

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CD. JUÁREZ
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MULTIFÍSICA APLICADA A UN SISTEMA
PV-T-HHO MEDIANTE SIMULACIÓN**

**TESIS
QUE PRESENTA**

JEOVANY RAFAEL RODRÍGUEZ MEJÍA

**COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

Cd. JUÁREZ, CHIH.

DICIEMBRE DE 2021



Ciudad Juárez, Chihuahua, **30/noviembre/2021**

Oficio No: D.E.P.I/042

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

**C. JOVANY RAFAEL RODRÍGUEZ MEJÍA
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR(A) EN
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
P R E S E N T E.**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de Tesis titulado "**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MULTIFÍSICA APLICADA A UN SISTEMA PV-T-HHO MEDIANTE SIMULACIÓN**", ha informado a esta División de Estudios de Posgrado e Investigación, que está de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior se le autoriza se proceda con la **IMPRESIÓN DEFINITIVA DE SU TRABAJO DE TESIS**.

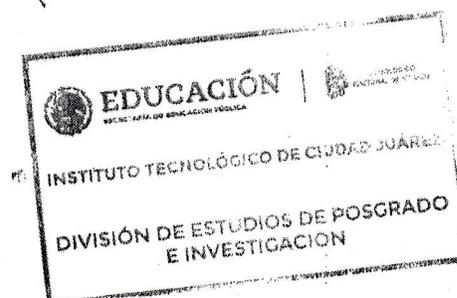
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®


**EDUARDO RAFAEL POBLANO OJINAGA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

C.c.p. Departamento de Servicios escolares
División de Estudios Profesionales



ERPO/dmsp



Av. Tecnológico #1340 Fracc. El Crucero C.P.32340
Ciudad Juárez, Chihuahua. Tel. 01 (656) 688-2500
e-mail: comunicacion_y_difusion@cdjuarez.tecnm.mx
tecnm.mx | cdjuarez.tecnm.mx





C. EDUARDO RAFAEL POBLANO OJINAGA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.

Por medio de la presente, se hace constar que la Tesis denominada "**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MULTIFÍSICA APLICADA A UN SISTEMA PV-T-HHO MEDIANTE SIMULACIÓN**", que presenta el(la) alumno(a) **C. JEOVANY RAFAEL RODRÍGUEZ MEJÍA**, con número de control **D17110006**, para obtener el Grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería, ha sido revisada y aprobada en su forma y contenido por los suscritos, por lo que no existe ningún inconveniente para la impresión de la misma.

Se extiende la presente constancia a petición del(la) interesado(a) y para los fines legales que a él(ella) convengan, en Ciudad Juárez, Chihuahua a los veintinueve e días del mes de noviembre del año dos mil veintiuno.

ATENTAMENTE


C. ARTURO WOOCAY PRIETO
DIRECTOR


C. ULISES MARTÍNEZ CONTRERAS
CO-DIRECTOR


C. ADÁN VALLES CHÁVEZ
REVISOR


C. HUGO FRANCISCO LÓPEZ HERRERA
REVISOR EXTERNO


C. JAIME SÁNCHEZ LEAL
REVISOR EXTERNO

C.c.p. División de Estudios de Posgrado e Investigación
Alumno(a)



Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

División de Estudios de Posgrado e Investigación

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Juárez, Chihuahua; siendo el día 1 del mes de Diciembre del año 2021, el (la) que suscribe C. Jeovany Rafael Rodríguez Mejía alumno(a) del Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, con número de control D17110006, adscrito(a) a la División de Estudios de Posgrado e Investigación, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) Dr. Arturo Woocay Prieto y cede los derechos del trabajo titulado METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MULTIFÍSICA APLICADA A UN SISTEMA

PV-T-HHO MEDIANTE SIMULACIÓN, al Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones jrodriguez@itcj.edu.mx y awoocay@itcj.edu.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Jeovany Rafael Rodríguez Mejía

Nombre y firma del alumno(a)



Ciudad Juárez, Chihuahua, **30/noviembre/2021**

C. YADIRA DOZAL ASSMAR
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E.

Me permito hacer de su conocimiento que se le autoriza a él (la) **C. JEOVANY RAFAEL RODRÍGUEZ MEJÍA**, con número de control **D17110006**, la defensa de su Tesis para obtener el Grado de Doctor(a) en el programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, quien desea titularse por medio de TESIS.

El tema a desarrollar será denominado "**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS MULTIFÍSICA APLICADA A UN SISTEMA PV-T-HHO MEDIANTE SIMULACIÓN**".

- Presidente: Arturo Woocay Prieto
- Secretario: Ulises Martínez Contreras
- Vocal: Adán Valles Chávez
- Vocal Externo: Hugo Francisco López Herrera
- Vocal Externo: Jaime Sánchez Leal

Sin otro particular de momento, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Excelencia en Educación Tecnológica"

EDUARDO RAFAEL POBLANO OJINAGA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



C.c.p. departamento de Servicios Escolares
ERPO/dmsp



DEDICATORIA

En memoria a mi padre Rafael Rodriguez qué, gracias a sus consejos, amor y apoyo incondicional siempre, hoy concluyo mis estudios de doctorado.

En forma afectuosa agradezco a mi madre Elisa y mis hermanas Elizabeth y Mariana por acompañarme a lo largo de estos años en mis logros académicos y profesionales.

Dedico esta tesis muy en especial a mi esposa Carmen y mi hijo Leonardo, que sobre todas las cosas han estado a mi lado siendo mi apoyo y talente empuje, y agradezco toda su comprensión, tiempo, amor y paciencia.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) le agradezco profundamente por el apoyo otorgado durante mis estudios de doctorado, principalmente por la beca recibida y los apoyos para estancias y congresos.

Al Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez en especial al Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería por todo el apoyo recibido y que gracias a este la investigación fue posible.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi mentor, amigo y director de tesis Dr. Arturo Woocay Prieto por su sincera amistad, dirección y colaboración para el desarrollo de esta investigación. Al Dr. Adán Valles Chávez por su valioso aporte a lo largo de esta investigación. Al Dr. Ulises Martínez Contreras por sus consejos y sugerencias brindadas durante todo este tiempo. Al Dr. Alfonso López Martínez por sus valiosas sugerencias técnicas y amplia colaboración durante el proyecto de investigación entre la UAZ y el ITCJ. Al Dr. Hugo López Herrera por sus valiosas sugerencias técnicas durante el proyecto de investigación. Al Dr. Jaime Sánchez Leal por su gran mentoría desde que inicié mis estudios de posgrado. Los seis formaron parte de mi comité tutorial, siempre alentándome a mejorar como estudiante, profesor e investigador.

Agradezco también a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a esta investigación y que no menciono en estos agradecimientos.

RESUMEN

La presente tesis doctoral consiste en el diseño de un modelo matemático en estado estacionario y transitorio de un sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO que sea útil como herramienta de simulación en la metodología de análisis multifísica de sistemas de generación de energía. El Modelo propuesto es la integración de un conjunto de modelos de simulación donde prevalece la interacción entre un sistema solar fotovoltaico, un sistema solar térmico y un electrolizador alcalino. La estructura fundamental del modelo propuesto se basa en el modelo eléctrico descrito por el sistema solar fotovoltaico y la interacción con un modelo térmico que sirve como un sistema de extracción de calor residual para mejorar el proceso de generación de energía eléctrica a través del solar fotovoltaico. Este modelo integra la generación de Hidrógeno Verde, a través de la interacción del modelo del sistema de generación de energía híbrido térmico fotovoltaico, debido a las cero emisiones de carbono para su producción. La sección medular del desarrollo de la tesis doctoral se describe a lo largo del diseño y puesta en marcha de la planta piloto ya que gracias a esta fue posible validar el conjunto de modelos de simulación y concluir que el modelo en estado estacionario alcanza un error menor al 8 % tomando en cuenta los datos muestreados de radiación solar y temperatura ambiente de una estación meteorológica. Además, se concluye que el modelo en estado transitorio permite validar el modelo híbrido PVT-HHO a través de estimar un error menor al 9 % del modelo en estado transitorio del sistema fotovoltaica. Por lo tanto, se considera como herramienta de utilidad a la metodología de análisis multifísica descrita para el diseño de sistemas de generación de energía a partir de la energía renovable, pero se recomienda al usuario validar las variables de entrada al modelo de simulación como lo son la radiación solar incidente y la temperatura ambiente.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE FIGURAS	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. Estado del Arte.....	12
2.3. Definición del problema	16
2.4. Justificación	16
2.5. Supuestos	20
2.6. Objetivos.....	21
2.7. Preguntas de investigación.....	21
2.8. Hipótesis y variables de investigación.....	21
2.9. Delimitaciones	22
3. MARCO TEÓRICO	23
3.1. Energía Solar.....	23
3.1.1. Disponibilidad de la Energía Solar	23
3.1.2. Celdas Fotovoltaicas	32
3.1.3. Colectores Solares.....	36
3.1.4. Celdas de Hidrógeno.....	46
3.1.5. Sistemas Híbridos	52
3.2. Modelado matemático.....	55
3.2.1. Principios del modelado matemático	55
3.2.2. Modelos Fenomenológicos	57
3.2.3. Modelos Mecanicistas.....	62

3.2.4.	Identificación de sistemas para construcción de modelos	64
3.2.5.	Simulación, validación y uso del modelo	66
3.2.6.	Análisis de Sensibilidad.....	69
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	72
4.1.	Marco metodológico	72
4.1.1.	Diseño de la investigación	73
4.1.2.	Enfoque de investigación.....	74
4.1.3.	Población Muestra y Muestreo	74
4.1.4.	Técnicas de recolección de datos.....	75
4.1.5.	Instrumento de recolección de datos.....	76
4.1.6.	Técnicas de procesamiento de datos.....	77
4.1.7.	Herramientas de procesamiento de datos.....	78
4.2.	Fase experimental	79
5.	DESARROLLO.....	82
5.1.	Planta Piloto.....	82
5.1.1.	Diseño de Sistema PVT-HHO	85
5.1.2.	Caracterización, recolección y procesamiento de datos del sistema PVT-HHO	88
5.2.	Modelo en estado estacionario.....	97
5.2.1.	Modelo térmico y eléctrico de Panel Fotovoltaico	98
5.2.2.	Modelo térmico del sistema hibrido	102
5.3.	Simulación en estado estacionario	111
5.3.1.	Diseño e implementación del modelo fotovoltaico	112
5.3.2.	Diseño e implementación del modelo hibrido	118
5.4.	Análisis de sensibilidad y Validación.....	125
5.5.	Modelo en estado transitorio del sistema PV-T-HHO.....	129
5.5.1.	Modelo térmico y eléctrico del sistema PV/T-HHO en estado transitorio	130
5.6.	Simulación estado transitorio.....	133
5.6.1.	Diseño e implementación del modelo fotovoltaico en estado transitorio.	133

5.6.2.	Diseño e implementación del modelo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico en estado transitorio.....	139
5.7.	Metodología de análisis multifísica	142
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	145
6.1.	Modelado y Simulación en Estado Estacionario	145
6.1.1.	Modelo Fotovoltaico.....	151
6.1.2.	Modelo Híbrido.....	159
6.2.	Modelado y Simulación en Estado Transitorio.....	164
6.2.1.	Modelo Térmico-Eléctrico Convección.....	164
6.2.2.	Modelo Híbrido Térmico-Fotovoltaico.....	175
6.2.3.	Modelo Térmico-Fotovoltaico-HHO	181
6.3.	Metodología de Análisis Multifísica.....	186
6.3.1.	Diseño de Sistema PVT-HHO	186
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	200
7.1.	Conclusiones.....	200
7.2.	Recomendaciones	214
	REFERENCIAS.....	215
	CURRÍCULUM VITAE	223
	ANEXO A MODELO DE 4 PARÁMETROS	229
	ANEXO B MODELO SISTEMA HÍBRIDO PV-T MODELO 2	234

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1 Requerimientos Planta Piloto.....	85
Tabla 5.2 Características de operación sistema de adquisición de datos.....	87
Tabla 5.3 Parámetros NOCT.....	126
Tabla 5.4 Parámetros Celda Fotovoltaica	127
Tabla 5.5 Parámetros Colector Placa Plana	127
Tabla 5.6 Parámetros Representativos de Entrada.....	128
Tabla 5.7 Combinaciones de las Variables de Control	128
Tabla 7.1 Radiación Solar Incidente para Simulación.....	207
Tabla 7.2 Medidas estadísticas Modelo de Simulación	212

[Este renglón es el fin de la lista de tablas: salto de página.]

