



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i2.2782>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

*Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares
Fotovoltaicos Flotantes*

Calculation of Heat Transfer by Radiation in Floating Photovoltaic Solar Panels

*Cálculo de Transferência de Calor por Radiação em Painéis Solares Fotovoltaicos
Flutuantes*

Edison Marcelo Defaz-Pallasco ¹
Marcelodefaz.p@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4299-0327>

Correspondencia: Marcelodefaz.p@hotmail.com

***Recibido:** 28 de marzo del 2022 ***Aceptado:** 30 de abril de 2022 *** Publicado:** 25 de mayo de 2022

I. Ingeniero Mecánico, Universidad Técnica Luis Vargas Torres, Esmeraldas, Ecuador.

Resumen

La investigación realizada, presenta el análisis y el procedimiento de cálculo 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 a una determinada altura. Se asumieron los coeficientes de convección, ya que el objetivo se enfoca en el desarrollo de un modelo físico de la transferencia de calor por radiación. 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: Transferencia de calor; Radiación; GNU Octave; Panel Fotovoltaico solar flotante.

Abstract

The research carried out presents the analysis and calculation procedure to obtain the temperature of the cell and the transmission of heat by radiation that occurs between the underside of floating photovoltaic panels and the water surface at a certain height. Convection coefficients were assumed, since the objective is focused on the development of a physical model of radiation heat transfer. In order to obtain these results, initially the value of the cell temperature and the heat transmission 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 height of the float, a mathematical model was made to characterize this phenomenon. The curves that characterize the behavior of the phenomenon were obtained by programming the mathematical model in GNU Octave.

Keywords: Calculation of Heat Transfer by Radiation in Photovoltaic Solar Panels Float Heat transfer; Radiation; GNU Octave; Floating solar photovoltaic panel.

Resumo

A pesquisa realizada apresenta o procedimento de análise e cálculo para obter a temperatura da célula e a transmissão de calor por radiação que ocorre entre a parte inferior dos painéis fotovoltaicos flutuantes e a superfície da água a uma determinada altura. Os coeficientes de convecção foram

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

assumidos, uma vez que o objetivo está focado no desenvolvimento de um modelo físico de transferência de calor por radiação. Para obter esses resultados, inicialmente foram obtidos o valor da temperatura da célula e a transmissão de calor por radiação, com um único valor de radiação solar e altura de flutuação; mas para caracterizar seu comportamento em diferentes valores de radiação solar e diferentes valores de altura da boia, foi feito um modelo matemático para caracterizar esse fenômeno. As curvas que caracterizam o comportamento do fenômeno foram obtidas programando o modelo matemático em GNU Octave.

Palavras-chave: Transferência de calor; Radiação; GNU Octave; Pannel solar fotovoltaico flutuante.

Introducción

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%.(Lumieres - Repositorio institucional Universidad de América: Incorporación de plantas fotovoltaicas flotantes en el embalse de la hidroeléctrica de Urrá para el aprovechamiento areal y de infraestructura eléctrica n.d.)

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.(Repositorio Universidad de Guayaquil: Diseño de un centro cultural que rescate y utilice técnicas constructivas de arquitectura vernácula flotante e incorpore un sistema de energía solar fotovoltaica , Babahoyo, 2015 n.d.)

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%.(Guillermo and Renella 2016)

Nomenclatura

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

A continuación se presenta el listado de símbolos usados en el desarrollo del modelo matemático. (Dimensionamiento de una instalación fotovoltaica flotante de 2,5 MW en el embalse de San Bartolomé - Repositorio Institucional de Documentos n.d.):

G = Valor de la radiación solar (W/m^2).

ef = Eficiencia del panel solar fotovoltaico (%). L = Largo del panel solar fotovoltaico (m).

A = Ancho del panel solar fotovoltaico (m).

e = Espesor del panel solar fotovoltaico (mm).

y = Altura de los flotadores en los cuales está instalado el panel solar fotovoltaico (m).

e_1 = Espesor del vidrio del panel solar fotovoltaico (mm). k_1 = Coeficiente de conductividad del vidrio ($W/m \cdot ^\circ K$).

e_2 = Espesor del EVA de la parte superior del panel solar fotovoltaico (mm).

e_3 = Espesor del EVA de la parte inferior del panel solar fotovoltaico (mm).

k_2 = Coeficiente de conductividad del EVA ($W/m \cdot ^\circ K$). e_4 = Espesor del tedlar del panel solar fotovoltaico (mm). k_3 = Coeficiente de conductividad del tedlar ($W/m \cdot ^\circ K$). ϵ_1 = Emisividad del vidrio.

