



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO
TÉRMICO-FOTOVOLTAICO DE CELDAS SOLARES
SENSIBILIZADAS POR COLORANTE**

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS CON OPCIÓN
TERMINAL EN TECNOLOGÍA MECÁNICA

PRESENTA:
MICA ITZEL NANZUI VERA WILIMEK

ASESORES DE TESIS:
DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRÁN
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ

CUERNAVACA, MORELOS

JUNIO 2021

*Me di por vencido y finalmente acepté que
Dios es Dios.*

C.S.Lewis.

Agradecimientos

Tengo mucho que agradecer, confieso que este proyecto no hubiera sido posible sin toda la red de apoyos con la que he contado. No tengo palabras para agradecer lo bendecida que soy:

Antes que nada quiero agradecerle a mi Dios. Por ser la roca que me sostiene en la adversidad, por escuchar mis oraciones y responderme siempre con una enseñanza.

A mi compañero de vida y mi mejor amigo, Rogelio, gracias por estar a mi lado y por tu apoyo incondicional en todas las pruebas que hemos tenido que enfrentar juntos. Por tus consejos y por tu amor.

A mi hijo por todo su cariño y todas las sonrisas y carcajadas que es capaz de sacarme hasta en los momentos más duros. Eres la razón por la cual no puedo rendirme nunca.

A mis padres por estar pendiente de mí y de mis proyectos, estoy tan agradecida con Dios por permitirme tenerlos como padres. Sus enseñanzas siempre están presentes en mi mente. Mamá, gracias por tus cuidados y por dar de tu tiempo incondicionalmente y sostenerme cuando he sentido que no puedo más. Papá, gracias por tus consejos y tu ejemplo al mostrarme con tu propia vida como luchas por tus ideales aún cuando las cosas se han puesto muy difíciles.

A mi tita, eres un gran ejemplo para mí, una mujer fuerte y valiente. Dios me ha enseñado mucho a través de tu vida.

A mis hermanas que siempre están presentes a pesar de nuestras diferencias. Las quiero mucho.

A toda mi familia y amigos: En especial a mi tía Angélica que ha partido con el Señor. Gracias por todo lo que me diste. Porque siempre compartiste de tu tiempo para escucharme, para recibirme en tu casa cuando lo necesitaba o simplemente para platicar y reír. Definitivamente fuiste una pieza clave en este proceso. Te extraño.

A mi asesor, el Dr. Gustavo Urquiza Beltrán y mi co-asesor, el Dr. Seuret Jiménez, por su apoyo y dirección para llevar a cabo esta tesis. Por compartirme de su conocimiento y experiencia y en definitiva, por su paciencia.

A todo el comité revisor por sus observaciones. La Dra. Laura Castro, el Dr. Jorge Uruchurtu, el Dr. Arturo Molina, el Dr. Moisés Montiel quien me compartió de su tiempo y conocimiento en varias ocasiones.

Al Dr. Juan Anta de la Universidad Pablo de Olavide por recibirme en su laboratorio para realizar mi estancia Doctoral y compartir de su conocimiento y tiempo.

Al Dr. Juan Carlos Castrejón por sus consejos en la realización de ésta tesis y por permitirme utilizar el equipo de cómputo de su laboratorio.

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Resumen

En las próximas décadas, la demanda de energía en el mundo será considerado uno de los principales problemas de la humanidad. Se espera que para el año 2024 la población mundial alcance 8 mil millones de habitantes, generando con esto una demanda energética de aproximadamente 16 TW por año. En la actualidad el suministro energético se basa principalmente en el petróleo cuyo consumo es un factor importante en la contaminación del planeta. Por esta razón es necesario explorar otro tipo de tecnologías amistosas con el medio ambiente. La energía eólica y solar son las mejores opciones; sin embargo, la más atractiva es la segunda debido a los increíbles valores de disponibilidad (23000 TW por año).

La generación de energía eléctrica a través del recurso solar cuenta con diversas tecnologías *fotovoltaicas*, dentro de las cuales se encuentran las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante (DSSCs), cuyas ventajas son: su facilidad de fabricación, no necesidad de un sistema de seguimiento solar y su ligereza. Sin embargo, por ahora dicha tecnología se ha comercializado poco (prácticamente sólo para dispositivos electrónicos portátiles) debido a que aún se necesita resolver la desventaja de contar con un bajo tiempo de vida útil y en menor grado pero no menos importante, mejorar su eficiencia; por lo que es necesario investigarlas con mayor profundidad y establecer mecanismos de control que les permitan funcionar adecuadamente en condiciones medio ambientales normales.

Una de las principales variables que influyen en el tiempo de vida útil de las DSSCs es la temperatura de operación de las celdas, la cual está relacionada principalmente por la temperatura ambiente, la velocidad de viento y la radiación solar. Por lo anterior expuesto, el presente trabajo consiste en desarrollar un modelo numérico transitorio de transferencia de calor con el objetivo de obtener la temperatura de operación y el desarrollo eléctrico en tres diferentes ciudades de México localizadas en tres diferentes lugares de la República Mexicana (norte, centro y sur del país). Además, de estudiar la relación de dichas variables con diferentes electrolitos empleados para la fabricación de las DSSCs.

El estudio se llevó a cabo por medio del software *Ansys Thermal* utilizando tres diferentes coeficientes convectivos: $5.82 \text{ W/m}^2\text{K}$, $13.96 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $47.6 \text{ W/m}^2\text{K}$, para celdas DSSCs con valores de eficiencia de 11.9% (valor de referencia de acuerdo a los trabajos publicados hasta el día de hoy) y de $13.96 \text{ W/m}^2\text{K}$, para dos diferentes tipos de celdas experimentales: con electrolito solaronix y electrolito a base de acetonitrilo.

Como parte de los resultados se obtuvo que los mayores porcentajes de eficiencia se obtuvieron en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos (de 10.95 % a 11.48 %) mientras que en la ciudad de Mérida, Yucatán fueron relativamente más bajos (de 10.42 % a 11.07 %).

Finalmente se concluyó que las eficiencias de las DSSCs aumentan conforme se incrementa el coeficiente de convección, los valores más altos de eficiencia no necesariamente se presentan con el valor más alto de irradiancia solar debido a que la acumulación de calor a lo largo del día influye en la disminución de la eficiencia de las DSSCs. Es importante considerar la temperatura ambiente variable en los modelos térmicos de las DSSCs. Los valores termodinámicos de los electrolitos prácticamente no afectan el desarrollo térmico de las DSSCs por lo que se pueden despreciar. Y puede presentarse una disminución en la brecha de eficiencias entre las celdas solares de Silicio y las DSSCs al considerar la temperatura de operación alcanzadas por las celdas en condiciones medio ambientales.

Abstract

In the coming decades, the world's energy demand will be considered one of humanity's main problems. It is expected that by 2024 the world population will reach 8 billion of inhabitants, generating approximately 16 TW per year. At present, the energy supply is mainly based on oil, the consumption of which is an important factor in the pollution of the planet. For this reason it is necessary to explore other types of environmentally friendly technologies to produce clean energy. Wind and solar energy are the best options; however, the most attractive is the second one due to the incredible availability values (23000 TW per year).

The generation of electrical energy through solar energy has several photovoltaic technologies, among which are the Dye Sensitized Solar Cells (DSSCs), whose advantages are: ease of manufacture, no need for a solar tracking system and their light weight. However, for now this technology has been little commercialized (practically only for portable electronic devices) because they still need to be further investigated in order to establish control mechanisms that allow them to function adequately under normal environmental conditions.

Some of the main variables that influence the operation of DSSCs are solar radiation, ambient temperature and wind speed. Therefore, the present work consists of developing a transient numerical model of heat transfer with the objective of obtaining the operating temperature and electrical development in two different cities in Mexico: Cuernavaca and Merida, whose climatic characteristics consist of high values of solar radiation throughout the year and relatively low wind speeds, which prevents the implementation of other sustainable technology such as wind power. In addition, to study the relationship of these variables with different electrolytes used for the manufacture of DSSCs.

The study was carried out by means of *Ansys Thermal* software, using three different convective coefficients: 5.82, 13.96 and 47.6 W/m^2K for DSCs with efficiency values of 11.9% (reference value according to published works to date) and 13.96 W/m^2K for two different types of experimental cells with solaronix electrolyte and acetonitrile-based electrolyte.

The study showed that the average efficiency in Cuernavaca for the month of April was 11.25% to 11.48% and for the month of September was 10.95% to 11.12%, when the convection coefficient increased from 5.82 to 46.7 W/m^2K . The average efficiencies

in Merida for the month of August was 10.92% to 11.07% and for the month of September was 10.42% to 10.54%, by increasing the convection coefficient from 5.82 to 46.7 W/m^2K . While for the experimental cells with Solaronix electrolyte, an average of 3.6% was obtained for the month of April and 3.73% for the month of September in Cuernavaca, Morelos; likewise, 3.2% was obtained for the month of August and 3.66% for the month of January in Mérida, Yucatán. For the experimental cells based on acetonitrile, an average of 5.9% was obtained for the month of April and 6.1% for the month of September in Cuernavaca, Morelos; in addition, 5.2% was obtained for the month of August and 5.98% for the month of January in Mérida, Yucatán.

Finally, it was concluded that the highest efficiency values do not occur with the highest solar irradiance value because heat accumulation throughout the day influences the decrease in the efficiency of the DSSCs. It is important to consider the variable ambient temperature in the thermal models of the DSSCs. The thermodynamic values of electrolytes practically do not affect the thermal development of DSSCs so they can be neglected in the thermal models of DSSCs. And there may be a decrease in the efficiency gap between silicon solar cells and DSSCs when considering the operating temperature reached by the cells at ambient conditions.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VII
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Celdas solares Sensibilizadas por Colorante.	5
1.2. Estado del arte.	9
1.2.1. Revisión bibliográfica sobre el envejecimiento de celdas solares Sensibilizadas por Colorante.	9
1.2.2. Revisión bibliográfica de los trabajos publicados sobre el comportamiento térmico en módulos Sensibilizados de Colorante.	11
1.2.3. Conclusiones de la revisión bibliográfica.	14
1.3. Planteamiento del problema e hipótesis.	15
1.3.1. Planteamiento del problema	15
1.3.2. Hipótesis	15
1.4. Objetivos de investigación	15
1.4.1. Objetivo general	15
1.4.2. Objetivos específicos	15
2. CARACTERÍSTICAS DE LAS CELDAS SOLARES.	17
2.1. Energía solar fotovoltaica y celdas solares	17
2.2. Curvas características	18
2.2.1. Principales parámetros de las características Corriente-Voltaje (I-V).	19
2.2.2. Modelo para representar el comportamiento eléctrico de las celdas solares.	20
2.2.3. Obtención de la máxima potencia en celdas solares.	20
2.3. Eficiencia de una celda solar.	22
2.4. Conexión eléctrica de las celdas.	22
2.5. Módulos fotovoltaicos.	24
2.5.1. Eficiencia del módulo fotovoltaico.	24
2.5.2. Pruebas y eficiencia de los módulos.	25

3. TRANSFERENCIA DE CALOR.	27
3.1. Transferencia de calor por el mecanismo de conducción.	27
3.1.1. Generación de calor.	28
3.1.2. Difusividad térmica.	28
3.1.3. Ecuaciones de transferencia de calor por conducción.	28
3.1.4. Condiciones de frontera.	29
3.1.5. Resistencia térmica.	34
3.2. Transferencia de calor por el mecanismo de convección.	35
3.2.1. Conceptos principales en el mecanismo de convección.	36
3.2.2. Clasificación de flujo de fluidos.	36
3.3. Transferencia de calor por el mecanismo de radiación.	37
3.3.1. Cuerpo negro.	38
3.3.2. Radiación incidente.	38
3.3.3. Ley de Kirchoff	39
3.3.4. Definiciones básicas de la radiación.	39
3.3.5. Efecto invernadero.	40
3.3.6. Radiación solar.	40
4. METODOLOGÍA.	43
4.1. Análisis del modelo.	43
4.1.1. Modelo publicado por Chen et al.	43
4.1.2. Modelo propuesto.	44
4.2. Generación de la geometría en 3D.	48
4.3. Discretización de la geometría.	48
4.4. Materiales y sus propiedades térmicas.	49
4.5. Condiciones de frontera.	49
4.5.1. Flujo de calor.	49
4.5.2. Radiación de calor.	53
4.5.3. Convección de calor.	54
4.6. Resolvedor.	54
4.7. Verificación de los resultados.	54
4.8. Eficiencia de los Módulos DSCs.	56
4.8.1. Fabricación de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante.	56
4.8.2. Medición del desarrollo de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante.	58
4.8.3. Análisis de los parámetros de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante en función de la temperatura de operación.	58
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.	59
5.1. Desarrollo de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante en Cuernavaca, Morelos.	59
5.1.1. Temperatura de operación de la celda en Cuernavaca Morelos, mes de abril.	59
5.1.2. Influencia de la velocidad de viento en el desarrollo eléctrico en Cuernavaca, Morelos, mes de abril.	63

5.1.3.	Influencia de la irradiancia solar en el desarrollo eléctrico en Cuernavaca, Morelos, mes de abril.	64
5.1.4.	Temperatura de operación en Cuernavaca, Morelos del mes de septiembre.	65
5.1.5.	Influencia de la velocidad de viento en el desarrollo eléctrico en Cuernavaca, Morelos, mes de septiembre.	68
5.1.6.	Influencia de la irradiancia solar en el desarrollo eléctrico en Cuernavaca, Morelos, mes de septiembre.	69
5.2.	Desarrollo de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante en Mérida, Yucatán.	70
5.2.1.	Temperatura de operación de la celda en Mérida, Yucatán, mes de agosto.	70
5.2.2.	Influencia de la velocidad de viento en el desarrollo eléctrico en Mérida, Yucatán, mes de agosto.	74
5.2.3.	Influencia de la irradiancia solar en el desarrollo eléctrico en Mérida, Yucatán, mes de agosto.	75
5.2.4.	Temperatura de operación en Mérida, Yucatán del mes de enero.	76
5.2.5.	Influencia de la velocidad de viento en el desarrollo eléctrico en Mérida, Yucatán, mes de enero.	79
5.2.6.	Influencia de la irradiancia solar en el desarrollo eléctrico en Mérida, Yucatán, mes de enero.	80
5.3.	Resultados experimentales de las Celdas Sensibilizadas por Colorante.	81
5.4.	Comparación de las eficiencias de las Celdas Sensibilizadas por Colorante con las Celdas de Silicio.	84
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
6.1.	Conclusiones.	87
6.2.	Recomendaciones.	88
	BIBLIOGRAFÍA	89
	Apéndice A. Código de Matlab	94
	Apéndice B. Resultados con velocidad de viento de 0 m/s para Cuernavaca (abril, septiembre) y Mérida (agosto, enero).	99
	Apéndice C. Resultados con velocidad de viento de 2 m/s para Cuernavaca (abril, septiembre) y Mérida (agosto, enero).	115
	Apéndice D. Resultados con velocidad de viento de 10 m/s para Cuernavaca (abril, septiembre) y Mérida (agosto, enero).	128

Índice de figuras

1.1. Triángulo dorado de la energía solar fotovoltaica.	2
1.2. Gráfica de eficiencias del National Renewable Laboratory (NREL). . . .	4
1.3. Representación esquemática de los componentes de una DSSC [50]. . . .	5
1.4. Representación esquemática del funcionamiento de una DSSC [31]. . . .	6
2.1. Característica J-V de una juntura p-n en oscuridad y bajo iluminación.	17
2.2. Tipos de materiales sólidos con respecto a su estructura electrónica. . .	18
2.3. Curva característica de una celda fotovoltaica.	19
2.4. Variación de la potencia de las celdas según el voltaje de operación [14].	20
2.5. Descripción del punto de operación de la celda para una carga resistiva [14].	21
2.6. Punto de máxima potencia de la celda solar y rectángulo de potencia [14].	22
2.7. Celdas conectadas en serie, con característica corriente-voltaje.[22] . . .	23
2.8. Celdas conectadas en paralelo, con característica corriente-voltaje.[22] .	24
3.1. Condiciones de frontera (temperatura específica).	30
3.2. Condiciones de frontera (flujo de calor específico).	30
3.3. Pared plana con aislamiento térmico.	31
3.4. Simetría en la distribución de temperatura con respecto al plano medio.	31
3.5. Condiciones de frontera de convección.	32
3.6. Condiciones de frontera de radiación.	33
3.7. Esquema para las resistencias combinadas a la convección y a la radiación.	35
3.8. Radiación incidente sobre una superficie (θ, ϕ) [42].	38
3.9. Absortividad, reflectividad y transmitividad en un material semitranspa- rente.	40
3.10. Efecto invernadero.	41
4.1. Modelo físico del artículo publicado por Chen et al.	44
4.2. Modelo físico propuesto.	45
4.3. Geometría del módulo DSC en 3D.	48
4.4. Malla hexaédrica de la geometría.	49
4.5. Promedios de la irradianción solar del 2010 al 2019 de las 8 a las 18 horas en Cuernavaca, Morelos (latitud 18.92° y longitud de -99.19°).	50
4.6. Promedios de la irradianción solar del 2010 al 2019 de las 8 a las 18 horas en Mérida, Yucatán (latitud 20.97° y longitud de -89.62°).	51

4.7. Promedios por hora diarios de la irradiación solar en el mes abril y en el mes de septiembre del año 2019 en Cuernavaca, Morelos.	52
4.8. Promedios por hora diarios de la irradiación solar en el mes agosto y en el mes de enero del año 2019 en Mérida, Yucatán.	52
4.9. Promedios por hora diarios de la temperatura ambiente en el mes abril y en el mes de septiembre del año 2019 en Cuernavaca, Morelos.	53
4.10. Promedios por hora diarios de la temperatura ambiente en el mes agosto y en el mes de enero del año 2019 en Mérida, Yucatán.	54
4.11. Gráfica de comparación de los resultados de las temperaturas resultantes para el modelo propuesto y el modelo de Chen et. al.	55
4.12. Celda solar fabricada.	57
4.13. Simulador solar AAB.	58
5.1. Contorno de temperatura de operación del modelo DSCs completo en abril a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.	60
5.2. Contorno de temperatura de operación en el plano medio del modelo DSCs en abril a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.	60
5.3. Contorno de temperatura de operación de la capa activa de la DSCs en abril a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.	61
5.4. Temperatura de operación de las DSCs en abril con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.	62
5.5. Temperatura de operación de las DSCs en abril con $h=13.96$, Cuernavaca, Morelos.	62
5.6. Temperatura de operación de las DSCs en abril con $h=47.6$, Cuernavaca, Morelos.	63
5.7. Eficiencia de las DSCs en Cuernavaca, Morelos en el mes de abril con velocidades de viento de 0m/s , 2m/s y 10m/s	64
5.8. a) Eficiencia de las celdas con una irradiancia solar de $238\text{W}/\text{m}^2$ a $904\text{W}/\text{m}^2$, lo que corresponde a un horario de 8 horas a 13 horas. En color rojo se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color azul una temperatura ambiente variable. b) Eficiencia de las celdas con una irradiancia de $904\text{W}/\text{m}^2$ a $113\text{W}/\text{m}^2$ de las 13:10 horas a las 18:00 horas . En color rojo se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color azul una temperatura ambiente variable.	65
5.9. Contorno de la temperatura de operación del modelo DSCs completo en septiembre a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.	65
5.10. Contorno de temperatura de operación en el plano medio del modelo DSCs en septiembre a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.	66
5.11. Contorno de temperatura de operación de la capa activa de la DSCs en septiembre a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.	66
5.12. Temperatura de operación de las DSCs en septiembre con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.	67
5.13. Temperatura de operación de las DSCs en septiembre con $h=13.96$, Cuernavaca, Morelos.	68

5.14. Temperatura de operación de las DSCs en septiembre con $h=47.6$, Cuernavaca, Morelos.	68
5.15. Eficiencia de las DSCs en Cuernavaca, Morelos en el mes de septiembre con velocidades de viento de 0m/s, 2m/s y 10m/s.	69
5.16. a) Eficiencia de las celdas con una irradiancia solar de $28W/m^2$ a $653W/m^2$, lo que corresponde a un horario de 8 horas a 12:50 horas. En color rojo se representan los resultados con una temperatura ambiente variable y en color azul una temperatura ambiente constante. b) Eficiencia de las celdas con una irradiancia de $633.65W/m^2$ a $51W/m^2$ de las 12:50 horas a las 18:00 horas. El orden de los valores de irradiancia no se encuentran en orden ascendiente por hora del día. En color rojo se representan los resultados con una temperatura ambiente variable y en color azul una temperatura ambiente constante.	70
5.17. Contorno de temperatura de operación del modelo DSCs completo en agosto a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.	71
5.18. Contorno de temperatura de operación en el plano medio del modelo DSCs en agosto a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.	71
5.19. Contorno de temperatura de operación de la capa activa de la DSCs en agosto a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.	72
5.20. Temperatura de operación de las DSCs en agosto con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.	73
5.21. Temperatura de operación de las DSCs en agosto con $h=13.96$, Mérida, Yucatán.	73
5.22. Temperatura de operación de las DSCs en agosto con $h=47.6$, Mérida, Yucatán.	74
5.23. Eficiencia de las DSCs en Mérida, Yucatán en el mes de agosto con velocidades de viento de 0m/s, 2m/s y 10m/s.	75
5.24. a) Eficiencia de las celdas con una irradiancia solar de $108.9W/m^2$ a $1070.6W/m^2$, lo que corresponde a un horario de 8 horas a 12:55 horas. En color azul se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color rojo a una temperatura ambiente variable. b) Eficiencia de las celdas con una irradiancia de $1065.8W/m^2$ a $61.5W/m^2$ de las 12:55 horas a las 18:00 horas. En color azul se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color rojo una temperatura ambiente variable.	76
5.25. Contorno de la temperatura de operación del modelo DSCs completo en enero a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.	76
5.26. Contorno de temperatura de operación en el plano medio del modelo DSCs en enero a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.	77
5.27. Contorno de temperatura de operación de la capa activa de la DSCs en enero a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.	77
5.28. Temperatura de operación de las DSCs en enero con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.	78
5.29. Temperatura de operación de las DSCs en enero con $h=13.96$, Mérida, Yucatán.	79

5.30. Temperatura de operación de las DSCs en enero con $h=47.6$, Mérida, Yucatán.	79
5.31. Eficiencia de las DSCs en Mérida, Yucatán en el mes de enero con velocidades de viento de 0m/s, 2m/s y 10m/s.	80
5.32. a) Eficiencia de las celdas con una irradiancia solar de $53.7W/m^2$ a $843.8W/m^2$, lo que corresponde a un horario de 8 horas a 12:00 horas. En color azul se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color rojo una temperatura ambiente variable. b) Eficiencia de las celdas con una irradiancia de $792.5W/m^2$ a $0W/m^2$ de las 12:05 horas a las 18:00 horas. En color azul se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color rojo una temperatura ambiente variable.	81
5.33. Eficiencias de los datos experimentales con electrolito solaronix y con electrolito base acetonitrilo, Cuernavaca, Morelos.	82
5.34. Eficiencias de los datos experimentales con electrolito solaronix y con electrolito base acetonitrilo, Mérida, Yucatán.	83
5.35. Comparación de las temperaturas de operación de un electrolito líquido y uno sólido.	83
5.36. Desarrollo de las celdas solares de Silicio y las DSCs con respecto a la temperatura de operación.	84

Índice de tablas

1.1. Publicaciones sobre envejecimiento de Celdas Solares Sensibilizadas de Colorante	13
1.2. Publicaciones sobre modelos térmicos de Celdas Solares Sensibilizados de Colorante	14
4.1. Espesores de las capas de la geometría.	48
4.2. Cálculo del error relativo.	49
4.3. Propiedades térmicas de los materiales que componen una DSCs.	50
4.4. Promedios de la irradiancia en Cuernavaca, Morelos (latitud 18.92° y longitud de -99.19°) de las 8 a las 18 horas.	51
4.5. Promedios de la irradiancia en Mérida, Yucatán (latitud 20.97° y longitud de -89.62°) de las 8 a las 18 horas.	51
4.6. Errores relativos de la verificación del modelo propuesto con el modelo de Chen et. al.	56
4.7. Electrolitos utilizados en la fabricación de las DSCs.	57
5.1. Desarrollo eléctrico experimental.	82

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN.

En las próximas décadas, la demanda de energía en el mundo será considerada uno de los principales problemas de la humanidad. Se espera que para el año 2024 la población mundial alcance 8 mil millones de habitantes, generando con esto una necesidad energética de aproximadamente 16 TW por año. Así mismo, de acuerdo a estudios publicados por *World Energy Council* para el año 2050, la energía proveniente del petróleo, gas y carbón representará menos del 15 % del consumo mundial y, otros tipos de fuentes suministrarán al menos el 70 %. Por estas razones es necesario explorar otro tipo de tecnologías amistosas con el medio ambiente para producir energía limpia. La energía eólica y solar son las mejores opciones; sin embargo, la más atractiva es la segunda debido a los increíbles valores de disponibilidad (23000 TW por año).

Desde 1970 hasta el día de hoy, las investigaciones realizadas sobre energía solar han contribuido a la existencia de las denominadas “celdas solares”. Durante ya varias décadas, han sido desarrolladas una gran variedad de tecnologías basadas en estos dispositivos, llegando hoy en día a la denominada *tercera generación*, la cual ha tenido como premisa en su desarrollo la implementación de materiales de menor costo, de mayor abundancia y tecnológicamente de fácil fabricación, que permitan tener dispositivos más livianos y con un tiempo de amortización mucho menor que el de la tecnología de silicio, la cual domina el mercado actual. Entre las tecnologías comprendidas en este grupo se encuentran las llamadas celdas orgánicas, celdas híbridas, celdas sensibilizadas de colorante y las recientemente desarrolladas celdas de perovskita [36].

Como se aprecia anteriormente, el principal problema que enfrentan los investigadores hoy en día es el mejorar las tecnologías ya existentes o desarrollar nuevas en función de cuatro principales variables: eficiencia, estabilidad, costo e impacto ambiental como se observa en la figura 1.1 conocida como el triángulo dorado (the golden triangle). De acuerdo a Fonash, el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas debería ser cuantificado no solo por la eficiencia sino también por el tiempo de vida útil y el costo, definiendo a este último por la ecuación 1.1 [?].

$$\frac{(\text{eficiencia de conversión de energía})(\text{tiempo de vida útil})}{\text{costos reales}} \quad (1.1)$$

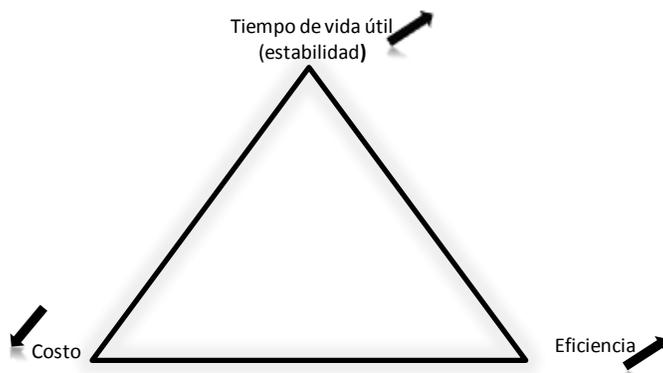


Figura 1.1: Triángulo dorado de la energía solar fotovoltaica.

En la figura 1.2, se muestra una gráfica de las diferentes tecnologías que se han desarrollado desde 1975 en función de las eficiencias que cada una de ellas han ido alcanzando, de acuerdo a National Renewable Laboratory (NREL). Se encuentran clasificadas en cuatro secciones: las celdas multiunión (triple unión, doble unión, cuatriple unión y más) y monounión GaAs (monocristalino, concentrado y de película delgada), en color morado; celdas cristalinas de silicio (monocristalina, policristalina, de película delgada y heteroestructuras de silicio), en color azul; celdas solares de películas delgadas (CIGS, CdTe y silicio amorfo), en color verde; celdas emergentes (celdas solares Grätzel ó celdas sensibilizadas de colorante, perovskita, celdas orgánicas, tandem, celdas inorgánicas y celdas de punto cuántico), en color rojo.

La industria se rige actualmente por las celdas fotovoltaicas de silicio cristalino y arseniuro de galio (GaAs):

Dentro de las celdas GaAs existen las GaAs monounión y las celdas GaAs que forman parte de las denominadas multiunión que son dispositivos muy eficientes. En diciembre del año 2006, Spectrolab alcanzó una eficiencia del 40.7 %, mientras que para septiembre del 2007 un consorcio liderado por investigadores de la Universidad de Delaware alcanzaron una eficiencia del 42.8 %; sin embargo, no han logrado el mismo grado de comercialización en comparación con las de silicio cristalino, pues a pesar de que es mucho mejor en la absorción de la luz solar, resulta más caro que la mayoría de las celdas solares. Además, aunque los módulos concentrados utilizan menos material semiconductor, por lo general requieren componentes ópticos caros, sistemas de refrigeración y sistemas de seguimiento para mantenerlos dirigidos hacia el sol. La desventaja de estas dos tecnologías mencionadas radica en los requerimientos de materiales semiconductores de alta calidad para fabricar películas fotoactivas libres de defectos, por lo que se incrementa significativamente los costos de fabricación, siendo la principal causa de los altos costos de estos dispositivos. Aunque cabe destacar que el precio comercial de

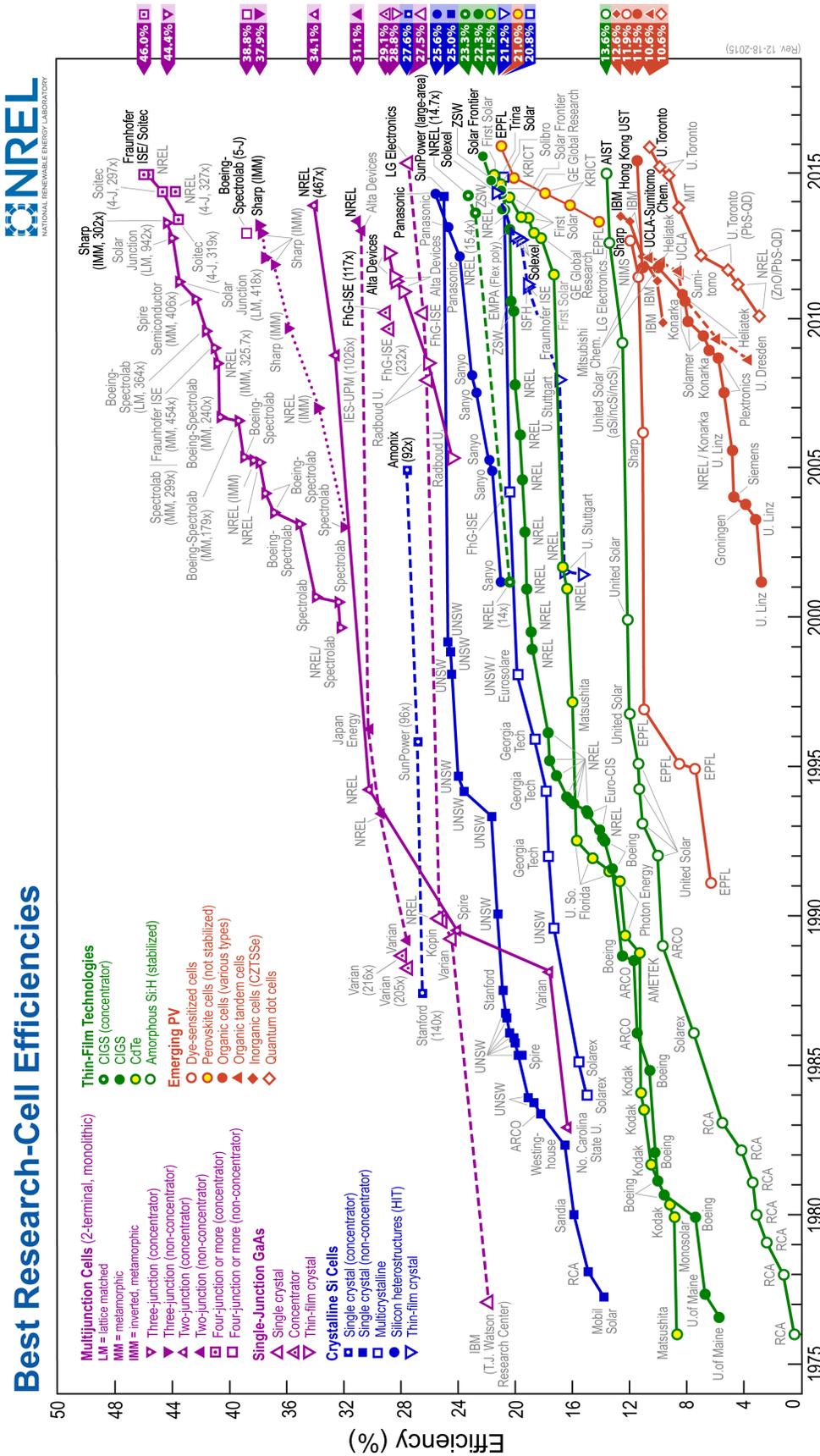
las celdas solares de silicio ha decrecido considerablemente en la última década gracias a los avances en los procesos y capacidad para fabricar obleas delgadas, los costos de producción e instalación son todavía relativamente altos, resultando en grandes tiempos de retorno tanto de energía como financieros.

Por lo anterior, en los últimos 15 años se han desarrollado nuevos materiales fotoelectroactivos y arquitecturas de celdas solares con expectativas de tener un menor costo, los cuales se han convertido en los objetivos más relevantes para los investigadores de las tecnologías de la *tercera generación*.

Las tecnologías más importantes, calificadas como celdas fotovoltaicas de *tercera generación ó tecnologías emergentes* son las llamadas celdas solares Grätzel, también conocida como Celda Solar Sensibilizada por Colorante (Dye sensitised solar cells; DSSCs, por sus siglas en inglés), las cuales han alcanzado una eficiencia de conversión del 12 % [21], las perovskitas, que poseen un gran potencial debido a que en pocos años han permitido obtener celdas a escala laboratorio con eficiencias mayores al 20 % y las celdas orgánicas.

Las celdas DSSCs, las cuales se estudiarán en la presente tesis, poseen varias ventajas potenciales para generar electricidad. No tienen limitaciones de materia prima, al basarse en materiales de bajo costo. Por ejemplo, los semiconductores inorgánicos pueden ser de dióxido de titanio o de óxido de zinc. El dióxido de titanio (más barato que el silicio) es un fotocatalizador muy eficaz, utilizado de forma habitual como absorbente de rayos ultravioleta, y presente en productos para el bronceado, jabones, polvos cosméticos, cremas, pasta de dientes y papel de cigarro. El óxido de zinc es también muy usado en la industria odontológica y en diversas aplicaciones cosméticas. En cuanto a los colorantes pueden ser sintéticos de bajo costo, como la eosina o el mercurocromo, o naturales como los extraídos de plantas (clorofilas, antocianinas de granadas, carotenos, etcétera). Sin embargo, si se usa un colorante orgánico, éste puede degradarse por la acción de la luz solar, disminuyendo su periodo de vida con respecto a las celdas de silicio.

Por otro lado, otra de las ventajas de las DSSCs se encuentra en que son fáciles de fabricar, pues tienen una estructura delgada y flexible. No son susceptibles al ángulo de incidencia y a la intensidad de la luz solar lo que hace que no sea necesario tener un sistema de seguimiento solar. Su peso es ligero, lo que les permite ser fácilmente instalada en lugares donde la apariencia es muy importante. Sin embargo, por ahora dicha tecnología se ha comercializado poco (prácticamente sólo para dispositivos electrónicos portátiles) debido a que aún debe de enfrentar diversas cuestiones. Estas cuestiones tienen que ver principalmente con la utilización de módulos de colorante en el medio ambiente; pues, son dispositivos inestables eléctricamente, con un periodo de vida corto y que aún necesitan ser investigadas más a fondo para lograr establecer mecanismos de control que permitan que su funcionamiento no se vea tan afectado ante condiciones medio ambientales y por lo tanto puedan ser utilizadas al aire libre.



Fuente: NREL, *Best Research-Cell Efficiencies.*, 2015

Figura 1.2: Gráfica de eficiencias del National Renewable Laboratory (NREL).

1.1. Celdas solares Sensibilizadas por Colorante.

Las celdas fotoelectroquímicas constituyen un tipo de celdas que pueden ser utilizadas para generar energía eléctrica a partir de la radiación del sol y también para utilizar la luz con el propósito de producir hidrógeno o reducir el CO_2 . Están basadas en un fotoánodo semiconductor y un cátodo de metal sumergidos en un electrolito.

Este tipo de celdas ha originado una tecnología fotovoltaica en la que hoy en día se le nombra Celda Solar Sensibilizada de Colorante (DSSC), creadas por Gratzel y O Regan en 1991 y de la cual se dará una explicación de sus componentes y funcionamiento a continuación.

Una DSSC se basa en un foto-electrodo de trabajo activo y un contra-electrodo en contacto con un electrolito líquido redox como se ve en la figura 1.3. El electrodo de trabajo consiste en una película de un semiconductor de óxido metálico nanoestructurado, generalmente TiO_2 , unido a un sustrato de vidrio conductor el cual adsorbe un fotosensibilizador (colorante o tinte) El contra-electrodo consta de un sustrato conductor platinado, y por último el sistema redox compuesto normalmente por un electrolito líquido con (I^- / I_3^-) de yoduro / triyoduro par redox.

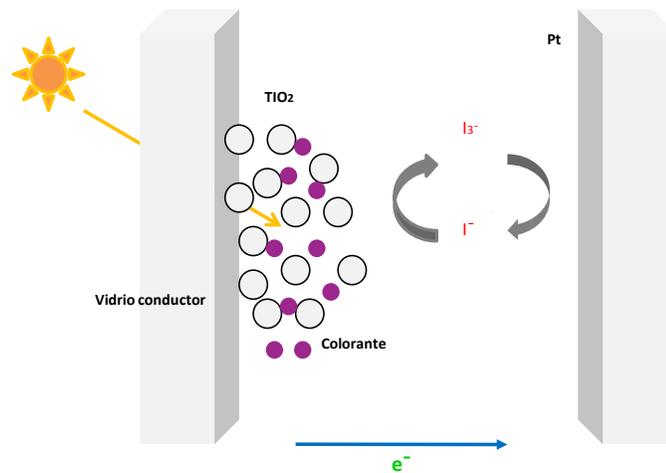


Figura 1.3: Representación esquemática de los componentes de una DSSC [50].

El principio de funcionamiento consiste en varios procesos clave, tales como la absorción de la luz, inyección electrónica, el transporte y la recolección. Después de la irradiación de luz, un electrón es promovido desde el estado fundamental del fotosensibilizador a un estado excitado del mismo. Estos tintes o colorantes excitados (1) inyectan electrones en la banda de conducción del semiconductor(2). Los procesos de separación de cargas que se producen en los resultados de la interfaz de TiO_2 -colorante en un electrón en la banda de conducción semiconductor y un agujero en el sensibilizador colorante. Después de esto, los electrones se transportan a través de la red de nanopartículas y finalmente llegan a la parte posterior de contacto del electrodo de trabajo.

toda la banda, son sustancias conductoras. Los aislantes son compuestos no conductores, caracterizados porque en su estructura electrónica tienen dos bandas separadas de energía: la banda de valencia, que está llena de electrones, y la banda de conducción, que está vacía. La diferencia de energía entre los dos lados se llama band gap. Como estas dos bandas están muy separadas, los electrones no pueden pasar de la banda de valencia a la de conducción y el material es aislante. Los materiales semiconductores también tienen dos bandas, la de valencia y la de conducción, pero están menos separadas. Al tener la banda gap más pequeña el electrón puede pasar de la banda de valencia a la banda de conducción más fácilmente. En las DSCs, bajo la irradiación de la luz solar, la separación de los electrones ocurre en el nivel HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital, en inglés) de el colorante, donde la salida de uno de ellos es generado con un estado de excitación en la interface semiconductor/colorante. Existen diferentes materiales semiconductores que han sido utilizados en las DSCs: ZnO (óxido de zinc, el primer semiconductor utilizado en una celda DSC) pero poco más tarde se utilizó el TiO_2 (dióxido de titanio), el cual ha llegado a ser el más popular, principalmente por sus características (comparadas con las de otros semiconductores): baja conductividad, no se incorpora en el campo eléctrico con partículas nanocrystalinas y la interfaz de contacto tridimensional del semiconductor/electrolito [39].

El colorante.

La función de los colorantes en las DSSCs es absorber la luz del sol y transformar esta energía en electrones. La luz que proviene del sol está formada por un conjunto de radiaciones electromagnéticas, que van desde la ultravioleta hasta los rayos infrarrojos. Estas radiaciones se diferencian las unas de otras por su longitud de onda, es decir, la distancia entre dos puntos de una misma onda que han pasado por un ciclo entero.

Los colorantes absorben determinadas longitudes de ondas de la luz debido a que todos los átomos tienen un determinado número de electrones a su alrededor. Estos electrones están distribuidos en el espacio, alrededor del núcleo, por lo que se llaman orbitales atómicos, y cada uno de estos orbitales tiene una energía determinada. Los electrones, en el estado fundamental, empiezan a llenar los orbitales de menos a más energía. En una molécula, los orbitales atómicos se combinan entre ellos para formar los orbitales moleculares, cada uno con una energía determinada. El número de electrones de una molécula es la suma del número de electrones de todos los átomos, y se colocan en los orbitales moleculares de menos a más energía. Igual que como los orbitales electrónicos, sólo pueden ir dos electrones en cada orbital. El orbital que esté lleno de electrones y que tenga más energía se llama HOMO, y el orbital que esté vacío de más baja energía se llama LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Para que un colorante absorba una radiación luminosa, es necesario que esta radiación tenga una energía igual que la necesaria para que un electrón pase del HOMO al LUMO. Si la energía de la radiación luminosa no es igual a la diferencia entre los estados HOMO y LUMO, no se absorberá. Cuando una molécula tiene todos los electrones en los orbitales de más baja energía, se dice que está en el estado fundamental. En cambio, cuando un colorante absorbe una radiación, un electrón pasa del orbital HOMO al LUMO, y decimos que la molécula está en estado excitado.

Los colorantes convencionales utilizados en las DSSCs consisten en un metal com-

plejo con un ion metálico central, tal como el Rutenio (Ru). Que puede mejorar su absorción en el semiconductor. Alguno de estos colorante son: N3, N749 y N719, entre otros [39]. Sin embargo la desventaja de estos colorantes se basa principalmente en su alto costo por lo que se siguen investigando otros colorantes que puedan ser más económicos y a la vez que puedan lograr el mismo desarrollo de las celdas que cuando se utilizan los colorantes de Ru ($\sim 11\%$).

El contra-electrodo.

El contra-electrodo, al igual que el electrodo de trabajo es un vidrio FTO. Este vidrio se recubre con una capa de grafito o de platino para hacerlo más conductor. Los electrones que llegan al contra-electrodo son transmitidos al electrolito. El grafito ó platino disminuye la resistencia al paso de electrones al contra-electrodo.

El electrolito.

El electrolito juega un papel importante en la conversión de energía solar en energía eléctrica en las DSSC. Es el responsable de regenerar el colorante y de esta forma favorecer el transporte del electrón entre el colorante, el semiconductor y el contra-electrodo. Los electrolitos se clasifican en estado líquido, cuasi-sólido y en estado sólido. Las características esenciales que debe de cumplir un electrolito para ser funcional para las DSSCs son: tener una reacción de recombinación lenta, la absorción de la luz visible debe de ser insignificante, tener una rápida difusión de electrones y una alta transferencia de electrones con el contra-electrodo; deben de ser materiales no tóxicos, no corrosivos, estar disponibles en la naturaleza y tener una buena estabilidad fotoquímica. Características coherentes con el objetivo de la tercer generación de las celdas fotovoltaicas.

