

## Cálculo de la transferencia de calor por radiación en paneles solares fotovoltaicos flotantes

Calculation of radiative heat transfer in floating photovoltaic solar panels

**Para citar este trabajo:**

Moreno, J. Guaman, R. Montaña, L. Intriago, H. (2024). Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes. *Reincisol*, 3(5), pp. 1-28.  
[https://doi.org/10.59282/reincisol.v3\(5\)1-28](https://doi.org/10.59282/reincisol.v3(5)1-28)

### Autores:

**Ing. José Ricardo Moreno Cevallos, MSc.**

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas

**Ciudad:** Esmeraldas

**Pais** – Ecuador

**Correo:** [jose.moreno@utelvt.edu.ec/](mailto:jose.moreno@utelvt.edu.ec/)

**Orcid:** <https://orcid.org/0000-0003-0040-8711>

**Ramiro Enrique Guamán Chávez PhD.**

Docente de la Carrera de Tecnología Superior en Mecánica Automotriz del ITS Japón Docente de la Carrera de Mecánica de la UTLVTE Esmeraldas

**Ciudad:** La Concordia

**País:** Ecuador

**Correo:** [rguamanc@itsjapon.edu.ec](mailto:rguamanc@itsjapon.edu.ec)

**Orcid:** <https://orcid.org/0000-0002-5593-4981>

**Ing. Víctor Lenin Montaña Roldan, MSc.**

Decano de la facultad de FACI de la Universidad Luis Vargas Torres de Esmeraldas

**Ciudad:** Esmeraldas

**Pais** – Ecuador

**Correo:** [victor.montano@utelvt.edu.ec](mailto:victor.montano@utelvt.edu.ec)

**Orcid:** <https://orcid.org/0000-0003-4424-048X>

**Ing. Holger Arturo Intriago Mairongo, MSc.**

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas

**Ciudad:** Esmeraldas

**Pais** – Ecuador

**Correo:** [holger.intriago@utelvt.edu.ec](mailto:holger.intriago@utelvt.edu.ec)

**Orcid:** <https://orcid.org/0000-0003-3694-1219>

## **Resumen**

Este artículo presenta el análisis y el procedimiento de cálculo realizado para poder obtener la temperatura de la celda y la transmisión de calor por radiación que ocurre entre la cara inferior de paneles fotovoltaicos flotantes y la superficie de agua. Para poder obtener estos resultados, inicialmente se obtuvo el valor de la temperatura de la celda y la transmisión de calor por radiación, con un solo valor de radiación solar y una altura de flotador; pero para caracterizar su comportamiento a diferentes valores de radiación solar y diferentes valores de altura del flotador se realizó un modelo matemático para caracterizar este fenómeno. Las curvas que caracterizan el comportamiento del fenómeno, se obtuvieron realizando la programación del modelo matemático en GNU Octave.

**Palabras clave:** GNU Octave, Panel Fotovoltaico solar flotante.

## Abstract

This article presents the analysis and calculation procedure performed to obtain the cell temperature and radiation heat transmission that occurs between the underside of floating photovoltaic panels and the water surface. In order to obtain these results, the value of the cell temperature and the transmission of heat by radiation were obtained, with a single value of solar radiation and a float height; but to characterize its behavior at different values of solar radiation and different values of float height, a mathematical model was carried out to characterize this phenomenon. The curves that characterize the behavior of the phenomenon were obtained by programming the mathematical model in GNU octave.

**Keywords:** GNU Octave, Panel Fotovoltaico solar flotante.

## INTRODUCCIÓN

El rendimiento de un panel fotovoltaico representa la razón entre la potencia eléctrica de salida (función del voltaje y la corriente generada) y la radiación incidente proveniente del Sol, es decir, la fracción real de energía que fue convertida por el panel fotovoltaico. Es de gran interés para la industria y para el futuro de esta tecnología siempre ir evolucionando en este aspecto e ir alcanzando cada vez más paneles fotovoltaicos con mayores eficiencias que en los últimos años ha aumentado de un 15% a un 20%. Una estrategia para incrementar la eficiencia del panel fotovoltaico viene dada por la disminución de temperatura de trabajo de la celda. La dependencia directa (rendimiento-temperatura) de la celda convierte a este parámetro en uno de los más relevantes a la hora de intentar diseñar y optimizar posibles mejoras en el panel fotovoltaico y su desempeño en condiciones reales, (Vega, 2019).

A mayor temperatura que alcance la celda, menor será su rendimiento eléctrico final, por lo que es de gran interés poder controlar la variable térmica frente a condiciones externas mediante un disipador de calor que aumente el flujo térmico y aquí la importancia de determinar la transferencia de calor de radiación hacia el agua desde las celdas ya que representa aproximadamente un 14% del total en la disipación de calor, lo que permite disminuir su temperatura, (Niño, et al. 2021).

Las plantas fotovoltaicas flotantes las cuales están constituidos por un pontón y una estructura resistente que sostiene el panel solar, son una forma emergente de sistemas fotovoltaicos que flotan en la superficie de depósitos de agua potable, lagos, presas, canales de riego, etc. (Padilla, et al. 2021). Este tipo de plantas cada vez más son utilizadas debido a que, mejoran la eficiencia de los paneles fotovoltaicos y se convierte en una opción para las regiones con escasas disponibilidad de áreas de instalación. El rendimiento de los módulos fotovoltaicos flotantes es mayor que en los sistemas instalados en tierra; el aumento de la energía producida con estos métodos puede alcanzar el orden del 20%, (Anderson, et al., 2020).

