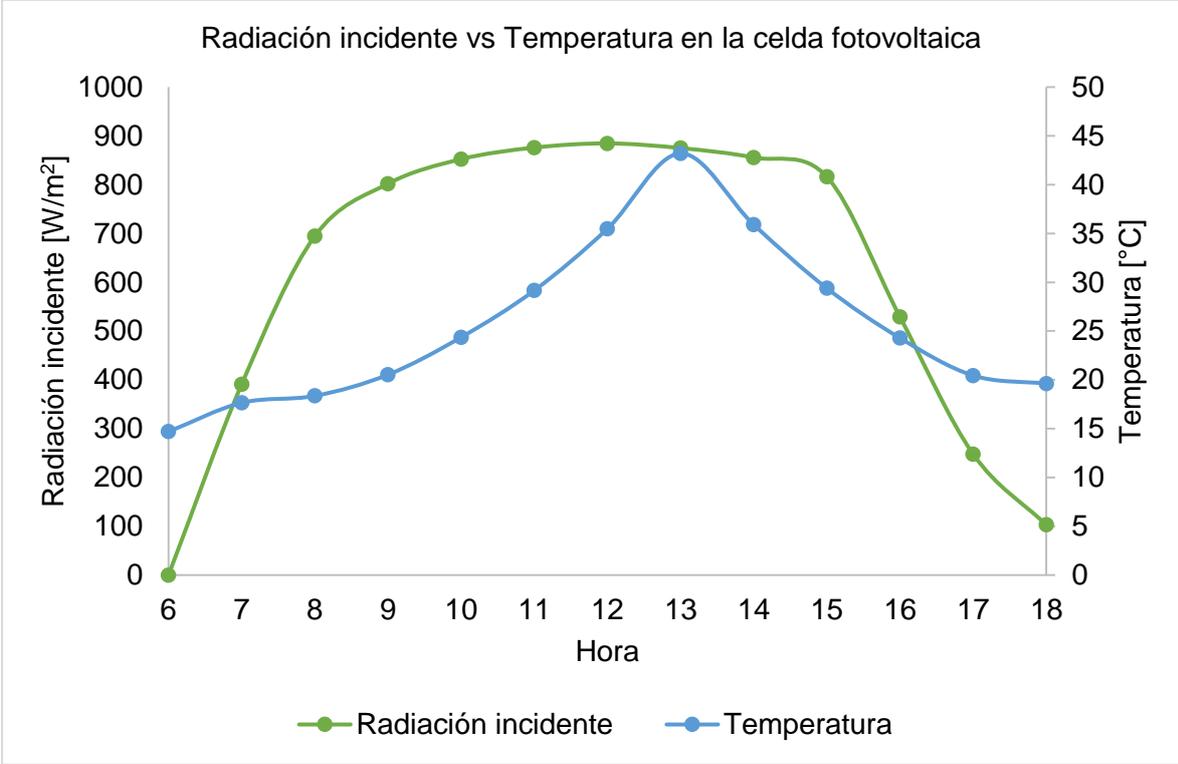


Figura 3.10. Radiación incidente vs Temperatura en la celda fotovoltaica, (Propia).

La Figura 3.11 muestra distribución de temperaturas que se alcanza internamente en las capas del FV que se muestran en Figura 2.3. Los valores obtenidos corresponden a las temperaturas que se alcanzan cuando la radiación incidente es 875 W/m² (13:00 pm) en el intervalo de 6:00 am a 18:00 pm. A este valor de radiación se alcanza el valor más alto de temperatura en la celda fotovoltaica (43.2°C) como se determina en la Figura 3.8 y Figura 3.9 donde se observa que las mayores temperaturas se alcanzan en el vidrio (60.5 °C) y en la celda fotovoltaica (43.2 °C).

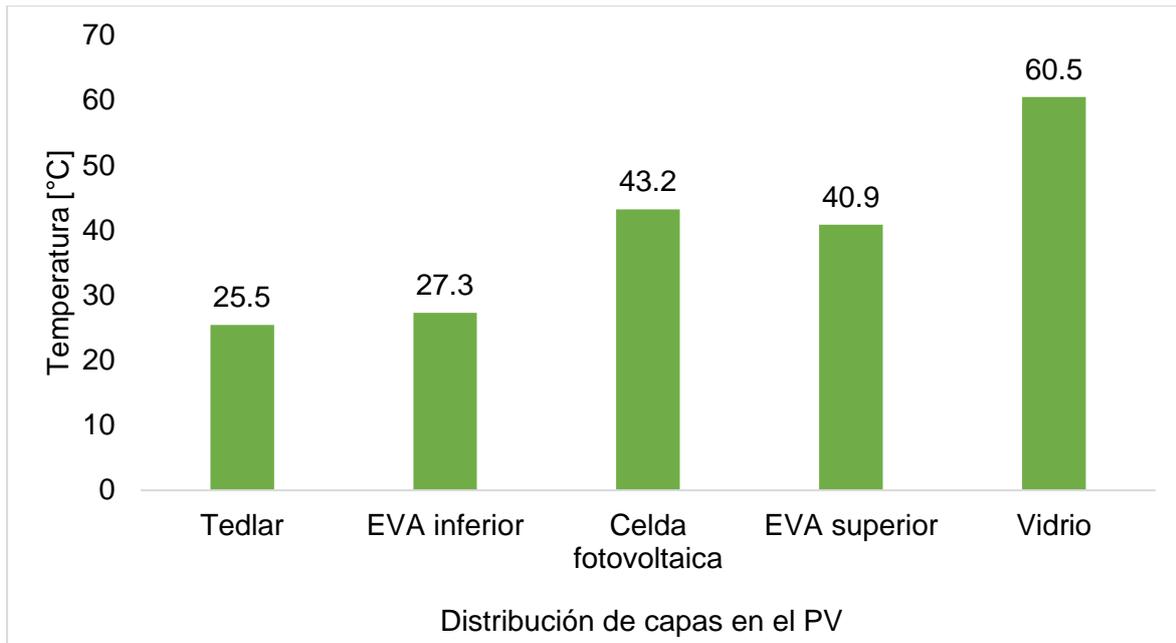


Figura 3.11. Distribución de temperaturas del FV, (Propia).

La Tabla 3.1 muestra los valores de las variables del modelo de King et al (2004) usados para obtener la temperatura en la celda fotovoltaica. Con el modelo matemático planteado en este documento se obtiene una temperatura de 43.2 °C a una radiación incidente de 875 W/m², mientras que usando el modelo de King et al (2004) se obtiene un valor de 50.9 °C en la celda fotovoltaica a una radiación incidente de 875 W/m².

Tabla 3.1. Resultados del modelo King et al (2004).