Los electrolitos que han sido más utilizados son los electrolitos en estado líquido, principalmente el par redox yoduro/triioduro, el cual es utilizado con alguno de los siguientes solventes: acetonitrilo (An), carbonato de etileno (EC), 3-metoxipropionitrilo (MePN), carbonato de propileno (PC), γ -butirolactina (GBL) y N-metilpirrolidona (NMP). Cabe destacar, que dependiendo de los solventes utilizados, el desarrollo de las DSSCs será diferente. Aquellos cuya viscosidad sea mayor, tendrán un menor desarrollo; es decir, una menor eficiencia, pero un tiempo de vida mayor. Y viceversa, aquellos con una viscosidad generaran una mayor eficiencia pero el tiempo de vida útil se verá disminuido. Por otro lado, otros pares redox han sido utilizados debido a que el par redox mencionado anteriormente cuenta con ciertas características no deseables como una alta corrosión y baja estabilidad a largo plazo. Algunos ejemplos son: SCN^- , Ni(III)/Ni(IV), Cu(I)/Cu(II), Fc/Fc^+ y Co(II)/Co(III). El par cobalto ha obtenido una alta eficiencia del 14 % [39].

Los electrolitos en estado cuasi-sólidos han comenzado a utilizarse debido a las desventajas que se mencionaron anteriormente respecto a los electrolitos líquidos. Los electrolitos cuasi-sólidos tienen la ventaja de que mantienen la propiedad del transporte de difusión como en el caso de los electrolitos líquidos pero con la propiedad de cohesión de un material sólido [39]. En general, un electrolito cuasi-sólido es una cadena

de polímeros preparado en un electrolito líquido. La presencia de polímeros mejora la estabilidad térmica de los electrolitos mientras que preserva las propiedades favorables de los electrolitos líquidos, tal como una alta conductividad iónica y un buen contacto en la interface [41]. Existen tres principales tipos de éstos electrolitos: los electrolitos termoplásticos de gel, los polímeros termoestables y los electrolitos compuestos de polímeros.

El último tipo de electrolito utilizado en las DSSCs son los llamados electrolitos en estado sólido, los cuales son considerados como una alternativa debido a su potencial para alcanzar una mejor estabilidad mecánica en comparación con los otros dos electrolitos mencionados anteriormente además de su potencial para simplificar su proceso de producción [39].

Selladores.

Las DSSCs necesitan estar encapsuladas para protegerse del oxígeno y la humedad. El tipo de sellador utilizado para dicho fin jugará un rol importante en la eficiencia, estabilidad y tiempo de vida útil de las celdas. El material sellador debe de ser térmicamente estable y químicamente inerte a el electrolito [33].

Un método tradicional para sellar las DSSCs es aplicar un sellador con materiales termoplásticos, tal como Surlyn y Bynel (DuPont); sin embargo, sus desventajas son: la baja estabilidad mecánica que se presenta cuando las celdas están sometidas a altas temperaturas y el envejecimiento al estar sometidas a la humedad [39].

1.2. Estado del arte.

En los últimos años se han dado grandes avances en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos, siendo el costo de producción, su rentabilidad y su eficiencia uno de los problemas que más ha preocupado a la industria solar fotovoltaica. Es por ello, que la tercera generación de celdas solares fotovoltaicas ha trabajado en el desarrollo de nuevos dispositivos que cumplan con dichas características; lo que ha dado lugar al desarrollo de celdas solares emergentes dentro de las cuales se encuentran las celdas solares Sensibilizadas de Colorante.

1.2.1. Revisión bibliográfica sobre el envejecimiento de celdas solares Sensibilizadas por Colorante.

La estabilidad y el tiempo de vida de las celdas solares Grätzel (DSSC) es uno de los problemas que se deben enfrentar para poder comercializar esta tecnología.

La estabilidad de las DSSC puede verse afectado por varios factores: [1]

1. La estabilidad fotoquímica del colorante que es adsorbida en el TiO₂, así como las interacciones del colorante y los alrededores del electrolito.

2. La composición química del electrolito.
3. La estabilidad del revestimiento de platino del contra-electrodo en la solución electrolítica.
4. La calidad en los materiales de sellado.

De acuerdo a Baxter [7], la estabilidad y el tiempo de vida de las celdas y módulos de colorante dependen críticamente de la encapsulación y sellado. El cual provee la mejor barrera para evitar fugas del electrolito y que se vea afectado por las condiciones medio ambientales. El vidrio puede ser utilizado para ambos electrodos en una configuración sandwich o como sustrato para ser utilizado como una capa barrera. Alternativamente, sustratos de polímeros o metal pueden ser utilizados para encapsular celdas flexibles con posibilidades de fabricar en procesos roll-to-roll pero esta a expensas de defectos. El ideal, es utilizar materiales termoplásticos o polímeros elastoméricos, adhesivos y pedazos de cristal; son resistentes al solvente y otros aditivos (el más común es el Dupont *Surlyn*). Finalmente, una reciente alternativa es mediante un método de encapsulación por medio de láser [20].

Las celdas con el mejor desarrollo utilizan solventes volátiles en el electrolito; Sin embargo, para paneles utilizados en condiciones ambientales se necesitaría métodos de encapsulación sofisticados. Es por ello, que se ha propuesto una atractiva solución utilizando fórmulas de baja viscosidad (1-etilo-3-tiocinato de metilimidazolio, selenocianato, tricrianometanuro o tetracianoborato). Desafortunadamente, con excepción del tetracianoborato, todas estas fórmulas de baja viscosidad resultan inestables bajo prolongado estrés térmico e intensidad de luz [6]. Con respecto a lo anteriormente planteado, existe una compensación entre eficiencia y estabilidad. Es decir, las celdas con mejor desarrollo, que permiten una difusión de electrones más rápida, utilizan electrolitos volátiles con baja viscosidad. Sin embargo, estos electrones están más propensos a evaporarse y fugarse. Así como también, las DSSC libres de solventes tienen baja eficiencia pero más tiempo de vida.

Actualmente muchos grupos se encuentran investigando estabilidades por encima de 1000 horas y el mejor desarrollo fotovoltaico, en ambos términos, eficiencia y estabilidad, ha sido alcanzado con el N3, N719 Y 749 ruteno polypyridyl desarrollado por O'Regan y Gratzel en 1991 [1].

Las publicaciones sobre estabilidad de celdas pequeñas muestran resultados prometedores pero la estabilidad de módulos DSSC brinda un desafío adicional. Los módulos tienen áreas mucho más grandes y por lo tanto bordes más grandes por lo que para sellarse se necesitan métodos de sellado y encapsulación de más alta calidad para mantener un buen sellado hermético en el módulo entero. El vidrio es una excelente barrera y puede ser fácilmente utilizado en áreas pequeñas. Sin embargo, al ser caro, es más difícil fabricar cristal para áreas mayores de 30 X 30 cm [35]. Otro desafío es seleccionar y proteger con metal interconectado las celdas. El metal más común es la plata, el cobre y el aluminio, el cual es elegido con base al costo y la resistividad. Sin embargo, estos materiales son corroídos por el electrolito y estos requerimientos agregan costo y

potencial a nuevas fallas de mecanismo.

Por otra parte, los módulos se desarrollan de manera óptima cuando las celdas producen la misma corriente y voltaje pero se requiere un alto control para la reproducibilidad. Además, las celdas deben de estar aisladas unas de otras para evitar fugas de electrolito y la interdifusión de especies redox.

En la tabla 1.1 se muestran los principales avances de acuerdo a la revisión bibliográfica en cuanto a estabilidad y tiempo de vida útil en las DSSCs.

1.2.2. Revisión bibliográfica de los trabajos publicados sobre el comportamiento térmico en módulos Sensibilizados de Colorante.

Como se menciona anteriormente las celdas de silicio y las de telurio de cadmio son las tecnologías fotovoltaicas más comercializadas; sin embargo, una desventaja que enfrenta ésta tecnología es que la conversión de energía eléctrica en éstas celdas cae por el aumento de la temperatura $-0.45\%/K$ en celdas de silicio y $-0.25\%/K$ en celdas de Telurio de Cadmio. En operación normal, las temperaturas de las celdas alcanzan de $45-50^{\circ}C$ y en consecuencia la eficiencia de valores normales cae aproximadamente de un 10% y a un 5% , respectivamente. En el caso de las DSSCs, la eficiencia se mantiene constante a temperaturas entre $30^{\circ}C$ y $40^{\circ}C$, por lo que la brecha de eficiencias entre las tecnologías comercializadas y ésta tecnología se ve reducida en el marco de operación [32]. De hecho, al respecto Raga and Fabregat-Santiago [32] remarcan que para una correcta comparación de eficiencias entre las tecnologías solares pueda darse los valores de temperatura de operación deberían ser utilizados.

Por otra parte, Chen et al. Explican que una buena disipación térmica facilita una alta eficiencia de la celda y es un factor importante que influye en su estabilidad a largo plazo [8].

De acuerdo a las afirmaciones de Raga y Fabregat-Santiago [32], un aumento de temperatura en las celdas entre los $30^{\circ}C$ y $40^{\circ}C$ mantiene una eficiencia constante, mientras Chen et al. [8] Demostraron que el voltaje disminuye incluso entre esos rangos de temperatura, afectando como consecuencia la eficiencia en los módulos DSSCs. El primer artículo reportado sobre modelos numéricos de temperatura esta escrito por el mismo autor, publicado en el 2013, el cual consiste en un modelo numérico basado en tres métodos de transferencia de calor y balance de energía en estado transitorio sin considerar las variables espaciales. En el 2014 [2] se desarrolló un nuevo modelo numérico en la que se investigó la transferencia de calor en DSCs con tres diferentes colorantes y además en celdas de silicio y se obtuvo una relación de las temperaturas de operación con los parámetros J_o , V_{oc} , FF y η ; el modelo fue realizado para dos dimensiones (x y). En el 2016 [16] se presentó un modelo para estimar la temperatura alcanzada en la capa activa de la celda. Finalmente, en el 2017 se presentó un modelo donde se relaciona la temperatura y la eficiencia de las celdas utilizando diferentes condiciones de operación (velocidad de viento, dirección del viento, ángulo del panel y radiación solar) durante

su operación. Donde se concluye que una alta generación de calor en celdas de silicio conduce a una elevación mayor en la temperatura en comparación con las DSSCs y que la velocidad de viento con valore de 0.5 m/s a 6 m/s conlleva a un decremento en la temperatura (de 56.6°C a 46.3°C) [34].

De acuerdo con Mehmood et al. [23] La disminución en la eficiencia se puede atribuir a la disminución del voltaje a circuito abierto de las celdas. El aumento de la temperatura de las celdas reduce la resistencia de la recombinación de la carga debido a la disminución del tiempo de vida del electrón y se demostró que en este sentido las celdas son estables hasta los 35 °C. Éste estudio fue realizado utilizando un fotosensibilizador orgánico sintetizado y el electrolito comercial de yoduro Z-150 Solaronix.

Por otra parte, es importante destacar, que al utilizar diferentes tipos de electrolito en el diseño de las celdas, se ocasiona un comportamiento eléctrico distinto en función de las temperaturas. Cabe recordar que la estabilidad y el tiempo de vida útil de las celdas tiene una relación muy estrecha con el electrolito. Por lo que al someter las celdas y/o módulos a altas temperaturas se contribuirá a que el electrolito se evapore con mayor rapidez y por lo tanto el desempeño de las celdas se vea afectado negativamente e incluso éstas pueden dejar de funcionar. Estudios realizados en el 2007 por Berginc et al. [19] En el cual se relacionaron diferentes temperaturas con irradiancias de 1 y 0.1 sol y diferentes concentraciones de electrolito utilizando imidazolium como solvente y permitieron concluir que a una concentración de 0.5 M de imidazolium sometidas a 1 sol de irradiancia, la densidad de corriente incrementaba conforme la temperatura incrementaba. Mientras que el voltaje a circuito abierto disminuía al disminuir la temperatura; sin embargo, la eficiencia aumentaba al incrementar la temperatura debido al aumento en la densidad de corriente. Aunque es importante señalar que este incremento en la eficiencia sucede hasta los 30°C- 35°C de temperatura, después de éste valor la eficiencia se mantiene. Por otro lado, al someter las celdas a 0.1 sol a diferentes temperaturas y con diferentes concentraciones de imidazolium, la densidad de corriente no se ve significativamente afectada en ningún caso. En el 2012, Edwing y Halil [11] reportaron que en DSCs basado en electrolito con acetonitrilo como solvente la temperatura afecta al voltaje y por lo tanto la eficiencia. Ésto fue independiente de la irradiancia.

Finalmente, un artículo publicado por Pan et al. [26], En el que propusieron un sistemas de enfriamiento de un módulo DSSCs mediante agua, se menciona que al elevarse las temperaturas se reduce la eficiencia de las DSSCs y una publicación del 2021 de Preeti Singh et al. [30] se analiza el comportamiento térmico y el desarrollo de las DSSCs , las celdas de Perovskita y de Silicio mono-cristalino bajo un flujo solar no uniforme.

En la tabla 1.2 se muestran los artículos encontrados en la revisión bibliográfica realizada acerca de métodos térmicos en las DSCs.

Tabla 1.1: Publicaciones sobre envejecimiento de Celdas Solares Sensibilizadas de Colorante

Año	Autor	Dispositivos	Descripción
1991	Regan y Gratzel	Celda	Mejor desarrollo fotovoltaico de las DSSCs entre eficiencia y estabilidad. La eficiencia obtenida fue entre 7.1-7.9% [1]
2001	Peterson et al.	Celda	Se mostró buena estabilidad a bajos niveles de iluminación sobre 4300 horas [27]
2002	Kubo et al.	Celda	Estabilidad de 1000 horas a 85°C oscuridad [18]
2008	Bai et al.	Celda	Se reportó una combinación de buena estabilidad y alta eficiencia. Los resultados obtenidos fueron 8.2% de eficiencia reteniendo el 93% de la eficiencia inicial después de 1000 horas a 1 sol y 60°C [6]
2008	Dai et al.	Celda	Se utilizaron celdas con electrodos de vidrio y electrolito volátil a base de nitrilo y mostraron una mínima degradación a 1 año en condiciones externas con un panel de 5.9% de eficiencia [9]
2009	Dyesol	Módulo	Dyesol mostró en un módulo de 100cm ² una retención del 80% a temperaturas de 40-85°C [10]
2010	Goldsten et al.	Módulo	En un área de 225cm ² se obtuvo una eficiencia del 4.2% a 85°C. La eficiencia disminuyó un 3.5% después de 600 horas y un 3.2% después de 3500 horas [12]
2010	Harikisu y Desilvestro	Celda	Se obtuvo una estabilidad de 25000 horas a 0.8 sol y después de 25000 horas la eficiencia disminuyó 17% de 4.2- 3.7% [13]
2010	Pettersson et al.	Módulo	Se investigaron módulos monolíticos con un electrodo de vidrio con una eficiencia del 5% sin degradación a las 1000 horas bajo 1 sol y a 50°C y una disminución de eficiencia del 0.3% después de las 1000 horas [28]
2011	Laboratorios Toyota	Módulo	En los laboratorios de Toyota Central R&D se reportó en un módulo de 110cm ² con dos sustratos de vidrio libre de solvente imidazolium como electrolito con una retención de eficiencia del 80% hasta 15800 horas a 1 sol y 60/grad C. Esta prueba pretende alcanzar 15 años de vida útil[37]
2016	Yang et al.	Celda	Se obtuvo una estabilidad de 50 días bajo una temperatura de 70°C en oscuridad [40]
2016	Macaira	Celda	Se demostró una estabilidad de 1000 horas a 65°C con una intensidad de luz de 765 W/cm ² [20]
2018	Huihui Yuan et al.	Celda	Se probó la estabilidad de DSCs durante 4 años y se concluyó que se obtuvo de un 15% a 20% más energía eléctrica de mayo a agosto que en las celdas policristalinas de silicio.

Tabla 1.2: Publicaciones sobre modelos térmicos de Celdas Solares Sensibilizados de Colorante

Año	Autor	Dimensiones	Descripción
2013	Chen et al.	No se considera	Primer modelo numérico para simular las temperaturas en DSSCs utilizando los tres métodos de transferencia de calor y balance de energía.[8]
2014	Anbarasan et al.	x,y (2D)	Investigación de la transferencia de calor en DSSCs con 3 diferentes colorantes y en diferentes celdas de silicio. Se obtuvo una relación de las temperaturas de operación con los parámetros J_{sc} , V_{oc} y FF y se llevó a cabo un estudio de Dinámica de Fluidos (CFD).[2]
2016	Pan et al.	No se considera	Sistemas de enfriamiento de un módulo DSSCs mediante agua. Se menciona que al elevarse las temperaturas se reduce la eficiencia.[26]
2016	J.Jesús Gallardo et al.	x (1D)	Modelo para estimar la temperatura alcanzada en la capa activa de la celda [16]
2017	Sourav Khanna et al.	3D	Análisis térmico de las Celdas Solares Sensibilizadas de Colorante y celdas solares de Perovskita bajo diferentes condiciones de operación (dirección de viento, velocidad de viento, ángulo del panel y radiación solar) y su relación con el desarrollo de las celdas; además, de la comparación de los resultados con el desarrollo de las celdas solares de Silicio Monocristalino.[34]
2021	Preeti Singh et al.	3D	Se analizó el desarrollo y la temperatura de operación de las Celdas Solares Sensibilizadas de Colorante, celdas solares de Perovskita y de Silicio monocristalino bajo la influencia de diferentes condiciones de viento, de ángulos de inclinación del módulo y de irradiación solar.

1.2.3. Conclusiones de la revisión bibliográfica.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada se puede concluir que la temperatura de operación de las celdas es un factor a considerar para contribuir en mejorar la estabilidad eléctrica, el tiempo de vida útil y la eficiencia de las DSSCs, problemática importante a enfrentar para lograr su comercialización. Además, sólo tres modelos numéricos se han encontrado aplicados a las DSSCs y de los cuales ninguno se presenta en tercera dimensión (3D) y uno de ellos sólo considera la distribución de temperatura en la capa activa de la celda.

Cabe mencionar que la mayoría de las publicaciones revisadas coinciden en que la

temperatura de operación en la celda o también conocida como capa activa afecta la eficiencia de las DSSCs al disminuir el voltaje aunque también se reporta una disminución de la foto corriente utilizando imidazolium como solvente en el electrolito. Por lo tanto se puede concluir que la estabilidad en la eficiencia se alcanza si la temperatura de operación en el área activa se mantiene entre los 30°C y los 40°C.

Finalmente, de acuerdo con las afirmaciones mencionadas anteriormente respecto a la importancia de utilizar los valores de temperatura de operación de las celdas. Coincidió en que este valor es de suma importancia no solo para comparar las celdas con otras tecnologías solares como lo mencionan Raga y Fabregat-Santiago sino también para evaluar su comportamiento en diferentes condiciones medioambientales en operaciones reales y no únicamente en condiciones estándar.

1.3. Planteamiento del problema e hipótesis.

1.3.1. Planteamiento del problema

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, en los modelos térmicos presentados no se ha propuesto un modelo térmico en el cual se estudie el efecto de la radiación solar y de la velocidad del viento en la transferencia de calor de Celdas Solares Sensibilizadas de Colorante en forma tridimensional (3D). Con el fin de contribuir en la problemática antes mencionada se propone presentar un modelo numérico utilizando como herramienta *Ansys Thermal* para estudiar la transferencia de calor en un módulo DSSCs considerando distintas velocidades de viento y relacionando dicho modelo con el comportamiento eléctrico.

1.3.2. Hipótesis

Una temperatura de operación alta afecta negativamente el desarrollo eléctrico de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante.

1.4. Objetivos de investigación

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo térmico en 3D para determinar el efecto de la temperatura en el comportamiento eléctrico de un Módulo Solar Sensibilizado de Colorante.

1.4.2. Objetivos específicos

- Simular numéricamente un Módulo Solar Sensibilizado de Colorante para obtener el contorno de temperaturas para el mes de mayor irradiación en diferentes ciudades de México: Cuernavaca y Mérida.
- Simular numéricamente un Módulo Solar Sensibilizado de Colorante para obtener el contorno de temperaturas para el mes de menor irradiación en dos diferentes ciudades de México: Cuernavaca y Mérida.

- Estudiar la influencia de la velocidad de viento en los contornos de temperatura de los Módulos Solares Sensibilizados por Colorante.
 - Estudiar la influencia de la temperatura ambiente en los contornos de temperatura de los Módulos Solares Sensibilizados por Colorante.
 - Caracterizar eléctricamente la Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante en función de la temperatura de operación.
 - Estudiar la influencia de la temperatura de operación en Celdas Sensibilizadas por Colorante elaboradas a escala laboratorio.
-

Capítulo 2

CARACTERÍSTICAS DE LAS CELDAS SOLARES.

2.1. Energía solar fotovoltaica y celdas solares

La energía solar fotovoltaica (FV) consiste en el aprovechamiento y transformación de la energía que recibimos del sol en energía eléctrica. La radiación solar llega a los módulos fotovoltaicos (celdas solares individuales conectadas eléctricamente), produciendo una corriente eléctrica.[48]

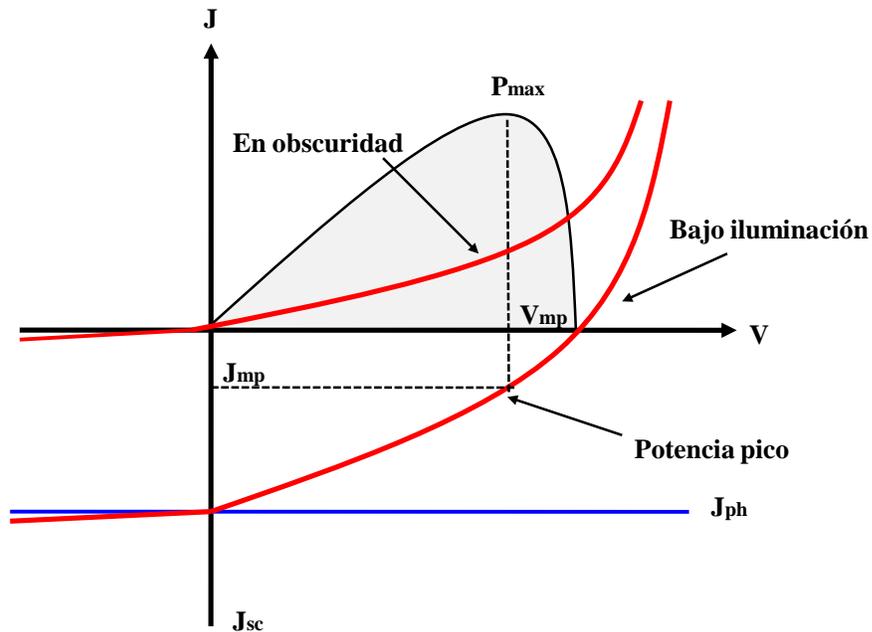


Figura 2.1: Característica J-V de una juntura p-n en oscuridad y bajo iluminación.

Este tipo de energía solar esta basado en un fenómeno llamado *efecto fotovoltaico*

en el cual la luz que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produce una diferencia del fotovoltaje o del potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo para producir trabajo útil [49]. El material sólido para construir las celdas solares es un semiconductor y no un metal debido a que para liberar un electrón, la energía de un fotón debe ser por lo menos tan grande como la energía de la banda prohibida pero no tan grande pues liberará esa energía adicional como calor al liberar electrones. Véase figura 2.2.

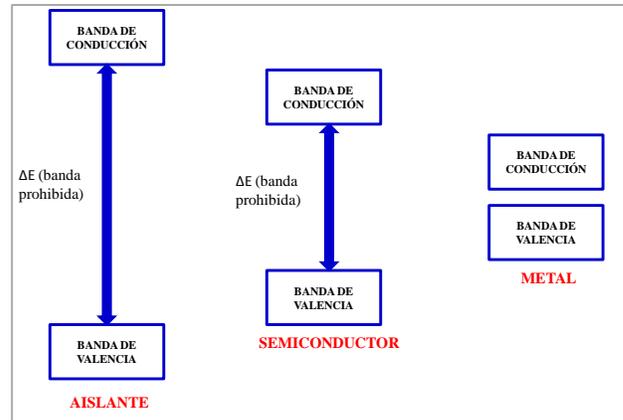


Figura 2.2: Tipos de materiales sólidos con respecto a su estructura electrónica.

Las células o celdas solares son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico, o indirectamente mediante la previa conversión de energía solar a calor o a energía química.

Los requisitos básicos para que un material sea adecuado para construir una celda solar son los siguientes:

1. Debe absorber luz de forma efectiva en la franja visible del espectro.
2. Se debe conseguir una separación de carga eficiente.
3. Debe ser un conductor o fotoconductor.

2.2. Curvas características

La representación estándar de un dispositivo FV es la característica corriente-voltaje (véase la figura 2.3). La curva representa las posibles combinaciones de corriente y voltaje para un dispositivo fotovoltaico.

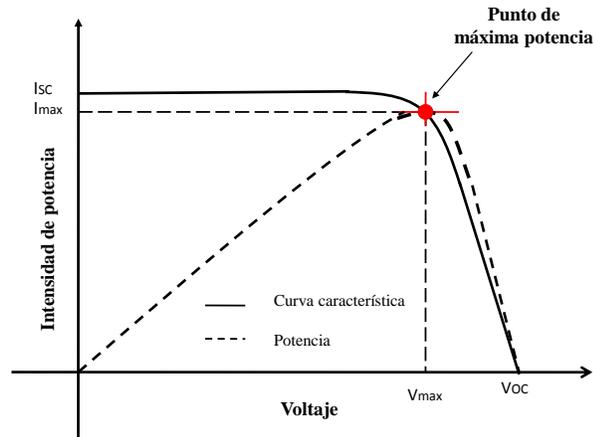


Figura 2.3: Curva característica de una celda fotovoltaica.

2.2.1. Principales parámetros de las características Corriente-Voltaje (I-V).

Los parámetros que influyen en la caracterización de las curvas corriente-voltaje son los siguientes:

- **Corriente de cortocircuito (Jcc notación española, Jsc notación internacional).** Es la máxima corriente que producirá el dispositivo bajo unas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a un voltaje igual a cero.
- **Voltaje de circuito abierto (Vca notación española, Voc notación internacional).** Es el máximo voltaje del dispositivo bajo unas condiciones definidas de iluminación y temperatura, correspondientes a una corriente igual a cero.
- **Potencia máxima (Pmax).** Es la máxima potencia que producirá el dispositivo en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura, correspondiente al par máximo I-V.
- **Corriente en el punto de máxima potencia (Ipmp).** Es el valor de la corriente para Pmax en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura.
- **Voltaje en el punto de máxima potencia (Vpmp).** Es el valor de voltaje para Pmax en unas condiciones determinadas de iluminación y temperatura.
- **Factor de forma (FF).** Es el valor correspondiente al cociente entre Pmax y el producto de Isc x Voc como se observa en la ecuación 6. Puede venir expresado en tanto por ciento o tanto por 1, siendo el valor 1 el que corresponderá a un hipotético perfil rectangular. Nos da una idea de la calidad del dispositivo FV, siendo éste tanto mejor cuánto más alto sea su factor de forma.

El factor de forma se define de acuerdo a la ecuación 2.1.

$$FF = \frac{(P_{max})}{V_{oc} \cdot J_{sc}}. \quad (2.1)$$

2.2.2. Modelo para representar el comportamiento eléctrico de las celdas solares.

El comportamiento de una celda solar puede ser descrito en una simple forma, por la ecuación del diodo (ecuación 2.2), asumiendo que no hay series o resistencias en derivación [25].

$$J = J_{SC} - J_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{mkT} - 1\right) \right), \quad (2.2)$$

donde: J_{SC} es la corriente de cortocircuito, J_0 es el cambio de corriente, q es la carga elemental, k es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta y m el factor de idealidad.

2.2.3. Obtención de la máxima potencia en celdas solares.

La potencia suministrada por las celdas FV corresponde al producto de la corriente de la celda (I) y el voltaje (V); el cual es mostrado en la figura 2.4. Se observa que existe un único valor de voltaje donde la potencia es máxima; y según la curva corriente - voltaje mostrada en la sección anterior, existe una corriente correspondiente a dicho voltaje. Estos valores de corriente y voltaje se conocen como el punto de máxima potencia.

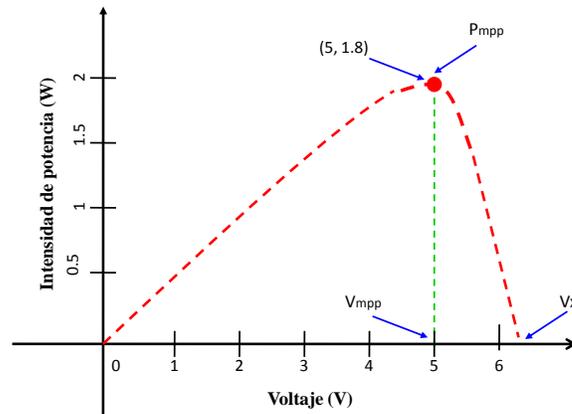


Figura 2.4: Variación de la potencia de las celdas según el voltaje de operación [14].

El punto máximo se puede determinar usando los conceptos de máximos y mínimos del cálculo diferencial, para esto determinamos la expresión de la potencia en la aproximación de líneas rectas (ecuación 2.1).

$$P(V) = \begin{cases} I_{mpp}V & \text{para } V \leq V_{mpp} \\ \frac{I_{mpp}(V_x - V)V}{V_x - V_{mpp}} & \text{para } V \geq V_{mpp} \end{cases} \quad (2.3)$$

Tomando la derivada de la potencia con respecto al voltaje según la ecuación 2.1, se tiene:

$$\frac{dP(V)}{dV} = \begin{cases} I_{mpp} & \text{para } V \leq V_{mpp} \\ \frac{I_{mpp}(V_x - 2V)}{V_x - V_{mpp}} & \text{para } V \geq V_{mpp} \end{cases} \quad (2.4)$$

Para $V \leq V_{mpp}$ la derivada es $I - mpp$, que representa la pendiente, y dado que es un valor positivo la función es creciente en todo el intervalo, por lo tanto el máximo es el valor final del intervalo, este V_{mpp} . Para el intervalo $V \geq V_{mpp}$, la derivada es negativa si $V_x < 2V$ o $V_x < 2V_{mpp}$, por lo tanto la función es decreciente en el intervalo y el valor máximo esta dado por el valor inicial, este es V_{mpp} . Por lo tanto V_{mpp} corresponde al punto de máxima potencia.

Cuando una carga resistiva es conectada directamente a las celdas solares, el punto de operación de las celdas corresponde al voltaje y a la corriente que la carga exige, el cual está dado por la ley de Ohm; es decir, el punto de operación de las celdas solares corresponde a la intersección de las curvas corriente - voltaje de la celda FV y de la carga como se muestra en la figura 2.5.

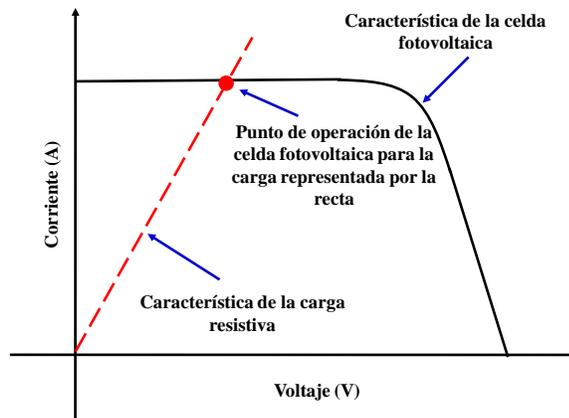


Figura 2.5: Descripción del punto de operación de la celda para una carga resistiva [14].

Dado que la potencia está dada por el producto del voltaje y su corriente correspondiente, se puede mostrar la potencia gráficamente como el área del rectángulo cuya diagonal va desde el origen de la gráfica (punto 0,0) al punto de operación, como se muestra en la Figura 6. Por tanto el punto de máxima potencia corresponde al rectángulo de mayor área, este punto está en la región de curvatura como se muestra en la figura 2.6, donde I_{mpp} y V_{mpp} son la corriente y el voltaje de máxima potencia.

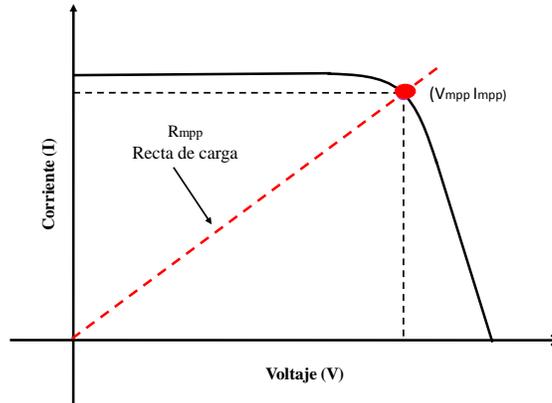


Figura 2.6: Punto de máxima potencia de la celda solar y rectángulo de potencia [14].

2.3. Eficiencia de una celda solar.

La eficiencia de una celda solar se mide como la capacidad de convertir energía lumínica en energía eléctrica. Es el parámetro principal del control de calidad de una celda solar.

La eficiencia η de fotoconversión de una celda fotovoltaica se expresa con la ecuación 2.5.

$$\eta = \frac{P_{max}}{(I_{luz})(area)}, \quad (2.5)$$

donde: P_{max} es la potencia máxima ó potencia pico y I_{luz} es la intensidad de luz utilizada en la medición (normalmente 1 sol = $1000W/m^2$ para medidas en condiciones estándar).

También puede ser expresado en función del factor de llenado (FF), ecuación 2.6.

$$\eta = \frac{(FF)(J_{sc})(V_{oc})}{(I_{luz})(area)}. \quad (2.6)$$

2.4. Conexión eléctrica de las celdas.

A fin de proporcionar el voltaje y la corriente apropiadas, un número de celdas solares individuales deberán ser conectados para convertirlas en módulos. Existen dos métodos básicos de conexión: conexión en serie y conexión en paralelo.

En la figura 2.7 se muestra una conexión en serie de celdas solares; en este tipo de conexión la corriente de salida es equivalente a la corriente de entrada de cada celda individual, pero el voltaje de salida incrementa, siendo la suma de los voltajes de las

celdas individuales. Por el contrario, en una conexión en paralelo, como se muestra en la figura 2.8, el voltaje de salida es equivalente al voltaje de entrada de cada celda individual, pero la corriente de salida es la suma de las corrientes de las celdas individuales. [22]

Loa anterior, basado en la teoría de las leyes de Kirchoff en donde las fórmulas de corriente y voltaje se describen a continuación:

Para voltajes en un circuito en serie.

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n. \quad (2.7)$$

Para intensidades de corriente en un circuito en serie.

$$I_T = I_1 = I_2 = \dots = I_n. \quad (2.8)$$

Para voltajes en un circuito en paralelo.

$$V_T = V_1 = V_2 = \dots = V_n. \quad (2.9)$$

Para intensidades de corriente en un circuito en paralelo.

$$I_T = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (2.10)$$

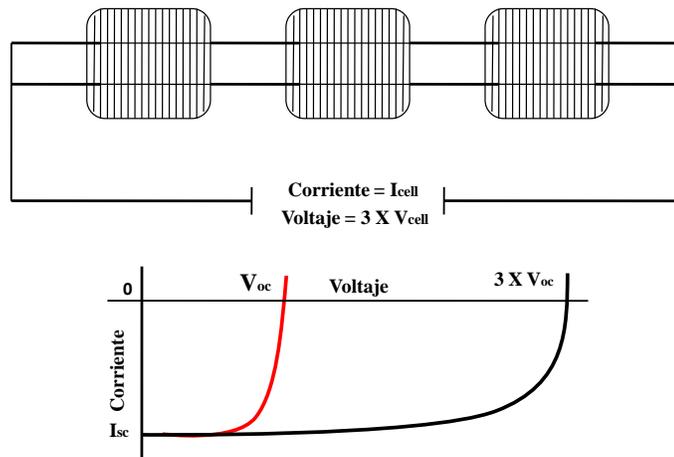


Figura 2.7: Celdas conectadas en serie, con característica corriente-voltaje. [22]

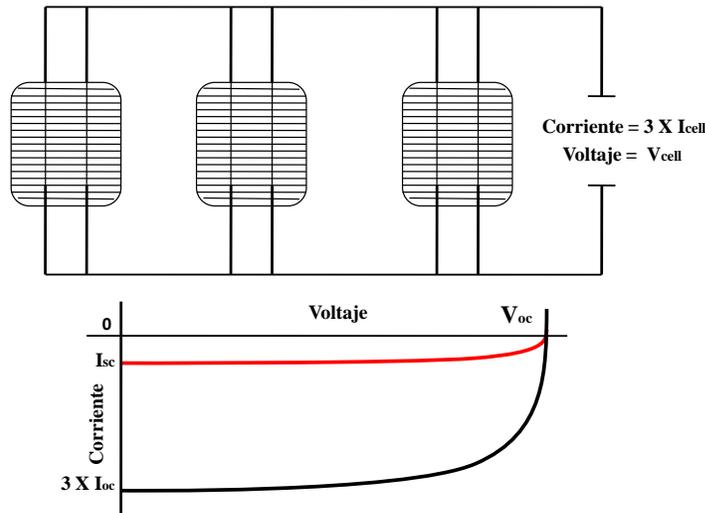


Figura 2.8: Celdas conectadas en paralelo, con característica corriente-voltaje.[22]

2.5. Módulos fotovoltaicos.

Con el fin de proporcionar energía útil para cualquier aplicación, las celdas solares individuales deben estar conectadas entre sí para dar los niveles de corriente y voltaje apropiados y también deben ser protegidos de daños por el entorno en el que operan. Esta unidad conectada eléctricamente, protegida con el medio ambiente por lo general se denomina *módulo fotovoltaico* [22].

2.5.1. Eficiencia del módulo fotovoltaico.

La eficiencia de un dispositivo es la manera común de definir la calidad del mismo. Para el caso de un generador FV, esta sería el cociente entre la energía producida por el dispositivo y la energía incidente. Sin embargo, existen varias maneras de definir la eficiencia FV: Eficiencia con respecto al área total, eficiencia con respecto al área de la celda, eficiencia con respecto al área activa de la celda.

Eficiencia con respecto al área total.

Esta definición implica la relación entre la máxima potencia generada por el dispositivo y la cantidad de radiación solar incidente en el dispositivo completo (ecuación 2.11). Por dispositivo completo se entiende el área total del módulo, incluyendo celdas, espacio intercelular, contactos y marco del mismo.

$$\eta_{Areatotal} = \frac{P_{max}}{A_T E_T}, \quad (2.11)$$

donde: $\eta_{Areatotal}$ es la eficiencia con respecto al área total, P_{max} es la potencia máxima que puede generar el dispositivo, A_T es el área total del mismo y E_T es la radiación solar incidente total.

Eficiencia con respecto al área de la celda.

Es una versión modificada de la anterior, en la que sólo se considera el área cubierta por las células dentro del módulo ignorando el espacio entre células y el marco del módulo. De esta manera se evita el efecto de marcos muy grandes, que en realidad no afectan a la calidad de la celda FV. Para calcularla sólo se sustituye el área total por el área de la celda en la ecuación 2.11.

eficiencia con respecto al área activa de la celda.

Esta definición implica el cálculo de la eficiencia basada solamente en el área del dispositivo que está expuesta a la luz solar incidente. Las áreas sombreadas por los contactos o las rejillas de las celdas no estarían incluidas. Esta es la eficiencia que nos ofrece siempre un valor mayor, aunque normalmente sólo se utiliza para celdas individuales y en resultados de laboratorio, y no en dispositivos comerciales.

2.5.2. Pruebas y eficiencia de los módulos.

Así como las celdas individuales pueden ser caracterizados también los módulos pueden serlo. Para las pruebas o mediciones se deben controlar las temperaturas del módulo, el espectro de luz y la iluminación para lo que se utilizan las siguientes condiciones estándar (STC, *Standard Test Conditions*):

- Intensidad de luz $1KW/m^2$
- Contenido espectral correspondiente a un estándar *AM1.5*
- Temperatura de operación de $25^{\circ}C$

Por otra parte cabe señalar, que la eficiencia de un módulo siempre es menor que la suma directa de las eficiencias de las celdas individuales. Además de destacar que para el caso de los dispositivos de Silicio el voltaje del módulo se reduce al aumentar la temperatura de operación y, aunque la corriente aumenta ligeramente, el efecto general es que se reduzca la eficiencia. Para el caso de las DSSCs es lo contrario.

Capítulo 3

TRANSFERENCIA DE CALOR.

El calor es la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperatura mientras que el interés de la termodinámica es cuantificar el calor transferido en un sistema al pasar de un proceso a otro. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esas transferencias de energía se le denomina “transferencia de calor y el cual esta determinado por tres mecanismos: Conducción, convección y radiación.

3.1. Transferencia de calor por el mecanismo de conducción.

La conducción es la transferencia de energía que se da, de las partículas más energéticas de una sustancia a las partículas adyacentes menos energéticas. La conducción de calor se puede dar en sólidos, líquidos y gases.

La Ley de Fourier sobre la conducción de calor describe matemáticamente en la ecuación 3.1.

$$\dot{Q}_{cond} = -K\bar{V}T, \quad (3.1)$$

donde \bar{V} representa la ecuación dentro de los tres componentes:

$$\dot{Q}_x = -K \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (3.2)$$

$$\dot{Q}_y = -K \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (3.3)$$

$$\dot{Q}_z = -K \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3.4)$$

donde: K es la conductividad térmica del material, la cual es una medida de la capacidad de un material para conducir calor y $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de la temperatura.

3.1.1. Generación de calor.

Es el medio a través del cual se transfiere calor al convertir la energía mecánica, eléctrica, nuclear o química en energía térmica (calor). La generación de calor es un fenómeno volumétrico, es decir, ocurre en todo el medio, razón por la cual se especifica como unidad de volumen (W/m^3).

$$\dot{E}_{gen} = \int \dot{e}_{gen} dV. \quad (3.5)$$

3.1.2. Difusividad térmica.

La difusividad térmica es una propiedad de los materiales que aparece en los problemas de transferencia de calor en régimen transitorio, la cual representa que tan rápido se difunde el calor por un material. Ésta propiedad se define de acuerdo a la ecuación 3.6.

$$\alpha = \frac{K}{\rho Cp}, \quad (3.6)$$

donde: ρCp que es la capacidad calorífica que representa cuanta energía almacena un material por unidad de volumen, ρ es la densidad y Cp es el calor específico.

La conductividad térmica es una propiedad que depende de la posición y de la temperatura, por lo que varía a través del tiempo. Afortunadamente, muchos materiales están muy cercanos a tener valores de K pudiendo asumir un valor de conductividad térmica constante.

La conductividad térmica que depende de la posición y de la temperatura, se representa con la ecuación 3.7.

$$K = k[\vec{r}, T(\vec{r}, t)]. \quad (3.7)$$

3.1.3. Ecuaciones de transferencia de calor por conducción.

Existen diferentes ecuaciones para describir la transferencia de calor por conducción: con generación o sin generación de calor, en régimen estacionario o en régimen transitorio, con conductividad variable o conductividad constante y de acuerdo a el número de dimensiones a considerar.