En este estudio vamos a calcular la temperatura que alcanza la celda y la transferencia de calor por radiación hacia la superficie de agua cuando variamos la condición externa de radiación solar y la influencia que tiene en las dos variables que alcanzamos de mencionar. Formular un modelo matemático para calcular la transferencia de calor por radiación que ocurre entre un panel fotovoltaica flotante y la superficie del agua, (Cengel, & Ghajar. 2007).

## METODOLOGÍA

La metodología empleada para calcular y modelar la transferencia de calor por radiación entre el panel fotovoltaico flotante y la superficie del agua, se presenta fuel:

Identificación de las condiciones de instalación de un panel fotovoltaico flotante.

Seleccionar un panel fotovoltaico flotante de los disponibles en el mercado para la obtención de datos de construcción. Obtener los datos meteorológicos promedio (radiación, temperatura del agua y del aire). Establecer el diagrama de resistencias del circuito de transferencia de calor, (Maggi, 2013).

Obtención de las propiedades de los materiales para el cálculo de la transferencia de calor.

- Seleccionar el factor de visión geométrica aplicable al problema.
- Establecer las ecuaciones de transferencia de calor y realizar los cálculos.
- Simulación del modelo matemático en software GNU Octave.
- modelación matemática

En el desarrollo del modelo matemático se estableció:

Consideraciones:

### **Condiciones de estado estable.**

Se produce transferencia de calor unidimensional en el panel solar fotovoltaico.

Se mantienen las propiedades de los materiales constantes. El tipo de celda solar seleccionada es de silicio policristalina de 156 mm x 156 mm. No se toma en consideración los efectos de transferencia de calor en los bordes del panel. La

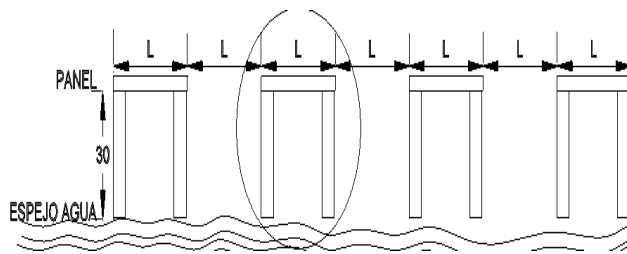
superficie del agua y la parte inferior de panel (tedlar) se ha considerado como superficies grises, (Pallasco, 2022).

Para fines del cálculo se asumieron los coeficientes de convección, ya que el objetivo principal del proyecto es el desarrollo de un modelo físico de la transferencia de calor por radiación que sucede entre el panel fotovoltaico flotante y la superficie del agua del reservorio.

Descripción de la instalación de los paneles solares fotovoltaicos sobre la superficie del agua, (Trashorras, 2021)..

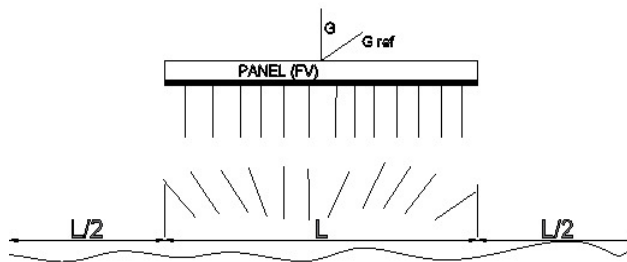
Los paneles solares fotovoltaicos flotantes se encuentran instalados en posición horizontal (formando un ángulo de  $0^\circ$  con respecto al eje de las x) sobre flotadores de 0,3 m (30 cm) de altura en un espejo de agua. El esquema de instalación de los paneles solares se puede ver en la Fig.1

**Fig. 1.** Instalación de los paneles flotantes sobre el espejo de agua.



Para el cálculo de la transmisión de calor por radiación de un panel solar fotovoltaico flotante, se ha realizado el análisis de un módulo en función de lo indicado en la Fig. 2.

**Fig. 2.** Instalación de los paneles flotantes sobre el espejo de agua



Los datos del panel solar fotovoltaico fueron obtenidos del Modelo GMA 260-60 [1], los cuales se muestran en la Tabla No. I.

TABLA I

Datos del Panel Solar Fotovoltaico Modelo GMA 260-60

Dato	Valor
Potencia nominal máx. (Wp)	260 W
Voltaje nominal (Vmp)	30.9 V
Eficiencia del módulo (%)	15.7
Celda solar	Policristalina 156 mm x 156 mm
Dimensiones	1652 mm x 1000 x 35 mm
Certificaciones	IEC 61215, IEC 61739, CE, cETLus

En la Tabla II, se presentan los datos usados para el cálculo de la transferencia de calor por radiación entre el panel solar fotovoltaico y la superficie del agua