ϵ_2 = Emisividad del agua. ϵ_3 = Emisividad del tedlar.

$h_{\infty 1}$ = Convección del aire en la parte superior del panel ($W/m^2 \cdot ^\circ K$).

$h_{\infty 2}$ = Convección del aire en la parte inferior del panel ($W/m^2 \cdot ^\circ K$).

$h_{\infty 3}$ = Convección del agua en la parte superior del panel ($W/m^2 \cdot ^\circ K$).

$T_{\infty 1}$ = Temperatura del aire en la parte superior del panel ($^\circ C$).

$T_{\infty 3}$ = Temperatura del agua ($^\circ C$). G_{ref} = Radiación reflejada (W).

G_{elec} = Energía generada (W). $G_{termico}$ = Calor generado (W).

F_{ij} = Factor de forma desde la superficie i hacia la superficie j .

T_c = Temperatura de la celda ($^\circ C$).

q_{rad} = Calor generado por radiación entre la parte inferior del panel fotovoltaico y la superficie del agua (W).

q_{conv} = Calor generado por convección entre la parte inferior del panel fotovoltaico y la superficie del agua (W).

q_1 = Calor generado en la parte superior del panel fotovoltaico (W)

A_r = Área m^2 .

Objetivos

A. General

- 1) Formular un modelo matemático para calcular la transferencia de calor por radiación que ocurre entre un panel fotovoltaica flotante y la superficie del agua.

B. Específicos

- 1) Calcular la temperatura de la celda de un panel fotovoltaico flotante expuesto a radiación solar.
- 2) Calcular la transferencia de calor por radiación que ocurre entre la cara inferior de los paneles fotovoltaicos flotantes y la superficie del agua.
- 3) Elaborar un modelo matemático para la caracterización del fenómeno de transmisión de calor por radiación y su respectiva simulación en GNU Octave.

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 fue. (Diseño de implantación y análisis del potencial de generación de sistemas fotovoltaicos flotantes en centrales hidroeléctricas reversibles en España - Archivo Digital UPM n.d.):

- 1) Identificación de las condiciones de instalación de un panel fotovoltaico flotante.
- 2) Seleccionar un panel fotovoltaico flotante de los disponibles en el mercado para la obtención de datos de construcción.
- 3) Obtener los datos meteorológicos promedio (radiación, temperatura del agua y del aire).
- 4) Establecer el diagrama de resistencias del circuito de transferencia de calor.
- 5) Obtención de las propiedades de los materiales para el cálculo de la transferencia de calor.
- 6) Seleccionar el factor de visión geométrica aplicable al problema.
- 7) Establecer las ecuaciones de transferencia de calor y realizar los cálculos.
- 8) Simulación del modelo matemático en software GNU Octave.

MODELACIÓN MATEMÁTICA

En el desarrollo del modelo matemático se estableció. (Sáez Sáez 2021):

A. Consideraciones:

- 1) Condiciones de estado estable.
- 2) Se produce transferencia de calor unidimensional en el panel solar fotovoltaico.

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

- 3) Se mantienen las propiedades de los materiales constantes.
- 4) El tipo de celda solar seleccionada es de silicio policristalina de 156 mm x 156 mm.
- 5) No se toma en consideración los efectos de transferencia de calor en los bordes del panel.
- 6) La superficie del agua y la parte inferior de panel (tedlar) se ha considerado como superficies grises.
- 7) 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.

B. Descripción de la instalación de los paneles solares fotovoltaicos sobre la superficie del agua. Los paneles solares fotovoltaicos flotantes se encuentran instalados en posición horizontal (formando un ángulo de 0° 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 (Es et al. 2020)

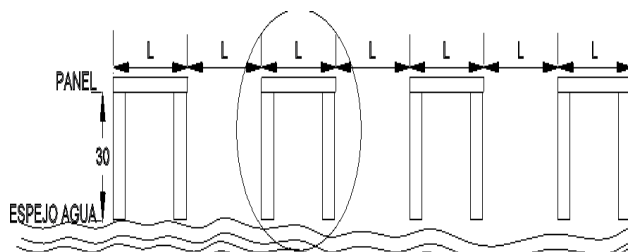


Fig. 1. Instalación de los paneles flotantes sobre el espejo de agua.