Ecuación de transferencia de calor en estado transitorio con generación de calor en una dimensión, K variable (ecuación 3.8):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3.8)$$

Ecuación de transferencia de calor en estado transitorio con generación de calor en una dimensión, K constante (ecuación 3.9):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3.9)$$

Ecuación de transferencia de calor en estado estacionario con generación de calor en una dimensión (ecuación 3.10):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{K} = 0. \quad (3.10)$$

Ecuación de transferencia de calor en régimen estacionario sin generación de calor en una dimensión (ecuación 3.11):

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0. \quad (3.11)$$

Por otro lado, a continuación se presentan las ecuaciones de transferencia de calor considerando los tres componentes: La ecuación de Fourier-Biot (ecuación 3.12), la ecuación de Poisson (ecuación 3.13), la ecuación de difusión la cual es similar a la de Fourier-Biot pero sin incluir el término de generación de calor (ecuación 3.14) y finalmente la ecuación de Laplace (ecuación 3.15).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{K} = 0, \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.15)$$

donde: T es la temperatura y t es el tiempo.

3.1.4. Condiciones de frontera.

Debido a que las ecuaciones diferenciales no incorporan información relacionada con las condiciones sobre las superficies del medio, es necesario expresar las condiciones térmicas en las fronteras, las cuales se llaman *condiciones de frontera*. Es decir, para obtener una solución única en un problema de transferencia de calor se necesita especificar más que sólo la ecuación diferencial que lo rige, es necesario fijar algunas condiciones que la satisfagan.

A continuación se explicará de manera breve las condiciones de frontera que se encuentran con mayor frecuencia:

1. Temperatura específica.

En la figura 3.1 se muestran los valores de la temperatura específica en la superficie, posición 0 (T_1) y la temperatura específica, posición L (T_2) en un tiempo dado. Las temperaturas pueden ser constantes.

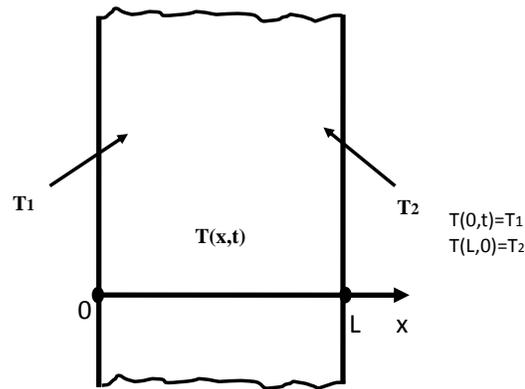


Figura 3.1: Condiciones de frontera (temperatura específica).

2. Flujo específico de calor.

El flujo de calor se expresa con la ley de Fourier (ecuación 3.16) y sus unidades son W/m^2 al ser la velocidad de transferencia de calor por unidad de área superficial. En la figura 3.2 se puede ver representada esta condición de frontera.

$$\dot{q} = -K \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (3.16)$$

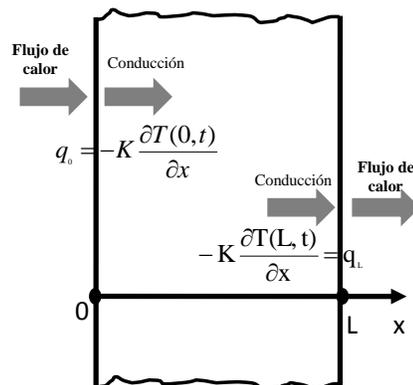


Figura 3.2: Condiciones de frontera (flujo de calor específico).

Casos especiales:

Frontera aislada.

Esta condición especial hace referencia a un flujo de calor de cero; es decir, no hay entrada ni salida de calor en aquellas superficies donde se define este tipo de caso. Véase figura 3.3.

Sobre una superficie aislada, la primera derivada de la temperatura con respecto a la variable espacial es cero [42].

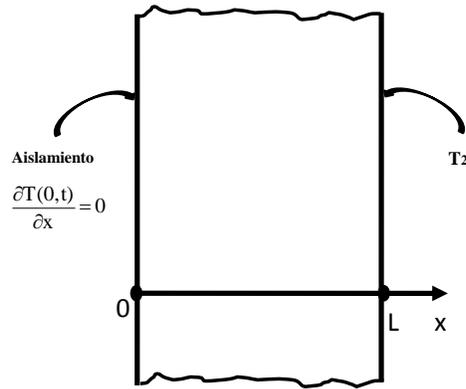


Figura 3.3: Pared plana con aislamiento térmico.

Simetría térmica.

Algunos problemas de transferencia de calor poseen simetría térmica; es decir, si todas las superficies de una geometría están sujetas a las mismas condiciones térmicas y la geometría tiene la misma forma, la distribución de la temperatura será igual en ambos lados con respecto al plano medio, véase la figura 3.4.

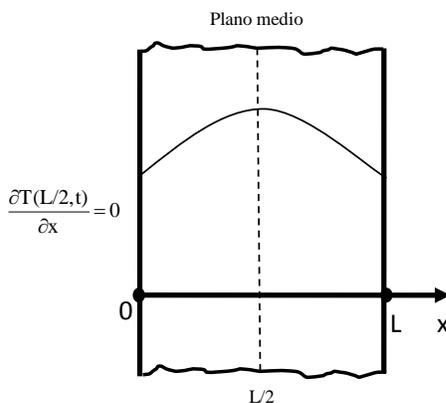


Figura 3.4: Simetría en la distribución de temperatura con respecto al plano medio.

3. Convección de frontera.

La condición de convección de frontera se basa en un balance de energía superficial expresada como [42]:

**Conducción de calor en la superficie en una dirección seleccionada =
convección de calor en la superficie en la misma dirección**

Las condiciones de convección de frontera en un medio unidimensional sobre ambas superficies se pueden expresar mediante la ecuaciones 3.17 y 3.18; y la figura 3.5 muestra el balance de energía descrito anteriormente.

$$-K = \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h_1 [T_{\infty 1} - T(0, t)] \quad (3.17)$$

y

$$-K = \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_2 [T(L, t) - T_{\infty 2}]. \quad (3.18)$$

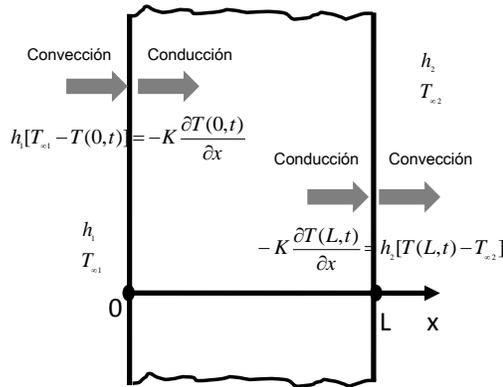


Figura 3.5: Condiciones de frontera de convección.

- Condición de radiación de frontera. Al que en la condición de convección de frontera, se puede utilizar un balance de energía para expresar la condición de radiación de frontera como [42]:

**Conducción de calor en la superficie, en una dirección seleccionada =
intercambio de radiación en la superficie, en la misma dirección**

Las condiciones de radiación de frontera en un medio unidimensional sobre ambas superficies se pueden expresar mediante las ecuaciones 3.19 y 3.20; y la figura ?? muestra el balance de energía descrito anteriormente.

$$-K \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \epsilon_1 \sigma [T_{aire,1}^4 - T(0, t)^4] \quad (3.19)$$

y

$$-\frac{\partial T(L,t)}{\partial t} = \varepsilon_2 \sigma [T(L,t)^4 - T_{alred,2}^4]. \quad (3.20)$$

Donde, ε es la emisividad y σ la absortividad. Propiedades que se describen en la sección de “radiación”.

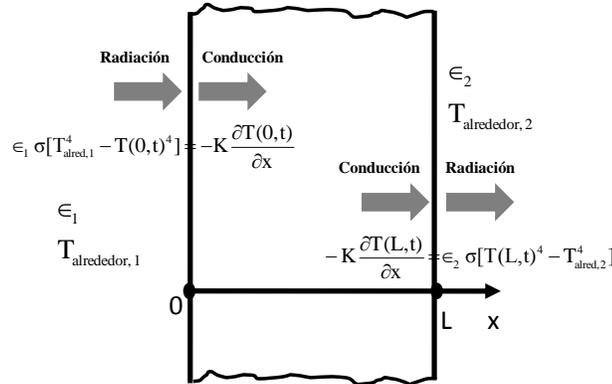


Figura 3.6: Condiciones de frontera de radiación.

5. Condiciones de frontera en las interfaces.

Cuando tenemos algún caso donde un cuerpo esta formado por capas de materiales diferentes, es necesario determinar la transferencia de calor entre cada capa. A esto se le conoce como condición de frontera en la interfaz. Este tipo de condición de frontera debe de cumplir con los siguientes puntos:

- Las dos capas que están en contacto deben tener la misma temperatura en el área de contacto.
- Una interfaz no puede almacenar energía y por lo tanto, el flujo de calor sobre ambos lados de la interfaz debe ser el mismo.

$$T_A(x_0, t) = T_B(X_0, t). \quad (3.21)$$

$$-K_A \frac{\partial T_A(x_0, t)}{\partial x} = -K_B \frac{\partial T_B(x_0, t)}{\partial x}. \quad (3.22)$$

6. Condiciones de frontera generalizadas.

Este tipo de condiciones hace referencia a que un problema de transferencia de calor puede tener varias condiciones de transferencia de calor de manera simultanea.

3.1.5. Resistencia térmica.

Existe una analogía entre la transferencia de calor \dot{q} (ecuaciones 3.24 y 3.25) y el flujo de corriente eléctrica I (3.26 y 3.27).

La conducción de calor a través de una pared plana se puede expresar de acuerdo a la ecuación 3.23.

$$\dot{q}_{cond,pared} = KA \frac{T_1 - T_2}{L}, \quad (3.23)$$

ó lo que es igual:

$$\dot{q}_{cond,pared} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}}, \quad (3.24)$$

donde: R es la resistencia térmica y se expresa en la ecuación 3.25.

$$R_{pared} = \frac{L}{KA}. \quad (3.25)$$

La resistencia a la conducción de la pared depende de la configuración geométrica y de las propiedades térmicas del medio [42].

Por otro lado, en cuanto al flujo de corriente eléctrica las expresiones matemáticas son las siguientes:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R_{elec}}, \quad (3.26)$$

donde: R_e es la resistencia eléctrica y se expresa como:

$$R_{elec} = \frac{L}{\sigma_e A}. \quad (3.27)$$

Finalmente, para integrar las condiciones de frontera de convección y de radiación en la presente analogía es importante conocer las siguientes expresiones matemáticas:

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} A_s}, \quad (3.28)$$

donde: R_{conv} es la resistencia a la convección, h_{conv} es el coeficiente de convección y A_s es el área superficial.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_s}, \quad (3.29)$$

donde: R_{rad} es la resistencia a la radiación y h_{rad} es el coeficiente de radiación, el cual se expresa en la ecuación 3.30.

$$h_{rad} = \epsilon\sigma(T_S^2 + T_{alred}^2)(T_s + T_{alred}) = \frac{\dot{q}_{rad}}{A_s(T_s - T_{alred})}. \quad (3.30)$$

En caso de tener un problema de transferencia de calor con condiciones de frontera simultaneas (condición de convección de frontera y condición de radiación de frontera)

es útil definir el coeficiente de transferencia de calor combinado $h_{combinado}$, el cual es simplemente la suma del coeficiente de convección y el de radiación, como se expresa en la ecuación 3.31 y se muestra en la figura 3.7.

$$h_{combinado} = h_{conv} + h_{rad}. \quad (3.31)$$

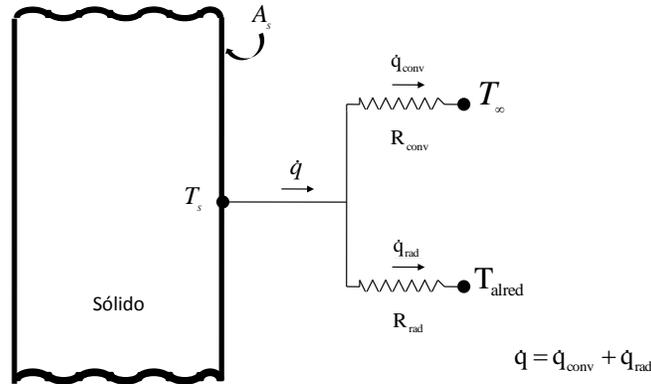


Figura 3.7: Esquema para las resistencias combinadas a la convección y a la radiación.

3.2. Transferencia de calor por el mecanismo de convección.

La transferencia de calor a través de un fluido puede ser por conducción pero también por convección. Esto depende de la presencia de movimiento de un fluido; es decir, en caso de que el fluido presente movimiento se considera una transferencia de calor por convección, de lo contrario se considera por conducción.

“Entre más alta es la velocidad del fluido, mayor es la velocidad de la transferencia de calor” [42]

Las propiedades de las que depende este mecanismo de transferencia de calor son: la viscosidad dinámica μ , la densidad ρ , el calor específico del fluido C_p , la velocidad del fluido v ; así como de la configuración geométrica y del tipo de flujo del fluido (laminar o turbulento).

La expresión matemática de la transferencia de calor por convección se describe con la ley de enfriamiento de Newton (ecuación 3.32).

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty), \quad (3.32)$$

donde: h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido por unidad de área superficial y

por el diferencial de la temperatura. A_s es el área superficial, T_s la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido.

Cabe destacar, que el coeficiente de transferencia de calor por convección h depende de múltiples variables y por lo tanto es difícil de determinar; además, varía a lo largo de la dirección del flujo.

$$h = \frac{-K_{fluido}(\partial T/\partial y)_{y=0}}{T_s - T_\infty}. \quad (3.33)$$

En la ecuación 3.33 se muestra la expresión que determina el coeficiente de transferencia de calor por convección en diferentes puntos del dominio. En el caso de las DSSCs se considera que $h = 5.82 + 4.07v$ [8] [26].

3.2.1. Conceptos principales en el mecanismo de convección.

Cuando se habla de transferencia de calor por convección es importante tener en cuenta diversos conceptos, los cuales se mencionan a continuación:

- **Estado estacionario:** hace referencia a que no hay cambio en un punto dado con respecto al tiempo.
- **Flujo uniforme:** hace referencia a que no hay cambios de calor con respecto a la posición.
- **Flujo laminar:** es el movimiento altamente ordenado de los fluidos, caracterizado por capas suaves.
- **Flujo turbulento:** es el movimiento altamente desordenado de los fluidos que en general se obtiene a altas velocidades.

3.2.2. Clasificación de flujo de fluidos.

La transferencia de calor esta íntimamente ligada a la mecánica de fluidos, la cual es la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos y su interacción con los sólidos o con otros fluidos en las fronteras. Existen varias formas de clasificar dichos fluidos. A continuación se explicaran algunas de ellas:

Flujo compresible e incompresible.

Se dice que un flujo es incompresible si la densidad permanece casi constante en toda la extensión del flujo, y por lo tanto un flujo compresible sería aquel que tiene cambios en su densidad. Prácticamente el flujo de los líquidos son incompresibles aunque no necesariamente el flujo de todos los gases son compresibles. La variación en la densidad en los flujos de los gases y, como consecuencia, la exactitud de aproximación que se hace al modelar esos flujos como incompresibles depende del número de Mach, definido como:

$$Ma = \frac{V}{c}, \quad (3.34)$$

donde: c es la velocidad del sonido (346 m/s).

Un flujo se considera incompresible cuando los valores del número de Mach se encuentran por debajo de 0.3, lo equivalente a velocidades de flujo menores a 100 m/s.

Flujo laminar y flujo turbulento.

En la sección pasada (conceptos principales por el mecanismo de convección) se define lo que es un flujo laminar y un flujo turbulento. Pero cabe destacar, que esta clasificación depende del número de Reynolds (Re), el cual es una cantidad adimensional y se expresa para flujo externo como las fuerzas de inercia/fuerzas viscosas:

$$Re = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu}, \quad (3.35)$$

donde: V es la velocidad de corriente, L_c es la longitud característica de la configuración geométrica, ν es la viscosidad cinemática del fluido y μ es la viscosidad dinámica.

A números de Reynolds grandes, las fuerzas de inercia, que son proporcionales a la densidad y a la velocidad del fluido, son grandes en relación con las fuerzas viscosas y, como consecuencia, estas últimas no pueden impedir las fluctuaciones aleatorias y rápidas del fluido. Sin embargo, a números de Reynolds pequeños o moderados, las fuerzas viscosas son suficientemente grandes como para suprimir estas fluctuaciones y mantener “alineado” el fluido. Por lo tanto, en el primer caso el flujo es turbulento y en el segundo, laminar [42].

Cuando el valor de Reynolds es de 1×10^5 es cuando ocurre la transición entre un flujo laminar a un flujo turbulento.

3.3. Transferencia de calor por el mecanismo de radiación.

La radiación difiere respecto a los otros mecanismos de transferencia de calor en que no requiere de la presencia de un medio material para que se pueda llevar a cabo. Además, puede ocurrir en sólidos y en fluido al igual que en la conducción.

La radiación electromagnética es aquella que ocurre tanto en campos eléctricos como magnéticos y existen tres tipos de ella: la luz, la cual es la parte visible del espectro electromagnético y se da en el rango de longitud de onda de 0.40 y 0.76 μm . La radiación infrarroja, la cual es emitida por un cuerpo a temperatura ambiente en el rango de 0.76-100 μm . La radiación ultra-violeta(UV), la cual es conocida por ser la que causa daño a los seres vivos e incluye el extremo de baja longitud de onda del espectro de radiación térmica (0.01 μm - 0.40 μm).

El tipo de radiación electromagnética pertinente para la transferencia de calor es la radiación térmica, emitida como resultado de las transiciones energéticas de las moléculas, los átomos y los electrones de una sustancia [42].

Cuando se habla de radiación, es de mucha pertinencia hablar del “Sol”, debido a que es nuestra principal fuente luminosa; es decir, el principal cuerpo que emite radiación en el rango visible. A la radiación que emite el Sol se le conoce como “radiación solar” se da en el rango de $0.3\text{-}3\mu\text{m}$. La mitad de la radiación solar es luz y la restante es infrarroja.

3.3.1. Cuerpo negro.

El cuerpo negro es un cuerpo que teóricamente emite y absorbe toda la radiación incidente. La radiación emitida por un cuerpo negro fue determinada por Joseph Stefan en 1879 como la unidad de tiempo por unidad de área superficial:

$$E_b(T) = \sigma T^4, \quad (3.36)$$

donde: $\sigma=5.670 \times 10^{-8}$ y es la constante de Stefan Boltzman.

3.3.2. Radiación incidente.

La radiación incidente es la energía de radiación dG que incide desde la dirección (θ, ϕ) sobre la unidad de área superficial receptora normal a esta dirección como se ilustra en la figura 3.8).

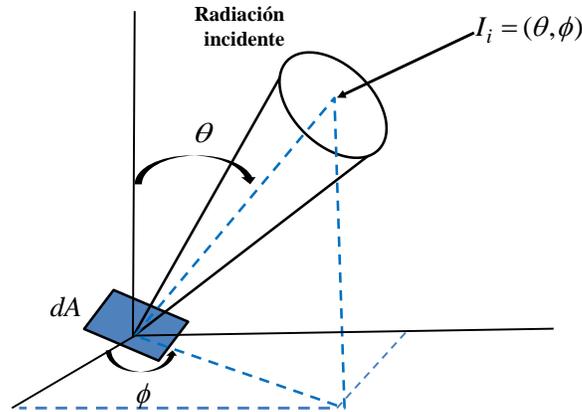


Figura 3.8: Radiación incidente sobre una superficie (θ, ϕ) [42].

El flujo de radiación incidente sobre una superficie desde todas direcciones se llama irradiación G y se expresa como:

$$G = \int_{\text{hemisferio}} dG = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_i(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi. \quad (3.37)$$

Además, la radiación incidente puede manifestarse en tres formas diferentes:

- **Radiación directa:** Es aquella que proviene directamente del sol.
- **La radiación difusa:** Es aquella que proviene de la atmósfera pero que también es parte de la radiación solar.
- **Radiación reflejada:** Es aquella que se recibe por parte de la superficie terrestre y depende del coeficiente de reflexión o albedo.

3.3.3. Ley de Kirchoff

La ley de Kirchoff es consecuencia de las leyes de la termodinámica. La cual expresa que la cantidad de energía emitida por un cuerpo hacia una dirección es la misma a la cantidad absorbida hacia la misma dirección cuando dicho cuerpo se encuentra en equilibrio. Observe la ecuación 3.38, donde el primer término de la ecuación representa la energía emitida y el segundo término la energía absorbida.

$$\epsilon_{\lambda}(T, \theta, \phi) = \alpha_{\lambda}(T, \theta, \phi). \quad (3.38)$$

La ecuación 3.38 puede simplificarse para una superficie difusa donde la emitancia y la absorbancia no depende de los ángulos, considerando además, una superficie gris (ecuación 3.39).

$$\epsilon(T) = \alpha(T). \quad (3.39)$$

Finalmente al considerar dos superficies difusas con la ley de Kirchoff y dividir la segunda integral por αT_2^4 se obtiene la ecuación 3.40 del flujo de calor de radiación que se puede simplificar como la ecuación 3.41.

$$q_{net} = \epsilon(T_1)\sigma T_1^4 - \alpha_1(T_1, T_2)\sigma T_2^4, \quad (3.40)$$

donde: el primer término representa la energía emitida por la superficie 1 y el segundo término la energía absorbida por la superficie 2.

$$q_{net} = \epsilon_1\sigma(T_1^4 - T_2^4). \quad (3.41)$$

3.3.4. Definiciones básicas de la radiación.

- **Emisividad ϵ :** es una relación entre la radiación que difunde una superficie a una temperatura dada y la radiación difundida por un cuerpo negro a esa misma temperatura. Los valores de la emisividad se encuentran entre 0 y 1, en el caso de un cuerpo negro su emisividad es igual a 1.
- **Absortividad α :** es aquella fracción de irradiación absorbida por una superficie.

$$\alpha = \frac{G_{absorbida}}{G} \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (3.42)$$

- **Reflectividad ρ :** es aquella fracción de la irradiación que refleja la superficie.

$$\rho = \frac{G_{reflejada}}{G} \quad 0 \leq \rho \leq 1. \quad (3.43)$$

- **Transmisividad τ** : es la fracción transmitida; es decir, transferida. En el caso de una superficie opaca $\tau = 0$ y por lo tanto $\alpha + \rho = 1$. De lo contrario, si $\tau > 0$ se trata de una material semitransparente.

$$\tau = \frac{G_{transmitida}}{G} \quad 0 \leq \tau \leq 1. \quad (3.44)$$

Para una mejor comprensión de los últimos tres términos observe la figura 3.9:

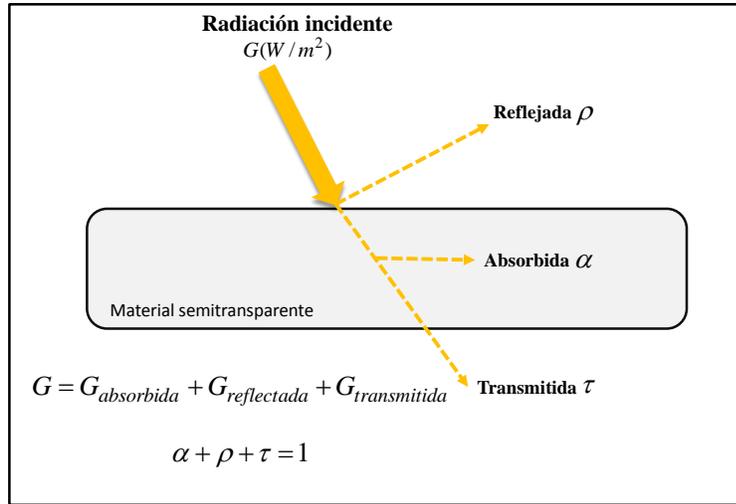


Figura 3.9: Absortividad, reflectividad y transmitividad en un material semitransparente.

3.3.5. Efecto invernadero.

El vidrio transmite más del 90% de la radiación en el rango visible, lo que quiere decir que es prácticamente opaco a la radiación; así que el vidrio emite más del 90% de la radiación y cae en la región infrarroja. Como consecuencia, el vidrio permite que entre la radiación solar pero no deja que escape la radiación infrarroja proveniente de las superficies interiores, por lo que causa una elevación en la temperatura interior. A esto se le conoce como efecto invernadero. Véase la figura 3.10.

3.3.6. Radiación solar.

El Sol es un cuerpo casi esférico que emite radiación en forma continua ($E_{sol} \approx 3.8 \times 10^{26} W$) y alrededor de $1.7 \times 10^{17} W$ choca contra la tierra [42]. La energía solar que llega a la atmósfera terrestre se llama irradiancia solar total (G_s) y consta de dos partes: radiación solar directa (G_D) y radiación solar difusa (G_d). La directa llega a la superficie terrestre sin ser dispersada ni absorbida, mientras que la difusa llega de manera uniforme desde todas las direcciones.

$$G_{solar} = G_D \cos \theta + G_d, \quad (3.45)$$

donde: θ el ángulo de incidencia de la radiación solar directa.

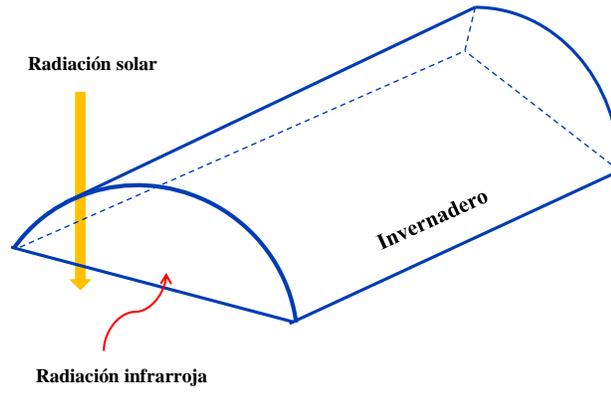


Figura 3.10: Efecto invernadero.

Capítulo 4

METODOLOGÍA.

4.1. Análisis del modelo.

4.1.1. Modelo publicado por Chen et al.

La metodología de la presente tesis parte del trabajo de investigación publicado por Chen et al. [8], el cual presenta un modelo de transferencia de calor utilizando un balance de energía (como se describe en el estado del arte) e incluye las siguientes consideraciones principales:

- El modelo es transitorio, presenta resultados en un intervalo de tiempo correspondiente de las 8 a las 18 horas.
- La temperatura es uniforme en todo el módulo solar; es decir, no se considera el comportamiento de la transferencia de calor con respecto a las variables espaciales.
- El modelo resuelve las ecuaciones de transferencia de calor considerando que todas las capas del módulo solar se comportan como cuerpos sólidos (incluyendo la capa de aire).
- No se consideran las variables de velocidad del viento hacia una dirección, solo varía el coeficiente de convección h .
- La temperatura ambiente es constante.
- El calor específico, la densidad el coeficiente de conductividad se consideran constantes.

El modelo físico que se presenta en dicha publicación (figura 4.1) analiza la conducción de calor a través de cuatro capas que compone una DSSCs (cubierta de vidrio, la DSSC (la capa activa), la película que funge como sellador de la capa activa y el sustrato de vidrio) y además se considera una capa de aire que se encuentra entre la cubierta de vidrio y la capa activa. Como condiciones de frontera se presenta: la convección entre la cubierta de vidrio y el medio ambiente así como el sustrato de vidrio y el medio ambiente, la radiación emitida por la cubierta y el sustrato de vidrio y finalmente una fuente de calor hacia el módulo, la cual es la irradiancia emitida por el sol.

Por otro lado, el modelo matemático representado por Chen et al. consiste en el intercambio de temperatura de la cubierta de vidrio (g_1) con el medio ambiente y la parte activa de la celda (dsc)(ecuación 4.1); el intercambio de temperatura de la parte activa de la celda con la cubierta de vidrio y el sustrato de vidrio (g_2) (ecuación 4.2); y en el intercambio de temperatura del sustrato de vidrio con la parte activa de la celda y el medio ambiente (ecuación 4.3).

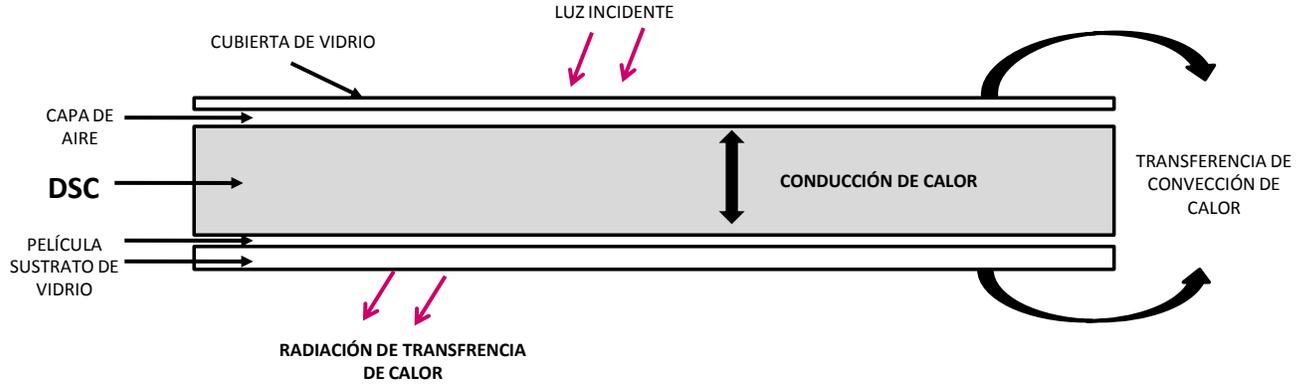


Figura 4.1: Modelo físico del artículo publicado por Chen et al.

$$Cp_{g1}Ad_{g1}\rho_g \frac{dT_{g1}}{dt} = A\alpha_{g1}Sun + A \frac{T_{dsc} - T_{g1}}{R_{dsc/g1} + (d_{g1}/K_g)} - hA(T_{g1} - T_{cielo}) - A\epsilon\sigma(T_{g1}^4 - T_{cielo}^4). \quad (4.1)$$

$$Cp_{dsc}Ad_{dsc}\rho_{dsc} \frac{dT_{dsc}}{dt} = A\alpha_{dsc}Sun - P_{out} - A \frac{T_{ds} - T_{g1}}{R_{dsc/g1} + (d_{g1}/K_g)} - A \frac{T_{ds} - T_{g2}}{R_{dsc/g2}}. \quad (4.2)$$

$$Cp_{g2}Ad_{g2}\rho_g \frac{dT_{g2}}{dt} = A\alpha_{g1}Sun - A \frac{T_{dsc} - T_{g2}}{R_{dsc/g2} + (d_{g2}/K_g)} - hA(T_{g2} - T_{aire}) - A\epsilon\sigma(T_{g2}^4 - T_{aire}^4). \quad (4.3)$$

La solución de las ecuaciones diferenciales se calcularon mediante el método de Euler. Se utiliza un valor inicial de las temperaturas de la cubierta de vidrio, la parte activa de la celda y el sustrato de vidrio para el primer paso de tiempo.

4.1.2. Modelo propuesto.

El modelo propuesto para la presente tesis cuenta con las siguientes consideraciones:

- Al igual que el modelo de Chen et al., la simulación es transitoria en un intervalo de tiempo correspondiente de las 8 a las 18 horas.

- La temperatura no es uniforme; es decir varía en el espacio y se considera las tres dimensiones del espacio (modelo 3D).
- El coeficiente de convección es variable.
- La temperatura ambiente es variable.
- Se estudia el contorno de temperaturas con respecto a la velocidad de viento a una dirección.
- La temperatura ambiente varía con respecto al tiempo.
- El calor específico, la densidad y el coeficiente de conductividad se consideran constantes.

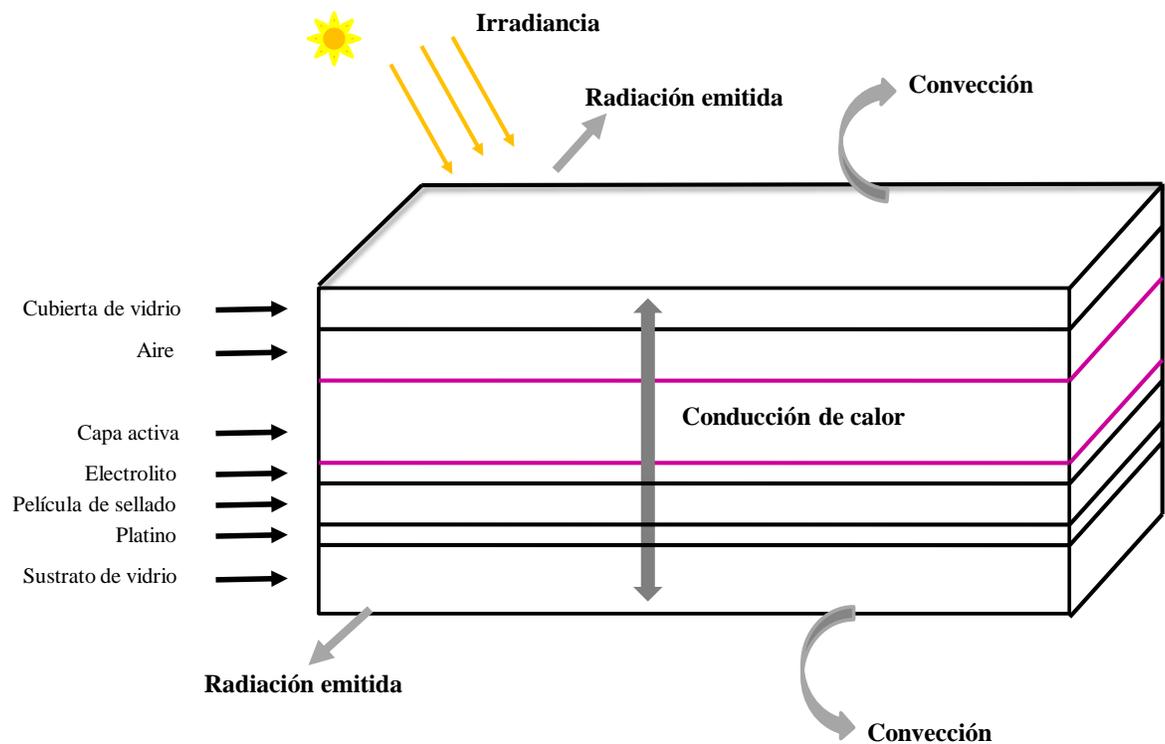


Figura 4.2: Modelo físico propuesto.

El modelo físico del presente modelo (figura 4.2) analiza la conducción de calor a través de siete capas que compone una DSSCs (cubierta de vidrio, una capa de aire, la capa activa, el electrolito, la película que funge como sellador, la capa de platino y el sustrato de vidrio). Al igual que el modelo físico anterior, las condiciones de frontera presentadas son: la convección entre la cubierta de vidrio y el medio ambiente así como

el sustrato de vidrio y el medio ambiente, la radiación emitida por la cubierta y el sustrato de vidrio y finalmente una fuente de calor hacia el módulo, la cual es la irradiancia emitida por el sol.

El modelo matemático consiste en el Método de Elementos Finitos (MEF), solucionado por el software “*Thermal Ansys 15*” cuyas ecuaciones se expresan a continuación.

La ecuación 4.4 es la ecuación gobernante en su forma diferencial para resolver la transferencia de calor entre las capas.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h e) = \nabla(K \nabla T) + Sh, \quad (4.4)$$

donde: Sh es el recurso de calor volumétrico y he es la entalpía sensible $\int_{T_{ref}}^T C_p dT$.

Además las condiciones de frontera se expresan mediante las siguientes ecuaciones: la ecuación 4.5 que expresa la condición de frontera referente a la radiación solar absorbida por la superficie incidente (cubierta de vidrio) y la superficie absorbida por la capa activa hacia la dirección “-y”. Las ecuaciones 4.6 y 4.7 que expresan la condición de frontera por convección de las superficies referentes a la cubierta y al sustrato de vidrio, simultáneamente. Y, finalmente las ecuaciones 4.8 y 4.9 que expresan la condición de frontera de radiación de igual forma, de la cubierta y el sustrato de vidrio.

$$\dot{q} = -K \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (4.5)$$

$$\dot{q}_{conv1} = h(T_c - T_{cielo}), \quad (4.6)$$

$$\dot{q}_{conv2} = h(T_s - T_{piso}), \quad (4.7)$$

$$\dot{q}_{rad1} = \epsilon \sigma (T_c^4 - T_{cielo}^4), \quad (4.8)$$

$$\dot{q}_{rad2} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{piso}^4), \quad (4.9)$$

donde: $T_{cielo} \cong T_{ambiente} - 6(K)$ y $T_{piso} \cong T_{ambiente}$.

La forma integral de la ecuación 4.4 para resolver el MEF se expresa de acuerdo a la ecuación 4.10 la cual incluye las condiciones de frontera.

$$\begin{aligned} \int_{vol} [\rho C_p \delta T \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - K \{ \nabla \}^T (\delta T) (\{ \nabla \} T)] d(vol) = \int_{S1} (\delta T) h (T_c - T_{cielo}) d(S1) + \\ \int_{S3} (\delta T) h (T_s - T_{piso}) d(S3) + \int_{S1} (\delta T) \epsilon \sigma (T_c^4 - T_{cielo}^4) d(S1) + \int_{S3} (\delta T) \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{piso}^4) \\ d(S3) - \int_{S1} (\delta T) q_{inc}^* d(s1) - \int_{S2} (\delta T) q_{dsc}^* d(s2), \quad (4.10) \end{aligned}$$

siendo: δT la temperatura virtual ($= \delta T(x, y, z, t)$), vol es el volumen del elemento, $S1$ la superficie incidente en la cubierta de vidrio, $S2$ la superficie de la capa activa de la DSC y $S3$ la superficie del sustrato de vidrio.

Finalmente, en la ecuación 4.11 se muestra la ecuación obtenida al unir todos los elementos para formar la matriz.

$$[Ce^b]\{\dot{T}e\} - [Ke^{tb}]\{\dot{T}e\} = \{Qe_1^c\} + \{Qe_3^c\} + \{Qe_1^r\} + \{Qe_3^r\} - \{Qe_1^f\} - \{Qe_2^f\}, \quad (4.11)$$

siendo:

$$[Ce^b] = \rho Cp \int_{vol} \{N\}^T d(vol), \quad (4.12)$$

$$[Ke^{tb}] = K \int_{vol} [B]^T [B] d(vol), \quad (4.13)$$

$$\{Qe_1^c\} = \int_{S1} T_B h \{N\} d(S1), \quad (4.14)$$

$$\{Qe_3^c\} = \int_{S3} T_B h \{N\} d(S3), \quad (4.15)$$

$$\{Qe_1^r\} = \int_{S1} \epsilon \sigma T_s^4 \{N\} d(S1), \quad (4.16)$$

$$\{Qe_3^r\} = \int_{S3} \epsilon \sigma T_s^4 \{N\} d(S3), \quad (4.17)$$

$$\{Qe_1^f\} = \int_{S1} \{N\} q^* d(S1) \quad (4.18)$$

$$\{Qe_2^f\} = \int_{S2} \{N\} q^* d(S2) \quad (4.19)$$

donde: $[Ce^b]$ es la matriz del término de calor específico, $[Ke^{tb}]$ la matriz del término de difusión, $\{Qe_1^c\}$ es el vector de convección de la superficie incidente, $\{Qe_3^c\}$ es el vector de convección del sustrato de vidrio, $\{Qe_1^r\}$ es el vector de la radiación de la superficie incidente, $\{Qe_3^r\}$ es el vector de la radiación de la superficie del sustrato de vidrio, $\{Qe_1^f\}$ es el vector del flujo de calor absorbida por la superficie de la capa incidente, $\{Qe_2^f\}$ el flujo de calor absorbido por la superficie de la capa activa, $\{N\} = \{N(X, Y, Z)\}$ la función de la forma del elemento, $\{Te\} = \{Te(t)\}$ el vector de la temperatura nodal, $\frac{\partial T}{\partial t} = \{N\}^T \{Te^*\}$ y $[B] = [L]\{N\}$.

4.2. Generación de la geometría en 3D.

La generación de la geometría del módulo DSSCs se llevó a cabo en el software de Design Modeler de Ansys, la cual se muestra en la figura 4.3. Las dimensiones corresponden a una longitud de 800mm de largo X 450mm de ancho, obteniendo como resultado un área de $0.36m^2$ y los espesores de cada una de las capas se muestran en la tabla 4.1.

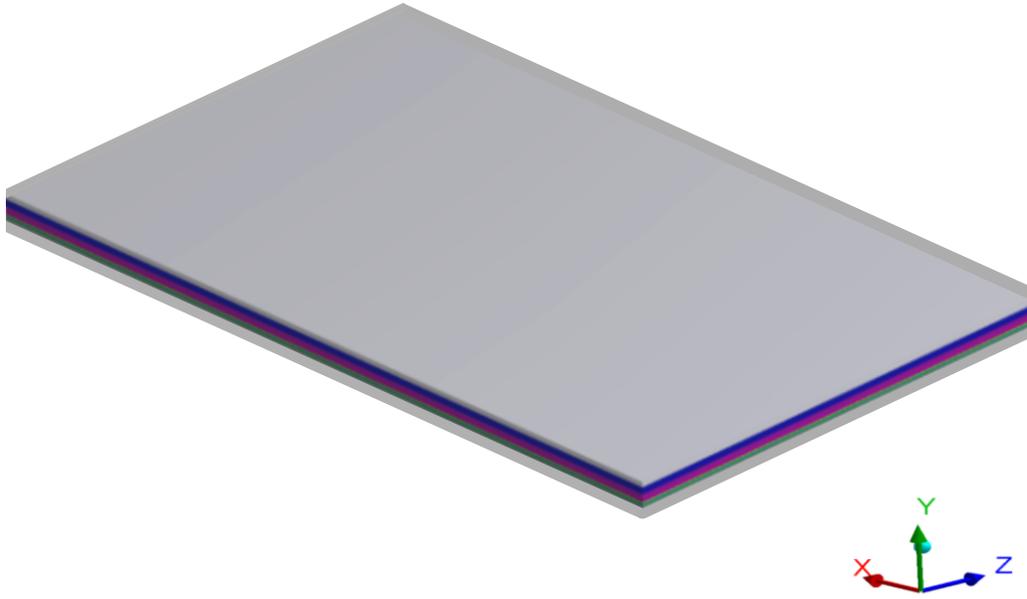


Figura 4.3: Geometría del módulo DSC en 3D.

Tabla 4.1: Espesores de las capas de la geometría.

Capa	Espesor(m)
Cubierta de vidrio	3e-003
Capa de aire	4e-003
Capa activa	4.6e-003
Electrolito	5e-004
Capa de sellado	1.6e-003
Platino	1e-003
Sustrato de vidrio	5e-003

4.3. Discretización de la geometría.

La discretización se llevó a cabo en el software Ansys Meshing, la cual corresponde a una malla hexaédrica con 475000 elementos (figura 4.4) y fue seleccionada a partir de

un análisis de independencia de malla con el fin de optimizar el recurso computacional sin comprometer la precisión del modelo. En este, se calculó el error relativo de la temperatura en la capa activa de la DSC para cuatro diferentes densidades de malla. Como se muestra en la tabla 4.2 la malla 2 presentó un error relativo de 0.003 % con respecto a la malla 1 (la malla con mayor densidad), lo que demuestra la confiabilidad de la malla 2. Adicional a esto, el recurso y tiempo de cómputo requerido por la malla 1 es mucho mayor que el requerido por la malla 2. Por lo anterior, se concluyó en utilizar la malla 2 en el presente estudio.

Tabla 4.2: Cálculo del error relativo.

No. de la malla	No. de elementos	Temperatura de la capa activa (K)	%Er
Malla 1	720000	308.53	-
Malla 2	475000	308.54	0.003
Malla 3	220000	308.48	0.016
Malla 4	1260	303.34	1.68



Figura 4.4: Malla hexaédrica de la geometría.