Variable	Valor	Unidades
T_m	48.327	°C
E	884.59	W/m ²
E_o	1000.000	W/m ²
a	-3.470	[1]
b	-0.059	[1]
WS	2.500	m/s
T_a	24.6	°C
ΔT	3	°C
T_c	50.981	°C

Fuente: Propia

3.1 Estudio paramétrico

La temperatura que alcanzan las celdas fotovoltaicas depende de un conjunto de variables que interactúan entre sí. En este apartado se va a realizar un análisis del impacto que

tienen estos parámetros en el FV. La variable de mayor influencia sobre la temperatura final alcanzada en las celdas fotovoltaicas del panel fotovoltaico es la radiación incidente, esta tiene una influencia directamente proporcional a la temperatura alcanzada en la celda (Figura 3.10); además se puede observar que en el caso de la radiación y temperatura alcanzada en la celda la relación es inversamente proporcional al ángulo cenital (Figura 3.3). Las altas velocidades del viento en la mañana ocasionan que la temperatura en la celda aumente hasta alcanzar su punto más alto, sin embargo, y a pesar de que se esperaba que al disminuir la velocidad del viento la temperatura en la celda disminuya esto no sucede debido a que el calor acumulado por a la captación de radiación se mantiene en la celda, una vez se disipa el calor acumulado en la celda el comportamiento de la curva recupera su comportamiento inicial.

3.2 Discusión

El ángulo de inclinación óptimo obtenido para el panel fotovoltaico con respecto a la horizontal del reservorio es de 14° como se muestra en la Figura 3.1. Se observa que al incrementarse el ángulo de inclinación se disminuye la captación de la radiación.

En cuanto a los coeficientes de convección y radiación, se observa en la Figura 3.4 y Figura 3.5 que tienen una relación directamente proporcional a la radiación incidente, al tiempo que la temperatura en la celda fotovoltaica se incrementa puesto que son factores que se consideran como ganancias en los nodos exteriores del panel fotovoltaico (Ecuación 2.40 , Ecuación 2.45).

De esta manera se infiere que para alcanzar la mayor temperatura en la celda fotovoltaica es necesario exponer el panel fotovoltaico en las horas de mayor radiación donde el ángulo cenital tendrá valores menores a 30° , la velocidad del viento es ligeramente menor de manera que no tiene una gran inferencia en la temperatura alcanzada en la celda fotovoltaica y finalmente los coeficientes de convección y radiación permiten las mayores ganancias en los nodos exteriores del panel.

Comparación

Existen distintos modelos matemáticos de FV en la literatura, para el propósito de este apartado se plantean las condiciones meteorológicas bajo las cuales se realiza la comparación de resultados:

- Temperatura ambiente de 24.6°C .
- Radiación incidente de 884.59 W/m^2 .

- Velocidad del viento 2.5 m/s.

En la Tabla 3.2. se muestra los resultados que se obtienen usando el modelo matemático de King et al (2004), donde obtiene una temperatura en la celda fotovoltaica de 50.98 °C, y en la Figura 3.11 se muestran los resultados al aplicar el modelo matemático de este documento obteniéndose una temperatura en la celda fotovoltaica de 43.20 °C.

La diferencia de la temperatura en la celda fotovoltaica de 7.78 °C de los modelos radica principalmente en que, para el cálculo de la temperatura de la celda fotovoltaica del modelo matemático de King et al (2004) intervienen únicamente variables meteorológicas como temperatura ambiente y velocidad del viento, mientras que, en el modelo matemático de este documento intervienen variables meteorológicas, geométricas y propiedades físicas del FV tales como; temperatura ambiente, velocidad del viento, ángulo cenital, ángulo de inclinación del FV, espesores de las capas del FV, conductividad, densidad y calor específico; las cuales permiten que los resultados sean más precisos que en el primer caso.

Limitaciones

El modelo matemático planteado no considera pérdidas por radiación y convección en las superficies laterales del FV, tampoco se considera convección forzada en ninguna de las superficies del FV.

El modelo planteado no considera generación de calor en el vidrio debido a la radiación incidente.

Para el modelo matemático se usaron datos de NREL correspondientes a un determinado día del año en un horario de 6:00 am a 18:00 pm.

3.3 Conclusiones

En este estudio se realizó un modelo matemático del balance térmico un panel fotovoltaico flotante, usando la base de datos de The National Renewable Energy Laboratory (NREL), el comportamiento del modelo se simuló a través del software Matlab.

- A través de un balance energético en un panel fotovoltaico y usando los datos meteorológicos proveídos por The National Renewable Energy Laboratory (NREL) correspondientes al día 36 del año 2020 de la hidroeléctrica Paute Mazar, se realizó un modelo matemático para un panel fotovoltaico flotante. Se determinó el comportamiento térmico en el panel debido a la radiación incidente en horario de 6:00 am a 18:00 pm, obteniéndose como resultado las temperaturas que se alcanzan en el panel fotovoltaico, de éstas la más relevante de acuerdo con su

función es la temperatura máxima de 43.2°C de la celda fotovoltaica a una radiación de 875 W/m² a las 13:00 pm.

- Se realizó el balance energético del panel fotovoltaico considerando pérdidas por convección y radiación en las superficies del vidrio y tedlar del panel fotovoltaico. Los coeficientes de convección y radiación del panel alcanzaron valores de 5.7 W/m²K a las 9:00 am con una radiación incidente de 802 W/m² y 5.89·10⁻⁰³ W/m²K a las 14:00 pm con una radiación de 855.6 W/m² respectivamente. En el caso del coeficiente de convección se produce un aumento súbito juntamente con la radiación incidente de 6:00 a 8:00 am y alcanza valores similares hasta las 15:00 pm, por su parte el coeficiente de radiación incrementa de acuerdo con la radiación incidente. El comportamiento de los dos coeficientes favorece a la temperatura alcanzada por las celdas fotovoltaicas.
- El modelo matemático del comportamiento térmico del panel fotovoltaico se trasladó y simuló en Matlab, con los datos meteorológicos de NERL del día 36 del año 2020 en un horario de 6:00 am a 18:00 pm, los resultados arrojados muestran que el comportamiento térmico del panel fotovoltaico (Figura 3.9 y Figura 3.10) durante el día es creciente hasta las 13:00 pm, donde alcanza los valores máximos de temperatura en las capas que componen el panel fotovoltaico (Figura 3.11), en el tedlar 25.5°C, en la capa de EVA inferior 27.3°C, en la celda fotovoltaica 43.2 °C, en la capa de EVA superior 40.8°C y en el vidrio 60.5°C.
- Se realizó un análisis paramétrico del modelo matemático de las variables de radiación, ángulo cenital y velocidad del viento, de éstas las de mayor impacto en el comportamiento es la radiación juntamente con el ángulo cenital, ya que su interacción es inversamente proporcional es decir que a mayor radiación menor es el ángulo cenital y las temperaturas del panel incrementan. El modelo matemático no considera convección forzada, por lo cual la velocidad del viento no provoca cambios significativos en el comportamiento del panel.

El modelo matemático de este documento puede usarse para predecir el comportamiento térmico de un panel fotovoltaico usando datos in situ; además, la metodología del modelo puede ajustarse para paneles que posean una configuración geométrica diferente.