TABLA II

Datos usadas en los cálculos

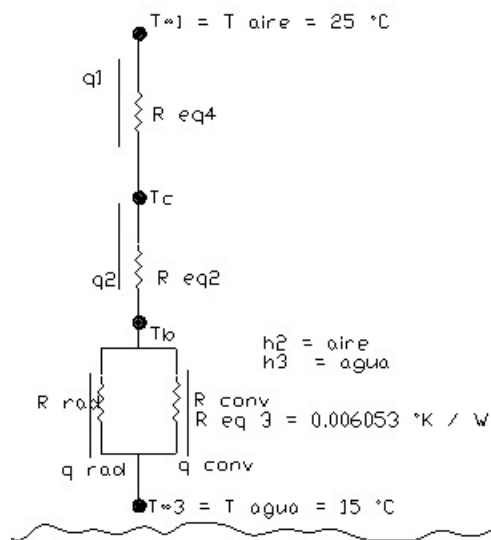
Símbolo de la variable	Valor	Unidad
<b>G</b>	1000,0*	<b>W/m<sup>2</sup></b>
<b>ef</b>	15,7	<b>%</b>
<b>L</b>	1,652	<b>m</b>
<b>A</b>	1,0	<b>m</b>
<b>e</b>	35,0	<b>mm</b>
<b>y</b>	0,3	<b>m</b>

<b>e1</b>	3,0	<b>mm</b>
<b>e2</b>	1,0	<b>mm</b>
<b>e3</b>	0,5	<b>mm</b>
<b>e4</b>	0.1	<b>mm</b>
<b>k1</b>	1,8 [2]	<b>W/m°K</b>
<b>k2</b>	0,35[2]	<b>W/m°K</b>
<b>k3</b>	0,2[2]	<b>W/m°K</b>
<b>ε1</b>	0,95[3]	
<b>ε2</b>	0,96[3]	
<b>ε3</b>	0,2[2]	
<b>h∞1</b>	0,95[4]	<b>W/m2°K</b>
<b>h∞2</b>	0,96[4]	<b>W/m2°K</b>
<b>h∞3</b>	0,86[4]	<b>W/m2°K</b>
<b>T∞1</b>	25,0	<b>° C</b>
<b>T∞2</b>	<b>15,0</b>	<b>° C</b>

\*Valor asumido

En la Fig. 3 se presenta el circuito térmico de resistencias que se presentan en nuestro caso de estudio:

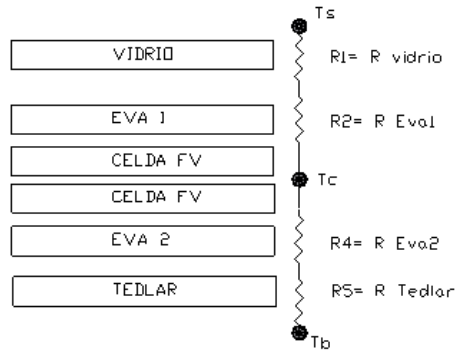
**Fig. 3.** Circuito térmico de resistencias.





En la Fig. 4, se muestra el diagrama de resistencias térmicas que se presentan en el interior del panel solar fotovoltaico.

**Fig. 4.** Circuito térmico de resistencias en el panel solar fotovoltaico.



$$G_{ref} = (1 - \epsilon) * G * L * A \quad (1)$$

$$G_{ref} = (1 - 0,95) * 1000 \frac{W}{m^2} * 1.652 * 1$$

$$G_{ref} = 82.6 W$$

$$G_{elec} = \epsilon f m * G * L * A \quad (2)$$

$$G_{elec} = \frac{15,7\%}{100} * 1000 \frac{W}{m^2} * 1.652m * 1m$$

$$G_{elec} = 259.364 W$$

$$G_{termico} = G * L * A - (G_{ref} + G_{elec}) \quad (3)$$

$$G_{t\acute{e}rmico} = 1000 * 1.652 * 1 - (82.6 + 259.364)$$

$$G_{termico} = 1310.036 W$$

$$R_{cond} = \frac{L}{K \cdot Ar} \quad (4)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot Ar} \quad (5)$$

Cálculo de resistencias en el panel solar fotovoltaico:

*R<sub>1cond</sub> en vidrio*

$$R_1 = \frac{0,003m}{1,8 \frac{W}{m^{\circ}K} * 1,652m^2} \quad (6)$$

$$R_1 = 0,00100887 \frac{^{\circ}K}{W}$$

*R<sub>2cond</sub> en EVA superior*

$$R_2 = \frac{0,001m}{0,35 \frac{W}{m^{\circ}K} * 1,652m^2} \quad (7)$$

$$R_2 = 0,0017295 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$R_{eq1} = R_1 + R_2 \quad (8)$$

$$R_{eq1} = 0,00100887 + 0,0017295$$

$$R_{eq1} = 0,0027387 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$R_{concs} = \frac{1}{Ar_1 h_{\infty 1}} \quad (9)$$

$$R_{concs} = \frac{1}{1,652m^2 * 25 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}K}}$$

$$R_{concs} = 0,0242 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$Req_4 = Req_1 + R_{conv_s} \quad (10)$$

$$Req_4 = 0,0027387 \frac{^{\circ}K}{W} + 0,0242 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$Req_4 = 0,02695 \frac{^{\circ}K}{W}$$