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 “Espectro Electromagnético de la Radiación Solar” (Uherek y Schupbach, 2008)	24
Figura 3.2 “Componentes de la Radiación en Superficies Inclinadas” (Duffie & Beckman, 2006)	28
Figura 3.3 “Ángulos Solares con respecto a una Superficie Inclinada” (Duffie & Beckman, 2006)	28
Figura 3.4 “Modelo celda fotovoltaica del tipo policristalino”	32
Figura 3.5 “Modelo celda fotovoltaica del tipo monocristalino”	33
Figura 3.6 “Modelo Diodo Simple de la Celda Fotovoltaica” (Duffie & Beckman, 2006)”	34
Figura 3.7 “Curva de Operación I-V de la Celda Fotovoltaica” (Ospino et al., 2014)” ...	35
Figura 3.8 “Colector Solar de Placa Plana”	37
Figura 3.9 “Red de resistencias térmicas en colector”	38
Figura 3.10 “Modelo térmico en función del coeficiente global de pérdidas”	39
Figura 3.11 “Modelo de simulación de resistencias térmicas en colector solar”	46
Figura 3.12 “Modelo de Celda de Hidrogeno HHO”	47
Figura 3.13 “Modelo de Celda de Hidrogeno PEM”	48
Figura 3.14 “Modelo de sistema PVT” (Triple Solar®-system)”	52
Figura 3.15 “Modelo de sistema C-PVT” (Thermaltricity International)”	53
Figura 3.16 “Modelo de cuatro pasos”	67
Figura 3.17 “Inserción del análisis de sensibilidad”	71
Figura 4.1 “Algoritmo de simulación Estacionario y Dinámico”	81
Figura 5.1 “Concepto planta piloto sistema hibrido PVT-HHO”	86
Figura 5.2 “Diseño planta piloto sistema hibrido PVT-HHO en CAD”	86
Figura 5.3 “Sistema de Adquisición de Datos”	88
Figura 5.4 “Localización Laboratorio experimental de energía solar”	90
Figura 5.5 “Equipo solar instalado”	91
Figura 5.6 “Planta piloto instalada”	91
Figura 5.7 “Área de colección del sistema hibrido”	92
Figura 5.8 “Sistema hibrido térmico-fotovoltaico”	92
Figura 5.9 “Planta Piloto PVT-HHO”	93
Figura 5.10 “Hardware del sistema de adquisición de datos”	94

Figura 5.11 “Interfaz gráfica multipropósito”	94
Figura 5.12 “Estación meteorológica”	95
Figura 5.13 “Conexiones eléctricas sistema PVT-HHO”	96
Figura 5.14 “Modelo de simulación estacionaria”	98
Figura 5.15 “Modelo de simulación estacionaria PVT”	103
Figura 5.16 “Balance de energía de placa colectora”	104
Figura 5.17 “Primer modelo de resistencias”	105
Figura 5.18 “Segundo modelo de resistencias”	106
Figura 5.19 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Entradas”	114
Figura 5.20 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Características del Panel Fotovoltaico”	114
Figura 5.21 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Vector de voltaje de celda”	115
Figura 5.22 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Vector de radiación solar incidente”	115
Figura 5.23 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Vector de temperatura de celda”	116
Figura 5.24 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Parámetro 1 y 2”	116
Figura 5.25 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Parámetro 3 y 4”	117
Figura 5.26 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Estimación de P e I”	117
Figura 5.27 “Algoritmo del modelo híbrido: Condiciones estándar PV”	120
Figura 5.28 “Algoritmo del modelo híbrido: Vectores de entrada”	121
Figura 5.29 “Algoritmo del modelo híbrido: Parámetros Característicos”	121
Figura 5.30 “Algoritmo del modelo híbrido: Parámetros Colector Placa Plana”	122
Figura 5.31 “Algoritmo del modelo híbrido: Parámetros fluido en colector”	122
Figura 5.32 “Algoritmo del modelo híbrido: Números adimensionales Nu y Pr”	123
Figura 5.33 “Algoritmo del modelo híbrido: Números adimensionales”	123
Figura 5.34 “Algoritmo del modelo híbrido: Números adimensionales Nu y h”	124
Figura 5.35 “Algoritmo del modelo híbrido: Coeficientes de transferencia de calor” ...	124
Figura 5.36 “Algoritmo del modelo híbrido: Modelo Híbrido térmico-fotovoltaico”	125
Figura 5.37 “Algoritmo de simulación estacionaria”	126
Figura 5.38 “Modelo de simulación transitoria”	131
Figura 5.39 “PV-Cell-Convección Modelo Térmico Dinámico”	134
Figura 5.40 “Conexiones del Modelo PV-Cell-Convección”	135
Figura 5.41 “PV-Cell-Convección-Radiación Modelo Térmico Dinámico”	136
Figura 5.42 “Conexiones del modelo PV-Cell-Convección-Radiación”	136
Figura 5.43 “PV-Cell-EGE Cuatro Parámetros”	137
Figura 5.44 “Conexiones del modelo PV-Cell-EGE”	138
Figura 5.45 “Modelo Electrolizador Alkalino”	139
Figura 5.46 “PV-T-Convección Modelo Térmico Dinámico”	140

Figura 5.47 “Conexiones del modelo PV-T-Convección”	141
Figura 5.48 “Modelo PV-T-HHO”	142
Figura 5.49 “Metodología de Análisis Multifísica”	143
Figura 5.50 “Criterios de la Metodología de Análisis Multifísica”	144
Figura 6.1 “Algoritmo de Simulación Diodo Simple Sección 1”	146
Figura 6.2 “Algoritmo de Simulación Diodo Simple Sección 2”	147
Figura 6.3 “Corriente Característica de Celda Fotovoltaica”	148
Figura 6.4 “Potencia Característica de Celda Fotovoltaica”	148
Figura 6.5 “Eficiencia Característica de Celda Fotovoltaica”	149
Figura 6.6 “Eficiencia respecto a la Corriente de Celda Fotovoltaica”	150
Figura 6.7 “Potencia y Corriente respecto al Voltaje de Celda Fotovoltaica”	150
Figura 6.8 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ Tc=15 °C”	151
Figura 6.9 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=15 °C”	152
Figura 6.10 “Curva Potencia vs Voltaje @ Tc=15 °C”	152
Figura 6.11 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ Tc=25 °C”	153
Figura 6.12 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=25 °C”	153
Figura 6.13 “Curva Potencia vs Voltaje @ Tc=25 °C”	154
Figura 6.14 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ Tc=35 °C”	154
Figura 6.15 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=35 °C”	155
Figura 6.16 “Curva Potencia vs Voltaje @ Tc=35 °C”	155
Figura 6.17 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ Tc=45 °C”	156
Figura 6.18 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=45 °C”	156
Figura 6.19 “Curva Potencia vs Voltaje @ Tc=45 °C”	157
Figura 6.20 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ Tc=55 °C”	157
Figura 6.21 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=55 °C”	158
Figura 6.22 “Curva Potencia vs Voltaje @ Tc=55 °C”	158
Figura 6.23 “Modelo Estático Sistema Híbrido Térmico-Fotovoltaico”	159
Figura 6.24 “Curva de Temperatura de Celda Sistema Híbrido”	160
Figura 6.25 “Curva de Potencia de Celda Sistema Híbrido”	161
Figura 6.26 “Curva de Eficiencia de Celda Sistema Híbrido”	161
Figura 6.27 “Curva de Temperatura de Celda Sistema Híbrido Sim-2”	162
Figura 6.28 “Curva de Potencia de Celda Sistema Híbrido Sim-2”	163
Figura 6.29 “Curva de Eficiencia de Celda Sistema Híbrido Sim-2”	163
Figura 6.30 “Modelo Sintético del Sistema Térmico Eléctrico”	165
Figura 6.31 “Curva de Radiación Solar Incidente Muestreada”	165
Figura 6.32 “Curva de Temperatura Ambiente”	166
Figura 6.33 “Curva de Temperatura de Celda Modelo Convección”	166
Figura 6.34 “Curva de Temperatura de Celda y Ambiente M-Convección”	167

Figura 6.35 “Curva de Temperatura de Celda Real y Simulada M-Convección”	167
Figura 6.36 “Curva de Corriente Real y Simulada M-Convección”	168
Figura 6.37 “Curva de Voltaje Real y Simulada M-Convección”	169
Figura 6.38 “Curva de Potencia Real y Simulada M-Convección”	169
Figura 6.39 “Curva de Hidrógeno Generado en M-Convección”	170
Figura 6.40 “Variación de Temperatura de Celda Real y Simulada M-Convección”	171
Figura 6.41 “Variación de Corriente Real y Simulada M-Convección”	171
Figura 6.42 “Variación de Voltaje Real y Simulada M-Convección”	172
Figura 6.43 “Variación de Potencia Real y Simulada M-Convección”	173
Figura 6.44 “Curva de Corriente Real y Simulada M-4-Parámetros”	173
Figura 6.45 “Curva de Voltaje Real y Simulada M-4-Parámetros”	174
Figura 6.46 “Curva de Potencia Real y Simulada M-4-Parámetros”	175
Figura 6.47 “Modelo del Sistema Hibrido Térmico”	176
Figura 6.48 “Modelo del Sistema Hibrido Térmico-Eléctrico”	177
Figura 6.49 “Curva de Temperatura de Celda Real y Simulada M-Radiación”	177
Figura 6.50 “Curva de Corriente Real y Simulada M-Radiación”	178
Figura 6.51 “Curva de Voltaje Real y Simulada M-Radiación”	179
Figura 6.52 “Curva de Potencia Real y Simulada M-Radiación”	179
Figura 6.53 “Curva de Hidrógeno Generado en M-Radiación”	180
Figura 6.54 “Modelo del Sistema Hibrido Térmico-Eléctrico HHO”	181
Figura 6.55 “Curva de Temperatura de Celda Real y Simulada M-PVT”	182
Figura 6.56 “Curva de Corriente Real y Simulada M-PVT”	183
Figura 6.57 “Curva de Voltaje Real y Simulada M-PVT”	183
Figura 6.58 “Curva de Potencia Real y Simulada M-PVT”	184
Figura 6.59 “Curva de Hidrógeno Generado en M-PVT”	185
Figura 6.60 “Curva de Temperatura de Celda Simulada 3 Casos”	185
Figura 6.61 “Modelo CAD de Celda Fotovoltaica”	187
Figura 6.62 “Modelo CAD del Sistema Híbrido”	187
Figura 6.63 “Modelo CAD del Sistema PVT”	188
Figura 6.64 “Modelo CAD del Sistema PVT Estructura Final”	189
Figura 6.65 “Modelo CAD Estructura Sistema Fotovoltaico”	189
Figura 6.66 “Modelo CAD Estructura Sistema PVT”	190
Figura 6.67 “Modelo CAD Estructura Sistema PVT-HHO”	191
Figura 6.68 “Estudio Térmico del Sistema Fotovoltaico”	192
Figura 6.69 “Estudio Térmico Respuesta de Temperatura de Celda”	192
Figura 6.70 “Estudio Térmico Perfil de Temperatura en Convección”	193
Figura 6.71 “Estudio Térmico de Temperatura de Celda”	194
Figura 6.72 “Estudio Térmico 2 Respuesta de Temperatura de Superficie”	194