3.4 Recomendaciones

- El proyecto se realizó considerando únicamente pérdidas por convección y radiación en el vidrio y tedlar del panel fotovoltaico, por lo tanto, para que el modelo se ajuste a un

sistema real es necesario considerar pérdidas por convección y radiación en las superficies laterales del panel; y convección forzada en el balance de energía en el sistema.

- La radiación incidente total es absorbida por las diferentes capas del panel fotovoltaico, sin embargo, existe una parte de radiación incidente que es recomendable considerar en el modelo, ya que no se convierte en corriente eléctrica en las celdas fotovoltaicas y se acumula dentro del panel como calor lo cual provoca que eleve la temperatura del panel fotovoltaico y en consecuencia esta elevación de temperatura provoca una reducción en la eficiencia del panel.

- Para obtener un modelo matemático más generalizado se recomienda considerar una base datos que abarque un ciclo de tiempo mayor a un día en el modelo matemático.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aly, S. P., Ahzi, S., Barth, N., & Figgis, B. W. (2018). Two-dimensional finite difference-based model for coupled irradiation and heat transfer in photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180(April), 289–302. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.055>

Armstrong, S., & Hurley, W. G. (2010). A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*, 30(11–12), 1488–1495. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.012>

CELEC EP. (2011). *CENTRAL HIDROELÉCTRICA PAUTE MOLINO EMBALSE AMALUZA*. CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR. <https://www.celec.gob.ec/celec-sur/index.php/generacion/paute-molino>

Çengel, Y. (2013). Transferencia de Calor y Masa. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1(9), 1699.

Cervantes, F. (2005). Método de Diferencias Finitas. *Diseño de Mallas Adaptativas Aplicando Equidistribución, Anexo I Pr*, 1–12.

Chapra, S., & Canale, R. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros* (Quinta edi). MacGraw Hill. <http://artemisa.unicauca.edu.co/~cardila/Chapra.pdf>

Coluccio, E. (2022). *Conducción, convección y radiación*. <https://www.ejemplos.co/10-ejemplos-de-conduccion-conveccion-y-radiacion/>

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1982). Solar engineering of thermal processes. In *Design Studies* (Vol. 3, Issue 3). [https://doi.org/10.1016/0142-694x\(82\)90016-3](https://doi.org/10.1016/0142-694x(82)90016-3)

Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind. In *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. <https://doi.org/10.1002/9781119540328>

El Hammoumi, A., Chalh, A., Allouhi, A., Motahhir, S., El Ghzizal, A., & Derouich, A. (2021). Design and construction of a test bench to investigate the potential of floating PV systems. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123917>

Fanney, A. H., Dougherty, B. P., & Davis, M. W. (2002). EVALUATING BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC PERFORMANCE MODELS By Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Reprinted from the

Proceedings of the New Orleans , Louisiana NOTE : This paper is a contribution of the *Technology*.

Gea, M., Montero, M. T., & Cadena, C. (2006). Simulación eléctrica y térmica de paneles fotovoltaicos. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10, 1–8.

King, D. L., Boyson, W. E., & Kratochvil, J. A. (2004). Photovoltaic array performance model, SANDIA Report SAND2004-3535. *Sandia Report No. 2004-3535*, 8(December), 1–19.

Mathworks. (2019). Primer R 2019 a. In *Book* (p. 2000). https://au.mathworks.com/login?uri=https%3A%2F%2Fau.mathworks.com%2Fhelp%2Fpdf_doc%2Fmatlab%2Findex.html&context=behindmwa

Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M., & Poggi, P. (2005). Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. *Applied Thermal Engineering*, 25(17–18), 2854–2877. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.02.008>

NREL. (2020). *NSRDB Data Viewer*. Nrel.Gov. https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/?aL=x8Cl3i%255Bv%255D%3Dt%26Jea8x6%255Bv%255D%3Dt%26Jea8x6%255Bd%255D%3D1%26VRLt_G%255Bv%255D%3Dt%26VRLt_G%255Bd%255D%3D2%26mcQtmw%255Bv%255D%3Dt%26mcQtmw%255Bd%255D%3D3&bL=clight&cE=0&IR=0&mC=4.740675384778373%2C22.8515

Sánchez Barroso, J. C., Barth, N., Correia, J. P. M., Ahzi, S., & Khaleel, M. A. (2016). A computational analysis of coupled thermal and electrical behavior of PV panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 148, 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.004>

Sunpower, M. (2020). *Residential Solar Panel & Solar Battery Marketplace*. 1–2. https://sunpower.maxeon.com/int/sites/default/files/2019-10/sp_MAX3-375BLK_355BLK_ds_en_a4_mc4_532497.pdf

Swinbank, W. C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), 339–348. <https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>

Ureña, F. (2009). *Resolución de la ecuación de Ondas en 2-D y 3-D utilizando diferencias finitas generalizadas*. 2009, 1–8.

Usama Siddiqui, M., Arif, A. F. M., Kelley, L., & Dubowsky, S. (2012). Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions. *Solar Energy*, 86(9), 2620–2631. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.034>

5 ANEXOS

ANEXO I. Datos de The National Renewable Energy Laboratory (NREL).

ANEXO II. Coeficiente de convección y radiación de acuerdo con la radiación incidente.

ANEXO III. Código para la obtención del ángulo de incidencia.

ANEXO IV. Tabla A-15 de (Çengel, 2013).

ANEXO V. Código del modelo matemático.

ANEXO VI. Campo térmico T , para la celda fotovoltaica.

ANEXO VII. Campo térmico T , para el vidrio.

ANEXO I

Year	Month	Day	Hour	DHI	DNI	GHI	Solar Zenith Angle	Wind Speed	Temperature
-	-	-	-	W/m^2	W/m^2	W/m^2	Degree	m/s	$^{\circ}C$
2020	2	5	6	0	0	0	96.16	0.9	14.7
2020	2	5	7	48	418	109	81.65	2	16.1
2020	2	5	8	78	765	374	67.27	2.7	18.4
2020	2	5	9	93	902	637	52.93	3.1	20.7
2020	2	5	10	101	969	856	38.82	3.2	22.3
2020	2	5	11	110	997	1011	25.41	3.1	23.4
2020	2	5	12	113	1008	1087	14.82	2.9	24.2
2020	2	5	13	126	984	1076	15.16	2.5	24.6
2020	2	5	14	130	953	987	26	2.2	24.5
2020	2	5	15	129	898	822	39.47	2.1	23.6
2020	2	5	16	203	465	479	53.61	1.9	22.3
2020	2	5	17	149	162	210	67.96	1.6	20.4
2020	2	5	18	49	77	59	82.34	0.6	17.9