*R<sub>4cond</sub> en EVA inferior*

$$R_4 = \frac{0,005m}{0,35 \frac{W}{m^{\circ}K} * 1,652m^2} \quad (11)$$

$$R_4 = 0,00086475 \frac{^{\circ}K}{W}$$

*R<sub>5cond</sub> en tedlar*

$$R_5 = \frac{0,0001m}{0,2 \frac{W}{m^{\circ}K} * 1,652m^2} \quad (12)$$

$$R_5 = 0,00030266 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$Req_2 = R_4 + R_5 \quad (13)$$

$$Req_2 = 0,00086475 + 0,00030266$$

$$Req_2 = 0,0011674 \frac{^{\circ}K}{W}$$

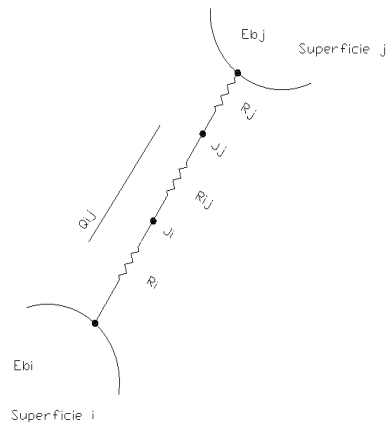
$$Req_3 = \frac{1}{h_{\infty 2} A_r} + \frac{1}{h_{\infty 3} A_{r2}} \quad (14)$$

$$Req_3 = \frac{1}{25 * 1,652} + \frac{1}{350 * 50}$$

$$Req_3 = 0,025077 \frac{^{\circ}K}{W}$$

En la Fig. 5, se indica el circuito de resistencias equivalentes que están presentes en la transmisión de calor de los paneles solares fotovoltaicos.

**Fig. 5.** Circuito de resistencias equivalentes.



Realizando el balance de calor tenemos:

$$q_T = q_1 + q_2 \quad (15)$$

$$q_1 = \frac{T_c - T_{\infty 1}}{Req_4} \quad (16)$$

$$q_1 = \frac{T_c - 298}{0,02695} W$$

$$q_2 = q_{conv} + q_{rad} \quad (17)$$

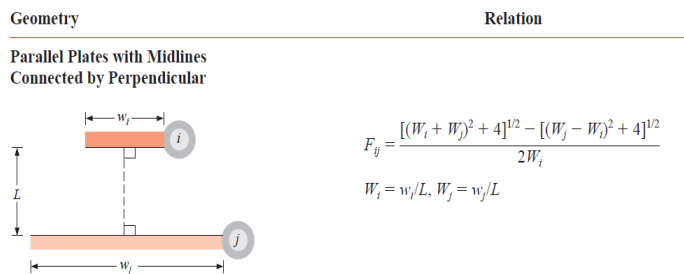
$$q_{conv} = \frac{1}{Re_{q3}} (T_c - T_{\infty 3}) \quad (18)$$

$$q_{conv} = \frac{1}{0,025077} (T_c - 288)$$

$$q_{rad} = \frac{\sigma(T_c^4 - T_{H_2O}^4)}{\frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{ij}} + \frac{1-\epsilon_j}{\epsilon_j A_j}} \quad (19)$$

En la Fig. 6 se presenta [5] se presenta el factor de visión geométrica aplicable al problema.

**Fig. 6.** Factor de visión.



$$F_{ij} = \frac{[(W_i + W_j)^2 + 4]^{1/2} - [(W_j - W_i)^2 + 4]^{1/2}}{2W_i} \quad (20)$$

$$W_i = \frac{1,652}{0,30} = 5,507 \quad (21)$$

$$W_j = \frac{3,304}{0,30} = 11,013 \quad (22)$$

$$F_{ij} = \frac{[(5,507 + 11,013)^2 + 4]^{\frac{1}{2}} - [(11,013 + 5,507)^2 + 4]^{\frac{1}{2}}}{2 * 5,507}$$

$$F_{ij} = 0,978996$$

$$q_{rad} = \frac{5,67 * 10^{-8} (T_c^4 - 288^4)}{\frac{1-0,86}{0,86 * 1,652} + \frac{1}{0,86 * 3,2633} + \frac{1-0,96}{0,86 * 3,304}} \quad (23)$$

$$q_{rad} = \frac{5,67 * 10^{-8} (T_c^4 - 288^4)}{0,098541 + 0,61831 + 0,01261}$$

$$q_{rad} = \frac{5,67 * 10^{-8} (T_c^4 - 288^4)}{0,72946}$$

$$q_T = q_1 + q_{con} + q_{rad} \quad (24)$$

$$1310,036 = \frac{(T_c - 298)}{0,026951} + \frac{(T_c - 288)}{0,025078} + \frac{5,67 * 10^{-8} (T_c^4 - 288^4)}{0,72946}$$

(25)

Iterando la ecuación 25 (lado izquierdo igual al lado derecho) se obtiene Tc:

$$T_c = 307,729686 \text{ } ^\circ K$$

$$T_c = 34,729686 \text{ } ^\circ C$$

=> El valor de la temperatura de la celda de un panel fotovoltaico flotante es Tc = 34,729686 °C (307,729686 °K).

Reemplazando Tc en las ecuaciones 16, 17, 18, 23, se obtiene:

$$q_1 = 361,07775 \text{ W}$$

$$q_2 = 949,021775 \text{ W}$$

$$q_{conv} = 786,738241 \text{ W}$$

$$q_{rad} = 162,289977 \text{ W}$$

=> El valor de la energía transferida por radiación a la superficie del agua es  $q_{rad} = 162,289977 \text{ W}$ .

modelación matemática

La simulación del modelo matemático ha sido realizada en el software GNU Octave, para lo cual se han realizado dos scripts:

Código de programa en GNU Octave, a través del cual se obtiene la temperatura de la celda ( $T_c$ ) del panel fotovoltaico y la transferencia de calor por radiación hacia la superficie del agua y la curva de  $G_{term}$  (vs) temperatura de la celda, (Sala, 2020).