4.4. Materiales y sus propiedades térmicas.

Para poder resolver las ecuaciones propias de la transferencia de calor es importante definir sus propiedades físicas tal como la densidad (ρ) y las propiedades térmicas como la conductividad térmica (K) y el calor específico (Cp) de cada uno de los materiales que comprende la DSC. Los valores de dichas propiedades se muestran en la tabla 4.3.

4.5. Condiciones de frontera.

4.5.1. Flujo de calor.

La condición de frontera de flujo de calor se utilizó para definir la radiación incidente en la pared superior de la cubierta de vidrio y en la pared superior de la capa activa.

Tabla 4.3: Propiedades térmicas de los materiales que componen una DSCs.

Capa	Material	Densidad (kg/m^3)	Conductividad térmica (W/mC)	Calor específico (J/KgC)
Cubierta [8]	Vidrio	2500	0.9	540
Capa de aire	Aire	1.225	2.42e-2	1006.4
Capa activa [16]	TiO_2 + dye(Ru535)	2190	6.5	328.78
Electrolito [2]	Electrolito (I^-/I^{3-})	4933	0.449	429
Capa de sellado [8]	Solaronix	2500	0.02	840
Platino [2]	Platino	21450	71.6	133
Sustrato [8]	Vidrio	2500	0.9	540

Los datos utilizados se consultaron en "weather underground" [54] y se calcularon los promedios de la irradiación solar del mes de enero al mes de diciembre a partir del año 2010 al 2019 para Cuernavaca, Morelos con una latitud de 18.92° y una longitud de -99.19° como se muestra en la tabla 4.4 y en la gráfica de la figura 4.5, concluyendo que el mes de abril es el mes con mas recurso solar y el mes de septiembre con menor recurso, para dicha localización.

De igual manera se calcularon los promedios de la irradiancia solar para Mérida, Yucatán con una latitud de 20.97° y una longitud de -89.62° , lo cual se muestra en la tabla 4.5 y en la gráfica de la figura 4.6 Se concluyó que el mes de agosto es el mes con mayor recurso solar y el mes de enero con el mes de menor recurso solar.

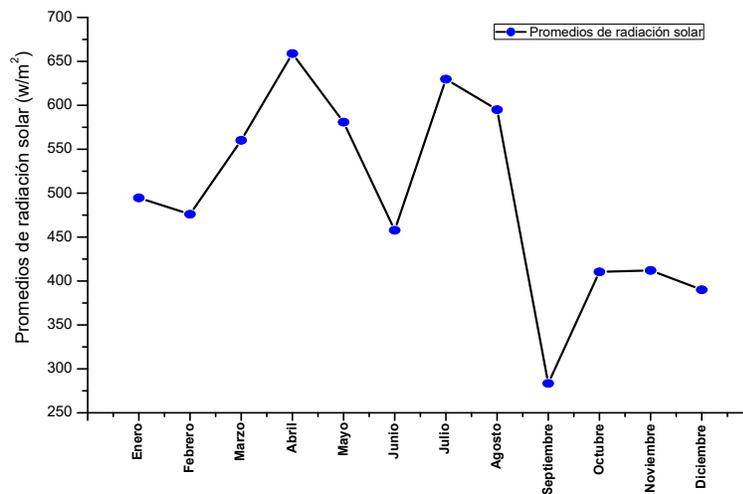
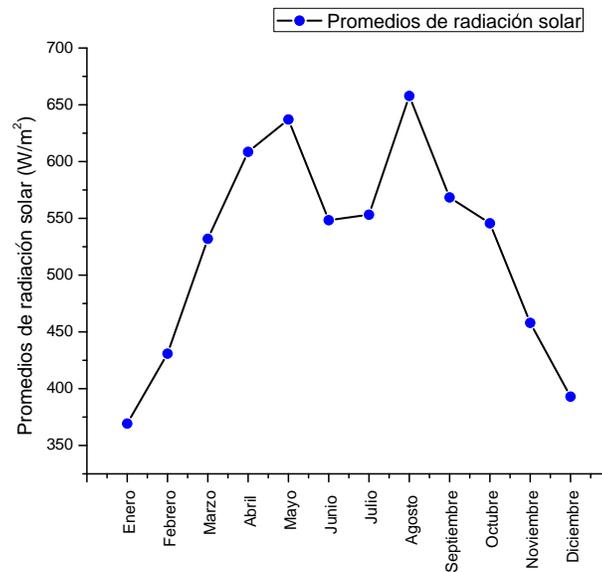
**Figura 4.5:** Promedios de la irradianción solar del 2010 al 2019 de las 8 a las 18 horas en Cuernavaca, Morelos (latitud 18.92° y longitud de -99.19°).

Tabla 4.4: Promedios de la irradiancia en Cuernavaca, Morelos (latitud 18.92° y longitud de -99.19°) de las 8 a las 18 horas.

Promedios de la irradianción solar W/m^2											
Ene	Feb	Mzo	Ab	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
494.63	476.03	560.17	658.90	580.84	457.83	629.80	595.02	283.47	410.42	412.08	390.07

Tabla 4.5: Promedios de la irradiancia en Mérida, Yucatán (latitud 20.97° y longitud de -89.62°) de las 8 a las 18 horas.

Promedios de la irradianción solar W/m^2											
Ene	Feb	Mzo	Ab	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
369.27	430.85	531.97	608.57	637.05	548.35	553.22	657.81	568.40	545.64	457.96	392.98

**Figura 4.6:** Promedios de la irradianción solar del 2010 al 2019 de las 8 a las 18 horas en Mérida, Yucatán (latitud 20.97° y longitud de -89.62°).

A partir de lo anterior, se obtuvieron los datos para el mes de abril del año 2019 y para el mes de septiembre del año 2019 de Cuernavaca, Morelos y los datos para el mes de agosto del año 2019 y para el mes de enero del año 2019 de Mérida, Yucatán, los cuales fueron utilizados como condiciones de frontera para cada paso de tiempo (figura 4.7 y 4.8) en conjunto con las propiedades ópticas del vidrio y de la capa activa, siendo la absorptividad (α) de 0.2 (capa semi-transparente) y de 1 (capa opaca), respectivamente. Y la transmitividad (τ) del vidrio de 0.8 [16]. Es decir, se desprecia el efecto de la reflectividad en el modelo. En la capa activa de la celda es importante restar el potencial correspondiente a la eficiencia del módulo solar como se define en la ecuación 4.20 y se

desprecia cualquier pérdida por conexión en serie y en paralelo de los módulos.

$$G_{dsc} = A\alpha_{dsc}Sun - P_{out}. \quad (4.20)$$

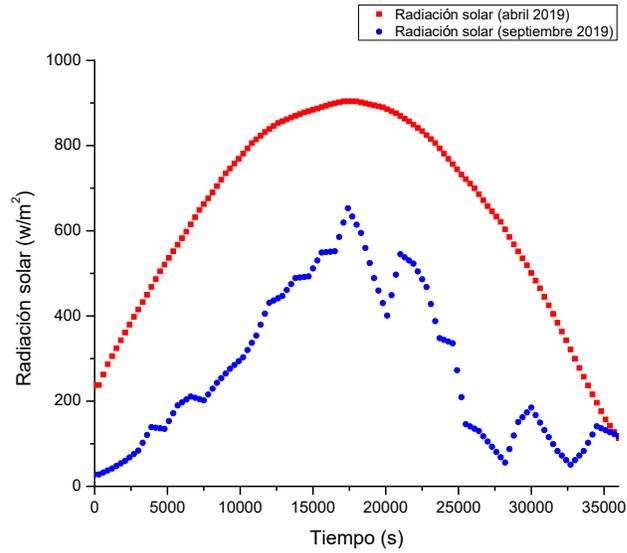


Figura 4.7: Promedios por hora diarios de la irradiación solar en el mes abril y en el mes de septiembre del año 2019 en Cuernavaca, Morelos.

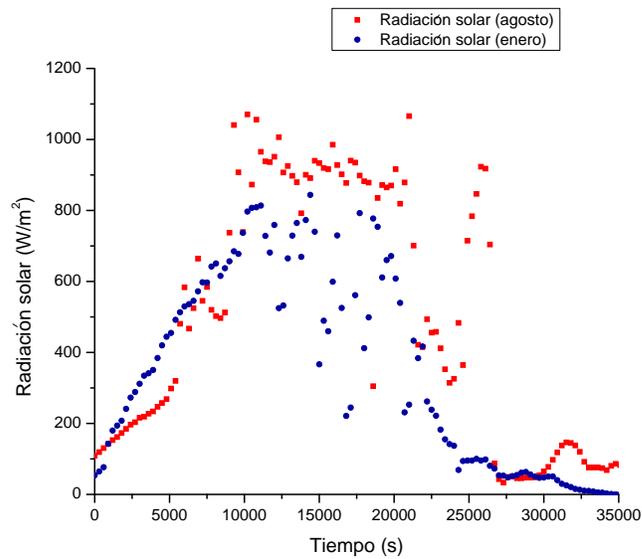


Figura 4.8: Promedios por hora diarios de la irradiación solar en el mes agosto y en el mes de enero del año 2019 en Mérida, Yucatán.

4.5.2. Radiación de calor.

La radiación de calor, como condición de frontera, se definió en la pared superior de la cubierta de vidrio y en la pared inferior del sustrato de vidrio. Es decir, el recurso de calor por radiación que es emitida por el módulo solar hacia el exterior. La emisividad del vidrio (ε) se consideró de 0.85 y la temperatura ambiente para el mes de abril y el mes de septiembre del 2019 (Cuernavaca, Morelos) se muestra en la figura 4.9 y para el mes de agosto y el mes de enero del 2019 (Mérida, Yucatán) se muestra en la figura 4.10.

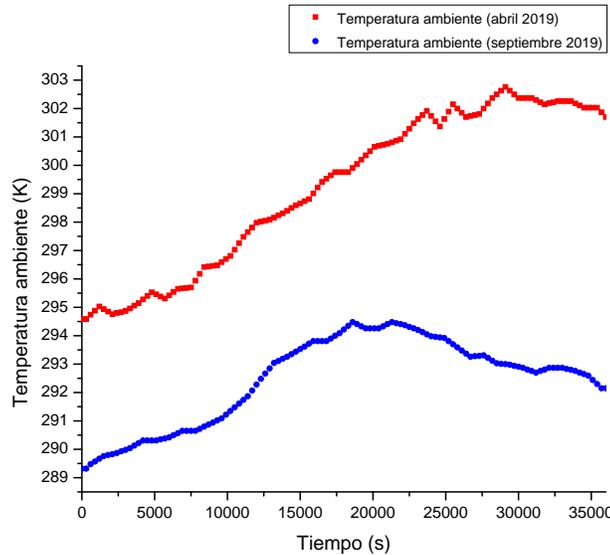


Figura 4.9: Promedios por hora diarios de la temperatura ambiente en el mes abril y en el mes de septiembre del año 2019 en Cuernavaca, Morelos.

Por otro lado cabe destacar que la temperatura ambiente hacia el cielo (temperatura donde se encuentra la cubierta de vidrio) es considerada como: $T_{cielo} = T_{amb} - 6K$ y la temperatura hacia el piso (temperatura del lado del sustrato de vidrio es considerada como: $T_{piso} \approx T_{amb}$ [34] [38] [15].

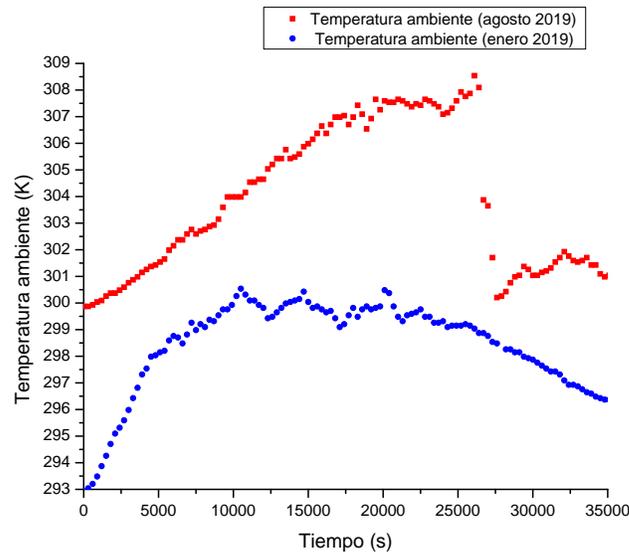


Figura 4.10: Promedios por hora diarios de la temperatura ambiente en el mes agosto y en el mes de enero del año 2019 en Mérida, Yucatán.

4.5.3. Convección de calor.

La condición de frontera de convección de calor fue calculada mediante la ecuación 4.21 [8] [26].

$$h = 5.82 + 4.07v \quad (4.21)$$

Las velocidades utilizadas se consideraron constante: 0m/s, 2m/s y 10 m/s. Dichas velocidades fueron simuladas para los dos meses de cada ciudad: abril y septiembre con los datos de las temperaturas ambiente de la figura 4.9, agosto y enero con los datos de la figura 4.10; al igual que en la condición de frontera por radiación.

4.6. Resolvedor.

El modelo se resolvió con un criterio de convergencia de $1e^{-3}$ y una tolerancia de $0.1 \text{ W}/m^2$. Además, de ser un modelo transitorio con un paso de tiempo de 300 s y 120 iteraciones; correspondientes a 10 horas (de las 8 horas a las 18 horas).

4.7. Verificación de los resultados.

El modelo de Chen et.al. [8], el cual se ha mencionado con anterioridad, fue utilizado para verificar los resultados del modelo propuesto en la presente tesis. La verificación consistió en crear un programa en el software Matlab que replicará el modelo propuesto por Chen et.al. Las condiciones de frontera y las propiedades utilizadas fueron las mismas para ambos modelos en dicha verificación. La programación en Matlab se puede

observar en el Apéndice A.

los resultados de la verificación se muestran en la tabla 4.6, en donde se observan las temperaturas a diferentes horas del día utilizando un coeficiente de convección de 5.82 (equivalente a una velocidad de viento de 2 m/s) y una convección de 47.6 (equivalente a una velocidad de viento de 10 m/s); además, de incluir los errores relativos entre los valores de temperatura del modelo de Chen et. al. y el modelo propuesto. Cabe aclarar que el error relativo para las 8:00 am es igual a 1 debido a que es el valor inicial para ambos modelos.

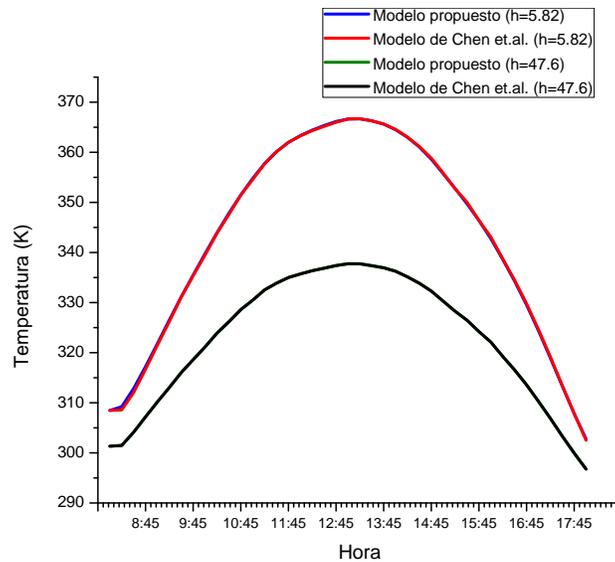


Figura 4.11: Gráfica de comparación de los resultados de las temperaturas resultantes para el modelo propuesto y el modelo de Chen et. al.

La figura 4.11 representa el comportamiento de las temperaturas comparando los dos modelos, donde se puede observar gráficamente que la diferencia del valor de la temperatura de un modelo con el otro es insignificante y se demuestra con el cálculo de los errores relativos antes mencionados. Con color rojo se muestra la gráfica de las temperaturas del modelo propuesto con un coeficiente de convección de 5.82; con azul los resultados de las temperaturas del modelo de Chen et. al. con un coeficiente de convección de 5.82; de color verde el modelo propuesto con un coeficiente de convección de 47.6; y de color negro el modelo de Chen et. al. con un coeficiente de convección de 47.6.

Tabla 4.6: Errores relativos de la verificación del modelo propuesto con el modelo de Chen et. al.

Hora	Temperatura con h=5.82(K) (propuesto)	Temperatura con h=5.82(K) (Chen et. al.)	Error relativo(%)	Temperatura con h=47.6(K) (propuesto)	Temperatura con h=5.82(K) (Chen et.al.)	Error relativo(%)
08:00:00 a.m	308.47	308.47	0	301.33	301.33	0
08:15:00 a.m	308.57	309.22	0.211	302.97	301.48	0.494
08:30:00 a.m	312.05	312.86	0.260	305.97	304.13	0.605
08:45:00 a.m	316.69	317.22	0.167	309.00	307.19	0.589
09:00:00 a.m	321.53	321.84	0.096	311.92	310.19	0.558
09:15:00 a.m	326.23	326.54	0.095	314.90	313.05	0.591
09:30:00 a.m	331.05	331.17	0.036	317.62	316.03	0.503
09:45:00 a.m	335.35	335.49	0.042	320.18	318.61	0.493
10:00:00 a.m	339.48	339.78	0.088	322.91	321.15	0.548
10:15:00 a.m	343.84	343.94	0.029	325.32	323.90	0.438
10:30:00 a.m	347.59	347.84	0.072	327.75	326.17	0.484
10:45:00 a.m	351.43	351.49	0.017	329.81	328.59	0.371
11:00:00 a.m	354.56	354.78	0.062	331.82	330.47	0.409
11:15:00 a.m	357.70	357.75	0.014	333.43	332.54	0.268
11:30:00 a.m	360.10	360.13	0.008	334.71	333.87	0.252
11:45:00 a.m	361.99	361.97	0.006	335.58	335.00	0.173
12:00:00 p.m	363.26	363.33	0.019	336.28	335.71	0.170
12:15:00 p.m	364.32	364.42	0.027	336.83	336.36	0.140
12:30:00 p.m	365.16	365.34	0.049	337.38	336.86	0.154
12:45:00 p.m	365.99	366.15	0.044	337.81	337.39	0.124
01:00:00 p.m	366.62	366.65	0.008	337.94	337.75	0.056
01:15:00 p.m	366.71	366.66	0.014	337.70	337.74	0.012
01:30:00 p.m	366.25	366.30	0.014	337.33	337.36	0.009
01:45:00 p.m	365.66	365.62	0.011	336.69	336.95	0.077
02:00:00 p.m	364.57	364.50	0.019	335.75	336.25	0.149
02:15:00 p.m	363.05	362.97	0.022	334.57	335.13	0.167
02:30:00 p.m	361.16	361.05	0.030	333.13	333.85	0.216
02:45:00 p.m	358.84	358.62	0.061	331.27	332.30	0.310
03:00:00 p.m	355.85	355.72	0.037	329.26	330.28	0.309
03:15:00 p.m	352.73	352.78	0.014	327.42	328.27	0.259
03:30:00 p.m	350.06	349.71	0.100	325.27	326.48	0.371
03:45:00 p.m	346.41	346.40	0.003	323.18	324.21	0.318
04:00:00 p.m	343.10	342.76	0.100	320.53	322.12	0.494
04:15:00 p.m	338.76	338.61	0.044	317.81	319.25	0.451
04:30:00 p.m	334.46	334.26	0.060	314.92	316.54	0.512
04:45:00 p.m	329.78	329.52	0.079	311.74	313.57	0.584
05:00:00 p.m	324.61	324.37	0.074	308.38	310.28	0.612
05:15:00 p.m	319.17	318.93	0.075	304.87	306.88	0.655
05:30:00 p.m	313.45	313.33	0.038	301.41	303.33	0.633
05:45:00 p.m	307.85	307.82	0.010	298.11	299.95	0.613
06:00:00 p.m	302.50	302.77	0.089	295.42	296.76	0.452

4.8. Eficiencia de los Módulos DSCs.

4.8.1. Fabricación de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante.

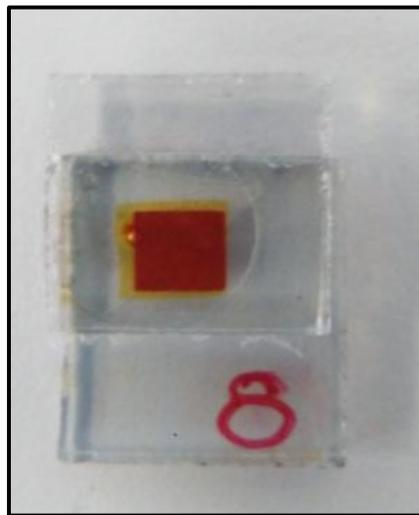
La fabricación de las DSCs (figura 4.12) consistió en los siguientes pasos:

Los electrodos de trabajo se realizaron utilizando películas de $12 \mu m$ de espesor que consisten en una capa de $8 \mu m$ de $20 nm$ nanopartículas de TiO_2 (18NR-T, Dyesol) y una capa de $4 \mu m$ de partículas de TiO_2 de $400 nm$ (18NR-AO, Dyesol) con un área activa de $0.16 cm^2$. Antes de la deposición de la pasta de TiO_2 , el conductor y los

Tabla 4.7: Electrolitos utilizados en la fabricación de las DSCs.

Muestra	Electrolito	Fórmula
A B C	1-etil-3-metilimidazolio bis (trifluorometanosulfonil) imida	0.1M I2 + 1MBMII + 0.05MLiI + 0.5M TBP+ 0.1M GuSCN
D E F	85 % Acetonitrilo + 15 % Valeronitrilo	0.03 M I2 + 1 M BMiI + 0.05 M LiI + 0.5M TBP + 0.1 M GuSCN

sustratos de vidrio (Pilkington-TEC15) se limpiaron mediante baños ultrasónicos con detergentes, agua desionizada, isopropanol y etanol sucesivamente, y fueron calentados a 500°C . Posteriormente, los sustratos de vidrio se sumergieron en una solución de TiCl_4 (40 mM) durante 30 minutos a 70°C y se calentaron a 500°C . La pasta de nanopartículas de TiO_2 se depositó sobre un sustrato de vidrio conductor utilizando la técnica de serigrafía. Los electrodos de TiO_2 se calentaron gradualmente bajo flujo de aire a 325°C durante 5 minutos, 375°C durante 5 minutos, 450°C durante 15 minutos y 500°C durante 15 minutos. Los electrodos de TiO_2 calentados fueron sumergidos nuevamente en una solución de TiCl_4 (40 mM) a 70°C durante 30 minutos y calentados nuevamente a 500°C durante 30 minutos. La solución de colorante estaba compuesta por 0.3 mM de N719 y 0.3 mM de ácido quenodesoxicólico en etanol. El contraelectrodo se fue esparciendo en una solución de Platisol (Solaronix) en un sustrato de vidrio conductor (Pilkington-TEC8), seguido de un calentamiento a 390°C durante 15 minutos. Finalmente, los electrodos de trabajo y los contraelectrodos se unieron usando un marco de termoplástico delgado (Surlyn, Solaronix). Las celdas se llenaron con electrolitos de composición variable destinados a ajustar la viscosidad (ver tabla 4.7), a través de un orificio previamente hecho en la parte posterior de una capa platinizada. Luego, el orificio se selló con un polímero termoplástico y un tapón de vidrio.

**Figura 4.12:** Celda solar fabricada.

4.8.2. Medición del desarrollo de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante.

Las mediciones fotovoltaicas de las DSCs se realizaron empleando un Simulador solar AAB (figura 4.13) con distribución de espectro (ABET 1100 150 W de la Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España) en condiciones estándar (1000 W/m^2 , AM 1.5 y 25°C).



Figura 4.13: Simulador solar AAB.

4.8.3. Análisis de los parámetros de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante en función de la temperatura de operación.

Para el análisis del desarrollo de las DSCs se utilizará el análisis de correlación de las eficiencias planteado por Preeti Singha et. al. [29]. La cual se expresa a través de la función de la ecuación 4.22.

$$11.9[1 - 0.001(T_{avg} - 40) + 0.057 \ln(S/800)], \quad (4.22)$$

siendo: (T_{avg} la temperatura de operación de la celda solar y S la radiación solar instantánea en la celda.

Capítulo 5

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1. Desarrollo de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante en Cuernavaca, Morelos.

5.1.1. Temperatura de operación de la celda en Cuernavaca Morelos, mes de abril.

Los resultados de los contorno de temperatura de operación obtenidos para el mes de abril a las 8 horas en Cuernavaca, Morelos se muestra en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3.

En la figura 5.1 y en la figura 5.2 podemos observar las temperaturas de operación en las diferentes capas del módulo solar. Donde, la capa con mayor temperatura se encuentra en la capa activa del módulo. La temperatura del sustrato de vidrio es mayor que la temperatura en la cubierta de vidrio a pesar de que en la cubierta es en donde incide el flujo solar. Esto es debido a que el calor emitido por el suelo es superior al emitido por el cielo al ser la temperatura ambiente (temperatura de los alrededores del suelo) mayor a la temperatura de los alrededores del cielo (mencionado en la metodología de la presente tesis). Por otra parte, también se debe a que las propiedades térmicas del medio entre la capa activa y el sustrato de vidrio (capa de sellado) contribuye a una mayor transferencia de calor.

que la temperatura más alta de dicha capa se encuentra en el punto medio, siendo esta, la temperatura de referencia para estimar la eficiencia del módulo. En el caso de una velocidad de viento de 0 m/s a las 8 horas es de 310.06 K.

Finalmente, cabe destacar que las figuras muestran el contorno de temperaturas a las 8:00 am con un coeficiente de convección de 5.82 para fines prácticos. Mostrando los resultados de las temperaturas para todas las condiciones en la parte de Apéndices, al final de la tesis.

En la figura 5.3 podemos observar el contorno de temperatura de la capa activa.

Temperatura (K)

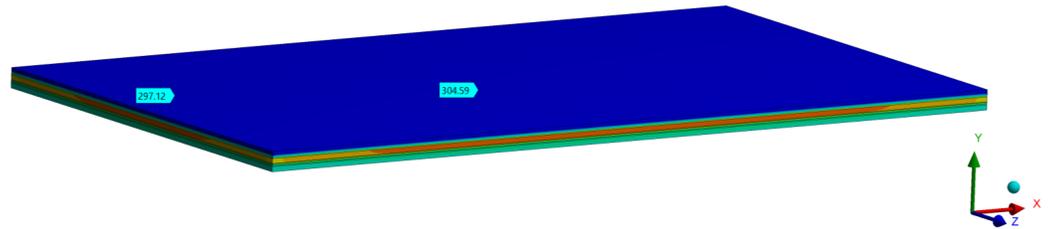
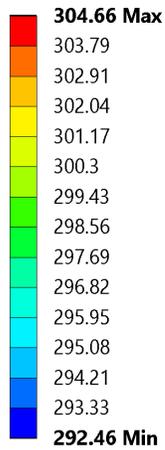


Figura 5.1: Contorno de temperatura de operación del modelo DSCs completo en abril a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.

Temperatura (K)

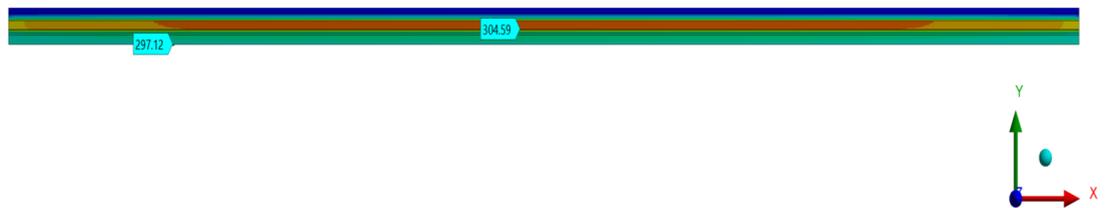
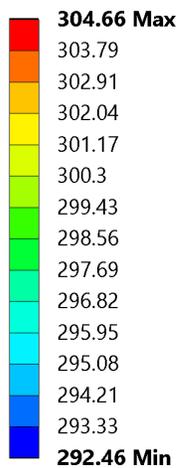


Figura 5.2: Contorno de temperatura de operación en el plano medio del modelo DSCs en abril a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.

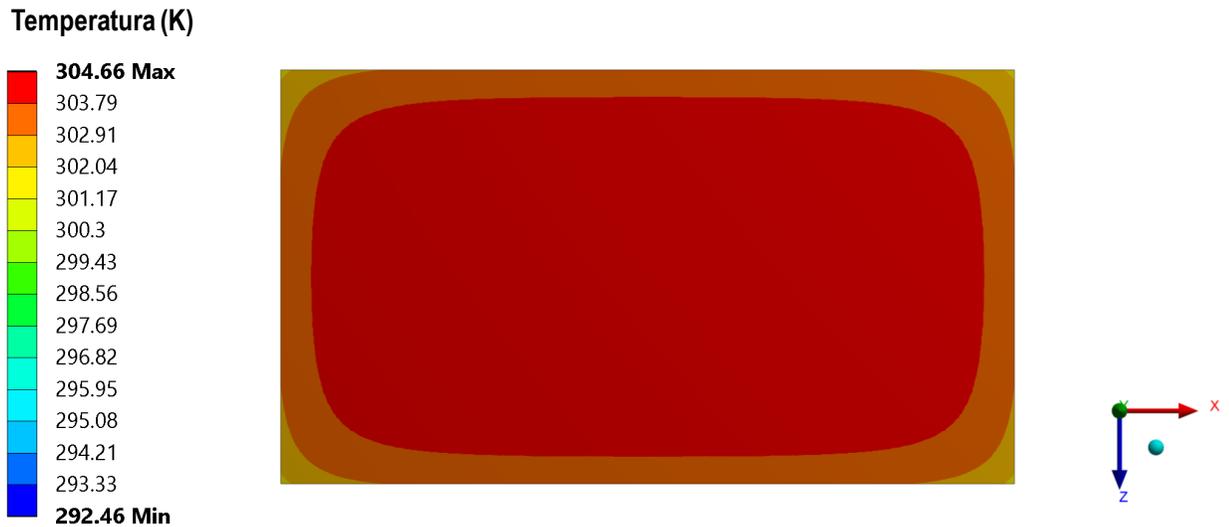


Figura 5.3: Contorno de temperatura de operación de la capa activa de la DSCs en abril a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.

Las gráficas de las figuras 5.4, 5.5 y 5.6, muestran el comportamiento de las temperaturas de operación de las DSCs con un coeficiente de convección de 5.82, 13.96 y 47.6, respectivamente, con la finalidad de obtener el comportamiento de tres diferentes casos (una velocidad de viento de 0 m/s, una de 2m/s y una de 10 m/s). Los resultados muestran el comportamiento considerando una temperatura ambiente variable y una irradiancia solar variable. Los datos meteorológicos utilizados fueron los de la Ciudad de Cuernavaca, Morelos en el mes con mayor irradiancia solar (el mes de abril), de las 8 horas a las 18 horas.

De acuerdo a la gráfica de la figura 5.4 y a los datos del Anexo B, se puede observar que la hora en que las DSCs alcanzan su mayor temperatura de operación es alrededor de las 13:15 horas con una temperatura de 372.43 K ($99.28^{\circ}C$) para la capa activa, 330.53 K ($57.38^{\circ}C$) para la cubierta de vidrio, 372.12 K ($98.972^{\circ}C$) para el electrolito y 335.04 K ($61.89^{\circ}C$) para el sustrato de vidrio.

De lo anterior cabe destacar dos puntos:

- La hora en que se presenta la temperatura de operación más alta se toma con referencia de la capa activa, en las otras capas de la celda puede variar ligeramente.
- La diferencia de temperatura entre la capa activa y el electrolito es prácticamente imperceptible en la gráfica debido a que las temperaturas son muy similares, y por lo que creemos que Chen et. al. no mostró resultados referentes a esta capa de las celda.

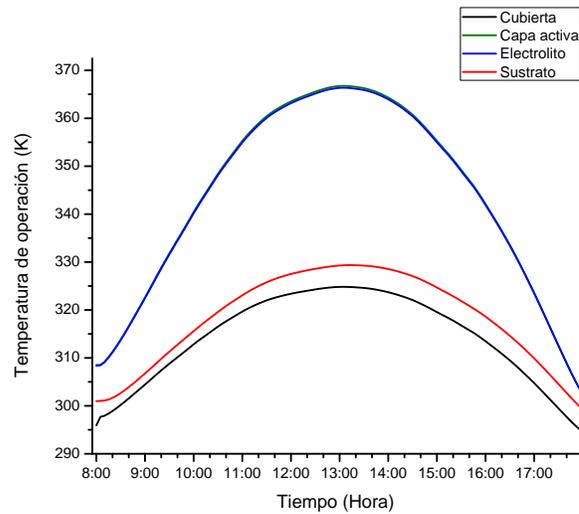


Figura 5.4: Temperatura de operación de las DSCs en abril con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.

La gráfica de la figura 5.5, la cual corresponde a un coeficiente de convección de 13.96 y cuya tabla de resultados se muestra en el Anexo C, alcanza su mayor temperatura de operación alrededor de las 13:05 horas con un valor de 358.24 K ($85.09\text{ }^{\circ}\text{C}$) para la capa activa, 316.01 K ($42.86\text{ }^{\circ}\text{C}$) para la cubierta de vidrio, 357.94 K ($84.79\text{ }^{\circ}\text{C}$) para el electrolito y 321.02 K ($47.87\text{ }^{\circ}\text{C}$) para el sustrato de vidrio.

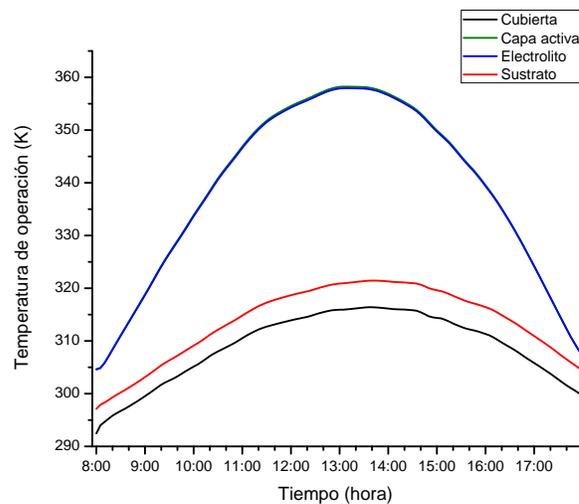


Figura 5.5: Temperatura de operación de las DSCs en abril con $h=13.96$, Cuernavaca, Morelos.

La gráfica de la figura 5.6, la cual corresponde a un coeficiente de convección de 47.6 y cuya tabla de resultados se muestra en el Anexo D, alcanza su mayor temperatura de operación alrededor de las 13:30 horas con un valor de 345.05 K ($71.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) para la capa activa, 302.77 K ($29.02\text{ }^{\circ}\text{C}$) para la cubierta de vidrio, 344.74 K ($71.59\text{ }^{\circ}\text{C}$) para el

electrolito y 308.43 K (35.28°C) para el sustrato de vidrio.

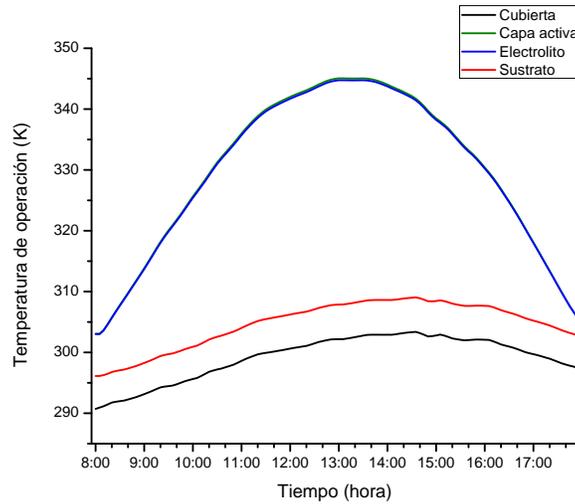


Figura 5.6: Temperatura de operación de las DSCs en abril con $h=47.6$, Cuernavaca, Morelos.

5.1.2. Influencia de la velocidad de viento en el desarrollo eléctrico en Cuernavaca, Morelos, mes de abril.

Las velocidades de viento evaluadas para investigar su influencia en el desarrollo eléctrico de las celdas fueron de 0m/s, 2m/s y 10 m/s, correspondiente a los coeficientes de convección de 5.82, 13.96, 47.6, respectivamente. Al aumentar la velocidad de viento, la disipación de calor aumenta y por consecuencia el desarrollo de las celdas mejora. En la figura 5.7 se puede observar que a las 10:10 horas se obtiene la mayor eficiencia de las celdas con una velocidad de viento de 0m/s de 11.41 %, con una velocidad de viento de 2m/s se obtiene la mayor eficiencia a las 10:35 horas de 11.51 %, con una velocidad de viento de 10m/s se obtiene la mayor eficiencia a las 11:00 horas de 11.63 %; lo que corresponde a una ganancia de 0.22 % de eficiencia y 1.85 % en porcentaje.

En cuanto al promedio diario de eficiencias se obtuvo lo siguiente:

- Con una velocidad de viento de 0m/s se obtuvo un promedio de eficiencia de 11.25 %, lo que corresponde a un 95.88 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).
- Con una velocidad de viento de 2m/s se obtuvo un promedio de eficiencia de 11.37 %, lo que corresponde a un 95.55 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).
- Con una velocidad de viento de 10m/s se obtuvo un promedio de eficiencia de 11.48 %, lo que corresponde a un 96.47 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).

De acuerdo a los puntos previamente mencionados, se puede inferir que en promedio se gana 0.23 % de eficiencia al aumentar la velocidad de viento de 0m/s a 10m/s en el mes de abril en Cuernavaca, Morelos.

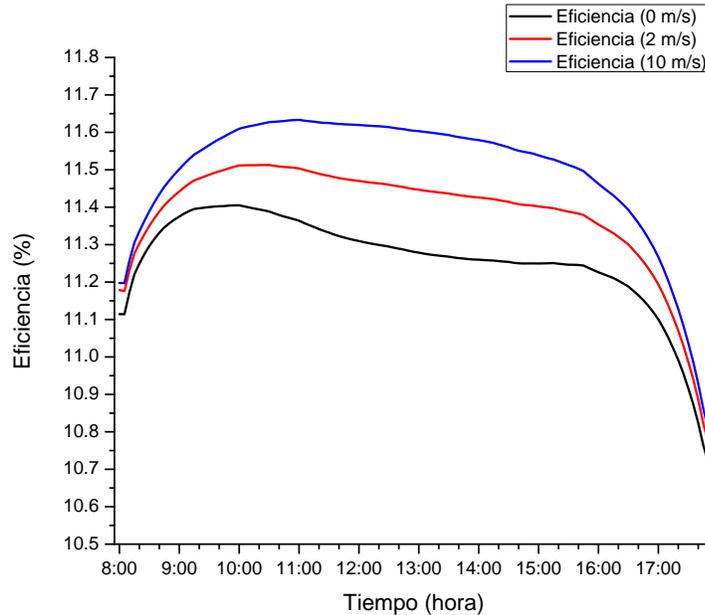


Figura 5.7: Eficiencia de las DSCs en Cuernavaca, Morelos en el mes de abril con velocidades de viento de 0m/s, 2m/s y 10m/s.

5.1.3. Influencia de la irradiancia solar en el desarrollo eléctrico en Cuernavaca, Morelos, mes de abril.

En la figura 5.8 se puede observar que al utilizar una temperatura ambiente variable la eficiencia se ve afectada negativamente con respecto a una temperatura ambiente constante. Lo anterior demuestra que es importante considerar la variación de la temperatura a través del tiempo en el modelo térmico de las DSCs. La eficiencia más alta alcanzada durante el día es de 11.4 % utilizando una temperatura variable y de 11.44 % utilizando una temperatura constante. Aunque justo a la hora en que la radiación solar es mayor existe una brecha de eficiencia de 11.30 a 11.36 %. Además, cabe destacar que aunque la radiación solar sea mayor, la eficiencia no es mayor, esto es debido a que la temperatura de operación también es más alta. y en las gráficas 5.8 (a) y (b) se puede observar que el hecho de que la radiación solar sea la misma y la temperatura ambiente sea constante a lo largo del tiempo, no necesariamente se obtiene como resultado la misma eficiencia, debido a que la acumulación de calor afecta el desarrollo de las DSCs.

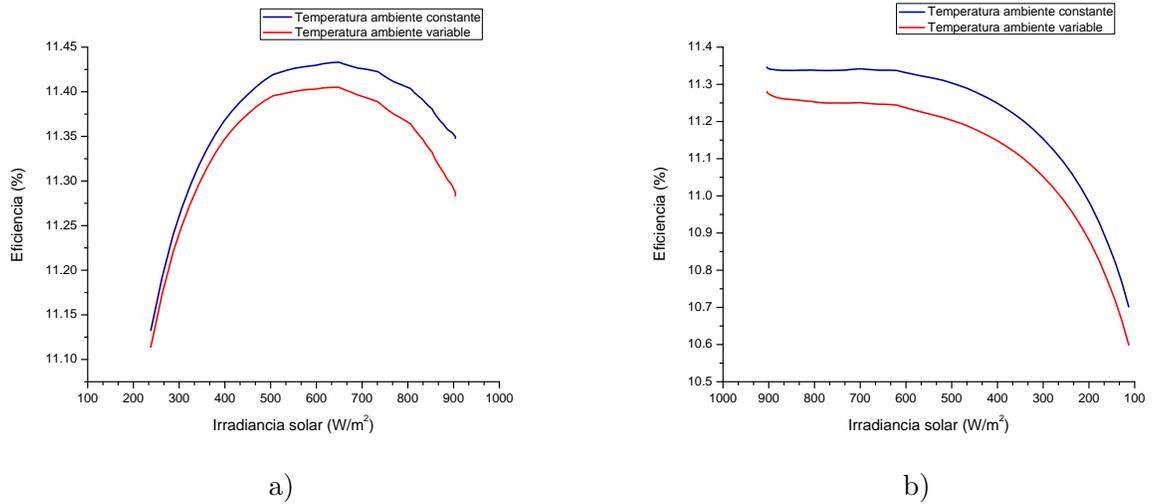


Figura 5.8: a) Eficiencia de las celdas con una irradiancia solar de $238W/m^2$ a $904W/m^2$, lo que corresponde a un horario de 8 horas a 13 horas. En color rojo se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color azul una temperatura ambiente variable. b) Eficiencia de las celdas con una irradiancia de $904W/m^2$ a $113W/m^2$ de las 13:10 horas a las 18:00 horas. En color rojo se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color azul una temperatura ambiente variable.

5.1.4. Temperatura de operación en Cuernavaca, Morelos del mes de septiembre.

Los resultados de los contorno de temperatura de operación obtenidos para el mes de septiembre a las 8 horas con un coeficiente de convección de 5.82 m/s en Cuernavaca, Morelos se muestra en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11.

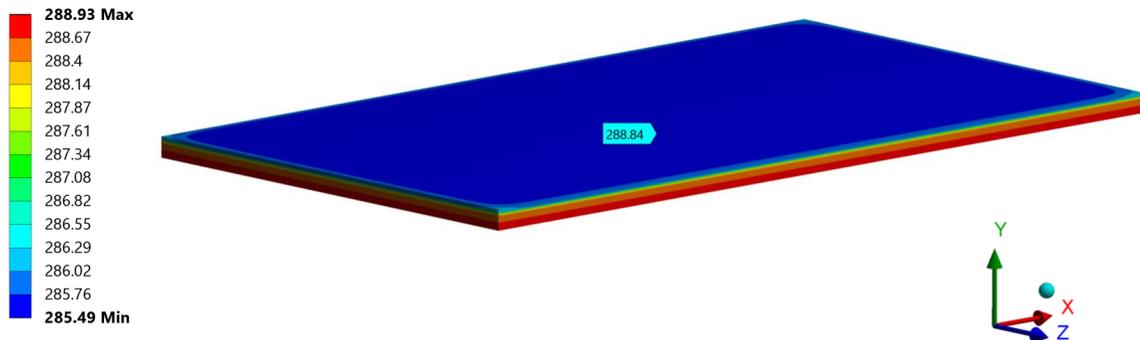


Figura 5.9: Contorno de la temperatura de operación del modelo DSCs completo en septiembre a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.