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.

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

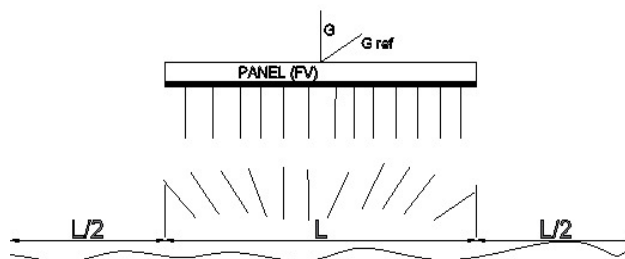


Fig. 2. Instalación de los paneles flotantes sobre el espejo de agua

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 usados en los Cálculos

Símbolo de la variable	Valor	Unidad
G	1000,0*	W/m ²
ef	15,7	%
L	1,652	m
A	1,0	m
e	35,0	mm
y	0,3	m
e1	3,0	mm
e2	1,0	mm
e3	0,5	mm

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

e4	0.1	mm
k1	1,8 [2]	W/m°K
k2	0,35[2]	W/m°K
k3	0,2[2]	W/m°K
€1	0,95[3]	
€2	0,96[3]	
€3	0,2[2]	
h∞1	0,95[4]	W/m ² °K
h∞2	0,96[4]	W/m ² °K
h∞3	0,86[4]	W/m ² °K
T∞1	25,0	° C
T∞2	15,0	° C

*Valor asumido

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

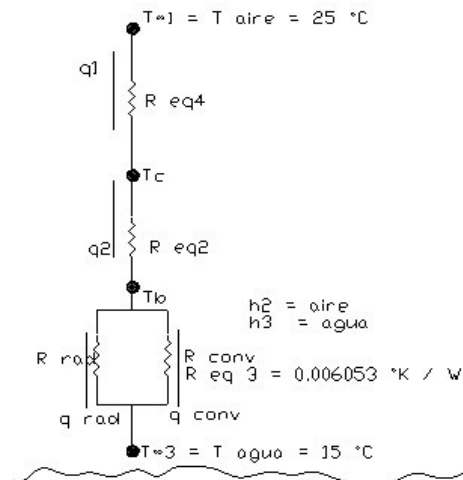


Fig. 3. Circuito térmico de resistencias.

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

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

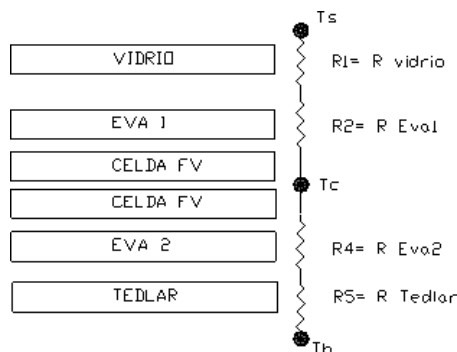


Fig. 4. Circuito térmico de resistencias en el panel solar fotovoltaico.

$$(1) \quad G_{ref} = (1-\epsilon) * G * L * A \quad G_{ref} = (1 - 0,95) * 1000 \frac{W}{m^2} * 1,652 * 1 \quad G_{ref} = 82.6 W$$

$$(2) \quad G_{elec} = \epsilon_{fm} * G * L * A \quad G_{elec} = \frac{15,7\%}{100} * 1000 \frac{W}{m^2} * 1,652m * 1m \quad G_{elec} = 259.364 W$$

$$(3) \quad G_{termico} = G * L * A - (G_{ref} + G_{elec}) \quad G_{termico} = 1000 * 1,652 * 1 - (82.6 + 259.364)$$

$$G_{termico} = 1310.036 W$$

$$(5) \quad R_{cond} = \frac{L}{K * Ar} \quad (4) \quad R_{conv} = \frac{I}{h * Ar}$$

Cálculo de resistencias en el panel solar fotovoltaico:

$$(6) \quad R_{1cond \text{ en vidrio}} \quad R_1 = \frac{0,003m}{1,8 \frac{W}{m^{\circ K}} * 1,652m^2} \quad R_1 = 0,00100887 \frac{\circ K}{W}$$

$$(7) \quad R_{2cond \text{ en EVA superior}} \quad R_2 = \frac{0,001m}{0,35 \frac{W}{m^{\circ K}} * 1,652m^2} \quad R_2 = 0,0017295 \frac{\circ K}{W}$$

$$(8) \quad R_{eq1} = R_1 + R_2 \quad R_{eq1} = 0,00100887 + 0,0017295 \quad R_{eq1} = 0,0027387 \frac{\circ K}{W}$$