Modelo Matemático para la elaboración del cálculo de transferencia de calor %por radiación desde un panel FV flotante hasta la superficie del agua

```
clear
```

```
clc
```

```
clf
```

```
disp
```

```
("*****")
```

```
disp
```

```
"=====
=====")
```

```
disp ("MODELO MATEMATICO ELABORADO POR EL GRUPO No. 3 - UTELVT
MAESTRIA EFICIENCIA ENERGETICA");
```

```

disp
("=====
=====")
disp
("*****\n"
);
G=input("Ingrese el valor de la radiación (en W/m2) G = ");
disp("");
ef=input("Ingrese el valor de la eficiencia (en %)del panel FV ef = ");
disp("");
L=input("Ingrese el largo (en m) del panel FV L = ");
disp("");
A=input("Ingrese el ancho (en m) del panel FV A = ");
disp("");
e=input("Ingrese el espesor (en mm) del panel FV e = ");
disp("");
y=input("Ingrese la altura (en m) de los flotadores en los que se instala el panel FV
y = ");
disp("");
e1=input("Ingrese el espesor (en mm) del vidrio del panel FV e1 = ");
disp("");
k1=input("Ingrese el coeficiente de conductividad (en W/m.°K) del vidrio del panel
FV k1 = ");
disp("");
e2=input("Ingrese el espesor (en mm) del EVA de la parte superior del panel FV e2
= ");
disp("");
e3=input("Ingrese el espesor (en mm) del EVA de la parte inferior del panel FV e3
= ");
disp("");
k2=input("Ingrese el coeficiente de conductividad (en W/m.°K) del EVA del panel
FV k2 = ");
disp("");

```



```
e4=input("Ingrese el espesor (en mm) del Tedlar del panel FV e4 = ");
disp("");
k3=input("Ingrese el coeficiente de conductividad (en W/m.°K) del Tedlar del panel
FV k3 = ");
disp("");
E1=input("Ingrese el valor de emisividad del vidrio E1 = ");
disp("");
E2=input("Ingrese el valor de emisividad del agua E2 = ");
disp("");
E3=input("Ingrese el valor de emisividad del Tedlar E3 = ");
disp("");
h1=input("Ingrese el coeficiente de conveccion (en W/m2.°K)del aire de la parte
superior del panel FV h1 = ");
disp("");
h2=input("Ingrese el coeficiente de conveccion (en W/m2.°K)del aire de la parte
inferior del panel FV h2 = ");
disp("");
h3=input("Ingrese el coeficiente de conveccion (en W/m2.°K)del agua FV h3 = ");
disp("");
To1=input("Ingrese la temperatura (°C) de los alrededores de la parte superior del
panel FV T01 = ");
disp("");
To2=input("Ingrese la temperatura (°C) del agua TH2O = T03 = ");
%{
G=1000; ef=15.7; L=1.652; A=1; e=35; y=0.3; e1=3; k1=1.8; e2=1; e3=0.5;
k2=0.35; e4=0.1; k3=0.2; E1=0.95; E2=0.96; E3=0.86; h1=25; h2=25; h3=350;
%}
To1=25; To2=15;
To1=To1+273;
To2=To2+273;
Gref=(1-E1)*G*L*A;
Gelec=(ef/100)*G*L*A;
```

```

Gterm=G*L*A-(Gref+Gelec);
disp("")
disp('Radiación referencial Radiación eléctrica Radiación térmica')
fprintf (" Gref= %8.3fW \t Gelec= %8.3fW \t Gterm= %8.3fW\n",Gref,Gelec,Gterm)
disp("")
disp('+++++')
disp(' Calculo de las resistencias del panel solar')
disp('+++++')
disp("")
R1=(e1/1000)/(k1*L*A);
R2=(e2/1000)/(k2*L*A);
R3=(e3/1000)/(k2*L*A);
R4=(e4/1000)/(k3*L*A);
fprintf ("R1= %10.8f °K/W\t R2= %10.8f °K/W\t R3= %10.8f °K/W\t R4= %10.8f
°K/W \n",R1,R2,R3,R4);
Req1=R1+R2;
Req2=R3+R4;
disp("")
fprintf ("Req1= %10.8f °K/W \t Req2= %10.8f °K/W\n",Req1,Req2)
disp("")
disp('+++++')
disp('Calculo de las resistencias de conveccion')
disp('+++++')
disp("")
Rconvs=1/(h1*L*A);
Rconvi=1/(h2*L*A)+1/(h3*2*L*A);
Req4=Req1+Rconvs;
fprintf ("Rconvs= %10.8f °K/W\t Rconvi= %10.8f Req4= %10.8f
°K/W\n",Rconvs,Rconvi,Req4);
disp("")
disp('+++++')
disp('Calculo del Factor de Forma las resistencias del panel solar')
disp('+++++')

```

```

disp("")
Wi=L/y;
Wj=(2*L)/y;
Fij=(((Wi+Wj)^2+4)^(0.5)-((Wj-Wi)^2+4)^(0.5))/(2*Wi);
fprintf('Fij= %8.6f\n',Fij)
disp("")
disp('+++++')
disp('          Calculo de Tc')
disp('+++++')
disp("")
disp
("*****");
disp
("=====
=====")
disp ("          RESULTADOS");
disp
("=====
=====")
disp
("*****");
c1=1/Req4;
c2=1/Rconvi;
c3=To1/Req4;
c4=To2/Rconvi;
c5=5.67e-8/(((1-E3)/(E3*L*A))+1/(L*A*Fij))+((1-E2)/(E2*2*L*A));
c6=c3+c4+(c5*To2^4)+Gterm;
c7=c1+c2;
p=[c5 0 0 c7 -c6];
raices=roots(p);
for Tc=300:0.0001:600