En las figuras 5.9 y 5.10 podemos observar las temperaturas de operación en las diferentes capas del módulo solar. Donde, la capa con mayor temperatura se encuentra en el sustrato del módulo (288.93 K), a diferencia del mes de abril. Esto es debido a que el flujo solar es de menor magnitud y el potencial eléctrico es considerado constante; es decir, si dicho potencial variara al variar el flujo de calor es probable que no se observe este mismo comportamiento.

La temperatura de operación en la capa activa de la celda es de 288.38 K.

En la figura 5.11 podemos observar el contorno de temperatura de la capa activa la cual es menor que la temperatura en el sustrato de vidrio.



Figura 5.10: Contorno de temperatura de operación en el plano medio del modelo DSCs en septiembre a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.



Figura 5.11: Contorno de temperatura de operación de la capa activa de la DSCs en septiembre a las 8 horas con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.

Finalmente, cabe destacar que las figuras muestran el contorno de temperaturas a las 8:00 am con un coeficiente de convección de 5.82 para fines prácticos. Mostrando los

resultados de las temperaturas para todas las condiciones en la parte de Apéndices, al final de la tesis.

Considerando una temperatura ambiente variable y una irradiancia solar variable en el mes en que se presenta menor recurso solar en la ciudad de Cuernavaca, Morelos (mes de septiembre), con datos de las 8 horas a las 18 horas, los resultados fueron los siguientes:

De acuerdo a la gráfica de la figura 5.12 y a los datos del Anexo B, se puede observar que la hora en que las DSCs alcanzan su mayor temperatura de operación es alrededor de las 13:05 horas con una temperatura de 353.41 K (80.26°C) para la capa activa, 317.84 K (44.69°C) para la cubierta de vidrio, 353.23 K (80.08°C) para el electrolito y 331.63 K (58.48°C) para el sustrato de vidrio.

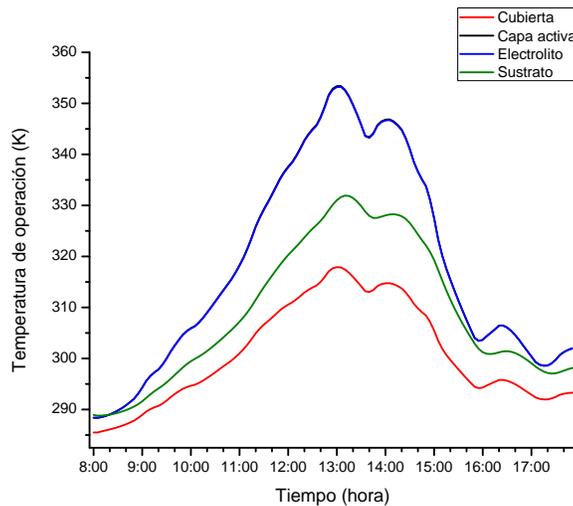


Figura 5.12: Temperatura de operación de las DSCs en septiembre con $h=5.82$, Cuernavaca, Morelos.

La gráfica de la figura 5.13, la cual corresponde a un coeficiente de convección de 13.96 y cuya tabla de resultados se muestra en el Anexo C. Se alcanza su mayor temperatura de operación alrededor de las 13:00 horas con un valor de 337.38 K (64.23°C) para la capa activa, 304.98 K (31.83°C) para la cubierta de vidrio, 337.18 K (64.03°C) para el electrolito y 312.27 K (39.55°C) para el sustrato de vidrio.

La gráfica de la figura 5.14, la cual corresponde a un coeficiente de convección de 13.96 y cuya tabla de resultados se muestra en el Anexo D, alcanza su mayor temperatura de operación alrededor de las 12:55 horas con un valor de 325.77 K (52.62°C) para la capa activa, 294.52 K (21.37°C) para la cubierta de vidrio, 325.54 K (52.39°C) para el electrolito y 299.65 K (26.50°C) para el sustrato de vidrio.

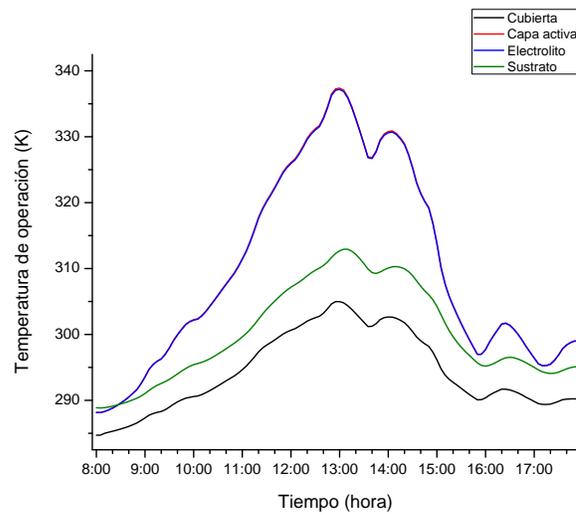


Figura 5.13: Temperatura de operación de las DSCs en septiembre con $h=13.96$, Cuernavaca, Morelos.

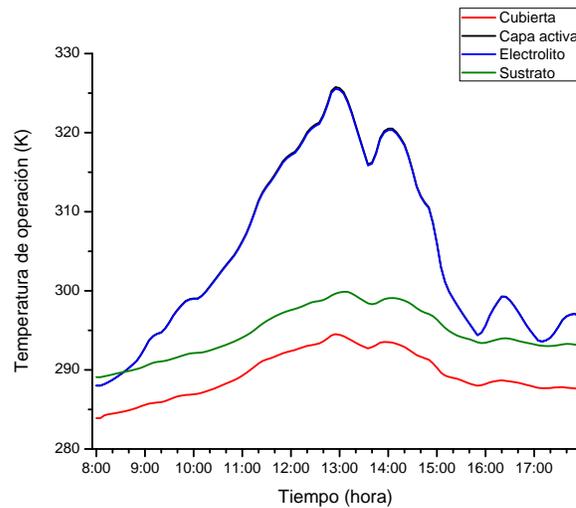


Figura 5.14: Temperatura de operación de las DSCs en septiembre con $h=47.6$, Cuernavaca, Morelos.

5.1.5. Influencia de la velocidad de viento en el desarrollo eléctrico en Cuernavaca, Morelos, mes de septiembre.

Al igual que en el mes de abril, al aumentar la velocidad de viento aumenta la eficiencia de las celdas. En la figura 5.15 se puede notar que a las 11:20 horas se obtiene la mayor eficiencia de las celdas con una velocidad de viento de 0m/s de 11.32% , con una velocidad de viento de 2m/s se obtiene la mayor eficiencia a las 12:20 horas de 11.44% ,

con una velocidad de viento de 10m/s se obtiene la mayor eficiencia a las 12:50 horas de 11.62 %; lo que corresponde a una ganancia de 0.3 % de eficiencia y 2.65 % en porcentaje con una velocidad de viento de 0m/s a una velocidad de 10m/s.

En cuanto al promedio diario de eficiencias se obtuvo lo siguiente:

- Con una velocidad de viento de 0m/s se obtuvo un promedio de eficiencia de 10.92 %, lo que corresponde a un 91.76 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).
- Con una velocidad de viento de 2m/s se obtuvo un promedio de eficiencia de 11.01 %, lo que corresponde a un 92.52 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).
- Con una velocidad de viento de 10m/s se obtuvo un promedio de eficiencia de 11.07 %, lo que corresponde a un 93.03 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).

En conclusión, se gana un promedio de 1.27 % de eficiencia al aumentar la velocidad de viento de 0m/s a 10m/s en el mes de abril en Cuernavaca, Morelos.

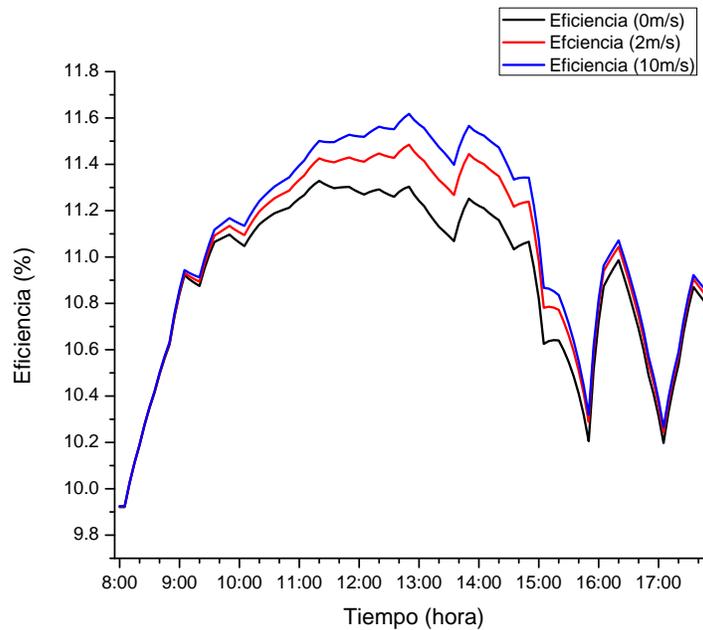


Figura 5.15: Eficiencia de las DSCs en Cuernavaca, Morelos en el mes de septiembre con velocidades de viento de 0m/s, 2m/s y 10m/s.

5.1.6. Influencia de la irradiancia solar en el desarrollo eléctrico en Cuernavaca, Morelos, mes de septiembre.

En las gráficas de la figura 5.16, se muestra el valor de las eficiencias de las DSCs con respecto a la irradiancia solar. Utilizando temperaturas ambiente variables y tem-

peratura de viento constante. En la gráfica 5.16 (b) se logra observar que los valores de las irradiancias solares no necesariamente se encuentran en orden ascendiente de acuerdo a la hora del día. Esto se debe a que en el mes de septiembre constantemente hay periodos de nubosidad al ser una época de lluvias. Y en general en ambas gráficas se logra apreciar dicho comportamiento.

Por otro lado, al igual que en la figura 5.8 se puede observar que la gráfica correspondiente a una temperatura ambiente variable la eficiencia es menor que en la gráfica con una temperatura ambiente constante. La eficiencia más alta alcanzada durante el día es de 11.32 % utilizando una temperatura variable y de 11.34 % utilizando una temperatura constante. A la hora en que la radiación solar es de mayor magnitud, existe una brecha de eficiencia de 11.30 a 11.35 %.

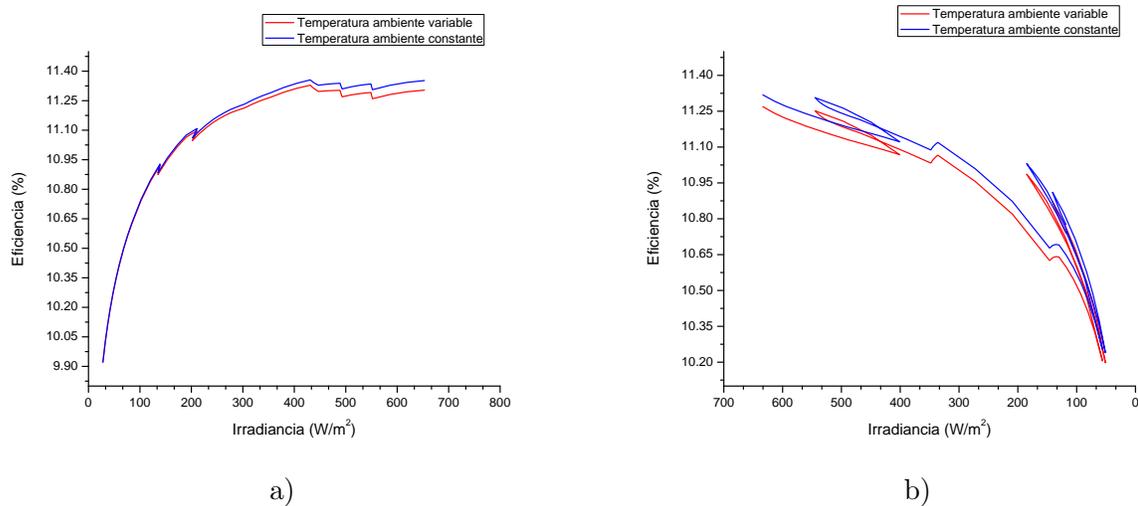


Figura 5.16: a) Eficiencia de las celdas con una irradiancia solar de $28W/m^2$ a $653W/m^2$, lo que corresponde a un horario de 8 horas a 12:50 horas. En color rojo se representan los resultados con una temperatura ambiente variable y en color azul una temperatura ambiente constante. b) Eficiencia de las celdas con una irradiancia de $633.65W/m^2$ a $51W/m^2$ de las 12:50 horas a las 18:00 horas. El orden de los valores de irradiancia no se encuentran en orden ascendiente por hora del día. En color rojo se representan los resultados con una temperatura ambiente variable y en color azul una temperatura ambiente constante.

5.2. Desarrollo de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante en Mérida, Yucatán.

5.2.1. Temperatura de operación de la celda en Mérida, Yucatán, mes de agosto.

En las figuras 5.17, 5.18 y 5.19 se muestra los contornos de temperatura de operación para el mes de agosto a las 8 horas en Mérida, Yucatán.

En la figura 5.17 y en la figura 5.18 podemos observar las temperaturas de operación en las diferentes capas del módulo solar, siendo, nuevamente, la capa activa la de mayor temperatura.

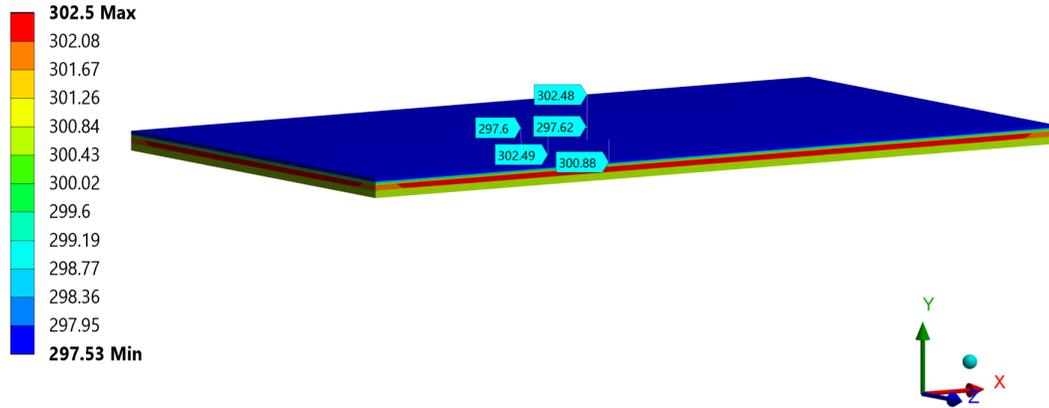


Figura 5.17: Contorno de temperatura de operación del modelo DSCs completo en agosto a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.

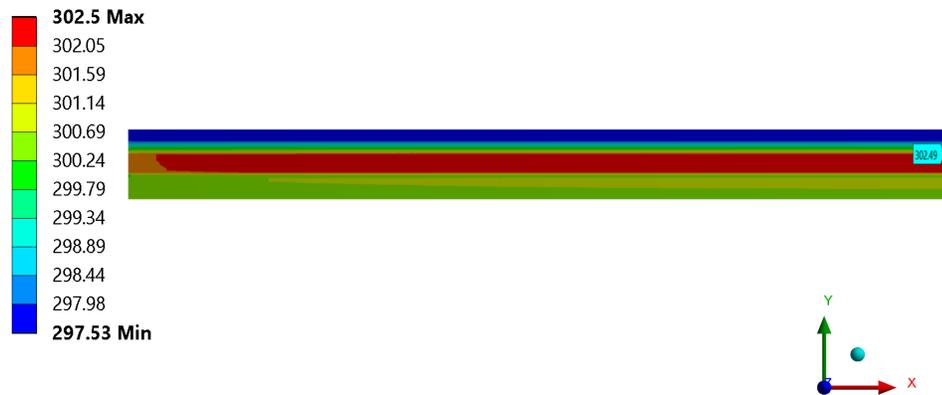


Figura 5.18: Contorno de temperatura de operación en el plano medio del modelo DSCs en agosto a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.

En la figura 5.19 podemos observar el contorno de temperatura de la capa activa. Observando que la temperatura más alta de dicha capa se encuentra en el punto medio (302.49 K), siendo esta, la temperatura de referencia para estimar la eficiencia del

módulo.

Finalmente, cabe destacar que las figuras muestran el contorno de temperaturas a las 8:00 am con un coeficiente de convección de 5.82.



Figura 5.19: Contorno de temperatura de operación de la capa activa de la DSCs en agosto a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.

Las gráficas de las figuras 5.20, 5.21 y 5.22, muestran el comportamiento de las temperaturas de operación de las DSCs con un coeficiente de convección de 5.82, 13.96 y 47.6, respectivamente, con la finalidad de obtener el comportamiento a una velocidad de viento de 0 m/s, una de 2m/s y una de 10 m/s. Los resultados muestran el comportamiento considerando una temperatura ambiente variable y una irradiancia solar variable. Los datos meteorológicos utilizados fueron los de la Ciudad de Mérida, Yucatán en el mes con mayor irradiancia solar (agosto), de las 8 horas a las 18 horas.

De acuerdo a la gráfica de la figura 5.20 y a los datos del Anexo B, se puede observar que la hora en que las DSCs alcanzan su mayor temperatura de operación con una convección de 5.82 m/s es alrededor de las 12:25 horas con una temperatura de 380.74 K (107.59 °C) para la capa activa, 337.25 K (64.1 °C) para la cubierta de vidrio, 380.4 K (107.25 °C) para el electrolito y 341.14 K (67.99 °C) para el sustrato de vidrio.

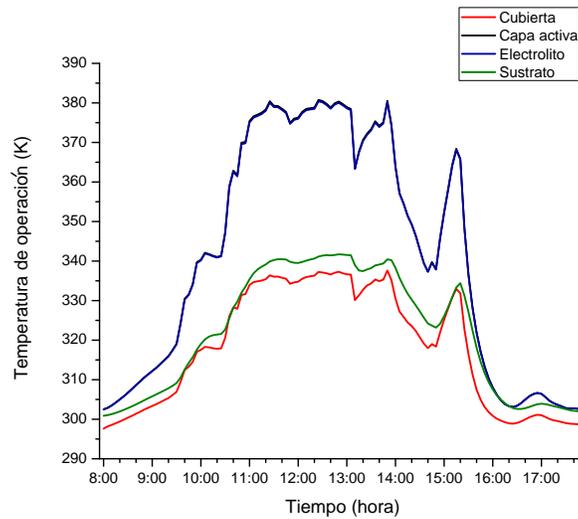


Figura 5.20: Temperatura de operación de las DSCs en agosto con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.

La gráfica de la figura 5.21, la cual corresponde a un coeficiente de convección de 13.96 y cuya tabla de resultados se muestra en el Anexo C, alcanza su mayor temperatura de operación alrededor de las 12:20 horas con un valor de 367.16 K ($94.01\text{ }^{\circ}\text{C}$) para la capa activa, 323.20 K ($50.05\text{ }^{\circ}\text{C}$) para la cubierta de vidrio, 366.82 K ($93.67\text{ }^{\circ}\text{C}$) para el electrolito y 327.79 K ($54.64\text{ }^{\circ}\text{C}$) para el sustrato de vidrio.

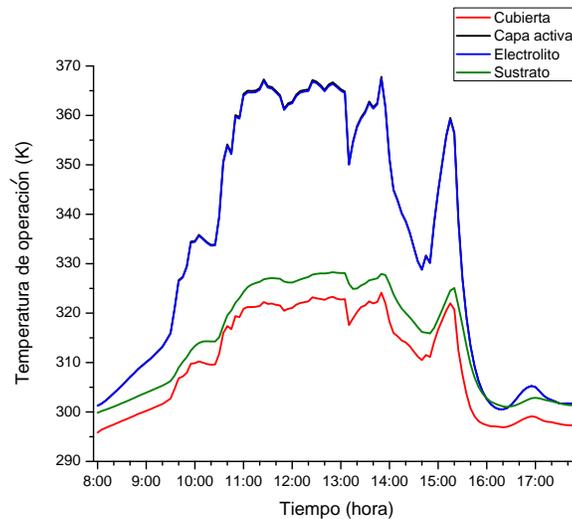


Figura 5.21: Temperatura de operación de las DSCs en agosto con $h=13.96$, Mérida, Yucatán.

La gráfica de la figura 5.22, la cual corresponde a un coeficiente de convección de 47.6 y cuya tabla de resultados se muestra en el Anexo D, alcanza su mayor temperatura de operación alrededor de las 12:20 horas con un valor de 353.97 K ($80.82\text{ }^{\circ}\text{C}$) para la capa activa, 309.38 K ($36.23\text{ }^{\circ}\text{C}$) para la cubierta de vidrio, 353.63 K ($80.48\text{ }^{\circ}\text{C}$) para

el electrolito y 314.82 K (41.67 °C) para el sustrato de vidrio.

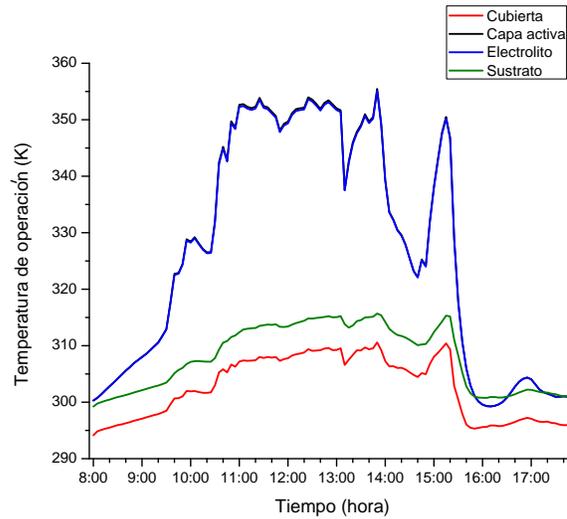


Figura 5.22: Temperatura de operación de las DSCs en agosto con $h=47.6$, Mérida, Yucatán.

5.2.2. Influencia de la velocidad de viento en el desarrollo eléctrico en Mérida, Yucatán, mes de agosto.

Las velocidades de viento evaluadas para investigar su influencia en el desarrollo eléctrico de las celdas, las velocidades de viento evaluadas fueron de igual manera de 0m/s, 2m/s y 10 m/s. Al aumentar la velocidad de viento, la disipación de calor aumenta y por consecuencia el desarrollo de las celdas mejora. En la figura 5.23 se puede observar que a las 10:35 horas se obtiene la mayor eficiencia de las celdas (11.53 %) con una velocidad de viento de 0m/s, con una velocidad de viento de 2m/s se obtiene la mayor eficiencia (11.63 %) a las 10:30 horas y con una velocidad de viento de 10m/s se obtiene la mayor eficiencia (11.73 %) a las 10:35 horas; lo que corresponde a una ganancia de 0.20 % de eficiencia y un aumento del 1.68 % en término de porcentaje.

En cuanto al promedio diario de eficiencias se obtuvo lo siguiente:

- Con una velocidad de viento de 0m/s se obtuvo un promedio de eficiencia del 10.95 %, lo que corresponde a un 92.01 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).
- Con una velocidad de viento de 2m/s se obtuvo un promedio de eficiencia del 11.63 %, lo que corresponde a un 92.77 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).
- Con una velocidad de viento de 10m/s se obtuvo un promedio de eficiencia del 11.12 %, lo que corresponde a un 93.45 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).

De acuerdo a los puntos previamente mencionados, se puede inferir que se gana un 1.44% de eficiencia al aumentar la velocidad de viento de 0m/s a 10m/s en el mes de abril en Mérida, Yucatán.

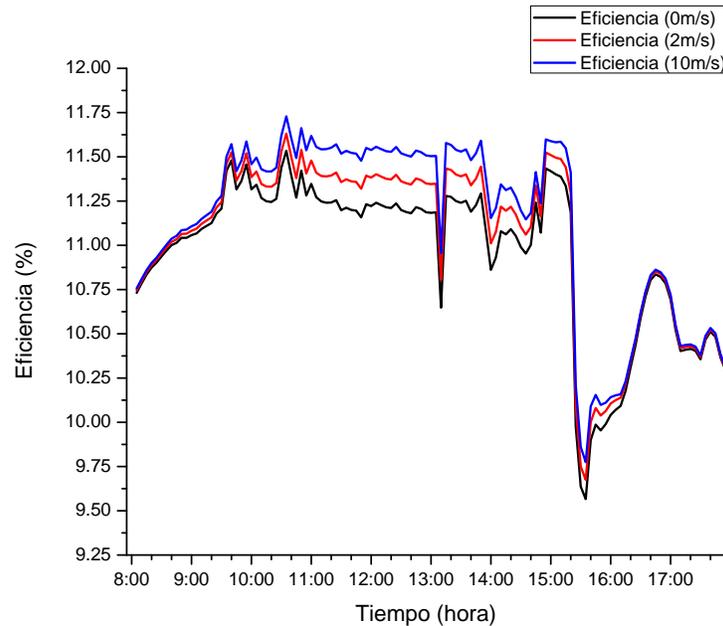


Figura 5.23: Eficiencia de las DSCs en Mérida, Yucatán en el mes de agosto con velocidades de viento de 0m/s, 2m/s y 10m/s.

5.2.3. Influencia de la irradiancia solar en el desarrollo eléctrico en Mérida, Yucatán, mes de agosto.

En la figura 5.24 se puede observar que al utilizar una temperatura ambiente variable la eficiencia se ve afectada negativamente con respecto a una temperatura ambiente constante, como ya se ha visto en los resultados anteriores por lo que se refuerza la recomendación de considerar la variación de la temperatura a través del tiempo en el modelo térmico de las DSCs. La eficiencia más alta alcanzada durante el día es de 11.46% utilizando una temperatura variable y de 11.53% utilizando una temperatura constante. A la hora en que la radiación solar es mayor existe una brecha de eficiencia de 11.42 a 11.47%. Además, cabe destacar que la radiación solar varía constantemente a lo largo del día para el mes de agosto en la ciudad de Mérida a diferencia del mes de mayor recurso solar en Cuernavaca (mes de abril).

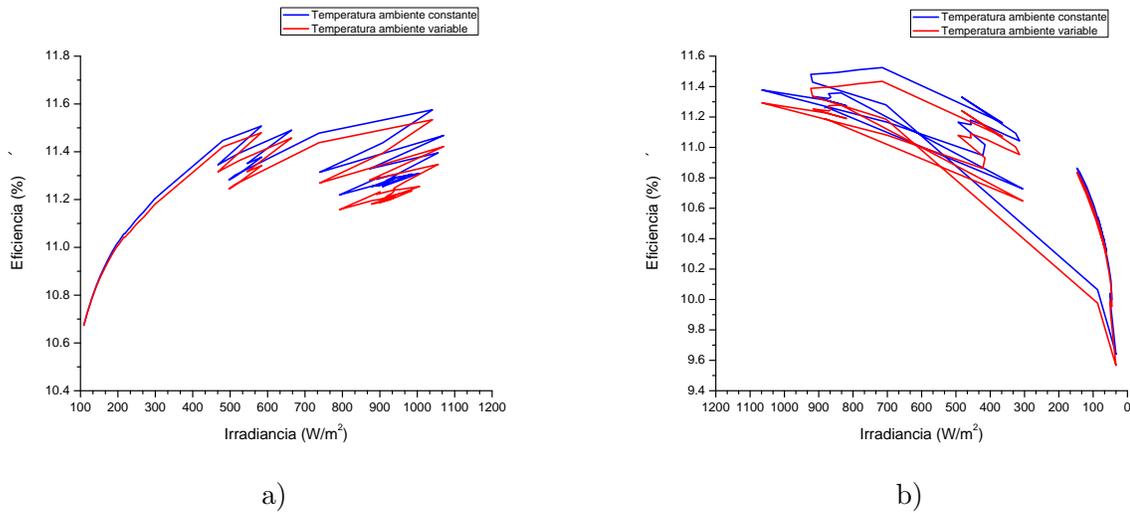


Figura 5.24: a) Eficiencia de las celdas con una irradiancia solar de $108.9W/m^2$ a $1070.6W/m^2$, lo que corresponde a un horario de 8 horas a 12:55 horas. En color azul se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color rojo a una temperatura ambiente variable. b) Eficiencia de las celdas con una irradiancia de $1065.8W/m^2$ a $61.5W/m^2$ de las 12:55 horas a las 18:00 horas. En color azul se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color rojo una temperatura ambiente variable.

5.2.4. Temperatura de operación en Mérida, Yucatán del mes de enero.

Los resultados de los contorno de temperatura de operación obtenidos para el mes con menor recurso solar en Mérida Yucatán (enero) a las 8 horas con un coeficiente de convección de 5.82 m/s se muestra en las figuras 5.25, 5.26 y 5.27.

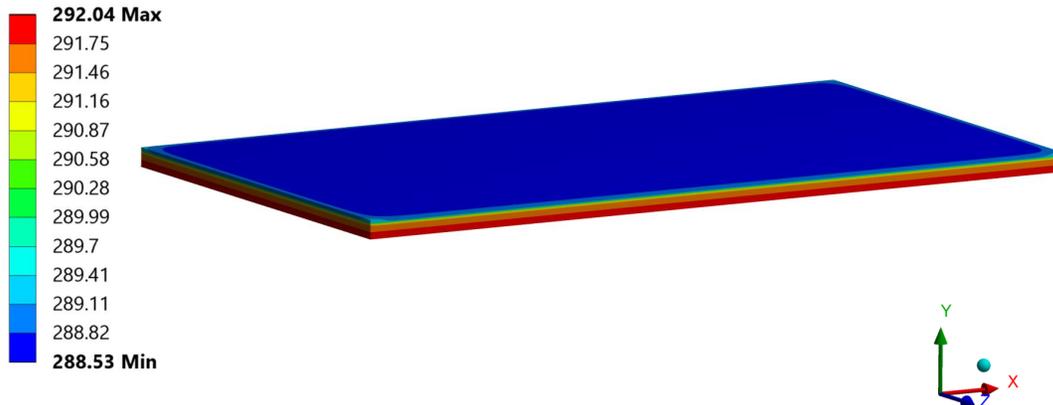


Figura 5.25: Contorno de la temperatura de operación del modelo DSCs completo en enero a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.

En las figuras 5.25 y 5.26 podemos observar las temperaturas de operación en las diferentes capas del módulo solar. Donde, la capa con mayor temperatura se encuentra en el sustrato del módulo, lo cual se debió a que el flujo solar es de menor magnitud y el potencial eléctrico es considerado constante; esto lo pudimos observar en el mes de septiembre en Cuernavaca, Morelos.



Figura 5.26: Contorno de temperatura de operación en el plano medio del modelo DSCs en enero a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.

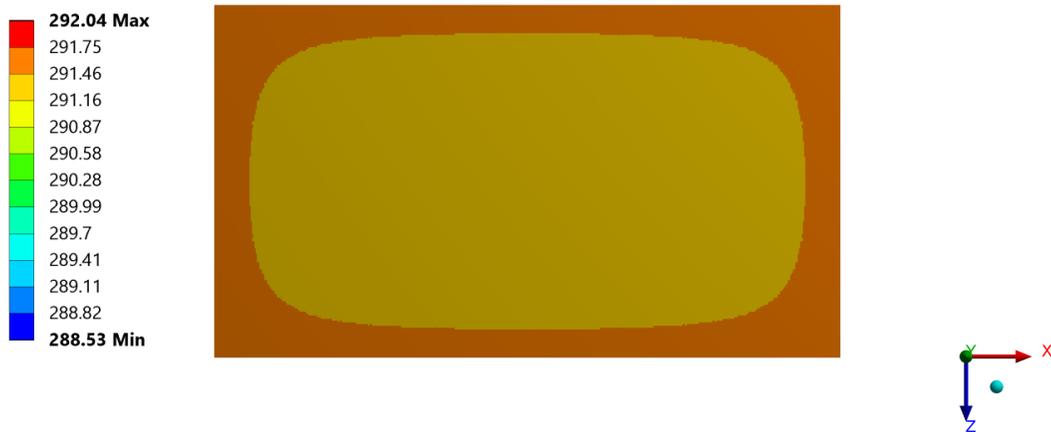


Figura 5.27: Contorno de temperatura de operación de la capa activa de la DSCs en enero a las 8 horas con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.

En la figura 5.27 podemos observar el contorno de temperatura de la capa activa.

Finalmente, cabe destacar que las figuras muestran el contorno de temperaturas a las 8:00 am con un coeficiente de convección de 5.82 (Apéndice B).

Considerando una temperatura ambiente variable y una irradiancia solar variable en el mes en que se presenta menor recurso solar en la ciudad de Mérida, con datos de las 8 horas a las 18 horas, los resultados fueron los siguientes:

De acuerdo a la gráfica de la figura 5.28 y a los datos del Anexo B, se puede observar que la hora en que las DSCs alcanzan su mayor temperatura de operación con un coeficiente de convección de 5.82 es alrededor de las 11:00 horas con una temperatura de 361.14 K (87.99°C) para la capa activa, 325.68 K (52.53°C) para la cubierta de vidrio, 360.86 K (87.71°C) para el electrolito y 328.56 K (55.41°C) para el sustrato de vidrio.

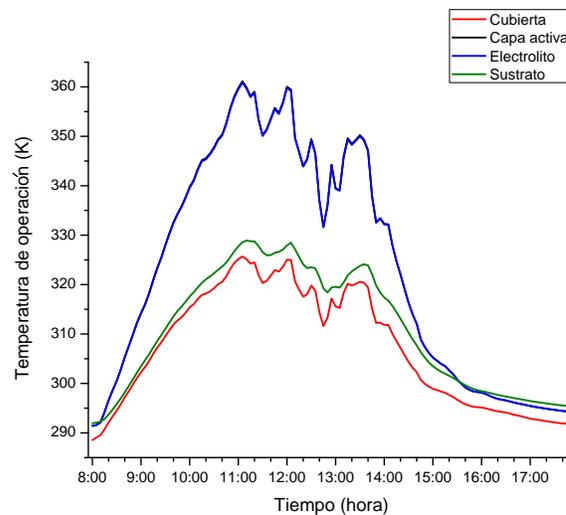


Figura 5.28: Temperatura de operación de las DSCs en enero con $h=5.82$, Mérida, Yucatán.

La gráfica de la figura 5.30, la cual corresponde a un coeficiente de convección de 13.96 y cuya tabla de resultados se muestra en el Anexo C, alcanza su mayor temperatura de operación alrededor de las 11:05 horas con un valor de 350.30 K (77.15°C) para la capa activa, 313.57K (40.42°C) para la cubierta de vidrio, 350.02 K (76.87°C) para el electrolito y 317.8 K (44.65°C) para el sustrato de vidrio.

La gráfica de la figura 5.29, la cual corresponde a un coeficiente de convección de 47.6 y cuya tabla de resultados se muestra en el Anexo D. Se alcanza su mayor temperatura de operación alrededor de las 11:05 horas con un valor de 339.64 K (66.49°C) para la capa activa, 301.63 K (28.48°C) para la cubierta de vidrio, 339.37 K (66.22°C) para el electrolito y 307.12 K (33.97°C) para el sustrato de vidrio.

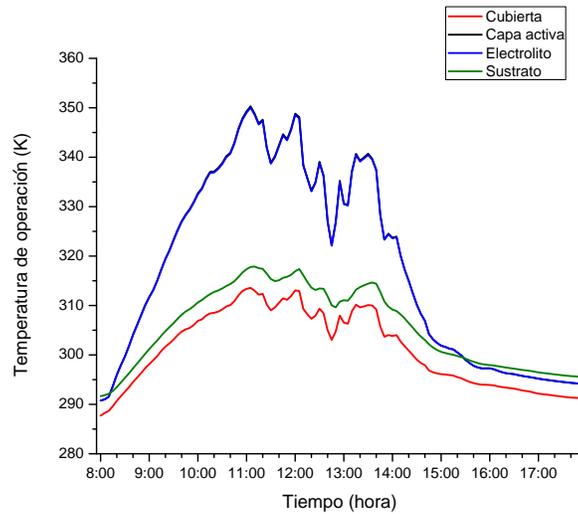


Figura 5.29: Temperatura de operación de las DSCs en enero con $h=13.96$, Mérida, Yucatán.

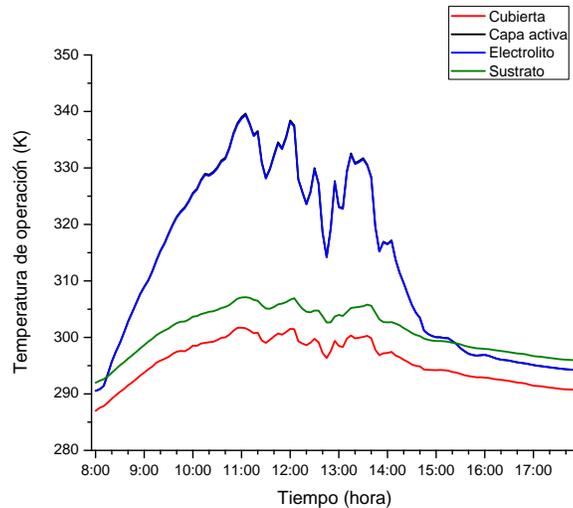


Figura 5.30: Temperatura de operación de las DSCs en enero con $h=47.6$, Mérida, Yucatán.

5.2.5. Influencia de la velocidad de viento en el desarrollo eléctrico en Mérida, Yucatán, mes de enero.

Al igual que en el mes de enero, al aumentar la velocidad de viento aumenta la eficiencia de las celdas. En la figura 5.31 se puede notar que a las 12:55 horas se obtiene la mayor eficiencia (11.52 %) de las celdas con una velocidad de viento de 0m/s, con una velocidad de viento de 2m/s se obtiene la mayor eficiencia (11.63 %) a las 12:55 horas, con una velocidad de viento de 10m/s se obtiene la mayor eficiencia (11.72 %) a las 12:55 horas; lo anterior, corresponde a una ganancia de 0.20 % de eficiencia y de

1.68 % en término de porcentaje al aumentar la velocidad de viento de 0m/s a 10m/s.

En cuanto al promedio diario de eficiencias se obtuvo lo siguiente:

- Con una velocidad de viento de 0m/s se obtuvo un promedio de eficiencia del 10.42 %, lo que corresponde a un 87.56 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).
- Con una velocidad de viento de 2m/s se obtuvo un promedio de eficiencia del 10.49 % , lo que corresponde a un 88.15 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).
- Con una velocidad de viento de 10m/s se obtuvo un promedio de eficiencia del 10.54 %, lo que corresponde a un 88.57 % con respecto al 100 % de la eficiencia de referencia (11.9 %).

En conclusión, se gana 0.12 % de eficiencia al aumentar la velocidad de viento de 0m/s a 10m/s en el mes de enero.

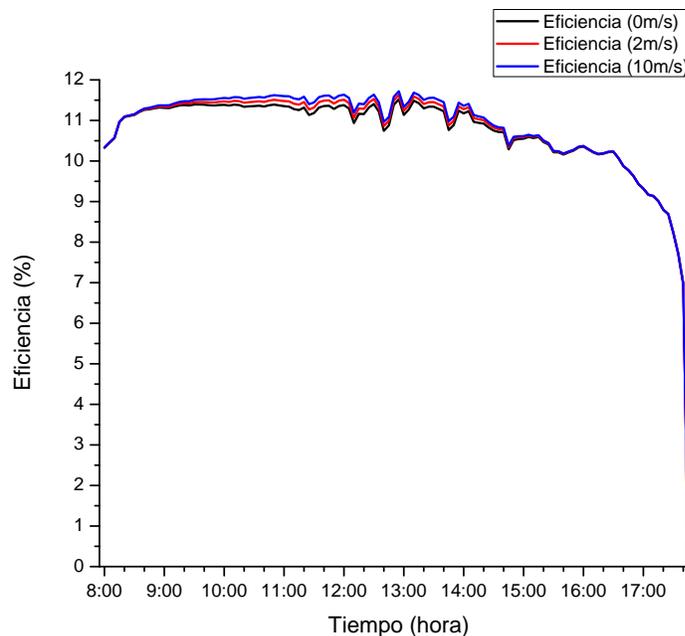


Figura 5.31: Eficiencia de las DSCs en Mérida, Yucatán en el mes de enero con velocidades de viento de 0m/s, 2m/s y 10m/s.

5.2.6. Influencia de la irradiancia solar en el desarrollo eléctrico en Mérida, Yucatán, mes de enero.

En las gráficas de la figura 5.32, se muestra el valor de las eficiencias de las DSCs con respecto a la irradiancia solar, utilizando temperaturas ambiente variables y una temperatura de viento constante. En la gráfica 5.32 (b) se logra observar que los valores

de las irradiancias solares no necesariamente se encuentran en orden ascendente con respecto a la hora del día. Esto se debe a la variación de los valores de irradiancia solar que normalmente se puede observar en la ciudad de Mérida, Yucatán.

La eficiencia más alta alcanzada durante el día es de 11.52 % utilizando una temperatura variable y de 11.60 % utilizando una temperatura constante. A la hora en que la radiación solar es de mayor magnitud, existe una brecha de eficiencia de 11.38 a 11.46 %. También se puede observar que los valores de eficiencia con mayor magnitud no corresponden a los valores de eficiencia en donde la irradiancia solar es mayor.

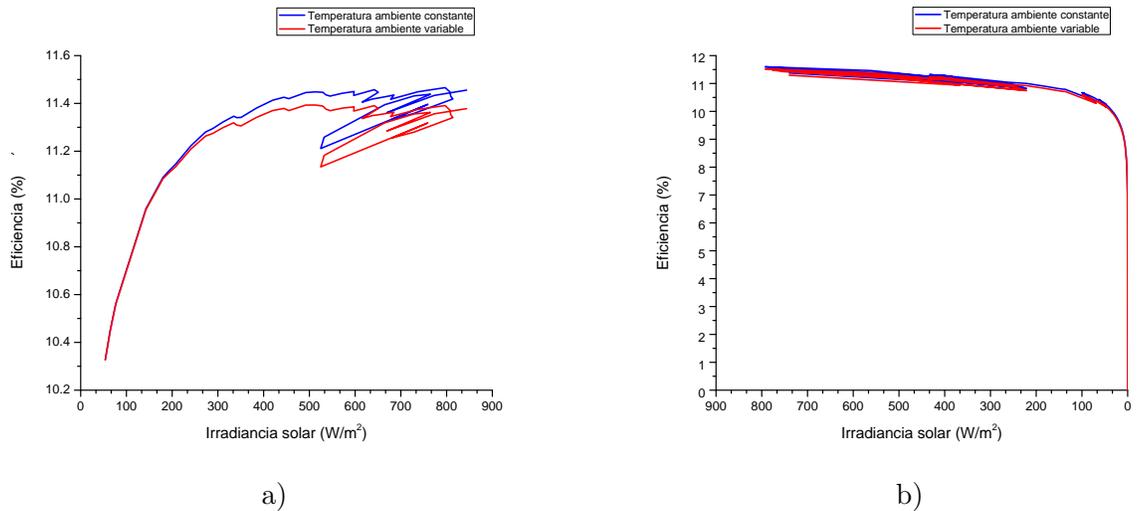


Figura 5.32: a) Eficiencia de las celdas con una irradiancia solar de $53.7W/m^2$ a $843.8W/m^2$, lo que corresponde a un horario de 8 horas a 12:00 horas. En color azul se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color rojo una temperatura ambiente variable. b) Eficiencia de las celdas con una irradiancia de $792.5W/m^2$ a $0W/m^2$ de las 12:05 horas a las 18:00 horas. En color azul se representan los resultados con una temperatura ambiente constante y en color rojo una temperatura ambiente variable.