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

$$(9) \quad R_{concs} = \frac{1}{A_{r1} h_{\infty 1}} \quad R_{concs} = \frac{1}{1,652m^2 * 25 \frac{W}{m^2 \cdot K}} \quad R_{concs} = 0,0242 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$(10) \quad Req_4 = Req_1 + R_{convs}; \quad Req_4 = 0,0027387 \frac{^{\circ}K}{W} + 0,0242 \frac{^{\circ}K}{W}; \quad Req_4 = 0,02695 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$(11) \quad R_{4cond \text{ en EVA inferior}} = \frac{0,005}{0,35 \frac{W}{m^{\circ}K} (X) 1,652m^2} \quad R_4 = 0,00086475 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$(12) \quad R_{5cond \text{ en tedlar}} = \frac{0,0001 m}{0,2 \frac{W}{m^{\circ}K} (X) 1,652m^2} \quad R_5 = 0,00030266 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$(13) \quad Req_2 = R_4 + R_5 \quad Req_2 = 0,00086475 + 0,00030266 \quad Req_2 = 0,0011674 \frac{^{\circ}K}{W}$$

$$(14) \quad Req_3 = \frac{1}{h_{\infty 2} A_r} + \frac{1}{h_{\infty 3} A_{r2}} \quad Req_3 = \frac{1}{25 * 1,652} + \frac{1}{350 * 50} \quad Req_3 = 0,025077 \frac{^{\circ}K}{W}$$

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

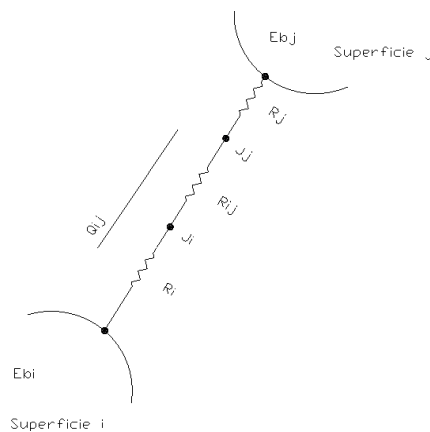


Fig. 5. Circuito de resistencias equivalentes.

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

Realizando el balance de calor tenemos:

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

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

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

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

$$(18) q_{conv} = \frac{1}{Req_3} (T_c - T_{\infty 3})$$

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

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

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

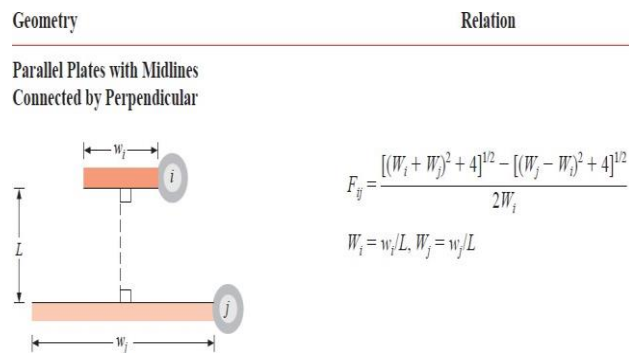


Fig. 6. Factor de visión.

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

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

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

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

$$F_{ij} = \frac{[(5,507 + 11,013)^2 + 4]^{\frac{1}{2}} - [(11,013 + 5,507)^2 + 4]^{\frac{1}{2}}}{2 * 5,507} \quad F_{ij} = 0,978996$$

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

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

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

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

$$(25) \quad 1310,036 = \frac{T_c - 298}{0,026951} + \frac{T_c - 288}{0,025078} + \frac{5,67 * 10^{-8} (T_c^4 - 288^4)}{0,72946}$$

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:

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

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

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

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

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

=> 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 script:

A. 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.

```
% 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.
disp("MODELO MATEMATICO ELABORADO E.DEFAZ");
("=====") 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 ("");
```

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

```
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')
```

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

```
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
```

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

```

("=====
===== ")
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 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');
    
```


Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

```
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);
Çfprintf(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');
```