Figura 6.73 “Estudio Térmico 2 Respuesta de Temperatura sin Convección”	195
Figura 6.74 “Algoritmo Eficiencia Energética”	196
Figura 6.75 “Algoritmo Eficiencia Exergética”	197
Figura 6.76 “Curvas de Eficiencia Energética y Exergética”	198
Figura 6.77 “Correlación de variables Temperatura de Celda y Radiación ”	199
Figura 7.1 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO”	203
Figura 7.2 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO 2”	203
Figura 7.3 “Curvas de Radiación Solar Incidente Entradas del Modelo PVT-HHO”	205
Figura 7.4 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT”	206
Figura 7.5 “Curvas de Temperatura de Celda del Sistema PVT”	207
Figura 7.6 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-Convección”	209
Figura 7.7 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO”	210
Figura 7.8 “Curvas de Temperatura de Celda del Sistema PVT-HHO”	211
Figura 7.9 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO Datos perdidos”	213
Figura 7.10 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO R 95%”	213

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad que tiene el ser humano de comprender su entorno lo ha llevado a desarrollar modelos matemáticos que le permitan simular todos aquellos fenómenos de conversión de energía para maximizar su rendimiento y obtener un beneficio particular sobre estos. Siendo el modelado de sistemas complejos el punto de partida de la presente investigación, debido a que permite analizar su comportamiento bajo diversas condiciones, características y criterios de operación. En forma estricta el modelado y la simulación permiten comprender a los sistemas no lineales, e identificar si estos son observables o si en su caso son controlables y observables. Por lo tanto, la línea central de la investigación es analizar en forma explícita el comportamiento de los sistemas generadores de energía, considerando a los paneles fotovoltaicos como aquellos que generan energía eléctrica, a los colectores solares quienes generan energía térmica y a los sistemas híbridos como los generadores de ambos tipos de energía en función de la energía solar, para el desarrollo de una metodología que permita unificar este análisis, y aplicarlo al diseño de sistemas energéticos eficientes.

Es necesario tener en cuenta que la energía de consumo primario del ser humano y las emisiones de dióxido de carbono se han incrementado de forma gradual a través de las últimas décadas. Puede verse como en los países en vías de desarrollo la velocidad de consumo de energía primaria ha incrementado alrededor de un 3.2 % a diferencia de los países desarrollados que ha sido de solo un 1.1 %, esto gracias a los tratados relacionados con el cuidado del medio ambiente y mitigación de las emisiones de gases efecto invernadero (Chaturvedi et al., 2014). Sin embargo, cabe destacar que esta alza en la demanda energética genera fuertes perturbaciones en la reducción de la fuente de combustibles fósiles. En particular la energía utilizada por la unión europea tan solo en los edificios y construcciones es de alrededor del 40 % del total de la energía primaria de

consumo; además se determina que de esta energía el 60 % de ella se consume en los sistemas de aire acondicionado y ventilación y un 15 % en el alumbrado (I.E.A, 2020).

Los principales estudios de celdas fotovoltaicas se basan en el desarrollo de modelos de simulación estática, dinámica, obtención de eficiencia, arreglos de sistemas aislados o interconectados a la red, y algunos sistemas de control para el seguimiento solar. Pero en la mayoría se analiza su comportamiento en función de las variables de entrada, es decir radiación y temperatura. En la literatura existen trabajos en donde se describen algunos modelos de celdas fotovoltaicas los cuales se implementan para su simulación en Simulink/Matlab. Principalmente son modelos basados en circuitos eléctricos equivalentes, el de diodo equivalente es el más conocido, ya que permiten la interacción con la radiación solar y la temperatura de celda siendo estas las principales condiciones que perturban el comportamiento de la celda (Krismadinata et al., 2013), (Habbati et al., 2014). Pero también hay trabajos realizados en donde se describe el modelado de la celda fotovoltaica a través de un el modelo térmico, en donde es posible identificar el comportamiento del sistema en función de la conversión de energía y las variables climatológicas que proceden el de intercambio de calor, tanto en estado transitorio como en estacionario (Dean et al., 2015), (De Soto, 2006), (Saad-Alam & Alouani, 2010), (Wang, (2006)), (Al-Hamadi, 2015), (Apatekar & Mallareddy, 2015).

Otro sistema generador de energía sumamente importante en la actualidad es el colector solar, debido a su aplicabilidad para la generación de energía térmica para procesos industriales y residencial. El colector solar es un dispositivo que ha sido estudiado bastante, y uno de ellos es el de placa plana principalmente por su facilidad para diseñarse, construirse y analizarse termodinámicamente hablando. De igual manera en la literatura se describen y desarrollan modelos matemáticos bajo condiciones estacionarias, dinámicas, parámetros de diseño y de control de sus variables para el incremento de la eficiencia (Furbo & Shah, 1996), (Bukola, 2006), (Hosni & Mulaweh, 2012). Algunos trabajos de

investigación están enfocados a colectores solares de placa plana, que por lo general estudian la importancia del flujo de fluido, coeficientes globales de transferencia de calor, área de captación energética, y la influencia que tienen con el rendimiento térmico (Hamidi & Fayath, 2011), (Nshimyumuremyi & Junqi, 2019). (Vikram, 2006), (Steven & Kamran, 2010). El interés de esta investigación es sobre los colectores solares de placa plana, en su concepto de sistema de absorción de energía, debido a que se conjuga con una celda fotovoltaica para formar un sistema híbrido de generación de energía. Así trabajos de investigación donde se realicen modelos del colector solar, análisis energéticos, exergéticos y experimentales son de gran interés, algunos de estos se mencionan con más detalle en la sección del estado del arte.

El desarrollo de sistemas híbridos surge de la necesidad de acoplar diversos sistemas independientes de generación de energía en un mismo entorno que la maximice. En la actualidad existen sistemas híbridos de generación de energía que combinan la generación fotovoltaica, eólica, térmica y de potencia en base a ciclos termodinámicos orgánicos. Los sistemas con mayor eficacia y de mayor alcance para la sociedad son los híbridos fotovoltaicos-térmicos, puesto que logran maximizar la energía solar fotovoltaica aprovechando el calor residual generado por el proceso de conversión de energía a través del uso de un intercambiador de calor para su extracción y así producir energía térmica y eléctrica. En la literatura se describen y analizan térmicamente modelos matemáticos de sistemas híbridos térmicos-fotovoltaicos, en donde combinan celdas fotovoltaicas con aire o agua como fluido de trabajo que recircula a través de ellas para refrigerarlas (Tripanagnostopoulos et al., 2021), (Li H., 2018).

Los sistemas de generación de energía verde e híbridos son para la actual sociedad una gran necesidad, pues además de subsanar los efectos causados de la sobre explotación de los recursos no renovables para la generación de energía, se convierten en un respaldo sumamente importante a la creciente demanda energética. Los sistemas híbridos de

generación de energía en la actualidad son más eficientes debido a que la fuente de energía primaria permite transformar energía a través de diversos métodos, por ejemplo: de solar a eléctrica y térmica, o de solar a eléctrica y química. Por tal motivo es necesario identificar el estado actual de la literatura de los sistemas de generación de combustible Hidrógeno y los de generación de energía eléctrica a través de las celdas de combustible. En la actualidad la generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno libre de CO₂ se basa en sistemas RedOx de Hidrogeno, Celdas de Combustible de Membrana de Electrolito Polimérico, Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio de Protones y Electrolizadores Alcalinos. (Katsutoshi, 2016), (Muhammed, 2016).

Así pues, debe tenerse en cuenta que los sistemas que utilizan energías convencionales incrementan las emisiones de gases efecto invernadero hacia la atmosfera. Por ejemplo, el uso de un calentador de agua que funciona a partir de la quema de gas natural emite alrededor de 2 toneladas anuales de dióxido de carbono y para el mismo sistema pero que funciona con electricidad emite el triple de dióxido de carbono por cada kWh de consumo eléctrico (D. E. C. C., 2014). Es otras palabras el crecimiento de la demanda energética a nivel mundial es motivo suficiente para el desarrollo de tecnologías de generación de energía primaria que sean amigables con el medio ambiente. Por lo tanto, los sistemas que están basados en la energía solar pueden llegar aportar la cantidad suficiente de energía de demanda con el fin de mantener el equilibrio ecológico. Los colectores solares y los sistemas híbridos son parte de este desarrollo tecnológico y pueden aplicarse en la agricultura, industrias con necesidad de calor de proceso y para el confort del ser humano en edificios y construcciones.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, y que el calentamiento global es uno de los mayores problemas en la actualidad el cual se relaciona en forma directa con el consumo de la energía proveniente de combustibles fósiles. Esta situación ambiental refleja el incremento gradual de la temperatura promedio del ambiente en la superficie terrestre y

se calcula que este calentamiento toma lugar a una tasa de incremento de alrededor de 0.3°C por década (ASHRAE, 2003). Es necesario responder ¿Por qué incentivar el uso de la energía solar?

La energía solar se considera como limpia, con disponibilidad en toda región geográfica, y de uso relativamente fácil y seguro. Además, puede utilizarse en dos formas distintas, es decir, energía solar térmica y energía solar eléctrica. Para el caso de la energía solar térmica las aplicaciones usuales son a través de colectores solares para el calentamiento de fluidos, así como el calentamiento y enfriamiento de espacios para el confort del ser humano. En el caso de la energía solar eléctrica el más usual es a partir de las celdas fotovoltaicas mismas que transforman los fotones de irradiancia en energía eléctrica. Por esta razón su desarrollo ha sido de tal magnitud que llega a considerarse como la energía limpia de mayor potencial a nivel mundial. De la misma manera se puede contestar ¿Para que la energía solar? La razón principal del uso de la energía solar es contrarrestar el calentamiento global, reducir las emisiones de dióxido de carbono provocadas por el consumo de energía primaria en edificios, construcciones y luminarias.