5.3. Resultados experimentales de las Celdas Sensibilizadas por Colorante.

Como se menciona en el apartado de la *Metodología*, fueron fabricadas dos tipos de Celdas Solares Sensibilizadas por Colorantes utilizando dos electrolitos diferentes: Solaronix (I-etil3-metilimidazolio bis trifluorometanosulforilimida) y con base acetonitrilo (85 % acetonitrilo + 15 % valeronitrilo). Los resultados de la experimentación realizada se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Desarrollo eléctrico experimental.

Celda	Electrolito	$J_{sc}(mA/cm^2)$	$V_{oc}(V)$	FF(%)	$\eta(\%)$
A	Solaronix	9.36	0.6844	65.33	4.18
B	Solaronix	8.35	0.6736	64.56	3.63
C	Solaronix	8.72	0.6754	68.61	4.04
D	Acetonitrilo	12.31	0.7567	67.33	6.27
E	Acetonitrilo	13.46	0.7477	66.40	6.68
F	Acetonitrilo	11.45	0.7929	70.48	6.40

Las eficiencias fueron promediadas en dos grupos de celdas diferentes: Grupo 1 (A, B, y C) y grupo 2 (D, E y F), obteniendo una eficiencia de referencia del grupo 1 de 3.95 % y una eficiencia del grupo 2 del 6.45 %. Posteriormente se obtuvieron los resultados de la gráfica de la figura 5.33 para el clima con mayor recurso solar de Cuernavaca y los resultados de la gráfica de la figura 5.34 para el clima con mayor recurso solar de Mérida y cuyo valor de temperatura de operación del electrolito se desprecia al no obtener una diferencia importante entre los valores de temperatura de los dos electrolitos con parámetros térmicos diferentes (electrolito líquido y electrolito sólido) de acuerdo a la gráfica de la figura 5.35.

Finalmente, el valor promedio de la eficiencia del grupo 1 para Cuernavaca fue de 3.73 % y para Mérida de 3.66 %. El valor promedio de la eficiencia del grupo 2 para Cuernavaca fue de 6.1 % y para Mérida de 5.98 %.

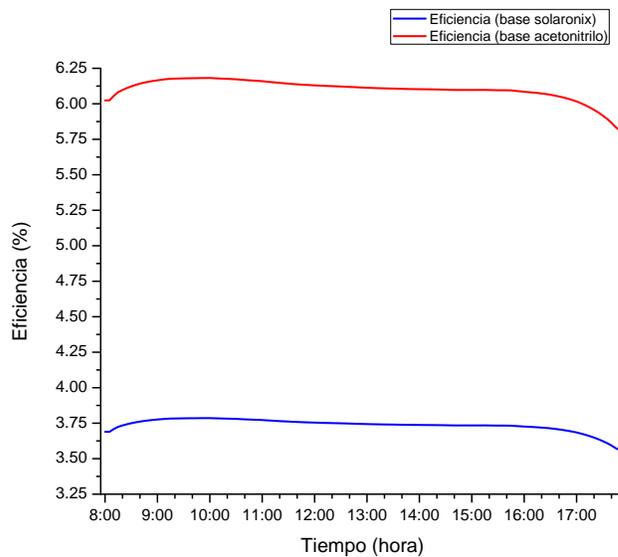


Figura 5.33: Eficiencias de los datos experimentales con electrolito solaronix y con electrolito base acetónitrilo, Cuernavaca, Morelos.

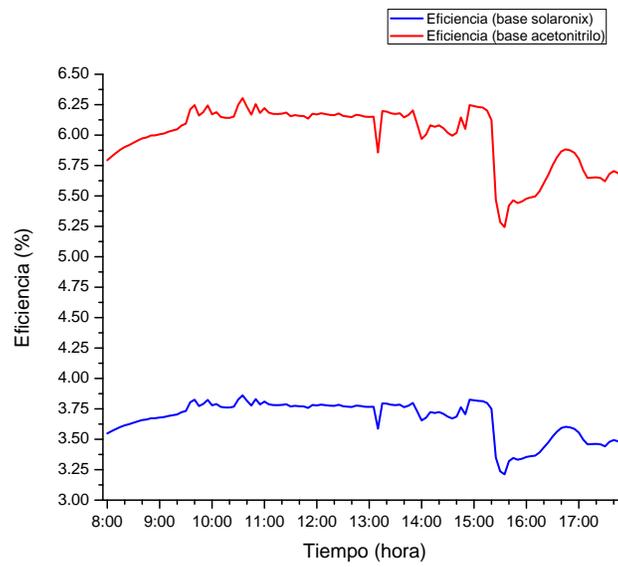


Figura 5.34: Eficiencias de los datos experimentales con electrolito solaronix y con electrolito base acetonitrilo, Mérida, Yucatán.

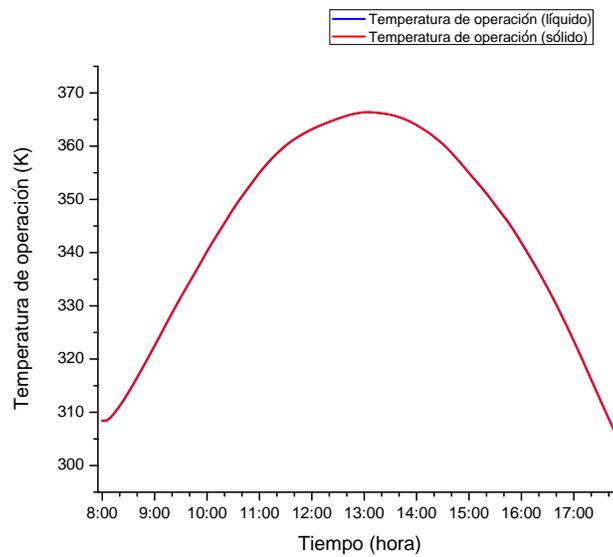


Figura 5.35: Comparación de las temperaturas de operación de un electrolito líquido y uno sólido.

5.4. Comparación de las eficiencias de las Celdas Sensibilizadas por Colorante con las Celdas de Silicio.

De acuerdo a la revisión bibliográfica revisada, las celdas solares de Silicio, cuya tecnología es la que principalmente se comercializa, presenta una eficiencia de referencia del 25.3 %, mientras que la tecnología de las DSCs presenta una eficiencia de referencia del 11.9 %. Lo anterior, es importante enfatizarlo debido a que podemos notar que el porcentaje de eficiencia de las DSCs esta todavía muy por debajo del porcentaje de eficiencia de las de Silicio; sin embargo, también es importante mencionar que la eficiencia de las celdas solares de Silicio se ven más afectadas al presentarse un aumento en la temperatura de operación de las mismas en comparación con las DSCs. En la gráfica de la figura 5.36 se puede observar el desarrollo de las celdas solares de Silicio y las DSCs con respecto a la temperatura de operación.

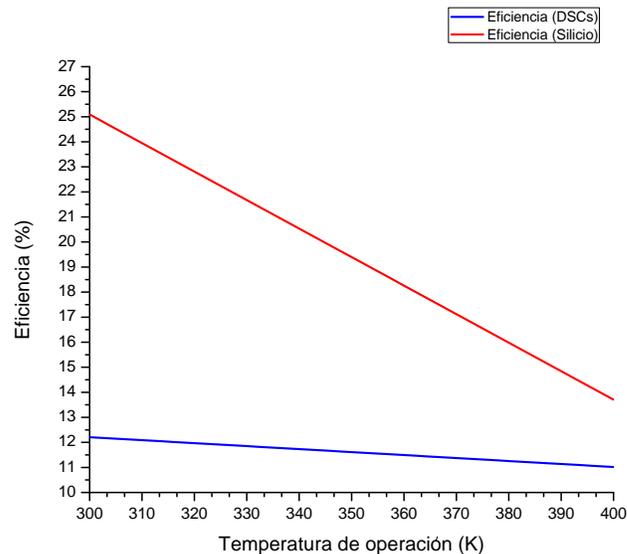


Figura 5.36: Desarrollo de las celdas solares de Silicio y las DSCs con respecto a la temperatura de operación.

De acuerdo a los datos procesados se puede concluir lo siguiente:

- El promedio de eficiencia presentado en las DSCs utilizando temperaturas de operación de 300 K a 400 K es de 11.61 %.
- El promedio de eficiencia presentado en las celdas solares de Silicio utilizando temperaturas de operación de 300 K a 400 K es de 19.39 %, 7.78 % por encima de las DSCs.
- Las DSCs conservan el 92.59 % de eficiencia con respecto a la eficiencia de referencia (11.9 %); es decir, solo se pierde el 7.41 % de la eficiencia inicial al aumentar la temperatura de operación de 300 K a 400 K.

- Las celdas solares de Silicio conservan el 54.16 % de eficiencia con respecto a la eficiencia de referencia (25.3 %). Pierde el 45.83 % de la eficiencia inicial al aumentar la temperatura de operación de 300 K a 400 K.
- La eficiencia más baja presentada en los resultados de la gráfica 5.36 es de 11.02 % para las DSCs y de 13.70 % para las celdas de Silicio. Con esto se puede concluir que la brecha de eficiencias entre estas dos tecnologías solares disminuye al aumentar la temperatura de operación.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

De acuerdo a los objetivos planteados, se logró desarrollar el modelo numérico transitorio en *Ansys Thermal* para estudiar el desarrollo térmico de las Celdas Solares Sensibilizadas por Colorante concluyendo los siguientes puntos:

- Los valores más altos de eficiencia no se presentan necesariamente con el valor más alto de irradiancia solar debido a que la acumulación de calor a lo largo del día y por lo tanto el aumento de la temperatura de operación influyen en la disminución de la eficiencia de las DSSCs.
- Al considerar un valor de temperatura ambiente constante, los valores de las eficiencias fueron más bajos que al considerar valores de temperatura ambiente variable. Por lo que se recomienda considerarlo en los modelos térmicos de las DSSCs.
- Los valores termodinámicos de los electrolitos prácticamente no afectan el desarrollo térmico de las DSSCs por lo que se pueden despreciar en los modelos térmicos de las DSSCs.
- Las horas en que se presentaron los valores más altos de eficiencia para la ciudad de Cuernavaca fueron de las 10:30 a las 11:30 en el mes de abril y de las 11:00 a las 12:00 horas en el mes de septiembre. Las horas en que se presentaron los valores con mayor eficiencia para la Ciudad de Mérida fueron de 10:00 a las 11:00 horas en el mes de agosto y de 11:00 a 12:00 horas en el mes de enero.
- El promedio de las eficiencias en Cuernavaca para el mes de abril fue de 11.25 % a 11.48 % y para el mes de septiembre fue de 10.95 % a 11.12 %, al aumentar el coeficiente de convección de 5.82 a 46.7 W/m^2K . El promedio de las eficiencias en Mérida para el mes de agosto fue de 10.92 % a 11.07 % y para el mes de enero fue de 10.42 % a 10.54 %, al aumentar el coeficiente de convección de 5.82 a 46.7 W/m^2K .

- Para las celdas experimentales con electrolito Solaronix se obtuvo un promedio de 3.6 % para el mes de abril y un 3.73 % para el mes de septiembre en Cuernavaca, Morelos; de igual manera, se obtuvo un 3.2 % para el mes de agosto y un 3.66 % para el mes de enero en Mérida, Yucatán. El valor de eficiencia de referencia, utilizando condiciones estándar, fue de 3.95 %. Mientras que para las celdas experimentales utilizando el electrolito a base de acetonitrilo fue de 5.9 % para el mes de abril y de 6.1 % para el mes de septiembre en Cuernavaca; de 5.2 % para el mes de agosto y de 5.98 % para el mes de enero en Mérida. El valor de eficiencia de referencia, utilizando condiciones estándar, fue de 6.45 %.
- Existe una disminución en la brecha de eficiencias entre las celdas solares de Silicio y las DSSCs, al ser las celdas de Silicio más susceptibles a las altas temperaturas de operación. Con temperaturas de operación de 370 K la eficiencia para las DSSCs disminuye de 11.9 % a 11.37 %, mientras que las celdas de Silicio disminuyen de 25.3 % a 13.7 %; es decir, las DSCs conservan el 95.5 % de la eficiencia de referencia y las celdas de Silicio conservan solo el 54.2 % de la eficiencia de referencia.

6.2. Recomendaciones.

Se recomienda hacer un estudio de Dinámica de Fluidos Computacional en forma transitoria para conocer la influencia que tiene la dirección de viento a diferentes horas del día en la temperatura de operación de las DSSCs. Por otra parte, sería de suma importancia realizar un estudio de costos en la implementación de las celdas DSSCs y las celdas de Silicio, considerando la brecha de eficiencia debido a la temperatura de operación de dichas celdas para las ciudades de Cuernavaca, Morelos y Mérida, Yucatán.

Bibliografía

- [1] AL-ALWANI, *Dye-sensitized solar cells: Development, structure, operation principles, electron kinetics, characterisation, synthesis materials and natural photosensitisers*, Renewable and Sustainable Energy Reviews; 2016
- [2] P.M. ANBARASAN ET AL, *Heat transfer investigation on performance of dye sensitized and v-grooved silicon solar cells.*, Int. J. Adv.Sci.Eng; 2014
- [3] ANSYS, *Ansys fluent user's guide*; 2013
- [4] ANSYS, *Ansys fluent theoretical guide*; 2013
- [5] AZHAR FAKHARUDDIN, ET AL., *A perspective on the production of dye-sensitized solar modules*, Energy & Environmental Science; 2014
- [6] BAI, *High-performance dye-sensitized solar cells based on solvent-free electrolytes produced from eutectic melts*, Nature Materials; 2008
- [7] BAXTER, *Commercialization of dye sensitized solar cells: Present status and future research needs to improve efficiency, stability, and manufacturing*, J. Vac. Sci. Technol. A; 2012
- [8] CHEN ET. AL. *Numerical model analysis of thermal performance for a dye-sensitized solar cell module*, JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS, 2013
- [9] DAI, *The design and outdoor application of dye-sensitized solar cells*, Inorganica Chemica Acta; 2008
- [10] DESILVESTRO, *3rd Dye Solar Cell Industrialization Conference*; 2009
- [11] EDWING PENG & HALIL BERBEROG., *Temperature and irradiance dependence of a dye sensitized solar cell with acetonitrile based electrolyte.*, Journal of Solar Energy Engineering; 2012
- [12] GOLDSTEN, *Development of large area photovoltaic dye cells at 3G solar*, Solar Energy Material and Solar Cells; 2010
- [13] HARIKISUM, *Long-term stability of dye solar cells*, Solar Energy; 2010
- [14] JESÚS GONZALEZ & JOHN FARAH, *Maximizando la potencia en celdas solares: Un enfoque pedagógico*, Latin American and Caribbean Conference; 2012

-
- [15] JI-CHENG ZHOU ET. AL., *Temperature distribution and back sheet role of polycrystalline silicon photovoltaics modules*, Applied Thermal Engineering; 2016
- [16] JUAN JESÚS GALLARDO ET AL, *Estimating the temperature of the active layer of dye sensitised solar cells by using a second order lumped parameter mathematical model* Solar Energy; 2016
- [17] JULIO FERNÁNDEZ, *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivos portátil*. Tesis. Universidad Carlos III de Madrid.
- [18] KUBO, *Quasi-Solid-State dye sensitized solar cells using room temperature molten salts and a low molecular weight gelator*, Chemical Communications; 2002
- [19] M. BERGINC ET AL., *The effect of the temperature on the performance of dye-sensitized solar cells based on a propyl-methyl-imidazolium iodide electrolyte.*, Solar Energy Materials & Solar Cells; 2007
- [20] MACAIRA, *Laser sealed dye-sensitized solar cells: Efficiency and long term stability*, Solar Energy Materials & Solar Cells; 2016
- [21] MARIO A.ESCOBAR, *Natural dyes and hibrid halide perovskites applied to meso-structured solar cells*. Doctoral thesis. University of Antioquia; 2015
- [22] MARY ARCHER & ROBERT HILL, *Clean electricity from photovoltaics*, Imperial College Press; 2001
- [23] MEHMOOD ET AL., *Effect of outdoor temperature on the power-conversion efficiency of newly synthesized organic photosensitizer based dye-sensitized solar cells.*, Materials Letters; 2018
- [24] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, *Best Research-Cells Efficiencies*, 2015
- [25] NELSON J., *The Physics of Solar Cells*. Imperial College Press; 2003.
- [26] PAN B, CHEN S H, HUANG Y, ET AL., *Design and thermal analysis of a water-cooled DSC module*, Sci China Tech Sci; 2016
- [27] PETERSON, *Long-term Stability of low-power dye-sensitized solar cells prepared by industrial methods*, Solar Energy Material and Solar Cells; 2001
- [28] PETTERSSON, *Parallel-connected monolithic dye-sensitized solar modules*, Progress in Photovoltaics; 2010
- [29] PREETI SINGHA, ET AL., *Three dimensional analysis of dye-sensitized, perovskite and mono-Si solar photovoltaic cells under non uniform solar flux*, Applied Thermal Engineering ; 2021
- [30] PREETI SINGH ET. AL. *Three dimensional analysis of dye sensitized, perovskite and mono-Si solar photovoltaic cells under non uniform solar flux*, Applied thermal engineering, 2021

- [31] RAFAEL FORMENTÍN , *Estudio de las características electrónicas de dispositivos fotovoltaicos moleculares: células Gratzel* . Trabajo final de grado. Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [32] RAGA & FABREGAT-SANTIAGO, *Temperature effects in dye-sensitized solar cells*, Phys.Chem. Chem. Phys.,2013
- [33] ROY MAYHEW JD, ET AL., *Functionalized graphene as a catalytic counter electrode in dye-sensitized solar cells.*, Applied physics A. Materials Sciences & Processings ; 2019
- [34] SOURAV KHANNA ET AL., *Performance Analysis of Perovskite and Dye-Sensitized Solar Cells under varying operation conditions and comparasion with Monocrystalline of Silicon Solar Cell.*,Applied Thermal Engineering; 2017
- [35] SUK, *Dye sensitized solar cells for economically viable PV systems*,J. Phys. Chem; 2013
- [36] TIRADO JARAMILLO, *Desarrollo de nuevos materiales semiconductores para su uso como capas transportadoras de cargas en celdas solares nanoestructuradas*. Propuesta de tesis doctoral. Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales CIDEMAT
- [37] TOYOTA CENTRAL R&D LABORATORIES, *Improvement in long-term stability of dye-sensitized solar cell for outdoor use*,Solar Energy Material and Solar Cells; 2011
- [38] TY W NEISES, *Development and validation of a model to predict the temperature of a photovoltaic cell*. Tesis de maestria. Universidad de Wisconsin 2011
- [39] V. RONDÁN GÓMEZ, ET AL., *Recent advances in dye-sensitized solar cells*, ACS publications ; 2010
- [40] YANG, *Thermal Stability Study of Dye-Sensitized Solar Cells with Cobalt Bipyridyl-based Electrolytes*, Electrochimica Acta; 2016
- [41] YU Q., ET AL., *High-efficiency dye-sensitized solar cells: the influence of lithium ions on exciton dissociation, charge recombination, and surface states.*, ACS publications ; 2010
- [42] YUNUS A. ÇENGEL & AFSHIN J. GHAJAR., *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones.*; 2004.
- [43] YUNUS A. ÇENGEL., *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones.*,Mc. Graw Hill, cuarta edición; 2011
- [44] http://www.esco-tel.com/tipos_de_celdas_solares.html
Consultado el 30 de enero del 2015
- [45] http://gabinete.org.ar/Febrero_2012/paneles_eficientes.htm
Consultado el 12 de enero del 2016

- [46] http://cienciaysalud.laverdad.es/4_2_35.html
Consultado el 12 de enero del 2016
- [47] <http://www.biodisol.com/energia-solar/investigacion-celdas-solares-que-imitan-la-actividad>
Consultado el 12 de enero del 2016
- [48] <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/ciudadania/energia-solar>
Consultado el 21 de enero del 2016
- [49] <http://www.textoscientificos.com/energia/celulas>
Consultado el 21 de enero del 2016
- [50] <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar16/HTML/articulo01.htm>
Consultado el 14 de noviembre del 2016
- [51] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4119/fichero>
Consultado el 16 de junio del 2020
- [52] https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/117152/TFG_Giraldo_Vivas_Adria.pdf?sequence=1&isAllowed=y
Consultado el 16 de junio del 2020
- [53] <https://power.larc.nasa.gov>
- [54] <https://www.wunderground.com>
Consultado en el 2019


```
t(j+1)=t(j)+h;
[fT]=itzel(T(:,j),vecsun11(j));
for i=1:ne
    T(i,j+1)=T(i,j)+fT(i)*h;
end
end
%Gráfica t vs Ti
hora=(t/60)+8
for i=1:ne
    plot(hora,(T(1,:)-273),'g')
xlabel('Tiempo(Hr)'),ylabel('Temperatura(°C)')

    hold on
    plot(hora,(T(2,:)-273),'b')

    plot(hora,(T(3,:)-273),'m')
    grid on
legend('Cubierta de vidrio','DSC','Sustrato de vidrio')
end
```

```

function [fT]=cover (T, sun11, Ta2)

Tc=T (1);
Tm=T (2);
Ts=T (3);

A=0.36 ;%área(m2)
Cc=540; %calor específico (J/KgK)
Cs=540;
Cm=328;

Ta=293; %temperatura ambiente piso (K)
Tal=287; %temperatura ambiente cielo (K)
Kc=0.9; %conductividad térmica (w/Km)
Kair=0.025;
Kdsc=6.5;
Kfilm=0.02;
Ks=0.9;
Pout=13.8; %Potencial (W)
R1=0.16; %Resistencia térmica (W/m2K)
R2=0.08;
dc=0.003; %Espesor(m)
dair=0.004;
dm=0.0046;
dfilm=0.0016;
ds=0.005;
hc=5.82; %Coeficiente de convección
ab=5.67E-8;%Coeficiente de Stefan Boltzman (W/m2K4)
pc=2500;%Densidad (kg/m2)
ps=2500;
pm=2150;
ag=0.12;%Absortividad del vidrio
ag2=0
adsc=0.7;%Absortividad ef de la celda
E=0.85;%emisitividad
%

tg=0.88

sun1=sun11*0.2

dT_dt (1) = ((sun1*A) + ((A) * ((Tm-Tc) / (R1 + (dc/Kc)))) - (hc*A*(Tc-Tal)) -
((A*E*ab) * (Tc^4-Tal^4))) / (A*Cc*dc*pc)
dT_dt (2) = (((sun11-sun1-38.3)*A) - ((A) * ((Tm-Tc) / (R1 + (dc/Kc)))) - ((A) * ((Tm-
Ts) / (R2 + (ds/Ks)))))) / (A*Cm*dm*pm)
dT_dt (3) = (((A) * ((Tm-Ts) / (R2 + (ds/Ks)))) - (hc*A*(Ts-Ta)) - (E*ab*A*(Ts^4-
Ta^4))) / (A*Cs*ds*ps)
e = ((Tm-Ts) / (R2 + (ds/Ks)))
fT=dT_dt
end

```

**Resultados con velocidad de viento de 0 m/s Cuernavaca
(abril, septiembre) y Mérida (agosto, enero)**

TEMPERATURA CONSTANTE (MES DE ABRIL)

TIEMPO (s)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	238.00	295.93	308.54	308.37	300.97
300	238.00	297.7	308.54	308.46	301.04
600	262.50	297.93	309.17	309.08	301.09
900	287.00	298.39	310.17	310.07	301.32
1200	305.67	298.93	311.29	311.18	301.67
1500	324.34	299.54	312.52	312.4	302.13
1800	343.00	300.19	313.84	313.71	302.67
2100	361.34	300.86	315.22	315.08	303.26
2400	379.67	301.56	316.66	316.51	303.91
2700	398.00	302.28	318.14	317.98	304.59
3000	415.34	303	319.62	319.46	305.3
3300	432.67	303.72	321.12	320.95	306.02
3600	450.00	304.44	322.63	322.46	306.76
3900	468.34	305.18	324.18	323.99	307.51
4200	486.67	305.92	325.74	325.55	308.27
4500	505.00	306.67	327.33	327.12	309.04
4800	520.65	307.4	328.85	328.64	309.8
5100	536.35	308.1	330.34	330.12	310.56
5400	552.00	308.8	331.81	331.59	311.3
5700	567.35	309.47	333.26	333.02	312.04
6000	582.65	310.14	334.68	334.44	312.76
6300	598.00	310.8	336.09	335.84	313.47
6600	615.00	311.47	337.53	337.28	314.18
6900	632.00	312.15	338.99	338.73	314.89
7200	649.00	312.84	340.46	340.19	315.6
7500	662.65	313.49	341.85	341.57	316.3
7800	676.35	314.11	343.19	342.9	316.98
8100	690.00	314.71	344.5	344.2	317.65
8400	705.00	315.32	345.81	345.51	318.31
8700	720.00	315.93	347.13	346.83	318.95
9000	735.00	316.54	348.45	348.14	319.6
9300	746.35	317.1	349.67	349.36	320.23
9600	757.65	317.64	350.84	350.51	320.83
9900	769.00	318.15	351.96	351.63	321.41
10200	781.35	318.66	353.08	352.74	321.97
10500	793.65	319.17	354.19	353.85	322.52
10800	806.00	319.67	355.29	354.94	323.06
11100	814.65	320.13	356.29	355.94	323.58
11400	823.35	320.55	357.23	356.87	324.08
11700	832.00	320.96	358.12	357.76	324.55
12000	839.00	321.33	358.94	358.58	324.99
12300	846.00	321.68	359.71	359.34	325.4

12600	853.00	322.01	360.44	360.07	325.78
12900	857.35	322.29	361.07	360.7	326.14
13200	861.65	322.55	361.64	361.27	326.46
13500	866.00	322.78	362.17	361.79	326.76
13800	870.00	323	362.65	362.27	327.03
14100	874.00	323.2	363.1	362.72	327.28
14400	878.00	323.39	363.53	363.15	327.51
14700	881.00	323.56	363.91	363.53	327.72
15000	884.00	323.72	364.27	363.89	327.91
15300	887.00	323.87	364.6	364.22	328.1
15600	890.35	324.01	364.92	364.54	328.27
15900	893.65	324.15	365.24	364.85	328.43
16200	897.00	324.29	365.55	365.16	328.58
16500	899.35	324.42	365.83	365.44	328.73
16800	901.65	324.53	366.09	365.7	328.87
17100	904.00	324.64	366.34	365.94	329
17400	904.00	324.72	366.51	366.12	329.11
17700	904.00	324.78	366.64	366.25	329.2
18000	904.00	324.82	366.74	366.35	329.28
18300	901.65	324.83	366.76	366.37	329.33
18600	899.35	324.81	366.73	366.34	329.36
18900	897.00	324.78	366.65	366.26	329.36
19200	894.65	324.73	366.55	366.16	329.34
19500	892.35	324.67	366.43	366.04	329.31
19800	890.00	324.6	366.29	365.9	329.26
20100	885.35	324.51	366.08	365.69	329.2
20400	880.65	324.39	365.82	365.44	329.11
20700	876.00	324.25	365.53	365.15	329
21000	869.65	324.09	365.17	364.79	328.87
21300	863.35	323.91	364.76	364.39	328.72
21600	857.00	323.71	364.33	363.96	328.54
21900	849.35	323.48	363.84	363.47	328.35
22200	841.65	323.24	363.31	362.94	328.13
22500	834.00	322.98	362.75	362.39	327.89
22800	824.65	322.7	362.12	361.77	327.64
23100	815.35	322.39	361.45	361.1	327.36
23400	806.00	322.07	360.76	360.41	327.06
23700	793.65	321.71	359.96	359.62	326.73
24000	781.35	321.31	359.1	358.76	326.37
24300	769.00	320.9	358.19	357.86	325.98
24600	756.65	320.46	357.25	356.93	325.57
24900	744.35	320.02	356.28	355.96	325.14
25200	732.00	319.56	355.29	354.98	324.69
25500	721.35	319.12	354.33	354.02	324.23
25800	710.65	318.68	353.38	353.08	323.78
26100	700.00	318.25	352.44	352.14	323.33
26400	686.00	317.78	351.41	351.12	322.86

26700	672.00	317.29	350.34	350.06	322.38
27000	658.00	316.77	349.24	348.96	321.87
27300	645.65	316.27	348.15	347.88	321.36
27600	633.35	315.77	347.07	346.8	320.85
27900	621.00	315.27	345.99	345.73	320.33
28200	603.35	314.71	344.78	344.52	319.79
28500	585.65	314.11	343.48	343.24	319.21
28800	568.00	313.48	342.12	341.89	318.61
29100	551.65	312.84	340.76	340.54	317.98
29400	535.35	312.2	339.39	339.17	317.34
29700	519.00	311.55	338	337.79	316.68
30000	501.00	310.87	336.56	336.36	316.01
30300	483.00	310.18	335.09	334.9	315.32
30600	465.00	309.48	333.59	333.4	314.61
30900	445.00	308.74	332.02	331.84	313.88
31200	425.00	307.98	330.4	330.24	313.13
31500	405.00	307.19	328.75	328.6	312.35
31800	384.34	306.39	327.06	326.91	311.55
32100	363.67	305.57	325.33	325.19	310.73
32400	343.00	304.74	323.58	323.45	309.9
32700	321.34	303.88	321.78	321.67	309.04
33000	299.67	303.01	319.96	319.85	308.16
33300	278.00	302.12	318.1	318.01	307.27
33600	257.34	301.24	316.26	316.17	306.36
33900	236.67	300.35	314.41	314.33	305.45
34200	216.00	299.46	312.56	312.49	304.53
34500	196.34	298.58	310.74	310.68	303.61
34800	176.67	297.7	308.92	308.87	302.7
35100	157.00	296.82	307.12	307.08	301.78
35400	142.34	296.01	305.44	305.41	300.89
35700	127.67	295.24	303.85	303.82	300.02
36000	113.00	294.49	302.31	302.29	299.19

TEMPERATURA VARIABLE (MES DE ABRIL)

TIEMPO (s)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	294.59	238.00	297.47	310.06	309.99	302.5
300	294.59	238.00	299.23	310.1	310.04	302.58
600	294.74	262.50	299.51	310.75	310.68	302.66
900	294.88	287.00	300.04	311.8	311.71	302.94
1200	295.03	305.67	300.68	312.98	312.89	303.36
1500	294.94	324.34	301.3	314.25	314.16	303.85
1800	294.85	343.00	301.93	315.6	315.49	304.39
2100	294.76	361.34	302.56	316.99	316.87	304.97
2400	294.80	379.67	303.26	318.42	318.31	305.62
2700	294.83	398.00	303.98	319.91	319.78	306.31
3000	294.87	415.34	304.72	321.41	321.28	307.02
3300	294.96	432.67	305.48	322.93	322.79	307.77
3600	295.06	450.00	306.25	324.47	324.32	308.55
3900	295.15	468.34	307.05	326.06	325.9	309.34
4200	295.28	486.67	307.87	327.68	327.52	310.16
4500	295.40	505.00	308.71	329.33	329.16	311
4800	295.53	520.65	309.53	330.93	330.75	311.85
5100	295.46	536.35	310.25	332.48	332.3	312.64
5400	295.38	552.00	310.93	333.98	333.8	313.41
5700	295.31	567.35	311.58	335.44	335.25	314.14
6000	295.42	582.65	312.27	336.88	336.69	314.88
6300	295.54	598.00	312.99	338.33	338.13	315.63
6600	295.65	615.00	313.73	339.81	339.61	316.39
6900	295.67	632.00	314.45	341.32	341.1	317.14
7200	295.68	649.00	315.15	342.82	342.61	317.89
7500	295.70	662.65	315.82	344.25	344.02	318.61
7800	295.94	676.35	316.55	345.64	345.41	319.37
8100	296.18	690.00	317.29	347.03	346.8	320.14
8400	296.42	705.00	318.05	348.46	348.22	320.92
8700	296.44	720.00	318.75	349.88	349.63	321.66
9000	296.46	735.00	319.41	351.29	351.03	322.38
9300	296.48	746.35	320.01	352.58	352.33	323.06
9600	296.59	757.65	320.62	353.82	353.56	323.73
9900	296.70	769.00	321.2	355.01	354.75	324.39
10200	296.81	781.35	321.79	356.2	355.94	325.03
10500	297.03	793.65	322.43	357.41	357.14	325.68
10800	297.26	806.00	323.08	358.62	358.34	326.35
11100	297.48	814.65	323.69	359.75	359.47	327
11400	297.65	823.35	324.26	360.82	360.53	327.63
11700	297.81	832.00	324.8	361.84	361.56	328.23
12000	297.98	839.00	325.31	362.8	362.51	328.81
12300	298.02	846.00	325.74	363.68	363.39	329.32
12600	298.05	853.00	326.13	364.52	364.22	329.8

12900	298.09	857.35	326.47	365.24	364.94	330.23
13200	298.16	861.65	326.78	365.89	365.59	330.62
13500	298.24	866.00	327.08	366.48	366.19	330.99
13800	298.31	870.00	327.36	367.04	366.74	331.32
14100	298.40	874.00	327.63	367.56	367.26	331.64
14400	298.50	878.00	327.89	368.06	367.76	331.94
14700	298.59	881.00	328.14	368.51	368.21	332.23
15000	298.66	884.00	328.36	368.93	368.63	332.49
15300	298.74	887.00	328.57	369.33	369.03	332.73
15600	298.81	890.35	328.78	369.73	369.42	332.97
15900	299.01	893.65	329.03	370.12	369.82	333.22
16200	299.22	897.00	329.3	370.53	370.22	333.49
16500	299.42	899.35	329.57	370.92	370.61	333.76
16800	299.53	901.65	329.79	371.29	370.98	334.01
17100	299.65	904.00	330.01	371.65	371.34	334.25
17400	299.76	904.00	330.19	371.93	371.62	334.46
17700	299.76	904.00	330.3	372.15	371.84	334.63
18000	299.76	904.00	330.38	372.33	372.02	334.77
18300	299.76	901.65	330.41	372.4	372.09	334.86
18600	299.91	899.35	330.47	372.43	372.12	334.96
18900	300.05	897.00	330.53	372.43	372.12	335.04
19200	300.20	894.65	330.59	372.41	372.1	335.12
19500	300.35	892.35	330.64	372.38	372.07	335.18
19800	300.50	890.00	330.69	372.34	372.04	335.24
20100	300.65	885.35	330.71	372.23	371.93	335.29
20400	300.69	880.65	330.67	372.07	371.77	335.29
20700	300.72	876.00	330.6	371.86	371.57	335.26
21000	300.76	869.65	330.49	371.58	371.28	335.19
21300	300.81	863.35	330.36	371.24	370.95	335.11
21600	300.87	857.00	330.22	370.87	370.58	334.99
21900	300.92	849.35	330.05	370.44	370.15	334.86
22200	301.11	841.65	329.91	369.98	369.7	334.73
22500	301.29	834.00	329.78	369.52	369.23	334.6
22800	301.48	824.65	329.64	369	368.72	334.46
23100	301.63	815.35	329.47	368.45	368.17	334.3
23400	301.77	806.00	329.28	367.87	367.6	334.13
23700	301.92	793.65	329.05	367.19	366.93	333.92
24000	301.74	781.35	328.66	366.41	366.15	333.61
24300	301.55	769.00	328.19	365.55	365.29	333.23
24600	301.37	756.65	327.68	364.61	364.36	332.8
24900	301.63	744.35	327.32	363.67	363.42	332.43
25200	301.89	732.00	327.01	362.74	362.5	332.08
25500	302.15	721.35	326.74	361.88	361.64	331.75
25800	302.00	710.65	326.33	361	360.77	331.35
26100	301.85	700.00	325.87	360.1	359.87	330.91
26400	301.70	686.00	325.35	359.09	358.87	330.43
26700	301.74	672.00	324.87	358.03	357.81	329.96

27000	301.77	658.00	324.38	356.94	356.72	329.48
27300	301.81	645.65	323.91	355.87	355.66	329
27600	302.00	633.35	323.51	354.83	354.63	328.55
27900	302.18	621.00	323.13	353.82	353.62	328.12
28200	302.37	603.35	322.72	352.7	352.51	327.69
28500	302.50	585.65	322.25	351.51	351.32	327.24
28800	302.63	568.00	321.75	350.26	350.08	326.75
29100	302.76	551.65	321.24	349.02	348.84	326.25
29400	302.63	535.35	320.63	347.73	347.56	325.67
29700	302.50	519.00	319.97	346.4	346.24	325.04
30000	302.37	501.00	319.27	344.99	344.84	324.38
30300	302.37	483.00	318.58	343.53	343.39	323.71
30600	302.37	465.00	317.89	342.05	341.91	323.02
30900	302.37	445.00	317.17	340.5	340.37	322.31
31200	302.30	425.00	316.41	338.89	338.77	321.57
31500	302.22	405.00	315.61	337.24	337.12	320.79
31800	302.15	384.34	314.79	335.54	335.43	319.98
32100	302.19	363.67	313.99	333.81	333.71	319.17
32400	302.22	343.00	313.19	332.07	331.98	318.36
32700	302.26	321.34	312.38	330.3	330.21	317.53
33000	302.26	299.67	311.55	328.49	328.41	316.69
33300	302.26	278.00	310.69	326.67	326.6	315.82
33600	302.26	257.34	309.84	324.85	324.78	314.95
33900	302.18	236.67	308.96	323.02	322.97	314.05
34200	302.11	216.00	308.06	321.18	321.13	313.14
34500	302.03	196.34	307.16	319.35	319.31	312.22
34800	302.03	176.67	306.29	317.54	317.51	311.31
35100	302.03	157.00	305.44	315.74	315.71	310.41
35400	302.03	142.34	304.64	314.08	314.06	309.53
35700	301.87	127.67	303.83	312.48	312.46	308.65
36000	301.70	113.00	303.02	310.92	310.91	307.78

SEPTIEMBRE TEMPERATURA VARIABLE

TIEMPO (s)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	289.32	28.00	285.49	288.38	288.39	288.93
300	289.32	28.00	285.50	288.37	288.38	288.79
600	289.48	32.67	285.72	288.51	288.52	288.81
900	289.57	37.33	285.91	288.74	288.74	288.88
1200	289.67	42.00	286.10	289.02	289.02	288.99
1500	289.76	48.00	286.31	289.39	289.38	289.15
1800	289.80	54.00	286.54	289.81	289.80	289.36
2100	289.83	60.00	286.80	290.27	290.26	289.60
2400	289.87	68.00	287.10	290.83	290.82	289.88
2700	289.93	76.00	287.45	291.45	291.44	290.21
3000	289.98	84.00	287.83	292.13	292.11	290.58
3300	290.04	102.34	288.35	293.12	293.09	291.04
3600	290.13	120.67	288.94	294.31	294.28	291.61
3900	290.22	139.00	289.60	295.64	295.60	292.28
4200	290.31	137.67	290.07	296.58	296.55	292.96
4500	290.31	136.34	290.43	297.30	297.26	293.58
4800	290.31	135.00	290.70	297.86	297.82	294.12
5100	290.31	153.34	291.15	298.82	298.78	294.67
5400	290.35	171.67	291.74	300.01	299.96	295.30
5700	290.38	190.00	292.42	301.37	301.31	296.01
6000	290.42	197.00	293.03	302.55	302.49	296.75
6300	290.50	204.00	293.56	303.64	303.58	297.49
6600	290.57	211.00	294.05	304.67	304.61	298.22
6900	290.65	208.00	294.39	305.40	305.34	298.89
7200	290.65	205.00	294.65	305.94	305.88	299.46
7500	290.65	202.00	294.86	306.35	306.29	299.93
7800	290.65	215.67	295.21	307.07	307.01	300.39
8100	290.72	229.34	295.66	307.99	307.92	300.89
8400	290.80	243.00	296.18	309.02	308.95	301.46
8700	290.87	254.00	296.71	310.08	310.00	302.08
9000	290.94	265.00	297.28	311.17	311.09	302.73
9300	291.02	276.00	297.87	312.29	312.20	303.42
9600	291.09	285.00	298.45	313.38	313.30	304.12
9900	291.22	294.00	299.02	314.47	314.38	304.85
10200	291.35	303.00	299.59	315.56	315.47	305.58
10500	291.48	320.00	300.26	316.86	316.76	306.36
10800	291.61	337.00	301.01	318.29	318.19	307.20
11100	291.74	354.00	301.82	319.83	319.72	308.11
11400	291.87	379.67	302.77	321.67	321.55	309.11
11700	292.07	405.34	303.82	323.71	323.58	310.25
12000	292.28	431.00	304.93	325.91	325.77	311.50
12300	292.48	436.34	305.86	327.70	327.56	312.76
12600	292.67	441.67	306.63	329.26	329.12	313.97

12900	292.85	447.00	307.29	330.66	330.52	315.11
13200	293.04	461.00	307.99	332.17	332.02	316.22
13500	293.11	475.00	308.72	333.72	333.57	317.30
13800	293.19	489.00	309.46	335.30	335.14	318.36
14100	293.26	490.34	310.06	336.56	336.40	319.37
14400	293.35	491.67	310.56	337.62	337.46	320.29
14700	293.44	493.00	311.00	338.53	338.38	321.11
15000	293.53	511.65	311.58	339.79	339.63	321.94
15300	293.62	530.35	312.22	341.24	341.07	322.80
15600	293.72	549.00	312.92	342.80	342.63	323.72
15900	293.81	550.00	313.45	343.99	343.82	324.62
16200	293.81	551.00	313.91	344.97	344.80	325.44
16500	293.81	552.00	314.31	345.80	345.63	326.17
16800	293.81	585.65	315.02	347.37	347.19	326.97
17100	293.90	619.35	315.97	349.38	349.18	327.93
17400	294.00	653.00	317.07	351.70	351.49	329.08
17700	294.09	633.65	317.69	352.88	352.68	330.15
18000	294.22	614.35	317.89	353.38	353.19	331.01
18300	294.35	595.00	317.84	353.41	353.23	331.63
18600	294.48	559.65	317.43	352.68	352.52	331.92
18900	294.41	524.35	316.79	351.42	351.27	331.85
19200	294.33	489.00	315.98	349.74	349.61	331.44
19500	294.26	459.67	315.09	347.89	347.76	330.76
19800	294.26	430.34	314.16	345.86	345.75	329.87
20100	294.26	401.00	313.18	343.67	343.57	328.80
20400	294.26	449.00	313.03	343.35	343.23	327.96
20700	294.33	497.00	313.41	344.15	344.01	327.53
21000	294.41	545.00	314.17	345.74	345.57	327.57
21300	294.48	537.65	314.57	346.48	346.32	327.80
21600	294.44	530.35	314.74	346.80	346.65	328.04
21900	294.41	523.00	314.76	346.87	346.72	328.22
22200	294.37	504.65	314.56	346.48	346.33	328.27
22500	294.31	486.34	314.20	345.79	345.65	328.16
22800	294.26	468.00	313.73	344.87	344.74	327.88
23100	294.20	428.00	312.93	343.21	343.10	327.36
23400	294.13	388.00	311.91	341.07	340.97	326.55
23700	294.05	348.00	310.73	338.55	338.47	325.47
24000	293.98	344.00	309.82	336.67	336.59	324.31
24300	293.96	340.00	309.06	335.13	335.05	323.18
24600	293.94	336.00	308.42	333.80	333.72	322.13
24900	293.92	272.67	307.16	331.08	331.02	320.88
25200	293.81	209.34	305.47	327.51	327.47	319.30
25500	293.70	146.00	303.48	323.33	323.32	317.34
25800	293.59	140.67	301.92	320.19	320.19	315.30
26100	293.48	135.34	300.71	317.63	317.63	313.35
26400	293.37	130.00	299.71	315.45	315.44	311.55
26700	293.26	117.67	298.78	313.35	313.34	309.87