```

```

    Gterm2=((Tc-To1)/Req4)+((Tc-To2)/(Rconvi))+5.67*10^(-8)*(Tc^4-To2^4)/((1-
E3)/(E3*L*A)+1/(L*A*Fij)+(1-E2)/(E2*2*L*A));
    if (Gterm2>=Gterm)
        break
    end
    end
    end
disp('')
Gterm3=Gterm2;
fprintf('El valor de la temperatura Tc= %9.5f°K, la radiación Gterm es =
%10.4fW\n',Tc,Gterm2)
Tc1=Tc;
q1=(Tc1-To1)/Req4;
qconv=1/(Rconvi)*(Tc-To2);
qrad=5.67*10^(-8)*(Tc^4-To2^4)/(((1-E3)/(E3*L*A))+1/(L*A*Fij))+((1-
E2)/(E2*2*L*A));
disp('')
fprintf('Radiación Q1=%9.3f W \t Qconv=%9.3f W Qrad=%9.3f W\n',q1,qconv,qrad)
disp('')
plot(Tc1,Gterm2,'or')
hold on
Tc=300:0.0001:Tc1;
Gterm2=((Tc-To1)/Req4)+((Tc-To2)/(Rconvi))+5.67*10^(-8)*(Tc.^4-To2^4)/((1-
E3)/(E3*L*A)+1/(L*A*Fij)+(1-E2)/(E2*2*L*A));
Tabla=[Tc; Gterm2];
tablaradi=fopen('TablaRadiacion.csv','w');
fprintf(tablaradi,'Temperatura Radiación \n');
fprintf(tablaradi,'%8.4f \t %7.3f \n',Tabla);
fclose(tablaradi);
plot(Tc,Gterm2,'Linewidth',2)
grid on
xlabel('Temperatura Tc, °K')
ylabel('Radiación, W')
title('Gráfica del valor de la Radiación / Temperatura')

```

```
txt=['Temperatura Tc \rightarrow'];
text(305,1300,txt)
saveas(gcf,'Radiacion.jpg')

grabacion=fopen('Calculos.txt','w');
fprintf(grabacion,'Datos iniciales \n \n');
fprintf(grabacion,"Radiación G = %7.2f W/m2 \n\n", G);
fprintf(grabacion,"Eficiencia del panel FV ef= %5.2f por ciento \n\n",ef);
fprintf(grabacion,"Longitud del panel FV L= %5.3f m \n\n", L);
fprintf(grabacion,"Ancho del panel FV A= %5.2f m \n\n",A);
fprintf(grabacion,"Espesor del panel FV e= %5.2f mm \n\n",e);
fprintf(grabacion,"Altura de los flotadores y= %5.2f m \n\n",y);
fprintf(grabacion,"Espesor del vidrio e1= %5.2f mm \n\n",e1);
fprintf(grabacion,"Coeficiente conductividad del vidrio k1= %5.2f W/m°K
\n\n",k1);
fprintf(grabacion,"Espesor superior del encapsulante EVA e2= %5.2f mm
\n\n",e2);
fprintf(grabacion,"Espesor inferior del encapsulante EVA e3= %5.2f mm \n\n",e3);
fprintf(grabacion,"Coeficiente de conductifidad del encapsulante EVA k2= %5.2f
W/m°K \n\n",k2);
fprintf(grabacion,"Espesor del Tedlar e4= %5.2f mm \n\n",e4);
fprintf(grabacion,"Coeficiente conductividad del Tedlar k3= %5.2f W/m°K
\n\n",k3);
fprintf(grabacion,"Emisividad del vidrio E1= %5.3f \n\n",E1);
fprintf(grabacion,"Emisividad del agua E2= %5.3f \n\n",E2);
fprintf(grabacion,"Emisividad del Tedlar E3= %5.3f \n\n",E3);
fprintf(grabacion,"Coeficiente convección aire parte superior h1= %5.3f W/m2°K
\n\n",h1);
fprintf(grabacion,"Coeficiente convección aire parte inferior h2= %5.3f W/m2°K
\n\n",h2);
fprintf(grabacion,"Coeficiente convección del agua h1= %5.3f W/m2°K \n\n",h3);
```

```

fprintf(grabacion,"Temperatura alrededores parte superior panel FV too1= %5.3f °C
\n\n",To1);
fprintf(grabacion,"Temperatura del agua too2= %5.3f W/m2°K \n\n",To2);
fprintf(grabacion,'          Resultados \n \n');
fprintf(grabacion,'Radiación referencial  Radiación eléctrica    Radiación térmica
\n\n');
fprintf(grabacion,"  Gref= %8.3fW \t Gelec= %8.3fW \t Gterm= %8.3fW
\n\n",Gref,Gelec,Gterm);
fprintf(grabacion,'Resistencias del panel solar \n\n');
fprintf(grabacion,"R1= %10.8f °K/W\t R2= %10.8f °K/W\t R3= %10.8f °K/W\t
R4= %10.8f °K/W \n\n",R1,R2,R3,R4);
fprintf(grabacion,'Resistencias de convección \n\n');
fprintf(grabacion,"Rconvs= %10.8f °K/W\t Rconvi= %10.8f Req4= %10.8f °K/W
\n\n",Rconvs,Rconvi,Req4);
fprintf(grabacion,'Factor de forma \n\n');
fprintf(grabacion,'Fij= %8.6f \n\n',Fij);
fprintf(grabacion,'          Resultados finales \n\n');
fprintf(grabacion,'El valor de la temperatura Tc= %9.5f °K \n\n',Tc1);
fprintf(grabacion,'Radiación Q1= %9.3f W \t Qconv= %9.3f W \t Qrad= %9.3f W
\n\n',q1,qconv,qrad);
%}
fclose(grabacion);