ANEXO II

HORA	Radiación incidente	Coefficiente de convección	Coefficiente de radiación
	W/m^2	$W/m^2 K$	$W/m^2 K$
6:00	0.000	0.000	0.00259
7:00	390.981	4.918	0.00303
8:00	694.474	5.642	0.00374
9:00	802.035	5.701	0.00439
10:00	852.339	5.637	0.00505
11:00	875.999	5.593	0.00547
12:00	884.599	5.546	0.00579
13:00	875.001	5.496	0.00594
14:00	855.632	5.465	0.00589
15:00	816.191	5.454	0.00551
16:00	529.026	4.845	0.00486
17:00	247.987	3.909	0.00410
18:00	102.870	3.065	0.00334

ANEXO III

```

%RADIACIÓN ABSORBIDA
%Datos
n1=1.0029;
n2=1.526;
beta=[0:1:40];
d=36;
fi=-2.580;
K=4;
L_e=0.003;
rho_r=0.2;
%ÁNGULOS
delta=23.45*sind(360*((284+d)/365)); %EC. 2.11
theta=90-fi+delta; %EC. 2.10
theta_b=90-(beta+theta); %EC. 2.7
theta_d=59.7-(beta*0.1388)+(0.001497*beta.^2); %EC. 2.8
theta_r=90-(0.5788*beta)+(0.002693*beta.^2); %EC. 2.9
theta_rfb=asind((n1/n2)*sind(theta_b)); %EC. 2.4
theta_rfd=asind((n1/n2)*sind(theta_d)); %EC. 2.4
theta_rfr=asind((n1/n2)*sind(theta_r)); %EC. 2.4
%EC. 2.3
theta_rfb_n=length(theta_rfb);
factor_expKLb=zeros(theta_rfb_n,1);
for theta_rfb_i=1:length(theta_rfb)
    factor_expKLb(theta_rfb_i)=exp(-K*L_e/cosd(theta_rfb(theta_rfb_i)));
end
factor_expKLb;
S1=theta_rfb+theta_b;
R1=theta_rfb-theta_b;
for R1_i=1:length(R1)
    for S1_i=1:length(S1)
        factor_senb(R1_i,S1_i)=(sind(R1(R1_i))).^2/(sind(S1(S1_i))).^2;
        factor_tanb(R1_i,S1_i)=(tand(R1(R1_i))).^2/(tand(S1(S1_i))).^2;
        if R1_i==S1_i
            DM_factor_senb(R1_i)=factor_senb(R1_i,S1_i);
            DM_factor_tanb(R1_i)=factor_tanb(R1_i,S1_i);
        end
    end
end
DM_factor_senb;
DM_factor_tanb;
for Msen_i=1:length(DM_factor_senb)
    for Mtan_i=1:length(DM_factor_tanb)
        tau_alfa_theta_b(Msen_i,Mtan_i)=(1-
(0.5*(DM_factor_senb(Msen_i)+DM_factor_tanb(Mtan_i))));
        if Msen_i==Mtan_i
            M_tau_alfa_theta_b(Msen_i)=tau_alfa_theta_b(Msen_i,Mtan_i);
        end
    end
end
M_tau_alfa_theta_b;
for M_tau_alfa_theta_b_i=1:length(M_tau_alfa_theta_b)
    for factor_expKLb_i=1:length(factor_expKLb)
F1(M_tau_alfa_theta_b_i,factor_expKLb_i)=M_tau_alfa_theta_b(M_tau_alfa_theta_b_i)*factor_expKLb_i;
        if M_tau_alfa_theta_b_i==factor_expKLb_i
MF_tau_alfa_theta_b(M_tau_alfa_theta_b_i)=F1(M_tau_alfa_theta_b_i,factor_expKLb_i);
    end
end

```

```

        end
    end
end
MF_tau_alfa_theta_b;
%EC. 2.3
theta_rfd_n=length(theta_rfd);
factor_expKLd=zeros(theta_rfd_n,1);
for theta_rfd_i=1:length(theta_rfd)
    factor_expKLd(theta_rfd_i)=exp(-K*L_e/cosd(theta_rfd(theta_rfd_i)));
end
factor_expKLd;
S2=theta_rfd+theta_d;
R2=theta_rfd-theta_d;
for R2_i=1:length(R2)
    for S2_i=1:length(S2)
        factor_send(R2_i,S2_i)=(sind(R2(R2_i))).^2/(sind(S2(S2_i))).^2;
        factor_tand(R2_i,S2_i)=(tand(R2(R2_i))).^2/(tand(S2(S2_i))).^2;
        if R2_i==S2_i
            DM_factor_send(R2_i)=factor_send(R2_i,S2_i);
            DM_factor_tand(R2_i)=factor_tand(R2_i,S2_i);
        end
    end
end
DM_factor_send;
DM_factor_tand;
for Mdsen_i=1:length(DM_factor_send)
    for Mdtan_i=1:length(DM_factor_tand)
        tau_alfa_theta_d(Mdsen_i,Mdtan_i)=(1-
(0.5*(DM_factor_send(Mdsen_i)+DM_factor_tand(Mdtan_i))));
        if Mdsen_i==Mdtan_i
            M_tau_alfa_theta_d(Mdsen_i)=tau_alfa_theta_d(Mdsen_i,Mdtan_i);
        end
    end
end
M_tau_alfa_theta_d;
for M_tau_alfa_theta_d_i=1:length(M_tau_alfa_theta_d)
    for factor_expKLd_i=1:length(factor_expKLd)
F2(M_tau_alfa_theta_d_i,factor_expKLd_i)=M_tau_alfa_theta_d(M_tau_alfa_theta_d_i)*factor_expKLd_i;
        if M_tau_alfa_theta_d_i==factor_expKLd_i
MF_tau_alfa_theta_d(M_tau_alfa_theta_d_i)=F2(M_tau_alfa_theta_d_i,factor_expKLd_i);
        end
    end
end
MF_tau_alfa_theta_d;
%EC. 2.3
theta_rfr_n=length(theta_rfr);
factor_expKLr=zeros(theta_rfr_n,1);
for theta_rfr_i=1:length(theta_rfr)
    factor_expKLr(theta_rfr_i)=exp(-K*L_e/cosd(theta_rfr(theta_rfr_i)));
end
factor_expKLr;
S3=theta_rfr+theta_r;
R3=theta_rfr-theta_r;
for R3_i=1:length(R3)
    for S3_i=1:length(S3)
        factor_senr(R3_i,S3_i)=(sind(R3(R3_i))).^2/(sind(S3(S3_i))).^2;
        factor_tanr(R3_i,S3_i)=(tand(R3(R3_i))).^2/(tand(S3(S3_i))).^2;
        if R3_i==S3_i