El presente documento se organiza de tal forma que en la sección número dos se identifica el problema de investigación haciendo un énfasis en los objetivos del proyecto, así como el alcance, posteriormente se presenta la sección número tres en donde se trata el marco teórico que fundamenta el proyecto de investigación, en esencia el proceso de conversión de energía solar fotovoltaica, termosolar y electroquímica. La sección número cuatro describe la metodología de investigación desarrollada y posteriormente se describe el desarrollo del modelo de simulación del sistema híbrido en estado estacionario y transitorio, adicionalmente se describe la metodología de análisis multifísica, el diseño y desarrollo de la planta piloto del laboratorio de energía solar del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez. Como parte final del documento se presentan las secciones de resultados y conclusiones en donde se enfatiza sobre el conjunto de modelos de

simulación desarrollados y validados que se integran como herramientas a una metodología de análisis multifísica establecida para el diseño y desarrollo de sistemas de generación de energía. En particular la metodología de análisis multifísica permite modelar, simular y analizar el diseño de sistemas de generación de energía principalmente sistemas híbridos de conversión de energía renovable y libre de emisiones de dióxido de carbono.

En este documento de tesis doctoral se describe la contribución del proyecto de investigación que es principalmente el diseño y desarrollo de un conjunto de modelos de simulación útiles como herramienta de análisis multifísica a través de una metodología para el diseño de sistemas de generación de energía renovable con criterios de sistemas híbridos o aislados. Además del diseño y desarrollo de una planta piloto para el análisis de sistemas energéticos dependientes de la energía solar como fuente primaria.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la siguiente sección se presenta a detalle el tema de investigación, describiendo en forma particular el problema que lleva al desarrollo del presente estudio. Es decir, el desarrollo de un modelo de simulación de sistemas híbridos para la generación de energía. Aquí mismo se hace énfasis en los objetivos del proyecto y el alcance de éste.

2.1. Antecedentes

En la actualidad es tan natural hablar del uso de la energía solar, las aplicaciones comerciales y los incentivos económicos que se otorgan por el uso de ésta, pero a la vez es importante saber cómo a través de su uso se reducen las emisiones de carbono. Lo contradictorio a todo esto es que persiste el alto costo, la baja eficiencia y hasta cierto punto llegan a ser inalcanzables para la sociedad. Entonces, ¿Qué sabemos de la energía solar?

La energía solar se deriva de un proceso nuclear, debido a la fusión hidrogeno-helio que mantiene al Sol a una temperatura alrededor de los 5777 K (Duffie y Beckman, 2006). Entonces como se enuncia en la Ley de Stefan-Boltzman, los fotones de energía viajan a través de las ondas electromagnéticas emitidas bajo una amplia gama de longitud de onda donde la mayor densidad de energía se encuentra en el espectro visible con posibilidad de absorberse a través de cuerpos negros. Por lo tanto, un cuerpo negro se considera como un gran absorbedor y emisor. Por otro lado, la potencia máxima a captarse en la tierra se considera constante y con un valor aproximado a los $1000 \frac{W}{m^2}$, tomando en cuenta las mejores condiciones climatológicas (Duffie y Beckman, 2006). Así pues, esta potencia energética podemos aprovecharla mediante el uso de cuerpos negros, es decir calentadores

solares, celdas fotovoltaicas, destiladores solares, cocinas solares, refrigeración solar y los sistemas combinados térmico-fotovoltaico.

Un colector solar es aquel sistema capaz de captar y absorber los fotones de energía inmersos en las ondas electromagnéticas emitidas por el sol, para convertirlos en energía térmica que pueda utilizarse en diversas aplicaciones. Una de las de mayor relevancia es el calentamiento de agua o aire, con el fin de elevar el confort en los diferentes sectores como el residencial o industrial. CONAE (2007) hace referencia sobre los colectores solares y menciona que se han convertido en una alternativa mundial para la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero, además se comenta que ya se tienen más de 164 millones de metros cuadrados de área de captación solar instalados con una capacidad mayor a los 115 GWh. En México, por su ubicación preferente de latitud, se reciben en promedio $5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ día}}$, y si fuese aprovechada al máximo con equipos termosolares sería equivalente a la energía existente en un metro cubico de gas natural (CONAE, 2007).

La celda fotovoltaica se considera como aquel conjunto de elementos semiconductores que convierten la energía solar en energía eléctrica de corriente directa, con una eficiencia teórica máxima del 23 % (Duffie y Beckman, 2006). Pero si la temperatura de la celda incrementa, la eficiencia del panel tiende a caer drásticamente además de provocar daños permanentes en los elementos de la celda. Por lo tanto, una solución a esta situación es combinar de forma conveniente un colector solar y una celda fotovoltaica, a este sistema se le conoce como sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico (SHCT-FV). Entonces el SHCT-FV es capaz de aprovechar la energía solar y producir tanto energía eléctrica como energía térmica de baja temperatura la cual puede usarse directamente, además de lograr un incremento en su rendimiento global debido al aprovechamiento eficiente de la energía solar.

A continuación, se presenta una revisión de los estudios realizados a los sistemas que conforman el SHCT-FV, para introducir brevemente al tema de investigación. El

interés que se tiene en los colectores solares es el de comprender su comportamiento durante el proceso de calentamiento, el cual se ha evaluado de forma experimental y con diferentes modelos de simulación. Como en Steven (2010), donde se evaluó el comportamiento del fluido térmico dentro del tubo del colector mediante el uso de la técnica de medición velocimetría de imágenes a partir de partículas para determinar la influencia del Reynolds en la transferencia de calor. Los estudios también se han direccionado hacia la evaluación del flujo óptimo para los colectores solares como en Furbo y Shah (1996), donde se dice que para sistemas pequeños el mayor rendimiento se alcanza cuando se tiene un flujo en un rango de entre 0.2 y 0.3 litros por minuto por unidad de área. También se ha buscado predecir las características y el comportamiento térmico a través de modelos matemáticos como se puede ver en Carrillo y Cejudo (2002), Vukman et al. (2011), Li y Chen (2012) y Ogbonna y Ndubuisi (2012). Sin embargo, en Hamidi y Fayath (2011) se evaluó un modelo de colector solar por medio de simulación bajo condiciones climatológicas reales, para meses críticos, alcanzado una eficiencia térmica de hasta un 53 %.

Algo muy semejante sucede con los sistemas fotovoltaicos; estos han sido evaluados de diferentes formas, y bajo ciertas condiciones ya que estos sistemas tienen un costo mayor en comparación con los colectores solares. Se han desarrollado experimentos para evaluar los efectos de la temperatura de la celda y la relación que existe con la caída de potencia. Uno de ellos se realizó a través de la caracterización de una celda fotovoltaica y una placa de cobre utilizada como disipador de calor, para evaluar las condiciones de incremento de temperatura y su influencia sobre esta como se describe en Radziemska (2003). Se han desarrollado, de igual manera, diferentes modelos de simulación de las condiciones de operación de la celda con el fin de optimizar su aplicación en los sistemas y poder controlar las condiciones que afectan implícitamente la eficiencia, para mayor referencia ver Huan-Liang et al. (2008), Mattei et al. (2006), Jangwoo et al. (2014), (Belhadj et al., 2015), (Ishaque et al, 2011), (Ceron, 2012), (Petcut y Dragomir, 2010) y Armstrong y Hurley (2010).

El análisis para los SHCT-FV, se enfoca hacia los diversos modelos que han sido desarrollados, los logros obtenidos y hacia donde se han direccionado sus innovaciones. En Rekha et al., (2013) se presenta un análisis matemático del rendimiento eléctrico, térmico y exergético del SHCT-FV, teniendo como base el colector solar de placa plana. Este análisis busca la evaluación de la viabilidad del SHCT-FV en las aplicaciones domésticas, alcanzando temperaturas del fluido de hasta 76 °C con un rendimiento térmico de hasta un 63 % y un 11 % de eficiencia eléctrica. A fin de ampliar el conocimiento sobre la tecnología utilizada en este tipo de sistemas híbridos, el laboratorio nacional de energía renovable de los Estados Unidos de Norte América realizó un informe detallado de los sistemas térmicos fotovoltaicos como se describe en Dean (2015). En Nayeem y Rahman (2016) se presenta un informe tanto del diseño como de la evaluación de las características térmicas y eléctricas en un concentrador solar híbrido térmico fotovoltaico, en donde se logró una eficiencia global del 80 %. Sin embargo, la mayoría de los modelos desarrollados de los SHCT-FV han sido en estado estacionario, es decir, en donde las variables que describen su comportamiento son invariantes respecto al tiempo. Wenke et al., (2016) presentó un modelo diferente a los existentes, debido a que desarrolló un modelo dinámico de simulación del SHCT-FV, es decir, donde las variables de estado del sistema se ven afectadas por la variación respecto al tiempo. Aquí se utilizó el método de volumen finito para discretizar el modelo propuesto y se pudo solucionar utilizando el método de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). A pesar de que este modelo se basa en un sistema que utiliza aire como fluido de transporte sirve como parámetro de referencia para el modelo a desarrollar en esta investigación. Aunado a esto se encontraron diferentes modelos de simulación en donde se plantean diversas suposiciones, que pueden ser consideradas como referentes respecto al tema que se aborda en la investigación, para mayor referencia vea Mutombo y Inambao, (2016), Khudheyer y Aldeen (2011), Bilbao y Sproul (2012), Ali et al., (2007), Chow (2003), (ASHRAE, 2003) y Huang et al., (2001).

Por otro lado, en Asterios (2008) se implementó una metodología para la evaluación de diferentes indicadores de rendimiento para un SHCT-FV utilizando como medio de transporte del calor el agua y aire. Los indicadores que se evaluaron fueron cinco parámetros de eficiencia los cuales son: eléctrica, térmica, energía total, energía ahorrada y exergética. En el mismo sentido en Mustafa (2013) se elaboró un análisis completo del rendimiento térmico y eléctrico de un SHCT-FV construido para el clima en Ras Al-Khaimah en los Emiratos Árabes Unidos. La evaluación térmica del sistema se llevó a cabo bajo el seguimiento de la norma europea UNE-EN 12975-2:2006 y para el sistema eléctrico se efectuó mediante el análisis del efecto causado por la circulación del agua en el sistema. Además del trabajo experimental se desarrolló un modelo de simulación para ser evaluado con el software PolySun. Mustafa (2013)

Con un enfoque distinto en Xingxing (2014) se desarrolló un novedoso sistema de tubo concentrador y bomba de calor para ser incorporados al SHCT-FV. Además, se propuso un nuevo tipo de recubrimiento a base de una aleación de aluminio con el objetivo de mejorar la transferencia de calor en la celda. Los resultados alcanzados con los dispositivos propuestos fueron un límite de potencia de calor transferido de 900 W y con el recubrimiento se mejoró la eficiencia de la celda en un 0.26 % comparándolo con una celda tradicional. También se observó que durante la evaluación en condiciones reales de medición para condiciones climatológicas en la región de Hong Kong se alcanzó una eficiencia térmica del 39.25 % y una eficiencia eléctrica del 9.13 %.