```

Código de programa en GNU Octave, a través del cual se obtiene la temperatura de la celda (Tc) del panel fotovoltaico haciendo variar la altura de los flotadores desde 0,3 m hasta 1m.

%Cálculo de la temperatura dependiendo de la altura del flotador

```

clear
clc
clf

```

```

G=1000; ef=15.7; L=1.652; A=1; e=35; y=0.3; e1=3; k1=1.8; e2=1; e3=0.5;
k2=0.35; e4=0.1; k3=0.2; E1=0.95; E2=0.96; E3=0.86; h1=25; h2=25; h3=350;

```

$$To1=25; To2=15;$$

$$To1=To1+273;$$

$$To2=To2+273;$$

$$Gref=(1-E1)*G*L*A;$$

$$Gelec=(ef/100)*G*L*A;$$

$$Gterm=G*L*A-(Gref+Gelec);$$

$$R1=(e1/1000)/(k1*L*A);$$

$$R2=(e2/1000)/(k2*L*A);$$

$$R3=(e3/1000)/(k2*L*A);$$

$$R4=(e4/1000)/(k3*L*A);$$

$$Req1=R1+R2;$$

$$Req2=R3+R4;$$

$$Rconvs=1/(h1*L*A);$$

$$Rconvi=1/(h2*L*A)+1/(h3*2*L*A);$$

$$Req4=Req1+Rconvs;$$

$$Wi=L/y;$$

$$Wj=(2*L)/y;$$

$$Fij=((Wi+Wj)^2+4)^{0.5}-((Wj-Wi)^2+4)^{0.5})/(2*Wi);$$

for Tc=300:0.0001:600

$$Gterm2=((Tc-To1)/Req4)+((Tc-To2)/(Rconvi))+((5.67*10^{-8})*(Tc^4-To2^4)/((1-E3)/(E3*L*A)+1/(L*A*Fij)+(1-E2)/(E2*2*L*A))));$$

if (Gterm2>=Gterm)

break

end

end

$$Gterm3=Gterm2;$$

$$Tc1=Tc;$$

```

%Cálculo de las radiaciones
q1=(307.729686-To1)/Req4;
qconv=1/(Rconvi)*(Tc-To2);
qrad=5.67*10^(-8)*(Tc^4-To2^4)/(((1-E3)/(E3*L*A))+1/(L*A*Fij))+((1-
E2)/(E2*2*L*A));

y=0.3:0.1:1;
Wi=L./y;
Wj=(2*L)./y;
Fij=(((Wi+Wj).^2+4).^0.5)-(((Wj-Wi).^2+4).^0.5)./(2.*Wi);
M=(1-E3)/(E3*L*A);

O=((1-E2)/(E2*2*L*A));
Tc01=(((qrad.*(M+(1./(L*A.*Fij))+O)+To2^4*(5.67e-8))/5.67e-8).^(1/2)).^(1/2);
TablaAltura=[y;Fij;Tc01];

plot(y,Tc01,'-or')
grid on
xlabel('Altura del flotador,m')
ylabel('Temperatura °K')
title('Gráfica del valor de la Temperatura con respecto a la altura del
flotador','fontsize',10)

saveas(gcf,'Flotador.jpg');

flotado=fopen('Flotadortemper.txt','w');
fprintf(flotado,'Altura,m   Fij   Temperatura,°K   \n \n');
fprintf(flotado,"%7.2f\t %8.4f\t %10.4f\t \n", TablaAltura);
fclose(flotado);

```

## **CONCLUSIÓN**

Mediante la elaboración del modelo matemático y su resolución, se obtuvo el valor de la temperatura de la celda de un panel fotovoltaico flotante expuesto a

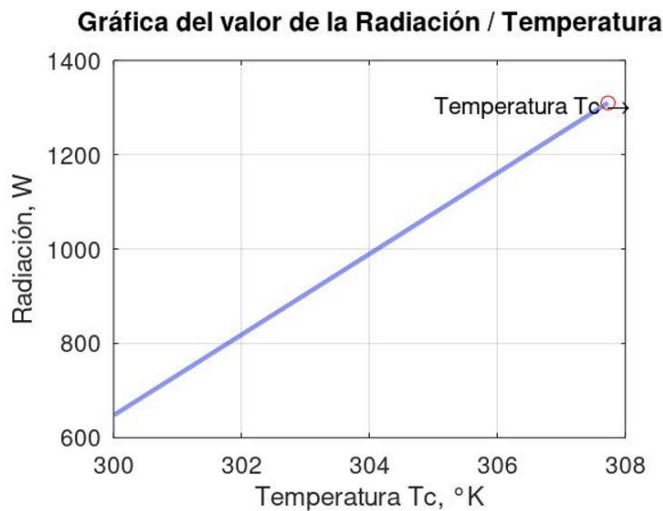


radiación solar; con un valor de radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$ , la temperatura de la celda fue de  $T_c = 34,7297^\circ \text{ C}$  ( $307,7297^\circ \text{ K}$ ).