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

```
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);
```

A. 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);
```

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

```
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')
```

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

```
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);
```

Conclusiones

- 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 dato inicial da valor de radiación de 1000 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 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_{ter}) vs la Temperatura (T_c). Como se muestra en la Fig. 7.



Fig. 7. Curva T_c vs Radiación.

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

- Con la simulación en GNU Octave, se simuló la variación de la altura del flotador haciendo variar desde 0,3 m hasta 1,0 m, obteniéndose la curva de altura de los flotadores). Como se muestra en la Fig. 8.

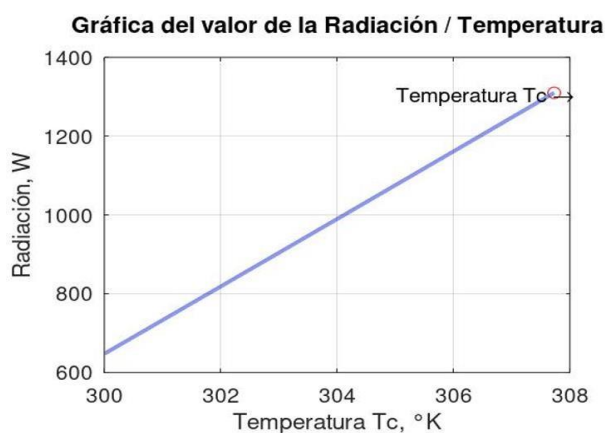


Fig. 8. Altura del flotador vs

- 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 acortó en un 20%.
- 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

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

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.

Agradecimientos

Las contribuciones de F. Ordoñez y Y C Naranjo las ayudas en la fijación de los criterios para la resolución del problema planteado.

Referencias

1. GMA SOLAR GMA 60/P Series 225/260W. <https://www.renova-energia.com/wp-content/uploads/2019/07/GMA-60-P-250-250W-24VDCFicha-t%C3%A9cnica.pdf>
2. S. Maggi, “Modelamiento térmico de un panel fotovoltaico con disipador de calor operando en el norte de Chile”, Cap. 5, Pag.34
3. Y, Cengel, A. Ghajar, “Transferencia de calor y masa”, cuarta edición, Tabla A-18, pag. 889
4. Coeficientes de transferencia de calor por convección. http://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm
5. F. Incropera, D. Dewitt, “Heat and mass transfer”, seventh edition, pag. 865.
6. “Dimensionamiento de Una Instalación Fotovoltaica Flotante de 2,5 MW En El Embalse de San Bartolomé - Repositorio Institucional de Documentos.” <https://zaguan.unizar.es/record/96380> (February 8, 2022).
7. “Diseño de Implantación y Análisis Del Potencial de Generación de Sistemas Fotovoltaicos Flotantes En Centrales Hidroeléctricas Reversibles En España - Archivo Digital UPM.” <https://oa.upm.es/49496/> (February 8, 2022).
8. Es, Autor /, Alejandro Abellán Guallarte, Ángel Antonio, and Bayod Rújula. 2020. “Trabajo Fin de Grado Sizing of a 2,5 MW Floating Photovoltaic Installation in San Bartolomé Reservoir.”

Cálculo de la Transferencia de Calor por Radiación en Paneles Solares Fotovoltaicos Flotantes

9. Guillermo, " Arq, and Cubillo Renella. 2016. "Diseño de Un Centro Cultural Que Rescate y Utilice Técnicas Constructivas de Arquitectura Vernácula Flotante e Incorpore Un Sistema de Energía Solar Fotovoltaica , Babahoyo, 2015."
10. "Lumieres - Repositorio Institucional Universidad de América: Incorporación de Plantas Fotovoltaicas Flotantes En El Embalse de La Hidroeléctrica de Urrá Para El Aprovechamiento Areal y de Infraestructura Eléctrica." <http://52.0.229.99/handle/20.500.11839/8762> (February 8, 2022).
11. "Repositorio Universidad de Guayaquil: Diseño de Un Centro Cultural Que Rescate y Utilice Técnicas Constructivas de Arquitectura Vernácula Flotante e Incorpore Un Sistema de Energía Solar Fotovoltaica , Babahoyo, 2015." <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/13043> (February 8, 2022).
12. Sáez Sáez, Celia. 2021. "Diseño de Una Instalación Fotovoltaica Flotante de 1MW En El Embalse Del Amadorio."