```

```

        DM_factor_senr(R3_i)=factor_senr(R3_i,S3_i);
        DM_factor_tanr(R3_i)=factor_tanr(R3_i,S3_i);
    end
end
end
DM_factor_senr;
DM_factor_tanr;
for M3sen_i=1:length(DM_factor_senr)
    for M3tan_i=1:length(DM_factor_tanr)
        tau_alfa_theta_r(M3sen_i,M3tan_i)=(1-
(0.5*(DM_factor_senr(M3sen_i)+DM_factor_tanr(M3tan_i))));
        if M3sen_i==M3tan_i
            M_tau_alfa_theta_r(M3sen_i)=tau_alfa_theta_r(M3sen_i,M3tan_i);
        end
    end
end
M_tau_alfa_theta_r;
for M_tau_alfa_theta_r_i=1:length(M_tau_alfa_theta_r)
    for factor_expKLR_i=1:length(factor_expKLR)

F3(M_tau_alfa_theta_r_i,factor_expKLR_i)=M_tau_alfa_theta_r(M_tau_alfa_th
eta_r_i)*factor_expKLR(factor_expKLR_i);
        if M_tau_alfa_theta_r_i==factor_expKLR_i
MF_tau_alfa_theta_r(M_tau_alfa_theta_r_i)=F3(M_tau_alfa_theta_r_i,factor_
expKLR_i);
        end
    end
end
MF_tau_alfa_theta_r;
tau_alfa_n=(exp(-K*L_e))*(1-((n2-n1)/(n2+n1))^2); %EC. 2.3
K_b=MF_tau_alfa_theta_b/tau_alfa_n; %EC. 2.5
K_d=MF_tau_alfa_theta_d/tau_alfa_n; %EC. 2.5
K_r=MF_tau_alfa_theta_r/tau_alfa_n; %EC. 2.5
%MASA DE AIRE M
tetha_z=xlsread('NREL',2,'M911:M911');
tetha_z_n=length(tetha_z);
AM=zeros(tetha_z_n,1);
for tetha_z_i=1:tetha_z_n
    AM(tetha_z_i)=1/(cosd(tetha_z(tetha_z_i))+(0.5057*(96.080-
tetha_z(tetha_z_i)).^-1.634));
end
V=AM;
a0=0.935823;
a1=0.054289;
a2=-0.008677;
a3=0.000527;
a4=-0.000011;
a0_AM0=a0*(AM).^0;
a1_AM1=a1*(AM).^1;
a2_AM2=a2*(AM).^2;
a3_AM3=a3*(AM).^3;
a4_AM4=a4*(AM).^4;
M=a0_AM0+a1_AM1+a2_AM2+a3_AM3+a4_AM4; %EC. 2.13
R_b=sind(theta+beta)/sind(theta); %EC. 2.14
%Radiaciones incidentes Gd, Gb, G
Gd=xlsread('NREL',2,'F911:F912');
Gb=xlsread('NREL',2,'G911:G912');
G=xlsread('NREL',2,'H911:H912');
%RADIACION INCIDENTE, S
F_R_K_b=R_b.*K_b;

```

```

for F_R_K_b_i=1:length(F_R_K_b)
    for Gb_i=1:length(Gb)
        F_R_G_K_b(F_R_K_b_i, Gb_i)=F_R_K_b(F_R_K_b_i)*Gb(Gb_i);
    end
end
M_F_R_G_K_b=F_R_G_K_b(:,1);
F_K_d_cos1=K_d.*((1+cosd(beta))/2);
for F_K_d_cos1_i=1:length(F_K_d_cos1)
    for Gd_i=1:length(Gd)
        F_G_K_d_cos1(F_K_d_cos1_i, Gd_i)=F_K_d_cos1(F_K_d_cos1_i).*Gd(Gd_i);
    end
end
M_F_G_K_d_cos1=F_G_K_d_cos1(:,1);
F_K_r_cos2=rho_r*K_r.*((1-cosd(beta))/2);
for F_K_r_cos2_i=1:length(F_K_r_cos2)
    for G_i=1:length(G)
        F_G_K_r_cos2(F_K_r_cos2_i, G_i)=F_K_r_cos2(F_K_r_cos2_i).*G(G_i);
    end
end
M_F_G_K_r_cos2=F_G_K_r_cos2(:,1);
%EC. 2.2
S=tau_alfa_n*M*(M_F_R_G_K_b+M_F_G_K_d_cos1+M_F_G_K_r_cos2);
figure(1)
plot(beta,S);
title('ángulo de incidencia vs Radiación incidente','FontSize',10);
xlabel('B[°]');
ylabel('S [W/m2]');
grid on;

```

ANEXO IV

884
APÉNDICE I

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T, °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.069	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.665×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.622×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3006	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , ν y α a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley; 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, R. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y R. Hestermann, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

ANEXO V

```

%RADIACIÓN ABSORBIDA
%Datos entrada
beta=14;
Gd=126; %radiación difusa DHI-NREL
Gb=984; %radiación directa DNI-NREL
G=1076; %Radiación global GHI-NREL
tetha_z=15.16;
Vw=2.5;
T_amb=24.6;
d=36;
%constantes
n1=1.0029; %indice de refraccion del aire
n2=1.526; %indice de refraccion del vidrio superior PV
fi=-2.580; %Latitud
K=4; %coeficiente de extinción de acristalamiento
L_e=0.003; %espesor del vidrio
rho_r=0.2;
%ángulos
delta=23.45*sind(360*((284+d)/365)); %EC. 2.11
theta=90-fi+delta; %EC. 2.10
theta_b=90-(beta+theta); %EC. 2.7
theta_d=59.7-(0.1388*beta)+(0.001497*beta^2); %EC. 2.8
theta_r=90-(0.5788*beta)+(0.002693*beta^2); %EC. 2.9
theta_rfb=asind((n1/n2)*sind(theta_b)); %EC. 2.4
theta_rfd=asind((n1/n2)*sind(theta_d)); %EC. 2.4
theta_rfr=asind((n1/n2)*sind(theta_r)); %EC. 2.4
%tau_alfa_theta_b
factor_expKLb=exp(-K*L_e/cosd(theta_rfb));
factor_senb=(sind(theta_rfb-theta_b))^2/(sind(theta_rfb+theta_b))^2;
factor_tanb=(tand(theta_rfb-theta_b))^2/(tand(theta_rfb+theta_b))^2;
tau_alfa_theta_b=factor_expKLb*(1-0.5*(factor_senb+factor_tanb));
%EC. 2.3
%tau_alfa_theta_d
factor_expKLd=exp(-K*L_e/cosd(theta_rfd));
factor_send=(sind(theta_rfd-theta_d))^2/(sind(theta_rfd+theta_d))^2;
factor_tand=(tand(theta_rfd-theta_d))^2/(tand(theta_rfd+theta_d))^2;
tau_alfa_theta_d=factor_expKLd*(1-0.5*(factor_send+factor_tand));
%EC. 2.3
%tau_alfa_theta_r
factor_expKLr=exp(-K*L_e/cosd(theta_rfr));
factor_senr=((sind(theta_rfr-theta_r))^2)/((sind(theta_rfr+theta_r))^2);
factor_tanr=((tand(theta_rfr-theta_r))^2)/((tand(theta_rfr+theta_r))^2);
tau_alfa_theta_r=factor_expKLr*(1-0.5*(factor_senr+factor_tanr));
%EC. 2.3
%tau_alfa_n
tau_alfa_n=(exp(-K*L_e))*(1-((n2-n1)/(n2+n1))^2);
%EC. 2.3
%factores K_j
K_b=tau_alfa_theta_b/tau_alfa_n; %EC. 2.5
K_d=tau_alfa_theta_d/tau_alfa_n; %EC. 2.5
K_r=tau_alfa_theta_r/tau_alfa_n; %EC. 2.5
%MASA DE AIRE M
AM=1/(cosd(tetha_z)+(0.5057*(96.080-tetha_z)^-1.634)); %EC. 2.13
a0=0.935823;
a1=0.054289;
a2=-0.008677;
a3=0.000527;