Sin embargo, en Buker (2015) se desarrolló toda una investigación con la intención de integrar los colectores solares en las azoteas, se pretendió que estos sistemas tuvieran doble función: una absorber calor y la otra servir como azoteas. Fue desarrollada una novedosa estructura de intercambiador de calor a base de polietileno, con características de ser una solución barata, libre de mantenimiento y de fácil integración. En la investigación se trabajó con fluidos de carácter evaporativo para evaluar la capacidad del sistema en el

caso de enfriamiento. El sistema propuesto fue evaluado a través de simulación computacional y a través de un trabajo experimental en laboratorio, donde se lograron temperaturas en el fluido de hasta 36 °C y una eficiencia térmica del 20.25 %.

Finalmente, en Premalatha se presenta un trabajo donde a través del uso de la técnica de redes neuronales artificiales se obtienen modelos de simulación de la radiación solar para aplicarlos en diversos sistemas solares. Mediante estos modelos se busca predecir la radiación solar en forma precisa usando diversos algoritmos de propagación hacia atrás y con este propósito se utilizan datos meteorológicos colectados de 10 años atrás y de cinco diferentes localidades. Los algoritmos utilizados son: Gradiente descendiente (GD), Levenberg-Marquardt (LM), Gradiente conjugado escalado (SCG) y Propagación hacia atrás resiliente (RP) (Premalatha, 2016). En Taehong se presenta un modelo matemático para predecir la radiación solar horaria con clima variable basado en el modelo simple de cielo claro. Este modelo propuesto considera superposición de funciones trigonométricas de periodos cortos y largos. Aquí se busca evaluar los efectos del índice de claridad para utilizar el modelo en la simulación dinámica de un ciclo Rankine Orgánico (Taehong, 2015).

2.2. Estado del Arte

El estado actual de las investigaciones relacionadas con los sistemas híbridos de generación de energía utilizando combinaciones de colectores solares para calentamiento de agua o aire y los paneles fotovoltaicos de diferente tecnología siguen en ascenso debido a la necesidad de maximizar la generación de energía a través de diversas técnicas y configuraciones. A continuación, se describen algunos de los trabajos más recientes y relevantes relacionados con los sistemas híbridos térmicos fotovoltaicos.

Como parte del desarrollo del concepto del sistema híbrido térmico fotovoltaico se analizó el trabajo desarrollado por Assoa et al., (2007) debido a que en éste se considera un sistema híbrido donde se combina el precalentamiento de aire y producción de agua caliente a través de la absorción de calor en un panel fotovoltaico, el cual a su vez es refrigerado para mejorar su rendimiento eléctrico. En éste trabajo en particular se considera que la generación de agua caliente alcanza mayores niveles de temperatura que algunos otros sistemas híbridos, además de describir el desarrollo de un modelo matemático de estado estacionario de un PVT bi-fluido sin absorbedor, que a través de un estudio numérico experimental sirvió para determinar los efectos del flujo másico del fluido y el efecto sobre el rendimiento térmico.

En el mismo sentido en la investigación de Dupeyrat et al., (2011) se diseña un PVT con protección de vidrio sencilla, donde se evalúa el rendimiento térmico y eléctrico bajo un modelo en 2D. Este trabajo se enfoca en la transferencia de calor entre el PV Cell y el fluido además de las propiedades ópticas del sistema. El objetivo principal del trabajo fue identificar el concepto más apropiado del sistema para construir y validar el prototipo, teniendo como resultado que la eficiencia eléctrica tiende a ser más baja que la de un panel fotovoltaico aislado, pero el sistema PVT logra eficiencias globales superiores a las últimas reportadas.

En Zhi et al., (2014) se logra identificar la aplicación más tangible de los sistemas híbridos térmicos fotovoltaicos, ya que en este trabajo el concepto del PVT se utiliza para la generación de aire de calefacción a través de sistemas híbridos; el propósito era integrar sistemas pasivos y activos para la generación de aire caliente, establecer diversas estrategias de operación y evaluar el efecto de calefacción. Este trabajo se basa en análisis numérico y experimental a través de una planta piloto instalada en un edificio de un campus universitario en China donde se logran eficiencias de entre 39 % y 69 %. Otro tipo de aplicación es tener sistemas híbridos con dos fluidos como es el caso de la investigación

de Abu-Bakar et al., (2014) en donde se presenta un concepto del PVT bi-fluido en donde se logra incrementar la eficiencia global por unidad de área comparándolo con los sistemas PVT tradicionales. El diseño se enfoca en el balance de energía en estado estacionario de dos dimensiones para optimizar el rango de flujo másico del fluido, cuando estos operan de forma independiente y simultaneo.

Algo semejante se menciona en el trabajo de Jie et al., (2014) el cual considera un sistema trifuncional el cual puede usar agua o aire según la temporalidad para la extracción del calor en el sistema fotovoltaico. Particularmente en este trabajo se realizan experimentos bajo diversos modos de operación en donde se logran rendimientos térmicos de hasta un 46 % con aire y eléctricos del 10.2 %, y se concluye que el comportamiento de la eficiencia térmica con cada fluido es totalmente dependiente del flujo másico del fluido de trabajo.

En contraste, el desarrollo presentado por Touafek et al., (2014) en donde a través de un prototipo del sistema híbrido logra determinar el incremento de la eficiencia térmica y global en función de la absorción de calor y además se logra analizar también que el costo de producción es más bajo que el de algunos otros sistemas híbridos utilizando un arreglo tubos aletados. También es necesario y relevante enunciar lo realizado por Taoufik y Abdelmajid, (2017) ya que se analizan además del rendimiento térmico y eléctrico de los sistemas híbridos, el costo y balance económico del desarrollo de estos. En este trabajo el estudio se enfoca en los desarrollos para mejorar la potencia eléctrica, así como la optimización de parámetros para el incremento de la eficiencia.

Por otro lado, el trabajo realizado por Shyan et al., (2015) describe la combinación de un sistema híbrido térmico fotovoltaico en un arreglo en serie, en donde se analiza y obtiene una expresión matemática para la eficiencia térmica y la eficiencia eléctrica dependientes de la temperatura. En este trabajo se concluye que el rendimiento térmico es

considerablemente mejor cuando se integran un gran número de sistemas PVT en serie y su operación está bajo un flujo másico moderado.

Finalmente, y dentro de los trabajos más actuales están el trabajo de (Pardo-Garcia et al., 2017) y (Ahmed-Raja y Huang, 2020). El trabajo realizado por Pardo-Garcia et al., (2017) analiza la necesidad del aire de calefacción residencial en ciudades europeas que, a pesar de estar conectados a redes inteligentes de calefacción y energía, el alto costo y el incremento de la demanda de los energéticos requiere de estrategias para la generación de aire de calefacción residencial a través de energías renovables. En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de sistema híbrido térmico fotovoltaico soportado por una bomba de calor para la generación de energía y aire de calefacción residencial en donde las configuraciones logradas se permite el consumo directo de calor en los edificios y el residual se inyecta a una red de distribución para maximizar su rendimiento. Y con esto se logra demostrar los beneficios que los sistemas híbridos tienen y se direccionan principalmente hacia la sustentabilidad, seguridad energética y los costos de generación. Por lo tanto, con el trabajo desarrollado por Ahmed-Raja y Huang, (2020) se logra demostrar la aplicabilidad que tiene el uso de sistemas híbridos de generación de energía, ya que en este trabajo se presenta un sistema híbrido en donde es posible generar energía eléctrica, hidrogeno y energía térmica para enfriamiento. Este sistema desarrollado reporta una eficiencia global de 12.9 %, eficiencia exergética de 54.72 % con temperaturas de salida del fluido de hasta 477 K. Donde la producción de hidrogeno alcanzada fue de entre 0.07518 g/s hasta 8.226 g/s el cual podría utilizarse en aplicaciones domésticas, médicas e industriales. Donde el propósito de todos los sistemas híbridos evaluados es demostrar la herramienta vital que es para la generación de energía.

2.3. Definición del problema

En resumen, con la investigación se pretende primero beneficiar con el desarrollo de modelos robustos que puedan adaptarse a condiciones reales de la multifísica de fenómenos de conversión de energía. Pero también se busca describir el comportamiento de la temperatura entre la placa absorbidora del colector solar y la superficie de contacto del panel fotovoltaico, a través de un modelo. Además de cuantificar la cantidad de calor ganada a través del sistema híbrido en función de las perturbaciones que pueden afectar al panel fotovoltaico. Los resultados del estudio ayudarán al desarrollo de un laboratorio virtual especializado en energías y termofluidos con el fin de evaluar nuevos procesos energéticos, durante su proceso de diseño.

2.4. Justificación

Las celdas fotovoltaicas generan electricidad y calor residual a partir de la irradiancia solar. Pero durante este proceso de conversión de energía se tiene una atenuación de la eficiencia debido al incremento de la temperatura en la celda. Además, es necesario destacar que la eficiencia máxima de conversión en laboratorio es del 23%, no obstante no se aprovecha al máximo por su dependencia a la temperatura (Duffie y Beckman, 2006). Por lo tanto, se presenta la necesidad de integrar un sistema de enfriamiento con la capacidad de aprovechar el calor residual en otro proceso de generación de energía, utilizando un fluido como medio de transporte de calor.

La evaluación térmica y eléctrica de la celda fotovoltaica es un proceso complejo y costoso, pues depende de la irradiancia y condiciones climatológicas, por lo general suele realizarse en laboratorios especializados. Así es como surge la necesidad de desarrollar un modelo válido para simular las condiciones de operación del panel fotovoltaico bajo una

variedad de fluctuaciones en tanto a irradiancia y condiciones climatológicas se refiere. Además, se busca una robustez amplia para cuantificar la cantidad de calor residual generado durante el proceso de conversión de energía eléctrica.

La refrigeración de la celda fotovoltaica es importante para maximizar su eficiencia, y se considera el uso de un intercambiador de calor en particular un sistema aletado como el del colector solar de placa plana. Este sistema tiene la capacidad de aprovechar la energía residual de la celda y convertirla en calor de proceso, utilizando un fluido como medio de transporte. Como punto referente se sabe que los colectores solares alcanzan eficiencias instantáneas de hasta un 83%, pero dependen de los mecanismos de transferencia de calor, así como de las pérdidas por convección y radiación (Almeida et al., 2012).

Sin embargo, la evaluación térmica de los colectores al igual que los paneles fotovoltaicos es compleja, por lo tanto, es necesario un modelo válido para simular sus condiciones de operación. Además, con éste modelo combinado se busca observar y evaluar el proceso de transferencia de calor; específicamente el mecanismo de conducción y convección desde la placa hasta el fluido de trabajo. Entonces, de esta manera será posible utilizar el SHCT-PV para generar calor y electricidad al mismo tiempo, además que el sistema de refrigeración de la celda fotovoltaica establece una ventana de oportunidad para el desarrollo de nuevas metodologías para su evaluación y diseño. Sin embargo, para evaluar el comportamiento del sistema en la fase de diseño se propone el desarrollo de un modelo del SHCT-FV, con el fin de simular el proceso de conversión de energía bajo ciertas condiciones de operación, y así poder optimizar el diseño de dichos sistemas independientes o combinados.