27000	293.28	105.34	297.86	311.33	311.33	308.32
27300	293.29	93.00	296.96	309.40	309.40	306.86
27600	293.31	80.67	296.08	307.54	307.54	305.49
27900	293.22	68.34	295.25	305.74	305.75	304.17
28200	293.12	56.00	294.45	304.00	304.01	302.90
28500	293.03	87.67	294.19	303.45	303.45	301.88
28800	293.01	119.34	294.31	303.66	303.64	301.22
29100	293.00	151.00	294.71	304.41	304.38	300.92
29400	292.98	162.34	295.08	305.06	305.02	300.87
29700	292.94	173.67	295.43	305.73	305.69	300.98
30000	292.91	185.00	295.78	306.45	306.40	301.20
30300	292.87	167.34	295.80	306.47	306.43	301.38
30600	292.81	149.67	295.64	306.09	306.05	301.43
30900	292.76	132.00	295.34	305.42	305.39	301.32
31200	292.70	115.67	294.95	304.58	304.56	301.06
31500	292.76	99.34	294.48	303.60	303.58	300.68
31800	292.81	83.00	293.94	302.49	302.48	300.20
32100	292.87	72.34	293.42	301.43	301.43	299.66
32400	292.87	61.67	292.90	300.38	300.38	299.06
32700	292.87	51.00	292.37	299.31	299.32	298.43
33000	292.87	61.67	292.09	298.78	298.78	297.88
33300	292.83	72.34	291.97	298.59	298.58	297.45
33600	292.80	83.00	291.98	298.62	298.61	297.16
33900	292.76	102.34	292.18	299.06	299.04	297.04
34200	292.70	121.67	292.48	299.77	299.74	297.10
34500	292.65	141.00	292.88	300.69	300.65	297.33
34800	292.59	136.40	293.09	301.27	301.24	297.62
35100	292.44	131.80	293.22	301.68	301.65	297.89
35400	292.30	127.20	293.29	301.98	301.95	298.12
35700	292.15	122.60	293.26	301.92	301.89	298.26
36000	292.15	118.00	293.16	301.63	301.61	298.30

TEMPERATURA VARIABLE (MES DE AGOSTO)

TIEMPO (s)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	299.87	108.90	297.62	302.49	302.48	300.88
300	299.87	119.30	298.18	302.89	302.87	301.04
600	299.93	130.50	298.56	303.49	303.46	301.29
900	300.04	142.30	298.99	304.22	304.2	301.6
1200	300.09	153.00	299.43	305.03	304.99	301.96
1500	300.26	161.70	299.9	305.83	305.8	302.37
1800	300.37	173.00	300.39	306.73	306.68	302.81
2100	300.37	184.70	300.87	307.67	307.62	303.26
2400	300.48	196.50	301.39	308.66	308.61	303.76
2700	300.59	203.40	301.88	309.55	309.5	304.26
3000	300.76	215.90	302.43	310.56	310.5	304.79
3300	300.87	219.00	302.89	311.38	311.32	305.3
3600	300.98	227.30	303.35	312.22	312.16	305.79
3900	301.15	233.80	303.81	313.04	312.97	306.29
4200	301.26	246.80	304.32	313.99	313.93	306.79
4500	301.37	257.60	304.85	314.98	314.91	307.31
4800	301.43	268.50	305.36	315.98	315.9	307.83
5100	301.54	298.40	306.11	317.48	317.39	308.44
5400	301.65	319.70	306.93	319.08	318.98	309.15
5700	301.98	480.70	309.47	324.39	324.22	310.56
6000	302.15	583.40	312.46	330.47	330.27	312.59
6300	302.37	467.20	313.27	331.58	331.42	314.24
6600	302.37	524.80	314.51	334.2	334.03	315.7
6900	302.59	664.20	317.06	339.71	339.48	317.6
7200	302.76	545.30	317.55	340.33	340.15	319.04
7500	302.59	584.30	318.29	342.1	341.91	320.18
7800	302.71	520.00	318.18	341.77	341.6	320.89
8100	302.76	502.30	317.95	341.34	341.18	321.25
8400	302.87	496.70	317.81	341.04	340.89	321.42
8700	302.93	512.70	317.92	341.33	341.17	321.57
9000	303.15	737.40	320.62	347.33	347.08	322.68
9300	303.59	1040.70	326.01	358.89	358.51	325.47
9600	303.98	907.50	328.28	362.87	362.54	328.19
9900	303.98	739.20	327.94	361.66	361.4	329.75
10200	303.98	1070.60	331.43	369.94	369.55	331.98
10500	303.98	872.80	331.65	370.1	369.8	333.55
10800	304.15	1055.90	333.94	375.41	375.04	335.39
11100	304.54	965.20	334.67	376.61	376.27	336.9
11400	304.54	938.30	334.88	377.04	376.71	337.89
11700	304.65	936.10	335.08	377.51	377.19	338.59
12000	304.65	951.30	335.41	378.34	378.01	339.14
12300	305.04	1006.30	336.4	380.42	380.06	339.9
12600	305.21	907.00	336.04	379.26	378.95	340.25
12900	305.43	925.20	336.08	379.22	378.91	340.46
13200	305.43	897.50	335.78	378.53	378.23	340.47
13500	305.76	879.70	335.53	377.73	377.43	340.4

13800	305.43	792.10	334.24	374.96	374.7	339.81
14100	305.48	900.50	334.61	376.02	375.71	339.57
14400	305.59	891.00	334.79	376.29	375.99	339.52
14700	305.87	940.00	335.53	377.74	377.41	339.78
15000	305.98	933.50	335.96	378.48	378.16	340.11
15300	306.15	919.60	336.15	378.66	378.35	340.4
15600	306.37	916.20	336.3	378.8	378.48	340.64
15900	306.65	985.20	337.25	380.74	380.4	341.14
16200	306.37	927.90	337.11	380.47	380.15	341.38
16500	306.71	901.90	336.91	379.78	379.47	341.5
16800	306.98	877.50	336.6	378.83	378.53	341.44
17100	306.98	940.40	337.04	379.88	379.56	341.54
17400	307.04	934.80	337.29	380.35	380.03	341.71
17700	306.71	898.30	336.92	379.7	379.39	341.64
18000	306.98	882.30	336.65	378.94	378.64	341.54
18300	307.43	878.40	336.59	378.44	378.14	341.47
18600	307.09	304.90	330.13	363.38	363.32	338.95
18900	306.54	835.10	331.35	367.75	367.47	337.61
19200	306.93	871.50	332.74	370.66	370.37	337.46
19500	307.65	864.90	333.83	372.24	371.94	337.87
19800	307.26	870.20	334.35	373.37	373.07	338.23
20100	307.59	916.20	335.35	375.36	375.04	338.89
20400	307.54	819.00	334.92	374.16	373.89	339.12
20700	307.54	878.90	335.29	375.11	374.81	339.39
21000	307.65	1065.80	337.62	380.51	380.13	340.44
21300	307.59	701.00	335.2	374.48	374.25	340.25
21600	307.48	421.60	330.51	363.91	363.8	338.29
21900	307.37	415.10	327.23	357.17	357.06	335.73
22200	307.48	493.60	325.89	354.58	354.44	333.6
22500	307.43	455.80	324.47	351.5	351.37	331.74
22800	307.65	458.00	323.57	349.32	349.19	330.24
23100	307.59	411.70	322.33	346.47	346.35	328.8
23400	307.48	352.60	320.73	342.93	342.83	327.27
23700	307.37	314.40	319.12	339.49	339.42	325.68
24000	307.09	325.80	317.99	337.35	337.26	324.21
24300	307.15	483.20	319	339.76	339.61	323.68
24600	307.32	364.30	318.37	337.93	337.83	323.16
24900	307.59	714.80	321.95	345.85	345.6	324.14
25200	307.93	783.80	325.22	352.4	352.12	326.07
25500	307.76	846.70	328.02	358.32	358.01	328.33
25800	307.87	923.20	330.83	364.32	363.99	330.86
26100	308.54	917.90	332.96	368.4	368.07	333.34
26400	308.09	704.00	331.86	365.88	365.64	334.42
26700	303.87	87.10	322.78	348.41	348.43	331.29
27000	303.65	42.90	316.47	336.58	336.62	327.13
27300	301.71	33.40	311.35	328.24	328.28	322.48
27600	300.21	48.90	307.5	321.93	321.97	318.12
27900	300.26	51.10	304.94	317.11	317.15	314.56
28200	300.43	45.50	303.08	313.27	313.3	311.65
28500	300.76	45.50	301.8	310.29	310.32	309.35

28800	300.98	47.20	300.87	307.99	308.01	307.52
29100	301.04	47.70	300.13	306.18	306.19	306.04
29400	301.37	48.10	299.65	304.78	304.8	304.93
29700	301.26	53.70	299.25	303.82	303.84	304.02
30000	301.04	64.60	298.95	303.28	303.29	303.3
30300	301.04	77.60	298.88	303.11	303.11	302.82
30600	301.15	97.50	299.07	303.41	303.41	302.6
30900	301.21	118.40	299.45	304.08	304.06	302.6
31200	301.32	137.90	299.96	304.99	304.96	302.79
31500	301.54	146.60	300.48	305.82	305.79	303.11
31800	301.71	144.90	300.87	306.38	306.35	303.47
32100	301.93	137.90	301.13	306.66	306.63	303.79
32400	301.76	120.10	301.02	306.43	306.41	303.92
32700	301.59	91.90	300.56	305.59	305.59	303.82
33000	301.54	75.80	300.06	304.66	304.66	303.58
33300	301.59	75.80	299.73	304.05	304.05	303.31
33600	301.71	75.80	299.55	303.64	303.64	303.08
33900	301.43	74.10	299.28	303.25	303.25	302.8
34200	301.43	68.50	299.04	302.81	302.81	302.55
34500	301.09	80.60	298.88	302.75	302.75	302.3
34800	300.98	86.20	298.81	302.77	302.77	302.14
35100	301.04	82.30	298.75	302.64	302.64	302.03
35400	301.21	68.90	298.61	302.22	302.22	301.92
35700	301.37	61.50	298.48	301.77	301.78	301.81
36000	301.54	69.70	298.52	301.72	301.72	301.74

TEMPERATURA VARIABLE (MES DE ENERO)

TIEMPO (s)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	292.93	53.70	288.53	291.39	291.4	291.93
300	293.04	64.60	289.07	291.59	291.59	292.07
600	293.21	76.70	289.54	292.1	292.1	292.27
900	293.48	142.60	290.7	294.21	294.18	292.82
1200	293.87	179.90	292.08	296.59	296.54	293.69
1500	294.26	193.90	293.33	298.64	298.58	294.72
1800	294.71	207.70	294.51	300.53	300.47	295.81
2100	295.09	241.10	295.77	302.83	302.76	296.96
2400	295.32	272.80	297.19	305.36	305.27	298.23
2700	295.59	288.50	298.46	307.61	307.53	299.52
3000	295.98	311.80	299.76	309.93	309.83	300.83
3300	296.43	334.50	301.1	312.28	312.17	302.18
3600	296.82	341.30	302.25	314.24	314.13	303.47
3900	297.32	350.50	303.34	316.03	315.92	304.71
4200	297.54	384.30	304.55	318.31	318.19	305.93
4500	297.98	419.90	305.98	320.94	320.8	307.26
4800	298.04	444.20	307.24	323.4	323.26	308.56
5100	298.15	455.00	308.32	325.53	325.38	309.79
5400	298.21	491.90	309.53	328.05	327.89	311.03
5700	298.59	513.20	310.79	330.44	330.26	312.33
6000	298.76	529.60	311.91	332.61	332.43	313.56
6300	298.71	536.10	312.75	334.36	334.19	314.65
6600	298.48	545.30	313.38	335.88	335.7	315.56
6900	298.82	572.20	314.31	337.73	337.54	316.53
7200	299.26	597.70	315.41	339.77	339.57	317.59
7500	298.98	596.90	316.03	341.17	340.97	318.45
7800	299.21	642.00	317.1	343.41	343.19	319.43
8100	299.09	650.70	317.9	345.16	344.94	320.33
8400	299.37	615.50	318.19	345.54	345.34	321.06
8700	299.32	637.30	318.62	346.52	346.31	321.64
9000	299.54	656.70	319.24	347.77	347.54	322.28
9300	299.76	685.00	320.07	349.4	349.17	322.99
9600	299.76	677.60	320.54	350.34	350.11	323.62
9900	299.93	737.00	321.61	352.61	352.35	324.43
10200	300.26	796.90	323.14	355.7	355.42	325.54
10500	300.54	807.30	324.38	358.07	357.79	326.73
10800	300.32	809.00	325.15	359.78	359.5	327.73
11100	300.09	813.80	325.68	361.14	360.86	328.56
11400	300.09	728.30	325.15	359.94	359.69	328.91
11700	299.93	681.40	324.24	358.14	357.91	328.76
12000	299.82	759.10	324.48	359.04	358.78	328.74
12300	299.43	524.80	321.91	353.45	353.29	327.78
12600	299.48	532.30	320.31	350.23	350.06	326.55
12900	299.65	665.00	320.75	351.44	351.22	325.94
13200	299.82	729.10	321.8	353.59	353.35	325.97
13500	299.98	764.70	322.93	355.77	355.51	326.44

13800	300.04	669.30	322.62	354.73	354.5	326.63
14100	300.09	773.00	323.58	356.89	356.62	327.07
14400	300.15	843.80	325.03	360.04	359.75	327.92
14700	300.43	740.00	324.98	359.45	359.2	328.48
15000	300.04	366.50	320.62	349.65	349.55	327.14
15300	299.82	489.30	318.96	346.86	346.72	325.58
15600	299.87	459.70	317.54	343.99	343.86	324.09
15900	299.76	599.10	318.06	345.5	345.31	323.32
16200	299.65	729.60	319.82	349.46	349.21	323.52
16500	299.71	525.30	318.72	346.53	346.37	323.3
16800	299.43	221.20	314.43	337.01	336.97	321.51
17100	299.09	244.70	311.6	331.66	331.61	319.22
17400	299.21	561.30	313.3	336.05	335.88	318.4
17700	299.54	792.50	317.18	344.26	343.98	319.41
18000	299.82	412.00	315.57	339.49	339.37	319.55
18300	299.48	498.90	315.27	339.13	338.97	319.39
18600	299.76	777.30	318.34	346.04	345.76	320.45
18900	299.87	754.00	320.19	349.64	349.38	321.89
19200	299.76	611.20	319.81	348.47	348.26	322.66
19500	299.82	660.20	320.15	349.32	349.09	323.25
19800	299.87	671.50	320.56	350.23	350.01	323.78
20100	300.48	608.10	320.38	349.34	349.14	324.11
20400	300.37	539.60	319.41	347.16	346.99	323.89
20700	299.87	231.20	315.09	337.86	337.81	322.09
21000	299.48	252.90	312.25	332.58	332.53	319.82
21300	299.32	432.90	312.28	333.46	333.34	318.38
21600	299.54	383.90	311.83	332.28	332.17	317.39
21900	299.59	416.80	311.85	332.21	332.08	316.75
22200	299.65	261.90	310.07	328.01	327.95	315.7
22500	299.76	238.60	308.57	324.77	324.72	314.44
22800	299.48	221.70	307.18	322.07	322.03	313.07
23100	299.48	182.50	305.76	319.12	319.09	311.68
23400	299.26	155.20	304.33	316.31	316.29	310.25
23700	299.26	141.80	303.16	313.95	313.93	308.9
24000	299.32	137.00	302.27	312.09	312.07	307.72
24300	299.09	68.90	300.73	308.91	308.92	306.37
24600	299.15	94.10	299.94	307.37	307.37	305.22
24900	299.15	95.40	299.37	306.18	306.18	304.27
25200	299.15	95.40	298.92	305.24	305.23	303.49
25500	299.21	100.20	298.66	304.61	304.61	302.9
25800	299.15	95.40	298.36	303.96	303.96	302.4
26100	299.04	98.40	298.12	303.52	303.51	301.98
26400	298.87	80.60	297.67	302.67	302.67	301.54
26700	298.87	72.80	297.26	301.86	301.86	301.12
27000	298.76	53.70	296.7	300.77	300.78	300.63
27300	298.54	52.80	296.21	299.95	299.96	300.11
27600	298.48	48.10	295.79	299.2	299.21	299.64
27900	292.48	51.50	295.49	298.71	298.72	299.23
28200	298.26	54.60	295.27	298.38	298.39	298.88
28500	298.26	61.20	295.2	298.26	298.26	298.64

28800	298.15	63.20	295.12	298.16	298.16	298.45
29100	298.15	56.30	294.98	297.87	297.88	298.29
29400	297.98	50.30	294.74	297.49	297.5	298.08
29700	297.93	46.70	294.53	297.14	297.15	297.88
30000	297.87	47.70	294.36	296.87	296.88	297.68
30300	297.76	50.30	294.24	296.71	296.72	297.51
30600	297.65	50.70	294.12	296.56	296.57	297.35
30900	297.54	40.20	293.91	296.34	296.35	297.19
31200	297.43	29.90	293.67	296.13	296.14	297.03
31500	297.43	25.60	293.5	295.95	295.96	296.9
31800	297.32	20.80	293.31	295.79	295.8	296.76
32100	297.09	15.50	293.09	295.62	295.63	296.6
32400	296.93	13.00	292.87	295.44	295.45	296.44
32700	296.93	10.40	292.73	295.28	295.29	296.31
33000	296.87	9.90	292.62	295.14	295.15	296.19
33300	296.76	8.20	292.49	295.01	295.02	296.07
33600	296.65	6.00	292.35	294.88	294.89	295.95
33900	296.59	5.10	292.24	294.76	294.77	295.84
34200	296.48	2.60	292.11	294.65	294.66	295.73
34500	296.43	1.20	292.01	294.53	294.54	295.63
34800	296.37	0.40	291.91	294.43	294.44	295.54
35100	296.37	0.00	291.85	294.34	294.35	295.46
35400	296.32	0.00	291.79	294.26	294.27	295.39
35700	296.26	0.00	291.72	294.19	294.2	295.32
36000	296.15	0.00	291.64	294.11	294.12	295.24

**Resultados con velocidad de viento de 2 m/s Cuernavaca
(abril, septiembre) y Mérida (agosto, enero)**

TEMPERATURA CONSTANTE (MES DE ABRIL)

TIEMPO (s)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	238.00	293.15	304.64	304.59	297.36
300	238.00	293.24	304.64	304.56	297.41
600	262.50	293.43	305.26	305.17	297.47
900	287.00	293.78	306.23	306.13	297.67
1200	305.67	294.17	307.29	307.18	297.95
1500	324.34	294.58	308.42	308.31	298.3
1800	343.00	295	309.61	309.49	298.69
2100	361.34	295.44	310.83	310.7	299.11
2400	379.67	295.88	312.08	311.94	299.54
2700	398.00	296.33	313.34	313.19	300
3000	415.34	296.77	314.6	314.44	300.46
3300	432.67	297.2	315.85	315.68	300.92
3600	450.00	297.64	317.09	316.92	301.38
3900	468.34	298.09	318.36	318.18	301.85
4200	486.67	298.54	319.65	319.46	302.32
4500	505.00	298.99	320.94	320.74	302.79
4800	520.65	299.42	322.17	321.96	303.26
5100	536.35	299.83	323.37	323.15	303.72
5400	552.00	300.24	324.54	324.32	304.16
5700	567.35	300.64	325.69	325.46	304.6
6000	582.65	301.03	326.83	326.59	305.03
6300	598.00	301.42	327.95	327.71	305.45
6600	615.00	301.82	329.11	328.85	305.87
6900	632.00	302.23	330.28	330.02	306.3
7200	649.00	302.64	331.47	331.2	306.73
7500	662.65	303.03	332.58	332.31	307.15
7800	676.35	303.4	333.65	333.37	307.56
8100	690.00	303.76	334.69	334.4	307.96
8400	705.00	304.12	335.74	335.45	308.35
8700	720.00	304.48	336.8	336.5	308.74
9000	735.00	304.85	337.86	337.56	309.13
9300	746.35	305.19	338.84	338.52	309.51
9600	757.65	305.5	339.76	339.44	309.87
9900	769.00	305.8	340.64	340.32	310.21
10200	781.35	306.11	341.53	341.2	310.55
10500	793.65	306.41	342.42	342.08	310.88
10800	806.00	306.72	343.3	342.96	311.2
11100	814.65	306.99	344.09	343.74	311.51
11400	823.35	307.24	344.83	344.47	311.81
11700	832.00	307.47	345.52	345.17	312.08
12000	839.00	307.69	346.16	345.8	312.34
12300	846.00	307.89	346.75	346.39	312.58
12600	853.00	308.08	347.31	346.95	312.8
12900	857.35	308.24	347.79	347.42	313

13200	861.65	308.38	348.21	347.85	313.18
13500	866.00	308.51	348.6	348.23	313.35
13800	870.00	308.64	348.96	348.59	313.5
14100	874.00	308.75	349.3	348.92	313.63
14400	878.00	308.86	349.62	349.24	313.76
14700	881.00	308.95	349.91	349.53	313.88
15000	884.00	309.04	350.17	349.79	313.99
15300	887.00	309.13	350.42	350.04	314.09
15600	890.35	309.21	350.66	350.28	314.18
15900	893.65	309.29	350.91	350.52	314.27
16200	897.00	309.37	351.15	350.76	314.36
16500	899.35	309.45	351.36	350.98	314.45
16800	901.65	309.51	351.56	351.18	314.53
17100	904.00	309.58	351.75	351.36	314.6
17400	904.00	309.62	351.88	351.49	314.67
17700	904.00	309.65	351.96	351.57	314.72
18000	904.00	309.67	352.02	351.63	314.75
18300	901.65	309.66	352	351.62	314.77
18600	899.35	309.63	351.94	351.56	314.77
18900	897.00	309.6	351.85	351.46	314.76
19200	894.65	309.56	351.74	351.35	314.73
19500	892.35	309.51	351.61	351.22	314.7
19800	890.00	309.46	351.47	351.08	314.65
20100	885.35	309.39	351.26	350.88	314.6
20400	880.65	309.3	351.02	350.64	314.53
20700	876.00	309.21	350.75	350.37	314.45
21000	869.65	309.1	350.42	350.05	314.35
21300	863.35	308.97	350.05	349.68	314.24
21600	857.00	308.83	349.66	349.29	314.11
21900	849.35	308.68	349.22	348.86	313.97
22200	841.65	308.51	348.75	348.39	313.82
22500	834.00	308.34	348.26	347.9	313.65
22800	824.65	308.15	347.71	347.35	313.47
23100	815.35	307.95	347.12	346.77	313.28
23400	806.00	307.74	346.52	346.17	313.07
23700	793.65	307.5	345.82	345.48	312.85
24000	781.35	307.23	345.06	344.73	312.6
24300	769.00	306.96	344.28	343.95	312.33
24600	756.65	306.68	343.46	343.14	312.06
24900	744.35	306.39	342.63	342.31	311.77
25200	732.00	306.1	341.78	341.48	311.47
25500	721.35	305.82	340.97	340.67	311.17
25800	710.65	305.54	340.18	339.88	310.87
26100	700.00	305.27	339.4	339.1	310.58
26400	686.00	304.98	338.54	338.25	310.28
26700	672.00	304.66	337.63	337.35	309.97
27000	658.00	304.34	336.7	336.43	309.65

27300	645.65	304.02	335.79	335.53	309.32
27600	633.35	303.71	334.9	334.63	308.99
27900	621.00	303.4	334.01	333.75	308.66
28200	603.35	303.05	332.99	332.74	308.32
28500	585.65	302.67	331.89	331.65	307.95
28800	568.00	302.27	330.74	330.51	307.55
29100	551.65	301.87	329.6	329.37	307.15
29400	535.35	301.47	328.45	328.23	306.74
29700	519.00	301.06	327.3	327.09	306.32
30000	501.00	300.65	326.1	325.9	305.89
30300	483.00	300.22	324.87	324.68	305.45
30600	465.00	299.78	323.63	323.45	305.01
30900	445.00	299.33	322.32	322.15	304.54
31200	425.00	298.85	320.98	320.81	304.07
31500	405.00	298.37	319.61	319.45	303.58
31800	384.34	297.88	318.21	318.06	303.08
32100	363.67	297.38	316.78	316.64	302.56
32400	343.00	296.87	315.34	315.21	302.04
32700	321.34	296.36	313.86	313.74	301.51
33000	299.67	295.83	312.36	312.25	300.96
33300	278.00	295.29	310.84	310.74	300.41
33600	257.34	294.77	309.34	309.25	299.86
33900	236.67	294.24	307.84	307.77	299.3
34200	216.00	293.71	306.35	306.28	298.74
34500	196.34	293.2	304.88	304.83	298.19
34800	176.67	292.69	303.43	303.39	297.64
35100	157.00	292.18	302	301.96	297.1
35400	142.34	291.72	300.69	300.66	296.58
35700	127.67	291.29	299.46	299.43	296.08
36000	113.00	290.88	298.28		295.61

TEMPERATURA VARIABLE (MES DE ABRIL)

TIEMPO (s)	RADIACION SOLAR (W/m ²)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	238.00	294.59	292.46	304.66	304.59	297.12
300	238.00	294.59	294	304.91	304.85	297.9
600	262.50	294.74	294.63	305.85	305.78	298.32
900	287.00	294.88	295.25	307.12	307.04	298.79
1200	305.67	295.03	295.84	308.45	308.36	299.31
1500	324.34	294.94	296.3	309.77	309.67	299.78
1800	343.00	294.85	296.72	311.08	310.97	300.23
2100	361.34	294.76	297.12	312.36	312.25	300.67
2400	379.67	294.80	297.57	313.65	313.54	301.14
2700	398.00	294.83	298.04	314.95	314.83	301.62
3000	415.34	294.87	298.51	316.24	316.11	302.11
3300	432.67	294.96	299.01	317.54	317.4	302.62
3600	450.00	295.06	299.53	318.84	318.7	303.15
3900	468.34	295.15	300.05	320.17	320.02	303.68
4200	486.67	295.28	300.6	321.53	321.38	304.24
4500	505.00	295.40	301.16	322.92	322.75	304.81
4800	520.65	295.53	301.7	324.24	324.08	305.38
5100	536.35	295.46	302.13	325.51	325.34	305.87
5400	552.00	295.38	302.5	326.72	326.54	306.33
5700	567.35	295.31	302.86	327.88	327.7	306.75
6000	582.65	295.42	303.29	329.04	328.85	307.21
6300	598.00	295.54	303.76	330.2	330.01	307.68
6600	615.00	295.65	304.25	331.42	331.21	308.18
6900	632.00	295.67	304.7	332.65	332.44	308.65
7200	649.00	295.68	305.14	333.88	333.67	309.12
7500	662.65	295.70	305.55	335.03	334.81	309.57
7800	676.35	295.94	306.05	336.17	335.95	310.08
8100	690.00	296.18	306.58	337.32	337.09	310.62
8400	705.00	296.42	307.14	338.51	338.27	311.17
8700	720.00	296.44	307.6	339.7	339.46	311.67
9000	735.00	296.46	308.02	340.86	340.62	312.14
9300	746.35	296.48	308.4	341.92	341.67	312.57
9600	757.65	296.59	308.79	342.92	342.66	313.01
9900	769.00	296.70	309.18	343.89	343.63	313.44
10200	781.35	296.81	309.58	344.87	344.6	313.87
10500	793.65	297.03	310.04	345.86	345.59	314.33
10800	806.00	297.26	310.53	346.88	346.61	314.81
11100	814.65	297.48	310.99	347.83	347.55	315.3
11400	823.35	297.65	311.41	348.73	348.45	315.75
11700	832.00	297.81	311.8	349.59	349.3	316.19
12000	839.00	297.98	312.17	350.38	350.09	316.6
12300	846.00	298.02	312.46	351.11	350.82	316.95
12600	853.00	298.05	312.72	351.78	351.49	317.27
12900	857.35	298.09	312.93	352.35	352.06	317.54
13200	861.65	298.16	313.14	352.86	352.57	317.8
13500	866.00	298.24	313.34	353.33	353.03	318.03
13800	870.00	298.31	313.53	353.76	353.46	318.26

14100	874.00	298.40	313.72	354.17	353.87	318.47
14400	878.00	298.50	313.91	354.57	354.27	318.68
14700	881.00	298.59	314.09	354.94	354.64	318.88
15000	884.00	298.66	314.25	355.28	354.98	319.06
15300	887.00	298.74	314.41	355.6	355.3	319.24
15600	890.35	298.81	314.56	355.93	355.62	319.4
15900	893.65	299.01	314.78	356.26	355.96	319.61
16200	897.00	299.22	315.03	356.63	356.32	319.84
16500	899.35	299.42	315.27	356.98	356.67	320.08
16800	901.65	299.53	315.47	357.31	357.01	320.29
17100	904.00	299.65	315.65	357.63	357.32	320.49
17400	904.00	299.76	315.81	357.88	357.57	320.67
17700	904.00	299.76	315.88	358.07	357.76	320.79
18000	904.00	299.76	315.93	358.2	357.89	320.89
18300	901.65	299.76	315.94	358.24	357.93	320.94
18600	899.35	299.91	316.01	358.24	357.94	321.02
18900	897.00	300.05	316.08	358.23	357.93	321.1
19200	894.65	300.20	316.17	358.21	357.91	321.19
19500	892.35	300.35	316.25	358.19	357.89	321.27
19800	890.00	300.50	316.34	358.17	357.87	321.35
20100	885.35	300.65	316.4	358.09	357.79	321.43
20400	880.65	300.69	316.4	357.95	357.65	321.45
20700	876.00	300.72	316.36	357.77	357.48	321.45
21000	869.65	300.76	316.3	357.52	357.23	321.41
21300	863.35	300.81	316.22	357.22	356.93	321.36
21600	857.00	300.87	316.15	356.9	356.61	321.3
21900	849.35	300.92	316.05	356.52	356.23	321.22
22200	841.65	301.11	316.01	356.13	355.84	321.17
22500	834.00	301.29	315.98	355.74	355.45	321.13
22800	824.65	301.48	315.96	355.31	355.03	321.09
23100	815.35	301.63	315.9	354.86	354.58	321.03
23400	806.00	301.77	315.83	354.38	354.11	320.97
23700	793.65	301.92	315.73	353.82	353.56	320.88
24000	781.35	301.74	315.44	353.15	352.89	320.67
24300	769.00	301.55	315.08	352.38	352.13	320.37
24600	756.65	301.37	314.67	351.54	351.29	320.02
24900	744.35	301.63	314.48	350.72	350.47	319.79
25200	732.00	301.89	314.36	349.94	349.7	319.61
25500	721.35	302.15	314.29	349.24	349	319.46
25800	710.65	302.00	314.02	348.52	348.29	319.21
26100	700.00	301.85	313.69	347.77	347.54	318.91
26400	686.00	301.70	313.3	346.9	346.67	318.56
26700	672.00	301.74	312.98	345.98	345.76	318.24
27000	658.00	301.77	312.67	345.04	344.83	317.93
27300	645.65	301.81	312.39	344.14	343.93	317.61
27600	633.35	302.00	312.19	343.29	343.08	317.36
27900	621.00	302.18	312.02	342.47	342.27	317.14
28200	603.35	302.37	311.83	341.55	341.36	316.93
28500	585.65	302.50	311.58	340.57	340.38	316.68
28800	568.00	302.63	311.32	339.54	339.36	316.42

29100	551.65	302.76	311.05	338.52	338.35	316.15
29400	535.35	302.63	310.65	337.46	337.29	315.78
29700	519.00	302.50	310.19	336.34	336.18	315.35
30000	501.00	302.37	309.7	335.14	334.98	314.89
30300	483.00	302.37	309.25	333.9	333.75	314.44
30600	465.00	302.37	308.81	332.64	332.5	313.99
30900	445.00	302.37	308.36	331.33	331.2	313.53
31200	425.00	302.30	307.86	329.97	329.84	313.03
31500	405.00	302.22	307.33	328.57	328.45	312.51
31800	384.34	302.15	306.79	327.13	327.02	311.96
32100	363.67	302.19	306.3	325.68	325.58	311.44
32400	343.00	302.22	305.81	324.23	324.13	310.93
32700	321.34	302.26	305.33	322.75	322.67	310.41
33000	299.67	302.26	304.82	321.26	321.18	309.89
33300	278.00	302.26	304.3	319.75	319.68	309.35
33600	257.34	302.26	303.79	318.26	318.2	308.81
33900	236.67	302.18	303.23	316.76	316.7	308.24
34200	216.00	302.11	302.67	315.25	315.2	307.65
34500	196.34	302.03	302.1	313.75	313.71	307.06
34800	176.67	302.03	301.57	312.28	312.24	306.5
35100	157.00	302.03	301.07	310.82	310.79	305.95
35400	142.34	302.03	300.61	309.5	309.48	305.42
35700	127.67	301.87	300.1	308.23	308.22	304.87
36000	113.00	301.70	299.57	306.99	306.98	304.31

TEMPERATURA VARIABLE (MES DE AGOSTO)

TIEMPO (s)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	299.87	108.90	295.83	301.27	301.26	299.84
300	299.87	119.30	296.43	301.7	301.68	300.19
600	299.93	130.50	296.78	302.31	302.29	300.46
900	300.04	142.30	297.14	303.04	303.02	300.76
1200	300.09	153.00	297.46	303.81	303.78	301.07
1500	300.26	161.70	297.82	304.57	304.53	301.41
1800	300.37	173.00	298.19	305.38	305.34	301.77
2100	300.37	184.70	298.5	306.22	306.18	302.1
2400	300.48	196.50	298.86	307.09	307.04	302.46
2700	300.59	203.40	299.2	307.86	307.81	302.82
3000	300.76	215.90	299.6	308.72	308.67	303.21
3300	300.87	219.00	299.91	309.4	309.34	303.57
3600	300.98	227.30	300.22	310.1	310.04	303.91
3900	301.15	233.80	300.55	310.76	310.7	304.26
4200	301.26	246.80	300.91	311.57	311.51	304.61
4500	301.37	257.60	301.27	312.41	312.34	304.98
4800	301.43	268.50	301.61	313.24	313.17	305.33
5100	301.54	298.40	302.15	314.57	314.49	305.76
5400	301.65	319.70	302.71	315.98	315.88	306.26
5700	301.98	480.70	304.67	321	320.84	307.39
6000	302.15	583.40	306.82	326.67	326.47	308.97
6300	302.37	467.20	307.17	327.34	327.18	310.13
6600	302.37	524.80	307.92	329.49	329.32	311.09
6900	302.59	664.20	309.76	334.47	334.24	312.43
7200	302.76	545.30	309.88	334.57	334.4	313.34
7500	302.59	584.30	310.23	335.85	335.66	313.96
7800	302.71	520.00	309.97	335.11	334.94	314.26
8100	302.76	502.30	309.7	334.34	334.18	314.31
8400	302.87	496.70	309.55	333.8	333.64	314.27
8700	302.93	512.70	309.62	333.89	333.73	314.26
9000	303.15	737.40	311.78	339.64	339.39	315.13
9300	303.59	1040.70	315.96	350.73	350.35	317.44
9600	303.98	907.50	317.38	354.14	353.82	319.55
9900	303.98	739.20	316.76	352.4	352.15	320.54
10200	303.98	1070.60	319.39	360.06	359.68	322.09
10500	303.98	872.80	319.19	359.64	359.34	323.05
10800	304.15	1055.90	320.86	364.34	363.97	324.27
11100	304.54	965.20	321.24	364.99	364.65	325.25
11400	304.54	938.30	321.22	364.95	364.62	325.77
11700	304.65	936.10	321.28	365.02	364.7	326.09
12000	304.65	951.30	321.44	365.52	365.19	326.33
12300	305.04	1006.30	322.24	367.29	366.95	326.84
12600	305.21	907.00	321.87	365.93	365.62	327
12900	305.43	925.20	321.93	365.73	365.42	327.09
13200	305.43	897.50	321.68	364.94	364.64	327.02
13500	305.76	879.70	321.55	364.1	363.8	326.95
13800	305.43	792.10	320.48	361.36	361.09	326.38

14100	305.48	900.50	320.87	362.44	362.14	326.2
14400	305.59	891.00	321.04	362.75	362.45	326.19
14700	305.87	940.00	321.71	364.21	363.89	326.49
15000	305.98	933.50	322.05	364.94	364.62	326.81
15300	306.15	919.60	322.21	365.12	364.81	327.08
15600	306.37	916.20	322.38	365.24	364.93	327.32
15900	306.65	985.20	323.2	367.16	366.82	327.79
16200	306.37	927.90	322.99	366.83	366.52	327.94
16500	306.71	901.90	322.86	366.12	365.81	328.04
16800	306.98	877.50	322.69	365.18	364.88	328.02
17100	306.98	940.40	323.1	366.24	365.92	328.12
17400	307.04	934.80	323.3	366.7	366.38	328.28
17700	306.71	898.30	322.92	366.03	365.73	328.17
18000	306.98	882.30	322.75	365.29	364.99	328.1
18300	307.43	878.40	322.82	364.84	364.54	328.11
18600	307.09	304.90	317.59	350.1	350.04	325.94
18900	306.54	835.10	318.93	354.75	354.47	324.89
19200	306.93	871.50	320.21	357.87	357.57	324.99
19500	307.65	864.90	321.22	359.61	359.32	325.6
19800	307.26	870.20	321.56	360.82	360.52	325.99
20100	307.59	916.20	322.39	362.82	362.5	326.63
20400	307.54	819.00	321.96	361.63	361.35	326.83
20700	307.54	878.90	322.26	362.55	362.25	327.04
21000	307.65	1065.80	324.14	367.81	367.44	327.94
21300	307.59	701.00	322	361.73	361.51	327.69
21600	307.48	421.60	318.28	351.34	351.23	325.93
21900	307.37	415.10	315.98	344.98	344.87	323.81
22200	307.48	493.60	315.32	342.87	342.72	322.23
22500	307.43	455.80	314.48	340.3	340.17	320.94
22800	307.65	458.00	314.07	338.66	338.53	320.03
23100	307.59	411.70	313.31	336.35	336.23	319.15
23400	307.48	352.60	312.24	333.35	333.26	318.17
23700	307.37	314.40	311.19	330.47	330.39	317.13
24000	307.09	325.80	310.5	328.85	328.76	316.18
24300	307.15	483.20	311.53	331.67	331.52	316.05
24600	307.32	364.30	311.13	330.21	330.11	315.89
24900	307.59	714.80	314.15	338.28	338.04	317
25200	307.93	783.80	316.65	344.77	344.49	318.8
25500	307.76	846.70	318.58	350.4	350.1	320.67
25800	307.87	923.20	320.51	355.95	355.63	322.64
26100	308.54	917.90	322	359.5	359.18	324.55
26400	308.09	704.00	320.75	356.5	356.27	325.08
26700	303.87	87.10	312.46	338.76	338.78	321.46
27000	303.65	42.90	307.57	327.05	327.08	317.53
27300	301.71	33.40	303.63	319.09	319.13	313.34
27600	300.21	48.90	300.72	313.33	313.36	309.63
27900	300.26	51.10	299.11	309.21	309.24	306.95
28200	300.43	45.50	298.13	306.18	306.2	305.01
28500	300.76	45.50	297.63	304.06	304.08	303.68
28800	300.98	47.20	297.34	302.6	302.61	302.75

29100	301.04	47.70	297.11	301.57	301.58	302.08
29400	301.37	48.10	297.09	300.9	300.91	301.7
29700	301.26	53.70	297	300.56	300.57	301.38
30000	301.04	64.60	296.91	300.54	300.54	301.13
30300	301.04	77.60	296.99	300.79	300.79	301.03
30600	301.15	97.50	297.27	301.42	301.41	301.12
30900	301.21	118.40	297.65	302.34	302.32	301.32
31200	301.32	137.90	298.1	303.41	303.38	301.65
31500	301.54	146.60	298.56	304.35	304.32	302.05
31800	301.71	144.90	298.89	304.96	304.94	302.44
32100	301.93	137.90	299.12	305.27	305.25	302.77
32400	301.76	120.10	299	305.05	305.04	302.87
32700	301.59	91.90	298.6	304.22	304.21	302.75
33000	301.54	75.80	298.21	303.31	303.31	302.52
33300	301.59	75.80	298.01	302.75	302.75	302.31
33600	301.71	75.80	297.95	302.4	302.4	302.16
33900	301.43	74.10	297.72	302.08	302.08	301.94
34200	301.43	68.50	297.56	301.7	301.7	301.76
34500	301.09	80.60	297.4	301.69	301.69	301.55
34800	300.98	86.20	297.33	301.75	301.75	301.41
35100	301.04	82.30	297.29	301.66	301.66	301.35
35400	301.21	68.90	297.24	301.28	301.28	301.31
35700	301.37	61.50	297.2	300.91	300.91	301.28
36000	301.54	69.70	297.32	300.93	300.93	301.3

TEMPERATURA VARIABLE (MES DE ENERO)

TIEMPO (s)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	RADIACIÓN SOLAR (W/m²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	292.93	53.70	287.71	290.76	290.78	291.65
300	293.04	64.60	288.25	290.99	291	291.86
600	293.21	76.70	288.66	291.54	291.54	292.12
900	293.48	142.60	289.61	293.65	293.62	292.68
1200	293.87	179.90	290.7	295.99	295.94	293.5
1500	294.26	193.90	291.65	297.94	297.89	294.41
1800	294.71	207.70	292.55	299.7	299.65	295.35
2100	295.09	241.10	293.46	301.81	301.75	296.27
2400	295.32	272.80	294.51	304.1	304.02	297.28
2700	295.59	288.50	295.4	306.08	305.99	298.25
3000	295.98	311.80	296.33	308.08	307.99	299.23
3300	296.43	334.50	297.31	310.1	310	300.23
3600	296.82	341.30	298.12	311.73	311.62	301.17
3900	297.32	350.50	298.93	313.19	313.09	302.08
4200	297.54	384.30	299.79	315.13	315.02	302.95
4500	297.98	419.90	300.84	317.41	317.27	303.92
4800	298.04	444.20	301.67	319.49	319.35	304.81
5100	298.15	455.00	302.34	321.22	321.08	305.63
5400	298.21	491.90	303.11	323.33	323.17	306.43
5700	298.59	513.20	303.99	325.31	325.14	307.32
6000	298.76	529.60	304.72	327.07	326.9	308.14
6300	298.71	536.10	305.19	328.42	328.25	308.8
6600	298.48	545.30	305.46	329.53	329.36	309.28
6900	298.82	572.20	306.08	331	330.82	309.89
7200	299.26	597.70	306.9	332.69	332.49	310.63
7500	298.98	596.90	307.2	333.74	333.55	311.11
7800	299.21	642.00	307.94	335.63	335.42	311.75
8100	299.09	650.70	308.39	337.03	336.82	312.3
8400	299.37	615.50	308.52	337.11	336.91	312.73
8700	299.32	637.30	308.75	337.82	337.61	313.04
9000	299.54	656.70	309.19	338.8	338.59	313.44
9300	299.76	685.00	309.8	340.2	339.97	313.94
9600	299.76	677.60	310.08	340.91	340.69	314.33
9900	299.93	737.00	310.87	342.94	342.69	314.91
10200	300.26	796.90	312.04	345.77	345.5	315.76
10500	300.54	807.30	312.94	347.86	347.58	316.67
10800	300.32	809.00	313.36	349.26	348.99	317.33
11100	300.09	813.80	313.57	350.3	350.02	317.8
11400	300.09	728.30	312.99	348.83	348.59	317.88
11700	299.93	681.40	312.18	346.84	346.62	317.56
12000	299.82	759.10	312.36	347.59	347.34	317.41
12300	299.43	524.80	310.18	341.98	341.82	316.43
12600	299.48	532.30	309.03	338.86	338.69	315.36
12900	299.65	665.00	309.6	340.2	339.98	314.94
13200	299.82	729.10	310.54	342.44	342.2	315.1
13500	299.98	764.70	311.46	344.66	344.4	315.6