```

```

a4=-0.000011;
a0_AM0=a0*(AM)^0;
a1_AM1=a1*(AM)^1;
a2_AM2=a2*(AM)^2;
a3_AM3=a3*(AM)^3;
a4_AM4=a4*(AM)^4;
M=a0_AM0+a1_AM1+a2_AM2+a3_AM3+a4_AM4; %EC. 2.12
R_b
R_b=sind(theta+beta)/sind(theta); %EC. 2.14
%RADIACION INCIDENTE, S
factor_R_G_K_b=R_b*Gb*K_b;
factor_G_K_d_cos1=Gd*K_d*((1+cosd(beta))/2);
factor_G_K_d_cos2=rho_r*G*K_r*((1-cosd(beta))/2);
S_n=tau_alfa_n*M*(factor_R_G_K_b+factor_G_K_d_cos1+factor_G_K_d_cos2);
%EC. 2.2
S=S_n*0.83;

%CONDICIONES DE BORDE DEL SISTEMA
%CONVECCIÓN
%CONVECCIÓN EN EL VIDRIO SUPERIOR
%Datos entrada
T_amb=19.57;
T_post_tedlar=T_amb;
T_reservorio=13.7;
%CONSTANTES
Delta_T=3;
g=9.81;
L_PV=1.046;%longitud del FV
Emisividad_vf=0.91;
Emisividad_tedlar=0.85;
T_amb_K=T_amb+273.15;
Cnste_Boltzman= 5.67*10^-8;
% Temperatura superficial del vidrio
T_sup_vf=T_post_tedlar+(S*Delta_T/1000); %EC. 2.23
%Temperatura de película para calcular las propiedades (TABLA A-15
CENGEL)
T_film_vf=(T_sup_vf+T_amb)/2; %EC. 2.24
%Propiedades del aire a T_film_vf y 1 atm (TABLA A-15 CENGEL)
TEMPERATURA_A=xlsread('TABLA A-15',1,'B3:B43');
DENSIDAD_A=xlsread('TABLA A-15',1,'C3:C43');
CP_A=xlsread('TABLA A-15',1,'D3:D43');
K_A=xlsread('TABLA A-15',1,'E3:E43');
ALFA_A=xlsread('TABLA A-15',1,'F3:F43');
MIU_A=xlsread('TABLA A-15',1,'G3:G43');
NIU_A=xlsread('TABLA A-15',1,'H3:H43');
PR_A=xlsread('TABLA A-15',1,'I3:I43');
Densidad_aire_vf=interp1(TEMPERATURA_A,DENSIDAD_A,T_film_vf);
Cp_aire_vf=interp1(TEMPERATURA_A,CP_A,T_film_vf);
k_aire_vf=interp1(TEMPERATURA_A,K_A,T_film_vf);
alfa_aire_vf=interp1(TEMPERATURA_A,ALFA_A,T_film_vf);
miu_aire_vf=interp1(TEMPERATURA_A,MIU_A,T_film_vf);
niu_aire_vf=interp1(TEMPERATURA_A,NIU_A,T_film_vf);
Pr_aire_vf=interp1(TEMPERATURA_A,PR_A,T_film_vf);

%Números ADIMENSIONALES, Gr, Ra, Re
Beta_aire_vf_f=1/T_film_vf; %EC. 2.22
Gr_aire_vf_f=(g*Beta_aire_vf_f*(T_sup_vf-
T_amb)*L_PV^3)/niu_aire_vf^2; %EC. 2.20
Ra_aire_vf_f=Gr_aire_vf_f*Pr_aire_vf; %EC. 2.21

```

```

%Coeficiente de convección libre para la superficie superior del
vidrio
if (Ra_aire_vf_f>1*10^4)&&(Ra_aire_vf_f<1*10^7);
    Nu_vf_l=0.76*(Ra_aire_vf_f^(1/4));
else (Ra_aire_vf_f>1*10^7)&&(Ra_aire_vf_f<3*10^10);
    Nu_vf_l=0.15*(Ra_aire_vf_f^(1/3));
end
Nu_vf_l;
%Coeficiente de convección libre
h_conv_vf_l=(Nu_vf_l*k_aire_vf)/L_PV;

%CONVECCIÓN EN EL TEDLAR
%Temperatura de película para calcular las propiedades (TABLA A-15
CENGEL)
T_film_tedlar=T_post_tedlar;
%Propiedades del aire a T_film_tedlar y 1 atm (TABLA A-15 CENGEL)
Densidad_aire_tedlar=interp1(TEMPERATURA_A,DENSIDAD_A,T_film_tedlar);
Cp_aire_tedlar=interp1(TEMPERATURA_A,CP_A,T_film_tedlar);
k_aire_tedlar=interp1(TEMPERATURA_A,K_A,T_film_tedlar);
alfa_aire_tedlar=interp1(TEMPERATURA_A,ALFA_A,T_film_tedlar);
miu_aire_tedlar=interp1(TEMPERATURA_A,MIU_A,T_film_tedlar);
niu_aire_tedlar=interp1(TEMPERATURA_A,NIU_A,T_film_tedlar);
Pr_aire_tedlar=interp1(TEMPERATURA_A,PR_A,T_film_tedlar);

%Coeficiente de convección libre (h_conv_tedlar_l) para la superficie
del tedlar
if (Ra_aire_tedlar_f>1*10^4)&&(Ra_aire_tedlar_f<1*10^7);
    Nu_tedlar_l=0.76*(Ra_aire_tedlar_f^(1/4));
else (Ra_aire_tedlar_f>1*10^7)&&(Ra_aire_tedlar_f<3*10^10);
    Nu_tedlar_l=0.15*(Ra_aire_tedlar_f^(1/3));
end
Nu_tedlar_l;
%Coeficiente de convección libre
h_conv_tedlar_l=(Nu_tedlar_l*k_aire_tedlar)/L_PV;

%CONVECCION TOTOAL DE SISTEMA
h_conv_T=h_conv_tedlar_l+h_conv_vf_l;

%RADIACIÓN
%Factores F
F_vf_cielo=0.5*(1+cosd(beta));
F_tedlar_reservorio=0.5*(pi-cosd(beta));
% COEFICIENTE DE RADIACIÓN EN EL VIDRIO FRONTAL h_rad_vf_cielo
T_cielo=0.00552*T_amb_K^1.5;

numerador_h_rad_vf_cielo=Cnste_Boltzman*((T_sup_vf^2)+(T_cielo^2))*(T_sup
_vf+T_cielo);
denominador_h_rad_vf_cielo=((1-
Emisividad_vf)/Emisividad_vf)+(1/F_vf_cielo);
h_rad_vf_cielo=(numerador_h_rad_vf_cielo/denominador_h_rad_vf_cielo);
%EC. 2.27
% COEFICIENTE DE RADIACIÓN EN EL TEDLAR h_rad_tedlar_cielo

numerador_h_rad_tedlar_reserv=Cnste_Boltzman*((T_post_tedlar^2)+(T_reserv
orio^2))*(T_post_tedlar+T_reservorio);
denominador_h_rad_tedlar_reserv=((1-
Emisividad_tedlar)/Emisividad_tedlar)+(1/F_tedlar_reservorio);