Lo anterior mencionado atestigua la tendencia global basada en la búsqueda de opciones novedosas que principalmente incrementen el rendimiento en los sistemas híbridos, además de buscar su fabricación a bajo costo, fácil integración al medio y libres

de mantenimiento. Por lo tanto, se encuentra un nicho de oportunidad a través del modelado del sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico-celda HHO. Pues nos permite evaluar el SHCT-FV bajo distintas condiciones y adicionarle elementos que se consideren como benéficos sin la necesidad de construirlos para poder evaluarlos. Así podemos contestar el por qué continuar con la investigación del SHCT-FV. Sin embargo, queda el para qué de los SHCT-FV y esto puede justificarse debido a que la demanda energética incrementa gradualmente a la par del desarrollo del ser humano contemporáneo. Además, los espacios del hábitat del ser humano son cada vez más reducidos por lo tanto es necesario mejorar los sistemas híbridos que puedan abastecer de energía al ser humano. Por esta razón el tema de investigación integra al SHCT-FV ya que éste puede convertirse en un sistema de necesidad básica en un futuro no muy lejano, por su doble función generar calor y electricidad a través de diversos procesos.

El proceso de modelación es una actividad clave en la mayoría de los procesos de ingeniería actualmente. El modelado y simulación es tan significativo en las compañías a nivel mundial que existen áreas especializadas para tratarlos como por ejemplo las áreas de control de procesos, diseño y optimización. Entonces el modelar un proceso en particular involucra tanto a éste como a su aplicación, además de que requiere de cierta madurez tecnológica para lograrlo. En el proceso de modelación y simulación por lo general todo depende de la Física del fenómeno de estudio y el cómo las matemáticas lo describen de forma simple. Por lo tanto, un modelo puede considerarse como la imitación de la realidad a diferencia del concepto de modelo matemático que es una forma particular de representarlo, y de esta manera podemos decir que se busca trasladar el problema del mundo real a un problema equivalente matemático que deberá resolverse e interpretarse (Hangos y Cameron, 2001).

Es importante comentar también que el proceso de modelado y simulación computacional ha probado satisfactoriamente ser de gran utilidad en la industria. Es decir,

al utilizarse como una herramienta de ingeniería para la evolución del diseño, optimización y control de procesos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para comprender adecuadamente estas metodologías el ingeniero debe tener la capacidad de describir el proceso físico a través de una serie de relaciones matemáticas que describan adecuadamente su comportamiento. El impacto que tiene la simulación se debe a los beneficios que se derivan de su implementación, pues es más barato usar las técnicas de simulación incorporando bases de datos de laboratorio en el modelo matemático que construir diversos prototipos para evaluar los efectos en el proceso y esto se vuelve atractivo económicamente hablando (Ramirez,1997).

Entonces la modelación puede considerarse como un principio a seguir bajo ciertas condiciones y que es de gran utilidad en un amplio rango de aplicaciones. Por ejemplo, día a día los ingenieros están en la búsqueda de minimizar los costos, el consumo de energía de los procesos, pero también de maximizar la salida del sistema, la eficiencia o rendimiento en máquinas y procesos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los recursos, tiempo y dinero son siempre limitados, entonces de aquí la importancia de la modelación y simulación. En la actualidad la mayoría de las actividades de investigación en ingeniería, ciencia e industria están relacionadas de cierta forma con el modelado, análisis de datos, simulación computacional y optimización. Una de ellas es el diseño en ingeniería, esta actividad está fuertemente relacionada con la simulación computacional, por lo que demanda mayor precisión y complejidad en las estructuras que se modelan. En términos de esfuerzo computacional se puede decir que tener un simulador eficiente es primordial para el control de la eficiencia general del sistema que se está modelando y para cualquier tipo de optimización que se desea realizar (Yang, 2011).

En base a estas características mencionadas las cuales describen de mejor manera el proceso de modelado y simulación, es posible justificar el por qué desarrollar un modelo matemático del SHCT-FV en la investigación que se propone. Al ser una herramienta

computacional de gran utilidad en los procesos de ingeniería es posible integrarla en el proceso de diseño de los sistemas híbridos de conversión de energía, en este caso el SHCT-FV. Esto permitiría realizar evaluaciones a nuevos elementos que mejoren la capacidad del SHCT-FV a costo reducido y bajo circunstancias críticas que serían costosas de implementar y evaluar en el sistema real. Además de permitir innovar en el diseño de elementos y materiales que se ajusten a las necesidades básicas del sistema. Por lo tanto, es técnicamente fácil responder el para qué simular y modelar el SHCT-FV, ya que ese es el objetivo principal de la investigación. Esto será para comprender el comportamiento global del sistema, debido a que implícitamente están ligados diversos fenómenos físicos de conversión de energía, y para detectar las necesidades que pudiesen surgir a lo largo de la operación del SHCT-FV.

2.5. Supuestos

La superposición de los modelos matemáticos del colector solar y panel fotovoltaico permite tener un nodo en común para simular el comportamiento multifísica del SHCT-FV.

La conversión eléctrica es el factor de mayor influencia sobre el comportamiento de la multifísica del SHCT-FV.

Logrando mantener la temperatura de la celda lo más bajo posible y estable, se podrá alcanzar una eficiencia fotovoltaica a su máxima capacidad.

Logrando absorber la mayor cantidad del calor residual generado a través de la celda fotovoltaica será posible aumentar la cantidad de energía térmica generada.

2.6. Objetivos

Desarrollar un modelo matemático para simular el comportamiento multifísico del sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico-celda HHO.

Validar el modelo matemático del sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico-celda HHO a través del análisis de sensibilidad.

2.7. Preguntas de investigación

¿Cómo es posible modelar matemáticamente el comportamiento multifísico del sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico- celda HHO?

¿Cuál es la estrecha vinculación entre los factores de la multifísica del sistema, cuando se realiza un análisis de sensibilidad al modelo matemático del SHCT-FV-HHO?

2.8. Hipótesis y variables de investigación

A través de un modelo matemático se podrá evaluar el comportamiento multifísico del sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico-celda HHO.

Por medio de un análisis de sensibilidad se podrá caracterizar el vínculo entre los factores de la multifísica del sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico-celda HHO.

Las variables de investigación se basan en los supuestos del SHCT-FV. La variable independiente para esta investigación es la irradiancia solar, y se considera como la entrada al sistema. Por lo tanto, se consideran tres variables dependientes que son: la temperatura

de la celda en el panel fotovoltaico, la energía térmica y la energía eléctrica generada. El voltaje, la corriente y la potencia a la salida del panel fotovoltaico caracterizan la energía eléctrica generada. La energía térmica producida por el colector es representada por el calor útil aprovechable a la salida del colector.

2.9. Delimitaciones

Este estudio aborda el comportamiento del sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico-celda HHO se delimita bajo las siguientes premisas:

Desarrollar un modelo del SHCT-FV que permita evaluar el comportamiento térmico y eléctrico en función de las condiciones de entrada. El estudio contempla el comportamiento en estado estacionario en la primera fase, y después de validarse, a través de un análisis de sensibilidad, deberá desarrollarse el modelo dinámico del sistema. El método propuesto se basa en la combinación de los análisis de balance de energía, mecanismos de transferencia de calor, dinámica de fluidos computacional y redes neuronales multicapa. Estos fueron seleccionados por la fortaleza que tienen en la solución de problemas de transferencia de calor y mecánica de fluidos, bajo condiciones estacionarias y transitorias.

Posteriormente se deberán interpretar los resultados a partir de graficas que definan el gradiente de temperatura, así como la dirección en la que evoluciona la conducción de calor en el sistema. Además, deberán generarse graficas que describan el rendimiento térmico y eléctrico del sistema. El estudio se deberá desarrollar dentro de un periodo de cuatro años, y se deberá desarrollar por fases. La primera es el modelo en estado estacionario, la segunda fase es el modelo dinámico y la fase número tres es la interpretación de los resultados.

3. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos para el desarrollo de la actual investigación. El énfasis particular está dado en los sistemas de conversión de energía, principalmente en aquellos que convierten energía solar en eléctrica de forma directa o indirecta. Además, se presenta el fundamento para el desarrollo del modelado matemático de sistemas multifísica, así como sus métodos de validación.

3.1. Energía Solar

3.1.1. Disponibilidad de la Energía Solar

El Sol es considerado como una esfera de materia gaseosa intensamente caliente, con un diámetro de alrededor de 1.39×10^9 m y una temperatura efectiva de aproximadamente 5777 K, que emite sin interrupciones una inmensa cantidad de energía en forma de radiación. Además, se considera que la porción de la radiación electromagnética con mayor intensidad energética se encuentra dentro del rango espectral que va desde el cercano ultravioleta con una longitud de onda de $0.25 \mu\text{m}$ hasta el cercano infrarrojo con una longitud de onda de $3 \mu\text{m}$. En la Figura 3.1 se observa el espectro idealizado de la radiación solar y la influencia sobre ella por las dispersiones atmosféricas (Eicker, 2003).

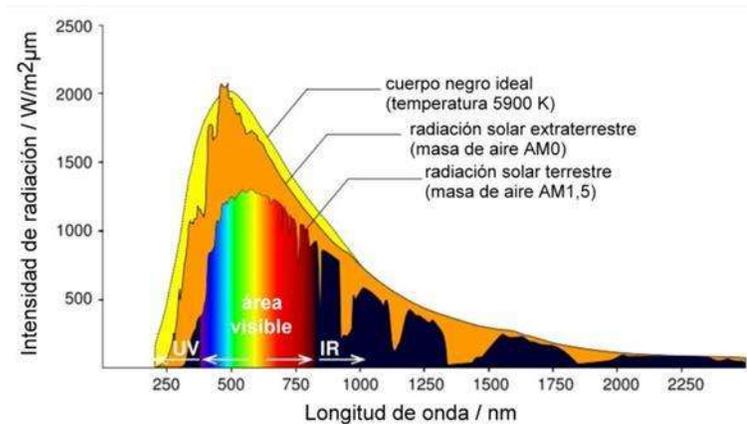


Figura 3.1 “Espectro Electromagnético de la Radiación Solar” (Uherek y Schupbach, 2008)

La irradiancia solar extraterrestre G_{on} representa la cantidad de energía irradiada por el sol a razón del tiempo exactamente un instante antes de atravesar la superficie terrestre. Esta magnitud se encuentra en función de la constante solar G_{sc} , considerada como la potencia recibida del sol en un área específica, con un valor constante de $1367 \pm 1.6 \frac{W}{m^2}$, (Duncan, 1982). Entonces, G_{on} se calcula con la ecuación 3.1 (Spencer, 1971).

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 * n}{365}\right) \right] \quad (3.1)$$

donde n representa los días del año de 1 a 365. Sin embargo, al atravesar la atmosfera terrestre el valor de G_{on} sufre atenuaciones debido a la dispersión y absorción en la atmosfera. Estas atenuaciones pueden representarse a través de la masa de aire, (M), que representa el espesor estandarizado de la atmosfera a través del cual un haz de luz radiante atraviesa. Cuando el sol está exactamente en el Zenith, $M=1$ y para una variación angular del haz de radiación de cero hasta setenta grados, M equivale al inverso del coseno del ángulo en cuestión (Duffie y Beckman, 2006).

A continuación, se describen algunos conceptos necesarios para la comprensión de los sistemas termosolares y fotovoltaicos, que convierten en energía eléctrica y calor la energía solar aprovechable.