13800	300.04	669.30	311.15	343.63	343.41	315.81
14100	300.09	773.00	311.93	345.77	345.51	316.21
14400	300.15	843.80	313.05	348.82	348.53	316.92
14700	300.43	740.00	312.93	348.13	347.88	317.38
15000	300.04	366.50	309.32	338.41	338.31	316.11
15300	299.82	489.30	308.22	335.81	335.67	314.76
15600	299.87	459.70	307.31	333.22	333.09	313.61
15900	299.76	599.10	307.93	334.98	334.79	313.13
16200	299.65	729.60	309.37	339.08	338.83	313.45
16500	299.71	525.30	308.42	336.29	336.13	313.37
16800	299.43	221.20	305	327.07	327.03	311.87
17100	299.09	244.70	303.03	322.15	322.1	310.04
17400	299.21	561.30	304.76	326.9	326.72	309.62
17700	299.54	792.50	307.97	335.25	334.97	310.79
18000	299.82	412.00	306.54	330.62	330.5	311.06
18300	299.48	498.90	306.31	330.38	330.22	310.97
18600	299.76	777.30	308.84	337.24	336.98	311.97
18900	299.87	754.00	310.16	340.68	340.42	313.19
19200	299.76	611.20	309.62	339.32	339.12	313.72
19500	299.82	660.20	309.82	339.98	339.76	314.09
19800	299.87	671.50	310.08	340.71	340.48	314.42
20100	300.48	608.10	310	339.7	339.5	314.66
20400	300.37	539.60	309.22	337.47	337.3	314.4
20700	299.87	231.20	305.73	328.32	328.27	312.75
21000	299.48	252.90	303.69	323.34	323.29	310.82
21300	299.32	432.90	304.01	324.55	324.42	309.76
21600	299.54	383.90	303.84	323.7	323.59	309.17
21900	299.59	416.80	304.02	323.95	323.82	308.88
22200	299.65	261.90	302.72	320.11	320.05	308.2
22500	299.76	238.60	301.78	317.28	317.23	307.38
22800	299.48	221.70	300.87	315.02	314.97	306.44
23100	299.48	182.50	299.97	312.52	312.49	305.52
23400	299.26	155.20	299.04	310.18	310.16	304.56
23700	299.26	141.80	298.36	308.3	308.28	303.71
24000	299.32	137.00	297.91	306.92	306.9	303.02
24300	299.09	68.90	296.87	304.22	304.23	302.16
24600	299.15	94.10	296.5	303.16	303.16	301.49
24900	299.15	95.40	296.27	302.42	302.42	300.99
25200	299.15	95.40	296.1	301.88	301.88	300.62
25500	299.21	100.20	296.05	301.62	301.62	300.39
25800	299.15	95.40	295.93	301.29	301.29	300.19
26100	299.04	98.40	295.82	301.12	301.11	300.02
26400	298.87	80.60	295.51	300.5	300.5	299.78
26700	298.87	72.80	295.27	299.9	299.9	299.56
27000	298.76	53.70	294.89	299.01	299.02	299.26
27300	298.54	52.80	294.55	298.37	298.38	298.91
27600	298.48	48.10	294.29	297.8	297.81	298.61
27900	292.48	51.50	294.11	297.47	297.48	298.36
28200	298.26	54.60	293.98	297.28	297.29	298.15
28500	298.26	61.20	293.97	297.28	297.29	298.03

28800	298.15	63.20	293.92	297.29	297.29	297.94
29100	298.15	56.30	293.83	297.09	297.1	297.86
29400	297.98	50.30	293.64	296.78	296.79	297.72
29700	297.93	46.70	293.49	296.5	296.52	297.58
30000	297.87	47.70	293.38	296.3	296.31	297.45
30300	297.76	50.30	293.28	296.2	296.21	297.33
30600	297.65	50.70	293.18	296.1	296.11	297.21
30900	297.54	40.20	293.01	295.91	295.93	297.09
31200	297.43	29.90	292.81	295.75	295.76	296.96
31500	297.43	25.60	292.7	295.61	295.62	296.87
31800	297.32	20.80	292.56	295.49	295.5	296.76
32100	297.09	15.50	292.35	295.34	295.36	296.61
32400	296.93	13.00	292.16	295.19	295.2	296.46
32700	296.93	10.40	292.06	295.06	295.07	296.36
33000	296.87	9.90	291.98	294.95	294.96	296.27
33300	296.76	8.20	291.87	294.84	294.85	296.17
33600	296.65	6.00	291.75	294.73	294.74	296.06
33900	296.59	5.10	291.66	294.63	294.64	295.97
34200	296.48	2.60	291.54	294.53	294.54	295.87
34500	296.43	1.20	291.45	294.43	294.44	295.79
34800	296.37	0.40	291.37	294.34	294.36	295.71
35100	296.37	0.00	291.33	294.27	294.29	295.66
35400	296.32	0.00	291.28	294.21	294.22	295.6
35700	296.26	0.00	291.23	294.15	294.16	295.54
36000	296.15	0.00	291.14	294.09	294.1	295.47

**Resultados con velocidad de viento de 10 m/s Cuernavaca
(abril, septiembre) y Mérida (agosto, enero)**

TEMPERATURA CONSTANTE (MES DE ABRIL)

TIEMPO (s)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO(K)	SUSTRATO (K)
0	238.00	289.12	301.49	301.42	294.53
300	238.00	289.35	301.48	301.42	294.54
600	262.50	289.46	302.08	302.01	294.59
900	287.00	289.63	302.99	302.91	294.71
1200	305.67	289.79	303.94	303.86	294.86
1500	324.34	289.96	304.93	304.83	295.02
1800	343.00	290.13	305.93	305.83	295.20
2100	361.34	290.30	306.94	306.84	295.38
2400	379.67	290.47	307.96	307.84	295.56
2700	398.00	290.63	308.97	308.85	295.74
3000	415.34	290.80	309.97	309.84	295.92
3300	432.67	290.96	310.95	310.81	296.10
3600	450.00	291.12	311.92	311.78	296.28
3900	468.34	291.29	312.92	312.77	296.46
4200	486.67	291.46	313.92	313.76	296.64
4500	505.00	291.63	314.93	314.77	296.82
4800	520.65	291.78	315.88	315.71	297.00
5100	536.35	291.93	316.80	316.62	297.17
5400	552.00	292.08	317.69	317.51	297.33
5700	567.35	292.23	318.57	318.39	297.49
6000	582.65	292.37	319.44	319.25	297.65
6300	598.00	292.51	320.30	320.10	297.81
6600	615.00	292.66	321.20	320.99	297.97
6900	632.00	292.82	322.12	321.91	298.13
7200	649.00	292.97	323.05	322.83	298.30
7500	662.65	293.11	323.90	323.68	298.46
7800	676.35	293.25	324.72	324.49	298.61
8100	690.00	293.38	325.51	325.27	298.76
8400	705.00	293.51	326.32	326.08	298.90
8700	720.00	293.65	327.14	326.89	299.05
9000	735.00	293.79	327.97	327.71	299.20
9300	746.35	293.91	328.71	328.45	299.34
9600	757.65	294.02	329.40	329.14	299.47
9900	769.00	294.13	330.07	329.80	299.59
10200	781.35	294.24	330.74	330.47	299.72
10500	793.65	294.35	331.42	331.15	299.84
10800	806.00	294.47	332.11	331.83	299.96
11100	814.65	294.56	332.70	332.42	300.08
11400	823.35	294.65	333.25	332.96	300.18
11700	832.00	294.74	333.77	333.48	300.28
12000	839.00	294.81	334.23	333.94	300.37
12300	846.00	294.88	334.67	334.37	300.46
12600	853.00	294.95	335.08	334.79	300.53

12900	857.35	295.00	335.42	335.12	300.60
13200	861.65	295.05	335.72	335.42	300.66
13500	866.00	295.10	336.00	335.69	300.72
13800	870.00	295.14	336.25	335.95	300.77
14100	874.00	295.18	336.49	336.19	300.81
14400	878.00	295.21	336.72	336.42	300.86
14700	881.00	295.25	336.93	336.62	300.90
15000	884.00	295.28	337.12	336.81	300.93
15300	887.00	295.31	337.30	336.99	300.97
15600	890.35	295.34	337.48	337.17	301.00
15900	893.65	295.37	337.66	337.35	301.03
16200	897.00	295.40	337.85	337.53	301.07
16500	899.35	295.42	338.01	337.69	301.10
16800	901.65	295.45	338.16	337.84	301.13
17100	904.00	295.47	338.30	337.98	301.15
17400	904.00	295.48	338.38	338.06	301.17
17700	904.00	295.49	338.42	338.11	301.19
18000	904.00	295.49	338.45	338.13	301.20
18300	901.65	295.48	338.41	338.09	301.20
18600	899.35	295.47	338.33	338.02	301.19
18900	897.00	295.45	338.23	337.92	301.17
19200	894.65	295.43	338.12	337.81	301.16
19500	892.35	295.41	338.01	337.69	301.14
19800	890.00	295.39	337.88	337.57	301.12
20100	885.35	295.36	337.70	337.39	301.09
20400	880.65	295.32	337.49	337.18	301.06
20700	876.00	295.28	337.25	336.95	301.02
21000	869.65	295.23	336.97	336.67	300.97
21300	863.35	295.18	336.66	336.36	300.92
21600	857.00	295.12	336.33	336.03	300.87
21900	849.35	295.06	335.96	335.67	300.80
22200	841.65	294.99	335.57	335.28	300.74
22500	834.00	294.93	335.16	334.87	300.67
22800	824.65	294.85	334.71	334.42	300.59
23100	815.35	294.77	334.23	333.94	300.51
23400	806.00	294.68	333.73	333.45	300.42
23700	793.65	294.58	333.15	332.88	300.33
24000	781.35	294.48	332.53	332.26	300.22
24300	769.00	294.37	331.88	331.62	300.11
24600	756.65	294.26	331.22	330.96	299.99
24900	744.35	294.15	330.55	330.29	299.87
25200	732.00	294.03	329.87	329.62	299.75
25500	721.35	293.93	329.23	328.98	299.64
25800	710.65	293.83	328.61	328.37	299.52
26100	700.00	293.73	328.00	327.76	299.41
26400	686.00	293.61	327.32	327.09	299.29
26700	672.00	293.49	326.60	326.37	299.17

27000	658.00	293.36	325.85	325.63	299.04
27300	645.65	293.24	325.13	324.92	298.91
27600	633.35	293.13	324.43	324.22	298.78
27900	621.00	293.01	323.73	323.52	298.65
28200	603.35	292.87	322.91	322.71	298.52
28500	585.65	292.72	322.02	321.83	298.37
28800	568.00	292.56	321.10	320.91	298.21
29100	551.65	292.41	320.18	320.00	298.04
29400	535.35	292.26	319.27	319.09	297.88
29700	519.00	292.11	318.36	318.19	297.71
30000	501.00	291.95	317.41	317.25	297.55
30300	483.00	291.79	316.44	316.28	297.37
30600	465.00	291.62	315.46	315.31	297.20
30900	445.00	291.45	314.42	314.28	297.02
31200	425.00	291.27	313.35	313.22	296.83
31500	405.00	291.09	312.26	312.14	296.64
31800	384.34	290.90	311.15	311.03	296.44
32100	363.67	290.71	310.02	309.92	296.24
32400	343.00	290.52	308.89	308.79	296.04
32700	321.34	290.33	307.72	307.63	295.83
33000	299.67	290.13	306.54	306.46	295.62
33300	278.00	289.93	305.35	305.28	295.40
33600	257.34	289.73	304.18	304.11	295.19
33900	236.67	289.54	303.01	302.96	294.98
34200	216.00	289.35	301.86	301.81	294.77
34500	196.34	289.16	300.73	300.69	294.56
34800	176.67	288.98	299.61	299.58	294.36
35100	157.00	288.79	298.51	298.48	294.16
35400	142.34	288.63	297.53	297.51	293.97
35700	127.67	288.48	296.62	296.60	293.79
36000	113.00	288.34	295.74	295.73	293.63

TEMPERATURA VARIABLE (MES DE ABRIL)

TIEMPO (s)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	294.59	238.00	290.71	303.08	303.01	296.12
300	294.59	238.00	290.94	303.07	303.01	296.13
600	294.74	262.50	291.16	303.70	303.63	296.27
900	294.88	287.00	291.45	304.69	304.61	296.49
1200	295.03	305.67	291.76	305.75	305.66	296.77
1500	294.94	324.34	291.89	306.79	306.69	296.94
1800	294.85	343.00	291.99	307.80	307.70	297.07
2100	294.76	361.34	292.08	308.78	308.67	297.18
2400	294.80	379.67	292.26	309.78	309.66	297.36
2700	294.83	398.00	292.45	310.79	310.67	297.56
3000	294.87	415.34	292.65	311.80	311.67	297.77
3300	294.96	432.67	292.89	312.81	312.68	298.01
3600	295.06	450.00	293.14	313.84	313.70	298.27
3900	295.15	468.34	293.40	314.91	314.76	298.53
4200	295.28	486.67	293.68	316.00	315.84	298.81
4500	295.40	505.00	293.97	317.11	316.95	299.11
4800	295.53	520.65	294.25	318.17	318.00	299.41
5100	295.46	536.35	294.38	319.15	318.98	299.58
5400	295.38	552.00	294.46	320.07	319.88	299.72
5700	295.31	567.35	294.55	320.93	320.74	299.83
6000	295.42	582.65	294.76	321.81	321.61	300.04
6300	295.54	598.00	295.01	322.71	322.52	300.27
6600	295.65	615.00	295.26	323.68	323.48	300.53
6900	295.67	632.00	295.45	324.66	324.45	300.73
7200	295.68	649.00	295.63	325.63	325.41	300.93
7500	295.70	662.65	295.79	326.52	326.30	301.11
7800	295.94	676.35	296.11	327.43	327.20	301.42
8100	296.18	690.00	296.46	328.36	328.12	301.76
8400	296.42	705.00	296.82	329.34	329.10	302.12
8700	296.44	720.00	297.02	330.30	330.06	302.36
9000	296.46	735.00	297.20	331.23	330.98	302.57
9300	296.48	746.35	297.34	332.04	331.79	302.75
9600	296.59	757.65	297.55	332.81	332.55	302.96
9900	296.70	769.00	297.76	333.57	333.30	303.19
10200	296.81	781.35	297.98	334.34	334.07	303.41
10500	297.03	793.65	298.28	335.15	334.87	303.70
10800	297.26	806.00	298.61	335.99	335.71	304.02
11100	297.48	814.65	298.92	336.77	336.49	304.34
11400	297.65	823.35	299.19	337.50	337.21	304.63
11700	297.81	832.00	299.44	338.20	337.91	304.90
12000	297.98	839.00	299.68	338.84	338.54	305.16
12300	298.02	846.00	299.82	339.41	339.11	305.33
12600	298.05	853.00	299.93	339.92	339.62	305.48
12900	298.09	857.35	300.03	340.34	340.04	305.60

13200	298.16	861.65	300.14	340.71	340.41	305.73
13500	298.24	866.00	300.26	341.06	340.75	305.85
13800	298.31	870.00	300.37	341.38	341.08	305.97
14100	298.40	874.00	300.50	341.70	341.39	306.10
14400	298.50	878.00	300.63	342.01	341.70	306.23
14700	298.59	881.00	300.75	342.30	341.99	306.36
15000	298.66	884.00	300.86	342.57	342.26	306.48
15300	298.74	887.00	300.97	342.83	342.52	306.59
15600	298.81	890.35	301.07	343.09	342.78	306.70
15900	299.01	893.65	301.27	343.39	343.07	306.88
16200	299.22	897.00	301.49	343.71	343.40	307.09
16500	299.42	899.35	301.71	344.04	343.72	307.30
16800	299.53	901.65	301.86	344.34	344.02	307.47
17100	299.65	904.00	302.01	344.62	344.30	307.62
17400	299.76	904.00	302.13	344.83	344.51	307.76
17700	299.76	904.00	302.17	344.97	344.65	307.83
18000	299.76	904.00	302.18	345.06	344.74	307.86
18300	299.76	901.65	302.18	345.06	344.74	307.88
18600	299.91	899.35	302.28	345.04	344.73	307.97
18900	300.05	897.00	302.39	345.03	344.72	308.07
19200	300.20	894.65	302.52	345.03	344.72	308.19
19500	300.35	892.35	302.64	345.04	344.73	308.31
19800	300.50	890.00	302.77	345.05	344.74	308.43
20100	300.65	885.35	302.88	345.01	344.70	308.55
20400	300.69	880.65	302.91	344.91	344.60	308.59
20700	300.72	876.00	302.91	344.76	344.46	308.62
21000	300.76	869.65	302.91	344.55	344.24	308.62
21300	300.81	863.35	302.90	344.30	343.99	308.62
21600	300.87	857.00	302.91	344.03	343.73	308.62
21900	300.92	849.35	302.90	343.71	343.42	308.61
22200	301.11	841.65	302.98	343.41	343.12	308.68
22500	301.29	834.00	303.09	343.13	342.84	308.76
22800	301.48	824.65	303.19	342.82	342.53	308.86
23100	301.63	815.35	303.27	342.49	342.20	308.93
23400	301.77	806.00	303.33	342.14	341.86	308.99
23700	301.92	793.65	303.38	341.71	341.44	309.04
24000	301.74	781.35	303.17	341.15	340.88	308.90
24300	301.55	769.00	302.91	340.48	340.22	308.67
24600	301.37	756.65	302.63	339.74	339.48	308.42
24900	301.63	744.35	302.68	339.06	338.81	308.40
25200	301.89	732.00	302.79	338.47	338.22	308.45
25500	302.15	721.35	302.93	337.98	337.73	308.55
25800	302.00	710.65	302.77	337.44	337.20	308.43
26100	301.85	700.00	302.55	336.84	336.60	308.24
26400	301.70	686.00	302.30	336.10	335.87	308.02
26700	301.74	672.00	302.18	335.34	335.12	307.88
27000	301.77	658.00	302.08	334.58	334.36	307.76

27300	301.81	645.65	301.99	333.87	333.65	307.65
27600	302.00	633.35	302.03	333.22	333.01	307.64
27900	302.18	621.00	302.08	332.63	332.42	307.66
28200	302.37	603.35	302.12	331.94	331.74	307.69
28500	302.50	585.65	302.11	331.19	331.00	307.68
28800	302.63	568.00	302.08	330.40	330.22	307.66
29100	302.76	551.65	302.06	329.62	329.44	307.63
29400	302.63	535.35	301.85	328.78	328.60	307.45
29700	302.50	519.00	301.59	327.86	327.70	307.21
30000	302.37	501.00	301.31	326.87	326.71	306.95
30300	302.37	483.00	301.13	325.85	325.70	306.74
30600	302.37	465.00	300.96	324.84	324.69	306.55
30900	302.37	445.00	300.78	323.78	323.64	306.36
31200	302.30	425.00	300.55	322.68	322.55	306.13
31500	302.22	405.00	300.30	321.55	321.43	305.88
31800	302.15	384.34	300.04	320.38	320.27	305.62
32100	302.19	363.67	299.87	319.22	319.12	305.41
32400	302.22	343.00	299.71	318.08	317.98	305.22
32700	302.26	321.34	299.55	316.92	316.83	305.04
33000	302.26	299.67	299.36	315.75	315.67	304.84
33300	302.26	278.00	299.16	314.57	314.50	304.64
33600	302.26	257.34	298.97	313.40	313.34	304.43
33900	302.18	236.67	298.72	312.23	312.17	304.17
34200	302.11	216.00	298.46	311.03	310.98	303.91
34500	302.03	196.34	298.20	309.85	309.81	303.64
34800	302.03	176.67	298.00	308.70	308.67	303.41
35100	302.03	157.00	297.81	307.57	307.54	303.19
35400	302.03	142.34	297.65	306.57	306.55	303.00
35700	301.87	127.67	297.38	305.61	305.59	302.72
36000	301.70	113.00	297.09	304.64	304.63	302.43

TEMPERATURA VARIABLE (MES DE SEPTIEMBRE)

TIEMPO (s)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	289.32	28.00	283.90	288.01	288.02	289.08
300	289.32	28.00	283.90	288.01	288.02	289.08
600	289.48	32.67	284.26	288.20	288.21	289.19
900	289.57	37.33	284.39	288.46	288.46	289.30
1200	289.67	42.00	284.47	288.75	288.75	289.42
1500	289.76	48.00	284.56	289.08	289.09	289.55
1800	289.80	54.00	284.66	289.45	289.44	289.66
2100	289.83	60.00	284.77	289.82	289.81	289.76
2400	289.87	68.00	284.89	290.24	290.23	289.86
2700	289.93	76.00	285.04	290.69	290.68	289.98
3000	289.98	84.00	285.20	291.17	291.16	290.11
3300	290.04	102.34	285.41	291.92	291.90	290.26
3600	290.13	120.67	285.58	292.80	292.77	290.47
3900	290.22	139.00	285.74	293.76	293.72	290.70
4200	290.31	137.67	285.81	294.29	294.25	290.90
4500	290.31	136.34	285.88	294.58	294.55	291.01
4800	290.31	135.00	285.92	294.74	294.70	291.07
5100	290.31	153.34	286.06	295.28	295.24	291.15
5400	290.35	171.67	286.26	296.04	295.99	291.28
5700	290.38	190.00	286.47	296.92	296.87	291.44
6000	290.42	197.00	286.65	297.61	297.55	291.60
6300	290.50	204.00	286.75	298.19	298.13	291.77
6600	290.57	211.00	286.83	298.71	298.64	291.93
6900	290.65	208.00	286.86	298.95	298.89	292.07
7200	290.65	205.00	286.92	299.04	298.98	292.13
7500	290.65	202.00	286.98	299.04	298.98	292.16
7800	290.65	215.67	287.11	299.39	299.33	292.20
8100	290.72	229.34	287.27	299.93	299.86	292.31
8400	290.80	243.00	287.45	300.59	300.52	292.46
8700	290.87	254.00	287.62	301.26	301.18	292.63
9000	290.94	265.00	287.84	301.93	301.85	292.81
9300	291.02	276.00	288.06	302.62	302.53	292.99
9600	291.09	285.00	288.28	303.27	303.18	293.17
9900	291.22	294.00	288.49	303.90	303.80	293.38
10200	291.35	303.00	288.71	304.53	304.43	293.59
10500	291.48	320.00	288.96	305.35	305.24	293.83
10800	291.61	337.00	289.28	306.29	306.17	294.09
11100	291.74	354.00	289.62	307.29	307.17	294.36
11400	291.87	379.67	290.01	308.54	308.41	294.67
11700	292.07	405.34	290.40	309.94	309.80	295.04
12000	292.28	431.00	290.81	311.42	311.27	295.46
12300	292.48	436.34	291.13	312.47	312.32	295.84
12600	292.67	441.67	291.32	313.27	313.12	296.18
12900	292.85	447.00	291.48	313.93	313.77	296.47

13200	293.04	461.00	291.68	314.70	314.54	296.76
13500	293.11	475.00	291.89	315.53	315.36	297.00
13800	293.19	489.00	292.10	316.38	316.20	297.22
14100	293.26	490.34	292.26	316.92	316.75	297.41
14400	293.35	491.67	292.39	317.31	317.13	297.57
14700	293.44	493.00	292.52	317.60	317.43	297.71
15000	293.53	511.65	292.71	318.26	318.08	297.88
15300	293.62	530.35	292.87	319.11	318.92	298.08
15600	293.72	549.00	293.04	320.06	319.86	298.31
15900	293.81	550.00	293.12	320.64	320.44	298.52
16200	293.81	551.00	293.23	321.02	320.83	298.64
16500	293.81	552.00	293.35	321.29	321.10	298.71
16800	293.81	585.65	293.62	322.28	322.07	298.84
17100	293.90	619.35	293.97	323.66	323.44	299.09
17400	294.00	653.00	294.37	325.29	325.05	299.41
17700	294.09	633.65	294.52	325.77	325.54	299.65
18000	294.22	614.35	294.43	325.63	325.41	299.80
18300	294.35	595.00	294.26	325.13	324.92	299.88
18600	294.48	559.65	293.99	324.03	323.83	299.87
18900	294.41	524.35	293.72	322.58	322.40	299.66
19200	294.33	489.00	293.43	320.91	320.74	299.36
19500	294.26	459.67	293.15	319.25	319.10	299.03
19800	294.26	430.34	292.93	317.61	317.47	298.72
20100	294.26	401.00	292.72	315.98	315.85	298.42
20400	294.26	449.00	292.89	316.23	316.08	298.30
20700	294.33	497.00	293.13	317.49	317.32	298.41
21000	294.41	545.00	293.45	319.34	319.15	298.69
21300	294.48	537.65	293.53	320.19	320.00	298.94
21600	294.44	530.35	293.51	320.51	320.32	299.06
21900	294.41	523.00	293.45	320.52	320.33	299.10
22200	294.37	504.65	293.30	320.07	319.90	299.05
22500	294.31	486.34	293.12	319.37	319.20	298.93
22800	294.26	468.00	292.90	318.52	318.36	298.76
23100	294.20	428.00	292.57	317.05	316.90	298.52
23400	294.13	388.00	292.23	315.25	315.12	298.20
23700	294.05	348.00	291.87	313.25	313.14	297.81
24000	293.98	344.00	291.67	312.02	311.90	297.48
24300	293.96	340.00	291.47	311.18	311.07	297.24
24600	293.94	336.00	291.29	310.57	310.46	297.07
24900	293.92	272.67	290.84	308.65	308.57	296.80
25200	293.81	209.34	290.28	306.04	305.98	296.37
25500	293.70	146.00	289.66	303.01	302.98	295.82
25800	293.59	140.67	289.29	301.15	301.11	295.32
26100	293.48	135.34	289.11	299.91	299.88	294.92
26400	293.37	130.00	288.99	299.03	299.00	294.61
26700	293.26	117.67	288.88	298.19	298.16	294.34
27000	293.28	105.34	288.69	297.39	297.37	294.16

27300	293.29	93.00	288.48	296.61	296.60	294.01
27600	293.31	80.67	288.28	295.87	295.86	293.88
27900	293.22	68.34	288.13	295.13	295.12	293.70
28200	293.12	56.00	288.00	294.39	294.39	293.49
28500	293.03	87.67	288.07	294.71	294.70	293.39
28800	293.01	119.34	288.22	295.61	295.58	293.43
29100	293.00	151.00	288.42	296.85	296.81	293.57
29400	292.98	162.34	288.54	297.80	297.75	293.72
29700	292.94	173.67	288.62	298.59	298.54	293.85
30000	292.91	185.00	288.69	299.30	299.25	293.97
30300	292.87	167.34	288.61	299.26	299.22	294.00
30600	292.81	149.67	288.55	298.82	298.79	293.94
30900	292.76	132.00	288.47	298.16	298.13	293.83
31200	292.70	115.67	288.39	297.39	297.37	293.67
31500	292.76	99.34	288.26	296.57	296.55	293.55
31800	292.81	83.00	288.12	295.72	295.71	293.44
32100	292.87	72.34	288.00	295.00	295.00	293.34
32400	292.87	61.67	287.86	294.34	294.33	293.23
32700	292.87	51.00	287.73	293.70	293.70	293.11
33000	292.87	61.67	287.69	293.59	293.59	293.05
33300	292.83	72.34	287.69	293.76	293.75	293.01
33600	292.80	83.00	287.71	294.08	294.07	293.02
33900	292.76	102.34	287.78	294.71	294.69	293.06
34200	292.70	121.67	287.80	295.49	295.46	293.13
34500	292.65	141.00	287.83	296.35	296.32	293.23
34800	292.59	136.40	287.75	296.80	296.76	293.29
35100	292.44	131.80	287.71	297.02	296.98	293.27
35400	292.30	127.20	287.66	297.10	297.07	293.20
35700	292.15	122.60	287.58	296.83	296.80	293.07
36000	292.15	118.00	287.51	296.40	296.37	292.99

TEMPERATURA VARIABLE (MES DE AGOSTO)

TIEMPO (s)	TEMPERATURA AMBIENTE (K)	RADIACIÓN SOLAR (W/m ²)	CUBIERTA (K)	CAPA ACTIVA (K)	ELECTROLITO (K)	SUSTRATO (K)
0	299.87	108.90	294.13	300.29	300.28	299.23
300	299.87	119.30	294.84	300.78	300.77	299.76
600	299.93	130.50	295.1	301.42	301.4	300.02
900	300.04	142.30	295.32	302.13	302.11	300.26
1200	300.09	153.00	295.49	302.82	302.8	300.45
1500	300.26	161.70	295.72	303.49	303.46	300.69
1800	300.37	173.00	295.94	304.19	304.16	300.91
2100	300.37	184.70	296.07	304.89	304.85	301.07
2400	300.48	196.50	296.27	305.6	305.56	301.27
2700	300.59	203.40	296.46	306.22	306.17	301.47
3000	300.76	215.90	296.71	306.93	306.88	301.71
3300	300.87	219.00	296.89	307.46	307.41	301.92
3600	300.98	227.30	297.08	308.02	307.96	302.12
3900	301.15	233.80	297.3	308.55	308.49	302.34
4200	301.26	246.80	297.51	309.22	309.16	302.55
4500	301.37	257.60	297.72	309.91	309.84	302.76
4800	301.43	268.50	297.89	310.59	310.52	302.94
5100	301.54	298.40	298.18	311.75	311.66	303.19
5400	301.65	319.70	298.47	312.95	312.86	303.47
5700	301.98	480.70	299.61	317.62	317.47	304.22
6000	302.15	583.40	300.66	322.73	322.54	305.13
6300	302.37	467.20	300.71	322.87	322.72	305.7
6600	302.37	524.80	301.02	324.49	324.32	306.07
6900	302.59	664.20	301.99	328.84	328.61	306.76
7200	302.76	545.30	301.92	328.42	328.24	307.14
7500	302.59	584.30	301.97	329.21	329.02	307.26
7800	302.71	520.00	301.79	328.12	327.96	307.28
8100	302.76	502.30	301.66	327.15	327	307.21
8400	302.87	496.70	301.65	326.52	326.36	307.17
8700	302.93	512.70	301.74	326.57	326.41	307.17
9000	303.15	737.40	303	332.09	331.84	307.8
9300	303.59	1040.70	305.28	342.53	342.16	309.33
9600	303.98	907.50	305.83	345.2	344.88	310.54
9900	303.98	739.20	305.28	342.85	342.6	310.82
10200	303.98	1070.60	306.67	349.72	349.35	311.53
10500	303.98	872.80	306.29	348.63	348.34	311.81
10800	304.15	1055.90	307.19	352.65	352.28	312.37
11100	304.54	965.20	307.39	352.76	352.42	312.87
11400	304.54	938.30	307.32	352.29	351.97	313
11700	304.65	936.10	307.36	352.05	351.73	313.09
12000	304.65	951.30	307.43	352.31	351.98	313.13
12300	305.04	1006.30	308.01	353.88	353.53	313.51
12600	305.21	907.00	307.84	352.42	352.11	313.62
12900	305.43	925.20	308	352.2	351.88	313.74
13200	305.43	897.50	307.89	351.42	351.12	313.69
13500	305.76	879.70	308	350.67	350.37	313.78
13800	305.43	792.10	307.31	348.08	347.81	313.35

14100	305.48	900.50	307.63	349.28	348.97	313.31
14400	305.59	891.00	307.77	349.67	349.37	313.4
14700	305.87	940.00	308.26	351.16	350.84	313.73
15000	305.98	933.50	308.48	351.88	351.56	314
15300	306.15	919.60	308.61	352.03	351.71	314.21
15600	306.37	916.20	308.8	352.13	351.82	314.42
15900	306.65	985.20	309.38	353.97	353.63	314.82
16200	306.37	927.90	309.09	353.55	353.23	314.79
16500	306.71	901.90	309.14	352.8	352.49	314.91
16800	306.98	877.50	309.21	351.92	351.62	314.99
17100	306.98	940.40	309.49	352.99	352.66	315.09
17400	307.04	934.80	309.6	353.44	353.12	315.22
17700	306.71	898.30	309.22	352.73	352.43	315.03
18000	306.98	882.30	309.25	352.02	351.72	315.05
18300	307.43	878.40	309.54	351.68	351.38	315.24
18600	307.09	304.90	306.59	337.57	337.5	313.81
18900	306.54	835.10	307.52	342.63	342.34	313.2
19200	306.93	871.50	308.36	346	345.7	313.58
19500	307.65	864.90	309.18	347.89	347.59	314.35
19800	307.26	870.20	309.16	349.08	348.78	314.53
20100	307.59	916.20	309.69	350.97	350.65	315
20400	307.54	819.00	309.37	349.68	349.4	315.05
20700	307.54	878.90	309.54	350.49	350.19	315.13
21000	307.65	1065.80	310.58	355.46	355.09	315.69
21300	307.59	701.00	309.22	349.33	349.1	315.38
21600	307.48	421.60	307.28	339.34	339.22	314.2
21900	307.37	415.10	306.35	333.68	333.56	312.99
22200	307.48	493.60	306.36	332.33	332.18	312.37
22500	307.43	455.80	306.06	330.52	330.39	311.89
22800	307.65	458.00	306.09	329.59	329.45	311.72
23100	307.59	411.70	305.79	327.92	327.8	311.44
23400	307.48	352.60	305.29	325.54	325.44	311.03
23700	307.37	314.40	304.82	323.25	323.16	310.56
24000	307.09	325.80	304.46	322.15	322.06	310.09
24300	307.15	483.20	305.14	325.28	325.13	310.22
24600	307.32	364.30	304.96	324.1	323.99	310.3
24900	307.59	714.80	306.76	332.07	331.83	311.2
25200	307.93	783.80	308.04	338.15	337.87	312.41
25500	307.76	846.70	308.74	343.09	342.79	313.32
25800	307.87	923.20	309.56	347.77	347.45	314.27
26100	308.54	917.90	310.41	350.49	350.17	315.33
26400	308.09	704.00	309.35	346.86	346.63	315.17
26700	303.87	87.10	302.87	328.92	328.94	311.07
27000	303.65	42.90	300.46	317.77	317.8	308.27
27300	301.71	33.40	297.96	310.7	310.73	305.26
27600	300.21	48.90	296.04	305.95	305.98	302.8
27900	300.26	51.10	295.48	302.99	303.01	301.6
28200	300.43	45.50	295.32	301.13	301.14	301
28500	300.76	45.50	295.45	300.1	300.11	300.81
28800	300.98	47.20	295.59	299.57	299.58	300.78

29100	301.04	47.70	295.63	299.3	299.31	300.75
29400	301.37	48.10	295.88	299.24	299.26	300.92
29700	301.26	53.70	295.87	299.35	299.36	300.91
30000	301.04	64.60	295.76	299.61	299.62	300.81
30300	301.04	77.60	295.81	300.05	300.05	300.83
30600	301.15	97.50	296.02	300.79	300.78	300.98
30900	301.21	118.40	296.24	301.73	301.71	301.16
31200	301.32	137.90	296.5	302.76	302.74	301.4
31500	301.54	146.60	296.81	303.62	303.6	301.71
31800	301.71	144.90	297.03	304.15	304.12	301.98
32100	301.93	137.90	297.23	304.37	304.35	302.22
32400	301.76	120.10	297.07	304.06	304.05	302.19
32700	301.59	91.90	296.77	303.18	303.17	302.01
33000	301.54	75.80	296.55	302.27	302.28	301.82
33300	301.59	75.80	296.51	301.77	301.77	301.71
33600	301.71	75.80	296.56	301.51	301.51	301.7
33900	301.43	74.10	296.34	301.25	301.25	301.5
34200	301.43	68.50	296.26	300.94	300.95	301.41
34500	301.09	80.60	296.03	300.96	300.96	301.18
34800	300.98	86.20	295.93	301.03	301.03	301.06
35100	301.04	82.30	295.94	300.96	300.96	301.04
35400	301.21	68.90	295.99	300.64	300.65	301.09
35700	301.37	61.50	296.08	300.35	300.36	301.17
36000	301.54	69.70	296.25	300.45	300.46	301.28

Cuernavaca, Morelos, a 25 de octubre de 2022.

DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: **CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO-FOTOVOLTAICO DE CELDAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR COLORANTE**, que presenta la alumna **ITZEL NANZUI VERA WILIMEK**, para obtener el título de **DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**, con opción terminal en **TECNOLOGÍA MECÁNICA**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. ÁLVARO ZAMUDIO LARA

DR. JORGE URUCHURTU CHAVARÍN

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO

DRA. LAURA LILIA CASTRO GÓMEZ

DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ

DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ

DR. GUSTAVO URQUIZA BELTRÁN

Se adiciona efirma UAEM



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

GUSTAVO URQUIZA BELTRAN | Fecha:2022-10-25 15:18:25 | Firmante

A1Ihfnoyl1wevhcjMUJISXYXKZPGQaZvR9MTF5MbiwrpmQLwZ7PbF8gN3b7OBfpZDGiiQpB5WC8wNsoyKZdaSA0TAzeHrCtIv9crolLafjWzZjuF28ySlOfDuiL.yadhowLpJpOj8qTREFlehFv5MjX2EymWQ9OV0y10vmjEzG8JNP/eBaVZhbENmXkqYU/ad5R3D5KS0d+weRzG0Z0qVSOFRKbeogAiuMs+prjC4oYznWNsfF13IRu0eMvKRUUXz5nZWWOUWk2LgYmqbsHzS5ARI0ocpjYm5pqpMhVQxqP38Y6nRj7wfTtBqfLUIqjaSsQDimLYAh/76czymw==

ALVARO ZAMUDIO LARA | Fecha:2022-10-25 17:02:40 | Firmante

r5Be2thcqravxtbxlv2TgZHd4uonWuMyAYfwClZxkfYE6CSP2+gKEVblvpH3AltN8CQ5QvEZ6Q6LDeE6XFMLeFl4X7zFeUZGpsVKKjPmWloHh1a0OYVLIHc6+fZD24a6rj/61oxZgafP UoVxPw+kd/zSnG18Vfg66ymMAW+JlBp7BZUNObR2b2dZGhaVRymbz34ibm5RGuIPyBpVvuYlaOPOAQ+PL4nUmclGajxTOBusyY7cSAHIF818nHINQnaHZOdGh01WCEIgpOy87w/vt+ohsN/P4rS2VUGjDYMMkgEfdDsbhM5gMA7146EOE45+a5oWyD6KpwwmZwogJwA==

JORGE URUCHURTU CHAVARIN | Fecha:2022-10-27 10:20:27 | Firmante

ZLxg6kQ9Wh3jkkGwwBiBJ7Ux+Bqi45oDjuy0P0FQu4NUqcJRFsTlyPjv8GdcZC4u9ab/sBX4fwFKwgxCzSVIth+SiP9/fZm9Tb5aldC0F1P8flyHXGuzP+eRzgiSqpRW94AnSWI6KQ i0mptNmgCzrmBrWChLkjeVcJMukluFHBavhNKJNnJxcGgzYI3Ae9gixUYOjFsx1XWoFmd2MsNoDIzHzDijyVXKYMsmiVJugh5++T4R+TssJxyWYTjvRrjMkbl0e+5yoMMNvQwYpqIqB52ZyhE+4Ql+3wVcBZrdzwyj7IwFnQ2ADcvszagGhb6rZrkJa1eAVMMWQGOQ==

DIEGO SEURET JIMENEZ | Fecha:2022-10-27 18:23:19 | Firmante

de93My3kdK2Nbh5x6dQRPSd0q1BFzjnbOvZM/z5jLh1sCyixOuJ67XaGu5eErlajuRFXAa3VSHLFicOFV///mFxmTmXo6UxJqczRW0fqxYSgtfXidAr88PK7Igvsc+RdDXTwHmQ6l8143LjPi/GdODqNmXaWR+i7/8RfsvfKkW7eRPjMmat6oQXJ2aAVVKXg7xwUqsAdBlmZe4/qLofikdBWOG8EvSwNAoxLToTJ9CyxZJZeM8aPM4ISNkktK91CyWgDeiSxjnKYmlgR eQVauBjIC6du0rKo+rFNjohWUCgqVXw5acysMzBB78BROvxX2qN+Y+/n3kaB9G/ZgXkVA==

MOISES MONTIEL GONZALEZ | Fecha:2022-10-31 17:06:41 | Firmante

Mw61fc/siY6+/16uz5Zx799DyRgBKiw7/jJ9s4y/PkyiOr9OG2qIhqnX4ksr7iulRlxgETv9AfxSXXyT3obJYxj6qyip+TqkiKqJrfQPWxu6UKXaEWSNVzJEM45H1r+hGyYazl1b4S1cEc vHMNRdZQcc0xOxvHjynwVLUDG03yLefuhJmQVcEJvqOALpGIFidPyyCFW7HfxvheNqb2DtBzZkhUWV9S2Tu5WFX9ybMtn/IkLsZsOJ1oqZ6Gfipb4H54jnXYLmmE/StuOPramp y0XEFRydcFNBJOXJdCl0dNV7fvdN98X82cpZtopYoaCqvNp2pulG8WY1J/Ct3iyQ==

ARTURO MOLINA OCAMPO | Fecha:2022-11-23 22:52:23 | Firmante

Yh0RkaZJ9X5y7Sph9kBC7Kw3K1TfVajJc8tdirs+yRlboUxMsovbyTK/LgCnuAfZ1Fx+Qkzle1ObbU3/izTncDfluhiOaqXBXuDXUIOzRx/zX7zFISJOOY6YxpaBHqnkjfb6h6hD5 uknqHmpQ94BMXUDcx2+shQ1a84NjJ4/S4cks1mNmYX0ANweNMA66plmYk3S8wvNY/UhDzKzCp4HhpxA63M8PQy6s+teoTLLc0bQpw2Ru0xNahPoysLjSNPstYb4eGs0Rngz L8N6OVRkyHNWHiOLWbb1SCAMewAk7IPCFOKPCxpnOzdpu1Bv1XzEF45W/N/H+VsXtsqA==

LAURA LILIA CASTRO GOMEZ | Fecha:2022-11-28 11:59:04 | Firmante

Ufelo6glgAajKoTAt0mZASD9vNDIjM57ZiK0F6kRwgCINytoatQrgY669RCJ1ingoWS3BYv615IGL7ITpru316pLb3clm+hZ4ulsMZlvjBBFaRdqGdhk0mQf+kjE/RAKzPNkbt6XSZe7 LNd40OHR1xnll/y1p2BT+Tziq25PM0qzYdYBwZUUyIlgTE1uGpRKi2BBfawy/ihh8ZsBdbT35OZOTEW0i8AVdoqwmKjfcGLXsOlk9ND3MzhcvOEK6ZTV9R4L06F0lwb/n3/aSch/ ogjVTXOfZ3WhOFDR/i3D2MTLbCBkR/8C5P/Ji9QeLtz7IGdXqOYXtIBpy1wkAg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



kHfvVQLns

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/PoPzEtHyBHrjQCZjKt24cLAQL9gbb7h>