```

```

h_rad_tedlar_reserv=(numerador_h_rad_tedlar_reserv/denominador_h_rad_tedlar_reserv);
    %COEFICIENTE DE RADIACION TOTAL DEL SISTEMA
    h_rad_total=h_rad_vf_cielo+h_rad_tedlar_reserv;

%DIFERENCIAS FINITAS
%PROPIEDADES FÍSICAS Y GEOMÉTRICAS DE LOS COMPONENTES DEL PV
%VIDRIO FRONTAL
e_vf=0.003; %espesor, [m]
k_vf=1.8; %conductividad térmica, [W/mK]
p_vf=3000; %densidad, [kg/m3]
Cp_vf=500; %capacidad de calor específico, [J/kgK]
%T_sup_vf=22.767; %Temperatura del vidrio, [W/m2K] (X)
h_conv_T_vf=h_conv_vf_l; %coeficiente de convección, [W/m2K] (X)
h_rad_T_vf=h_rad_vf_cielo; %coeficiente de radiación, [W/m2K] (X)
H_vf=h_conv_T_vf+h_rad_T_vf;
%EVA (superior e inferior)
e_eva=0.0005; %espesor, [m]
k_eva=0.35; %conductividad térmica, [W/mK]
p_eva=960; %densidad, [kg/m3]
Cp_eva=2090; %capacidad de calor específico, [J/kgK]
%CELDAS FOTOVOLTAICAS
e_cf=0.000225; %espesor, [m]
k_cf=148; %conductividad térmica, [W/mK]
p_cf=2330; %densidad, [kg/m3]
Cp_cf=677; %capacidad de calor específico, [J/kgK]
%TEDLAR
e_td=0.0001; %espesor, [m]
k_td=0.2; %conductividad térmica, [W/mK]
p_td=1200; %densidad, [kg/m3]
Cp_td=1250; %capacidad de calor específico, [J/kgK]
T_td=T_post_tedlar; %Temperatura en el tedlar, [W/m2K] (X)
h_conv_T_td=h_conv_tedlar_l; %coeficiente de convección, [W/m2K] (X)
h_rad_T_td=h_rad_tedlar_reserv; %coeficiente de radiación, [W/m2K] (X)
H_td=h_conv_T_td+h_rad_T_td;
%Parámetros ambientales
%T_amb=19.57; % [°C]
%T_cielo=27.64; % [°C]
%T_reservorio=13.7; % [°C]
To=T_amb; % [°C]

%PARÁMETROS MDF
n=12; %número de nodos
dt=1;
es=e_vf+2*e_eva+e_cf+e_td ; %espesor total del tedlar, [m]
dx=es/(n-1);
tiempo_maximo=11; % [h]
m=0:dx:es;
mi=length(m);

```

```

%COEFICIENTES DE LA MATRIZ DEL SISTEMA DE ECUACIONES, METODO IMPLICITO DE
%DIFERENCIAS FINITAS POR EL METODO DE THOMAS (ECUACIONES TRIDIAGONALES)
a1=0;
b1=((2*dt)/(p_td*Cp_td*dx))*(((p_td*Cp_td*dx)/(2*dt))+(k_td/dx)+(H_td));
c1=((2*dt)/(p_td*Cp_td*dx))*(-k_td/dx);
d1=((2*dt)/(p_td*Cp_td*dx))*((T_amb*h_conv_T_td)+(T_reservorio*h_rad_T_td
));
ai=0;
bi=0;
ci=0;
e1=0;
an=((2*dt)/(p_vf*Cp_vf*dx))*(-k_vf/dx);
bn=((2*dt)/(p_vf*Cp_vf*dx))*(((p_vf*Cp_vf*dx)/(2*dt))+(k_vf/dx)+(H_vf));
cn=0;
dn=((2*dt)/(p_vf*Cp_vf*dx))*((T_amb*h_conv_T_vf)+(T_cielo*h_rad_T_vf));
Ai=zeros (n,1);
Bi=zeros (n,1);
Ci=zeros (n,1);

%determinación de los coeficientes de acuerdo con el número de nodos
usando
%las características del material donde se ubique el nodo
for Ei=1:1:mi
    if m(Ei)>=0 && m(Ei)<=0.0001;
        ai(Ei)=((dt)/(p_td*Cp_td*dx))*(-k_td/dx);
        bi(Ei)=((dt)/(p_td*Cp_td*dx))*(((p_td*Cp_td*dx)/(dt))+(2*k_td/dx));
        ci(Ei)=((dt)/(p_td*Cp_td*dx))*(-k_td/dx);
        fprintf('tedlar %1f',Ei);

        elseif m(Ei)>0.0001 && m(Ei)<=0.0006;
            ai(Ei)=((dt)/(p_eva*Cp_eva*dx))*(-k_eva/dx);
            bi(Ei)=((dt)/(p_eva*Cp_eva*dx))*(((p_eva*Cp_eva*dx)/(dt))+(2*k_eva/dx));
            ci(Ei)=((dt)/(p_eva*Cp_eva*dx))*(-k_eva/dx);
            fprintf('EVA-inf %1f',Ei);

            elseif m(Ei)>0.0006 && m(Ei)<=0.000825;
                ai(Ei)=((dt)/(p_cf*Cp_cf*dx))*(-k_cf/dx);
                bi(Ei)=((dt)/(p_cf*Cp_cf*dx))*(((p_cf*Cp_cf*dx)/(dt))+(2*k_cf/dx));
                ci(Ei)=((dt)/(p_cf*Cp_cf*dx))*(-k_cf/dx);
                fprintf('celda: %.0f',Ei)

                elseif m(Ei)>0.000825 && m(Ei)<=0.001325;
                    ai(Ei)=((dt)/(p_eva*Cp_eva*dx))*(-k_eva/dx);
                    bi(Ei)=((dt)/(p_eva*Cp_eva*dx))*(((p_eva*Cp_eva*dx)/(dt))+(2*k_eva/dx));
                    ci(Ei)=((dt)/(p_eva*Cp_eva*dx))*(-k_eva/dx);
                    fprintf('EVA-sup %1f',Ei);

                    else m(Ei)>0.001325 && m(Ei)<=es;
                        ai(Ei)=((dt)/(p_vf*Cp_vf*dx))*(-k_vf/dx);
                        bi(Ei)=((dt)/(p_vf*Cp_vf*dx))*(((p_vf*Cp_vf*dx)/(dt))+(2*k_vf/dx));