Radiación directa I_b es la energía irradiada recibida del sol sin ningún tipo de dispersión provocada por la atmosfera y se mide en unidades de energía por unidad de área. Radiación difusa I_d es la energía recibida del sol que ha sido afectada por la dispersión atmosférica provocando un cambio en su dirección. Radiación global I_g es la suma algebraica de la componente directa y la difusa. Otro concepto de suma importancia es el de insolación, el cual denota la cantidad de energía total irradiada en un periodo de tiempo específico donde la irradiación de energía solar por día es H y la irradiación por hora es I . Por otro lado, es importante tener en cuenta que el tiempo horario que rige nuestras vidas es diferente al que rige en el espacio extraterrestre. Entonces el tiempo solar TS es basado en el aparente movimiento angular del sol durante el día, donde el medio día solar es el momento en donde el sol esta exactamente sobre el observador. Por lo tanto, el TS se calcula con la ecuación 3.2 (Spencer, 1971).

$$TS = TC + 4(L_{std} - L_{loc}) + E \quad (3.2)$$

donde TC es el tiempo civil estándar de la localización en cuestión, L_{std} es el meridiano estándar de la zona que define el tiempo civil, L_{loc} es la longitud de la localidad en cuestión y E que es una magnitud que relaciona las perturbaciones de la rotación de la tierra definida como Ecuación del tiempo y se calcula a partir de la ecuación 3.3 (Spencer, 1971).

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos(B) - 0.032077 \operatorname{sen}(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \operatorname{sen}(2B)) \quad (3.3)$$

donde $B = \left[\frac{(n-1)*360}{365} \right]$ y n es el n-ésimo día del año desde 1 hasta 365.

La posición relativa del sol respecto a un plano puede describirse en términos de ciertos ángulos relativos que dependen de las relaciones geométricas entre el plano con cualquiera orientación relativa a la tierra y la radiación solar directa de entrada (Benford y Bock, 1939).

El primero a tratar es la latitud ϕ , este ángulo denota la localización angular de norte a sur respecto al ecuador en un rango de -90° a 90° . La pendiente β se define como el ángulo entre el plano de la superficie y la horizontal teniendo un máximo de 180° . El ángulo Azimut de superficie γ se interpreta como el ángulo de desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local y se considera cero hacia el sur abarcando un rango de -180° hasta 180° . El ángulo horario ω se considera como el desplazamiento angular relativo del sol del este del meridiano local debido a la rotación de la tierra, y cambia a una razón de 15° por hora. El ángulo de incidencia θ relaciona el ángulo que se forma entre el haz de radiación sobre una superficie y la normal a esta. Existen tres casos especiales el ángulo Zenital θ_z , ángulo de altitud solar α_s y el azimuth solar γ_s . El primero de ellos describe el ángulo formado entre la vertical y la línea hacia el sol. El de altitud solar se interpreta como el ángulo entre la horizontal y la línea del sol. Por lo tanto, el Azimut solar es considerado como el desplazamiento angular hacia el sur de la proyección del haz de radiación en el plano horizontal (Duffie y Beckman, 2006).

Sin embargo, es importante definir también el ángulo de declinación δ que describe la posición angular relativa del sol al medio día solar con respecto al ecuador y que abarca un rango de -23.45° hasta 23.45° . La declinación solar se calcula con la ecuación 3.4 (Cooper, 1969).

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right) \quad (3.4)$$

La irradiancia global G_g es una magnitud medible a partir de instrumentos de medición como el piranómetro. Además, la irradiancia global se puede descomponer en directa G_b y difusa G_d . Entonces conociendo la componente global y difusa se puede calcular G_b a partir de la ecuación 3.5 (Duffie y Beckman, 2006).

$$G_g = G_b \cos(\theta_z) + G_d \quad (3.5)$$

Con el propósito de incrementar el aprovechamiento energético, se sugiere inclinar la superficie del colector para minimizar el ángulo de incidencia solar y maximizar de esta manera la componente directa. Además de seguir aprovechando la energía proveniente de la componente difusa y la reflectada por el suelo. En la Figura 3.2 se observa la relación entre ángulos de la superficie plana y superficie inclinada, respecto al haz de radiación recibido. Aprovechando esta inclinación en el colector se puede estimar la irradiación con cierto ángulo β . Esta condición especial se define como irradiación inclinada I_T y se calcula con la ecuación 3.6 (Liu y Jordan, 1963). En la Figura 3.3 se observa la superficie inclinada del colector y la relación entre los ángulos relativos solares.

$$I_T = I_b \left(\frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \right) + I_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + I\rho_s \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (3.6)$$

donde ρ_s es el factor de corrección de reflectancia del suelo, I_b la irradiación directa, I_d es la irradiación difusa, $\left(\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right)$ es el factor de vista al suelo y $\left(\frac{1-\cos(\beta)}{2}\right)$ es el factor de vista al cielo.

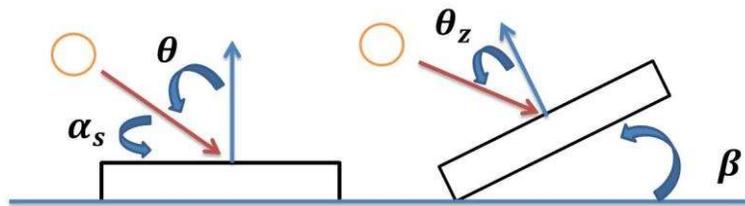


Figura 3.2 “Componentes de la Radiación en Superficies Inclinadas” (Duffie y Beckman, 2006)

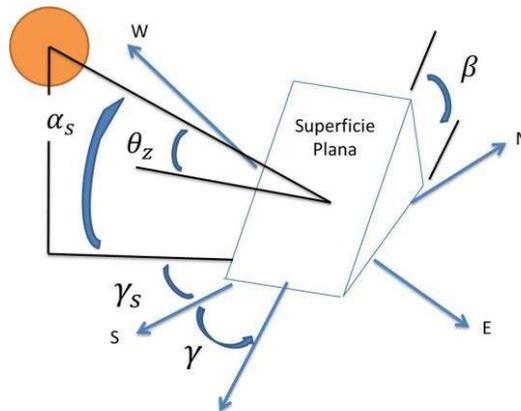


Figura 3.3 “Ángulos Solares con respecto a una Superficie Inclinada” (Duffie y Beckman, 2006)

Sin embargo, es importante comprender y calcular la cantidad de energía absorbida S_T por una superficie inclinada, la cual está en función de las componentes difusa, directa y reflectada de la irradiación así como la eficiencia óptica del elemento absorbedor. La energía absorbida S_T se calcula con la ecuación 3.7 (Duffie y Beckman, 2006).

$$S_T = I_b \left(\frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \right) (\tau\alpha)_b + I_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) (\tau\alpha)_d + I\rho_s \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) (\tau\alpha)_s \quad (3.7)$$

donde $(\tau\alpha)_b$ es la eficiencia óptica que afecta principalmente a la componente directa, de forma análoga sucede con $(\tau\alpha)_d$ y $(\tau\alpha)_s$ (Duffie y Beckman, 2006).

Con el propósito de conocer la cantidad de energía absorbida en superficies inclinadas H_T , la cual está en función de la radiación solar respecto a sus componentes y la eficiencia óptica de la superficie, es posible estimar la insolación solar instantánea disponible en una superficie a través de dos métodos conociendo datos históricos de insolación global horizontal total e insolación terrestre directa.

El primer método está en función de los datos históricos de insolación global horizontal H , la insolación terrestre directa I_b , además de los parámetros referentes a la geometría solar θ , α_s , δ , ϕ y donde se calcula H_T con la ecuación 3.8 (Duffie y Beckman, 2006).

$$H_T = H_b \left(\frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} \right) (\tau\alpha)_b + H_d \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) (\tau\alpha)_d + H\rho_s \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) (\tau\alpha)_s \quad (3.8)$$

donde H_b es la insolación horizontal directa, misma que se puede estimar en función de I_b y α_s utilizando la ecuación 3.9 (Duffie y Beckman, 2006).

$$H_b = I_b \sin(\alpha_s) \quad (3.9)$$

donde H_d es la insolación horizontal difusa, cual se puede estimar en función de I_b , H y α_s con la ecuación 3.10 (Duffie y Beckman, 2006).

$$H_d = H - I_b \sin(\alpha_s) \quad (3.10)$$

El segundo método está en función de los datos históricos de insolación global horizontal H y el índice de claridad K_T . Donde se calcula H_T con la ecuación 3.8 en función de estos dos parámetros, teniendo en cuenta que K_T es el índice de claridad que se puede estimar en función de H_0 , H y α_s con la ecuación 3.11 (Duffie y Beckman, 2006).

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (3.11)$$

donde H_0 es la insolación solar extraterrestre, la cual se puede estimar en función de $I_{sc} = 1367 \pm 1.6 \frac{W}{m^2}$ y α_s con la ecuación 3.12 (Duffie y Beckman, 2006).

$$H_0 = I_{sc} \left[\left(1 + 0.034 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \right) \text{sen}(\alpha_s) \right] \quad (3.12)$$

Estimando K_T , será posible estimar I_b y H_d en función de la ecuación 3.13 y la ecuación 3.14 (Duffie y Beckman, 2006).

$$\begin{aligned} I_b &= -520 + 1800 K_T \quad \text{---} \quad 0.85 > K_T \geq 0.30 \\ I_b &= 0 \quad \text{---} \quad 0.3 > K_T \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{H_d}{H} &= 1.0 - 0.249 K_T \quad \text{---} \quad 0.35 > K_T \\ \frac{H_d}{H} &= 1.557 - 1.84 K_T \quad \text{---} \quad 0.75 > K_T \geq 0.35 \\ \frac{H_d}{H} &= 0.177 \quad \text{---} \quad 0.75 > K_T \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.1.2. Celdas Fotovoltaicas

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos que convierten la irradiancia solar en forma directa a electricidad. Los sistemas fotovoltaicos pueden construirse de cualquier tamaño ya que pueden adicionarse celdas unitarias hasta lograr el tamaño deseado. La celda se conforma principalmente de capas de Silicio (Si) dopado con carga negativa (n) y positiva (p), donde existen del tipo policristalino como la que se observa en la Figura 3.4 y monocristalino como se observa en la Figura 3.5. Entonces, el proceso de conversión y generación de electrones se lleva a cabo en la capa n-Si y se transportan a través de un circuito externo, para su utilización. Sin embargo, solo se utiliza cierta cantidad de energía del fotón y la restante se convierte en calor.



Figura 3.4 “Modelo celda fotovoltaica del tipo policristalino”

Existen ciertos modelos matemáticos que logran describir el comportamiento de la celda y son considerados como circuitos equivalentes. Es decir, se representan por un

circuito eléctrico en función de la corriente, voltaje, resistencia y diodos. Uno de estos modelos es el de diodo simple, en la Figura 3.6 se observa su representación gráfica. El modelo diodo simple describe el comportamiento de la celda fotovoltaica a partir de la corriente de salida I , la cual está en función de la irradiancia de entrada y parámetros de diseño de la celda, por lo tanto con la ecuación 3.15 se puede calcular I (Duffie y Beckman, 2006).