Mediante la elaboración del modelo matemático y su resolución, se obtuvo el valor de la transferencia de calor que ocurre entre la cara inferior de los paneles fotovoltaicos flotantes y la superficie del agua; con un valor de radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$ , la transmisión por radiación a la superficie del agua fue de  $q_{\text{rad}} = 162,2899 \text{ W}$ , lo cual representa un valor aproximado del 14 % del total del calor transferido hacia el agua.

Con la simulación en GNU Octave, se obtuvo la curva de la variación del Calor generado en la celda ( $G_{\text{ter}}$ ) vs la Temperatura ( $T_c$ ). Como se muestra en la Fig. 7.

**Fig. 7.** Curva  $T_c$  vs Radiación.



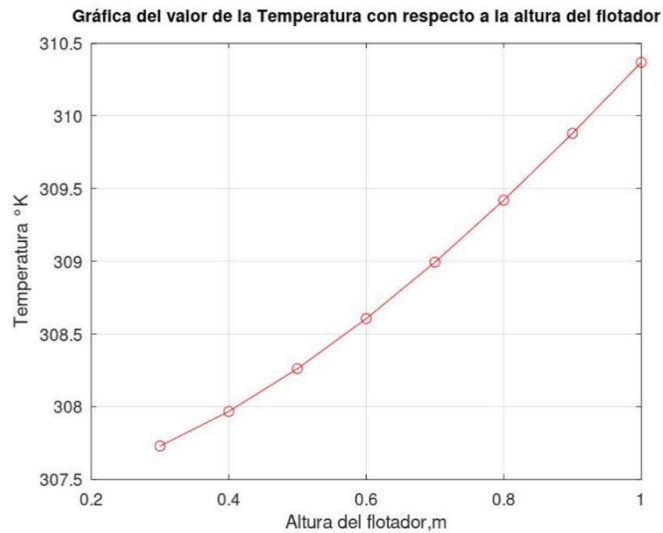
Se realizó una simulación con un incremento de la radiación solar en un 20%, con lo cual la temperatura de la celda también aumentó, y la respuesta de disipación de calor del panel fotovoltaico hacia la superficie del agua por transferencia de calor por radiación se elevó en un 40%.

Se realizó una simulación con una disminución del 20% de la radiación solar, con lo cual la temperatura de la celda también se redujo, y la respuesta de

disipación de calor del panel fotovoltaico hacia la superficie del agua por transferencia de calor por radiación acorto en un 20%.

Con la simulación en GNU Octave, se simulo la variación de la altura del flotador haciendo variar desde 0,3 m hasta 1,0 m, obteniéndose la curva de variación del Calor generado en la celda (Gter) vs la altura de los flotadores). Como se muestra en la Fig. 8.

**Fig. 8.** Altura del flotador.



De esta simulación se desprende que la disminución de la altura de los flotadores, genera un aumento de la transferencia de calor por radiación al espejo de agua en apenas con el 1%, lo cual no es significativo; el mismo comportamiento tiene la disminución de la temperatura de la celda que apenas alcanza un decremento de décimas de ° C.

Las instalaciones flotantes representan el futuro de la energía solar. Ya que en estas instalaciones se incrementa la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos. Y sobre todo reducen los conflictos ligados al uso de la tierra en detrimento de la agricultura o la construcción.

En este proyecto se demostró que los cálculos de la transferencia de calor por radiación entre el panel fotovoltaico y la superficie del agua contribuye a la transferencia de calor generado en la celda, lo cual favorece la operación del panel solar fotovoltaico, traduciéndose en una mayor eficiencia energética.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, D., Tannehill, J. C., Pletcher, R. H., Munipalli, R., & Shankar, V. (2020). Computational fluid mechanics and heat transfer. CRC press.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). Transferencia de calor y masa (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana.
- Ferrero Silvestre, V. (2021). Diseño, desarrollo y estudio de viabilidad técnica y económica de un sistema solar flotante (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Maggi Silva, S. A. (2013). Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile.
- Niño Salcedo, D., & Rodríguez Arbeláez, J. E. (2021). Incorporación de plantas fotovoltaicas flotantes en el embalse de la hidroeléctrica de Urrá para el aprovechamiento areal y de infraestructura eléctrica (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- Padilla Peralta, K. P., & Castillo Sánchez, J. A. (2021). Propuesta de parque solar fotovoltaico flotante en embalse de agua dulce en la República Dominicana 2021 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña).
- Pallasco, E. M. D. (2022). Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes. *Dominio de las Ciencias*, 8(2), 754-776.
- Sala Gómez, R. (2020). Instalación fotovoltaica flotante para embarcaciones e Isla de Tabarca.
- Trashorras, J. (2021). UF0150-Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas. Ediciones Paraninfo, SA.

Vega Orrego, M. (2019). Evaluación experimental y numérica de módulos fotovoltaicos bifaciales flotantes en comparación con sistemas monofaciales y terrestres.

Conflicto de intereses

El autor indica que esta investigación no tiene conflicto de intereses

con certificación de