```

```

        ci(Ei)=((dt)/(p_vf*Cp_vf*dx))*(-k_vf/dx);
        fprintf('VIDRIO FRONTAL %1f',Ei);
    end
    Ai(Ei)=ai(Ei);
    Bi(Ei)=bi(Ei);
    Ci(Ei)=ci(Ei);
end

Ai;
Bi;
Ci;

A=zeros(n);

for i=1:n
    for j=1:n
        if i==j
            A(i,j)=Bi(i);
        end
    end
end

for i=2:n
    for j=1:n
        if i-1==j
            A(i,j)=Ai(i);
        end
    end
end

for i=1:n-1
    for j=1:n
        if i==j-1
            A(i,j)=Ci(i);
        end
    end
end
A;

A(1,1)=b1;
A(1,2)=c1;
A(n,n)=bn;
A(n,n-1)=an;
A

%CALCULO DEL CAMPO TÉRMICO
Nx=length(m);
Nt=ceil(tiempo_maximo/dt)+1;
T=zeros(Nt,Nx);
T(1,:)=17.9;
T(1,n)=T_sup_vf;
T;

%Calculo de las alfa's
An=Ai;
Bn=Bi;
Cn=Ci;

```

```

An(1,1)=a1;
Bn(1,1)=b1;
Cn(1,1)=c1;
An(n,1)=an;
Bn(n,1)=bn;
Cn(n,1)=cn;
An;
Bn;
Cn;
alpha=zeros(n,1);
gamma=zeros(Nt,Nx);

%alpha's
for i=1:1:Nx

    if i==1
        alpha(i)=c1/b1;
    else
        alpha(i)=Cn(i)/(Bn(i)-(alpha(i-1)*An(i)));
    end
end

%gamma's

for j=2:Nt
    for i=1:Nx
        if i==1
            gamma(j-1,i)=(d1+(T(j-1)))/b1;

            elseif i==n
                gamma(j-1,i)=((dn+T(j-1,i))-gamma(j-1,i-1)*An(i))/(Bn(i)-
(alpha(i-1)*An(i)));
            else
                gamma(j-1,i)=(T(j-1,i))-gamma(j-1,i-1)*An(i)/(Bn(i)-(alpha(i-
1)*An(i)));
            end
        end
        T(j,n)=gamma(j-1,n);
        for i=n-1:-1:2
            T(j,i)=gamma(j-1,i+1)-(alpha(i)*T(j,i+1));
        end
        T(j,1)=gamma(j-1,i+1)-alpha(1)*T(j,2);
    end

gamma;
T;

```

ANEXO VI

N° HORAS DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN	HORARIO												
	6am	7am	8am	9am	10am	11am	12pm	13pm	14pm	15pm	16pm	17pm	18pm
	RADIACIÓN INCIDENTE, S [W/m ²]												
	0	390.98	694.47	802.03	852.34	875.99	884.59	875	855.63	816.19	529.03	247.99	102.86
	CAMPO DE TEMPERATURA DE LA CELDA FOTOVOLTAICA [°C]												
0	14.700	16.100	18.400	20.400	22.300	23.400	24.200	24.600	24.500	23.600	22.300	20.400	17.900
1	16.108	17.651	20.178	22.372	24.455	25.661	26.538	26.976	26.866	25.879	24.448	22.360	19.615
2	14.625	16.048	18.360	20.359	22.253	23.349	24.146	24.543	24.442	23.543	22.227	20.315	17.808
3	14.709	16.168	18.516	20.533	22.442	23.546	24.348	24.747	24.644	23.737	22.392	20.448	17.908
4	15.936	17.537	20.100	22.292	24.363	25.560	26.429	26.860	26.748	25.763	24.287	22.164	19.397
5	18.165	19.998	22.932	25.434	27.796	29.161	30.151	30.642	30.512	29.389	27.695	25.264	22.101
6	21.377	23.526	26.983	29.929	32.707	34.313	35.478	36.055	35.902	34.580	32.581	29.717	25.993
7	25.636	28.190	32.333	35.864	39.193	41.117	42.513	43.204	43.021	41.437	39.041	35.611	31.148
8	31.078	34.134	39.148	43.422	47.453	49.784	51.474	52.311	52.090	50.171	47.274	43.128	37.728
9	37.905	41.574	47.673	52.878	57.787	60.626	62.685	63.705	63.436	61.100	57.579	52.542	45.972
10	46.387	50.798	58.238	64.595	70.593	74.062	76.578	77.826	77.497	74.644	70.355	64.218	56.202
11	56.872	62.175	71.265	79.042	86.384	90.630	93.711	95.239	94.838	91.346	86.115	78.627	68.832

ANEXO VII

N° HORAS DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN	HORARIO												
	6am	7am	8am	9am	10am	11am	12pm	13pm	14pm	15pm	16pm	17pm	18pm
	RADIACIÓN INCIDENTE, S [W/m ²]												
	0	390.98	694.47	802.03	852.34	875.99	884.59	875	855.63	816.19	529.03	247.99	102.86
	CAMPO DE TEMPERATURA DEL VIDRIO [°C]												
0	14.700	16.100	18.400	20.400	22.300	23.400	24.200	24.600	24.500	23.600	22.300	20.400	17.900
1	14.432	15.837	18.119	20.090	21.960	23.041	23.828	24.220	24.120	23.233	21.934	20.047	17.573
2	15.278	16.806	19.254	21.353	23.337	24.484	25.317	25.731	25.624	24.681	23.275	21.247	18.602
3	17.280	19.033	21.824	24.206	26.453	27.752	28.695	29.162	29.039	27.970	26.359	24.045	21.035
4	20.288	22.350	25.638	28.437	31.076	32.602	33.708	34.256	34.111	32.855	30.953	28.227	24.686
5	24.313	26.770	30.710	34.064	37.225	39.052	40.378	41.034	40.859	39.354	37.073	33.808	29.565
6	29.467	32.413	37.182	41.242	45.070	47.283	48.887	49.682	49.471	47.649	44.889	40.941	35.805
7	35.936	39.479	45.282	50.226	54.888	57.584	59.538	60.506	60.250	58.031	54.676	49.877	43.629
8	43.975	48.241	55.321	61.360	67.057	70.351	72.740	73.924	73.611	70.900	66.812	60.964	53.338
9	53.914	59.050	67.701	75.091	82.064	86.096	89.021	90.471	90.089	86.771	81.784	74.647	65.327
10	66.167	72.346	82.925	91.975	100.518	105.459	109.043	110.821	110.354	106.291	100.202	91.487	80.088
11	81.250	88.680	101.621	112.709	123.180	129.237	133.632	135.813	135.242	130.263	122.828	112.182	98.234