Figura 3.5 “Modelo celda fotovoltaica del tipo monocristalino”

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{a}\right) - 1 \right] - \left[\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right] \quad (3.15)$$

donde los parámetros de diseño de la celda son: R_s considerado como el valor constante de la resistencia en serie, R_{sh} es la magnitud de la resistencia de derivación, I_o es la corriente de saturación del diodo y a es una constante de diseño de la celda. Además

I_{ph} es la corriente fotovoltaica que está en función de la irradiancia solar y el efecto fotovoltaico, y V que es el voltaje de salida del circuito equivalente.

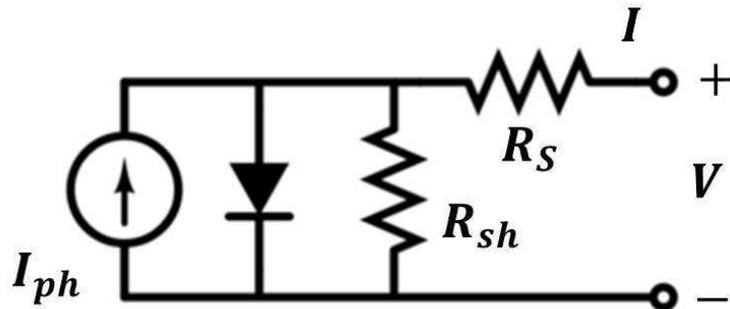


Figura 3.6 “Modelo Diodo Simple de la Celda Fotovoltaica” (Duffie y Beckman, 2006)

El comportamiento de la celda fotovoltaica suele representarse a través de la curva corriente-voltaje, la cual describe la evolución de la corriente y voltaje de salida en el panel. Entonces en la Figura 3.7 se observa a detalle esta curva corriente-voltaje. Esta curva refleja puntos críticos de operación del sistema los de mayor significancia son: la corriente a corto circuito I_{sh} que representa la corriente alcanzada por la celda cuando el voltaje es cero, el voltaje a circuito abierto V_{oc} que es el voltaje cuando la corriente es cero y el punto de máxima potencia P_{MPP} que representa la intersección entre la corriente y el voltaje máximos alcanzado por la celda bajo condiciones de operación estándar (Kalogirou, 2009).

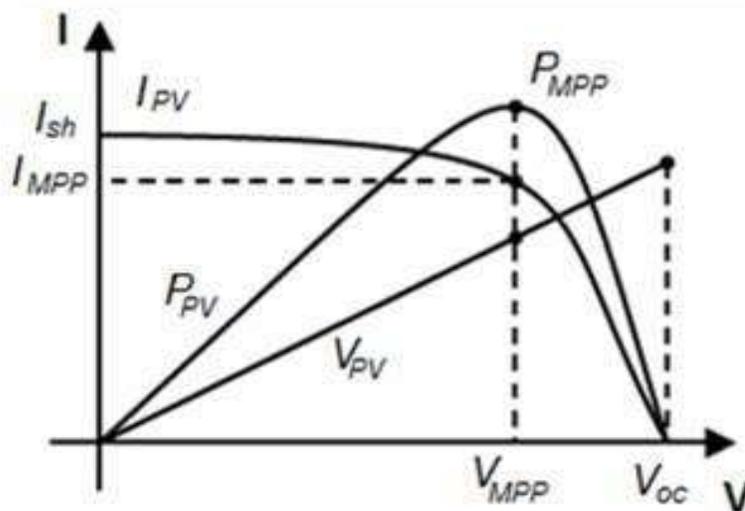


Figura 3.7 “Curva de Operación I-V de la Celda Fotovoltaica” (Ospino et al., 2014)

La operación de la celda fotovoltaica suele verse afectado por el incremento gradual de la temperatura de la celda. Esta temperatura afecta en forma directa a la eficiencia de conversión de energía eléctrica. Por lo tanto, es necesario mantener bajo control esta temperatura, y uno de los mecanismos implementados para lograr el control es a través de una configuración de aletas disipadoras de calor, que por convección natural reducen la temperatura de la celda, pero no por debajo de los niveles preferentes. Entonces a partir de un balance de energía en el sistema puede relacionarse la temperatura de la celda T_c , con la irradiancia solar y la eficiencia óptica. A partir de este balance de energía T_c se calcula con la ecuación 3.16, la cual considera parámetros de la temperatura nominal de operación de referencia de la celda (NOCT por sus siglas en inglés) (Duffie y Beckman, 2006).

$$\left(\frac{T_c - T_a}{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}} \right) = \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left[\frac{9.5}{5.7 + 3.8 V_v} \right] \left[\frac{(1 - \eta_c)}{0.9} \right] \quad (3.16)$$

donde T_a es la temperatura ambiente a la cercanía de la celda, G_T es el valor de irradiancia a la inclinación de la celda, V_v es la velocidad del viento en la cercanía de la celda, $T_{a,NOCT}$ es la temperatura ambiente nominal de operación de referencia de la celda, T_{NOCT} es la temperatura nominal de operación de referencia de la celda, $G_{T,NOCT}$ es el valor de irradiancia nominal de operación de referencia de la celda y η_c es la eficiencia de la celda fotovoltaica.

3.1.3. Colectores Solares

Los colectores solares de baja temperatura son clasificados en función del calor útil que el sistema logra convertir a partir de la diferencia de energía entre la irradiancia y las pérdidas por radiación y convección. El colector solar consiste en una placa absorbadora que convierte las ondas electromagnéticas irradiadas por el Sol en calor y lo transfiere al fluido de trabajo por conducción. Para minimizar las pérdidas en el sistema éste debe aislarse lo mejor posible, por ejemplo para un sistema aislado en su parte trasera y alrededores de la placa absorbadora el coeficiente global de pérdida U_L alcanza rangos entre $U_L = 5$ a $U_L = 6$ y en caso de que la placa este acondicionada con materiales selectivos los rangos de U_L alcanzan de $U_L = 3$ a $U_L = 3.5$ (Eicker, 2003). En la Figura 3.8 se observa un tipo de colector solar de placa plana.

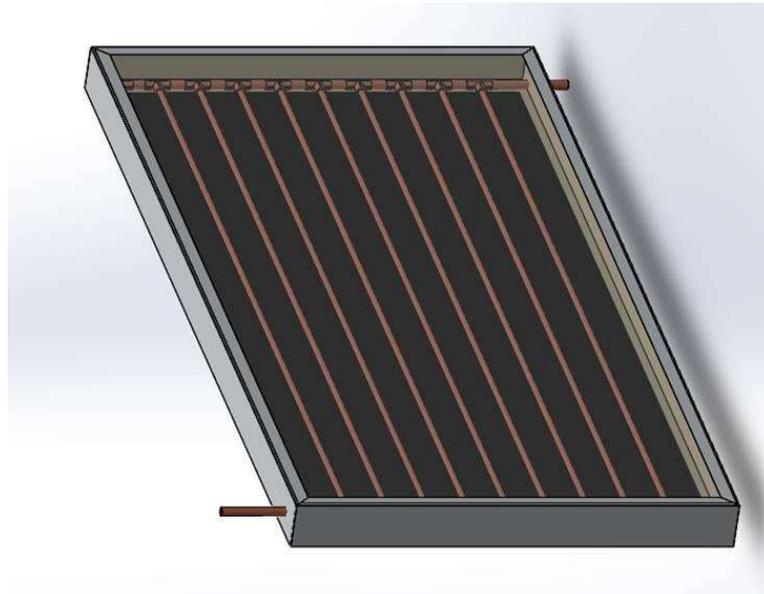


Figura 3.8 “Colector Solar de Placa Plana”

El principal análisis de un colector solar de calentamiento de agua se deriva de los principios básicos establecidos por Hottel y Whillier cerca de la década de los 60's. Este análisis se centra en la distribución de la temperatura de la región existente entre la placa y la serie de tubos en paralelo del colector. Con base al principio de conducción de calor se considera que la energía absorbida por la placa se conduce a lo largo de esta y la región en la cercanía de los tubos. Considerando que la temperatura en la parte media de la aleta será la más alta respecto a la existente por encima de los tubos. Por lo tanto, la energía transferida al fluido generará un gradiente térmico en la dirección del flujo y así el nivel de temperatura dependerá directamente de la temperatura local del fluido.

Por los efectos del perfil de temperatura en el colector se tiene una distribución en dos dimensiones, misma que podría simplificarse sin perturbar la física básica del fenómeno de transferencia de calor. Aquí se considera un colector de placa plana y tubos en paralelo adheridos a la placa, en estado estacionario, donde los cabezales del colector proveen flujo uniforme hacia los tubos además de ocupar un área despreciable en el

colector. A esto se agrega que no existe absorción de energía por la cubierta y el flujo de calor es unidimensional desde la cubierta hasta el aislante de fondo. También se toma en cuenta que el gradiente de temperatura alrededor de los tubos es despreciable, así como que el gradiente de temperatura en dirección del flujo y entre la placa y tubos se trata de forma independiente, así como que las pérdidas por convección se tratan con la misma temperatura ambiente.

Las ecuaciones que desarrollan el concepto de análisis térmico del colector solar son un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales acopladas, de allí parte la complejidad del modelado.

El primer concepto a desarrollar se trata del coeficiente global de pérdidas el cual considera una red de resistencias térmicas donde el nodo principal de análisis es la temperatura de la placa, como se observa en la Figura 3.9. Por lo tanto, la energía absorbida se distribuye entre las pérdidas térmicas con el ambiente y la ganancia de energía útil.

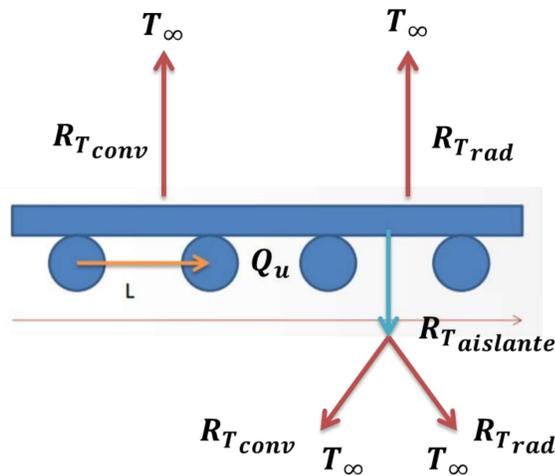


Figura 3.9 “Red de resistencias térmicas en colector”

El coeficiente global de pérdidas U_L se formula a través de las resistencias térmicas del sistema. Donde la resistencia térmica total es dependiente del coeficiente convectivo por viento y el coeficiente por radiación ambos combinados, además de la resistencia térmica por conducción a través del sistema aislado. Por lo tanto U_L es equivalente al inverso de la resistencia térmica total, como se muestra en la Figura 3.10.

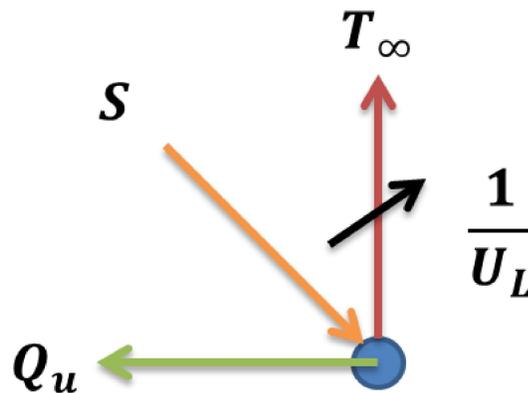


Figura 3.10 “Modelo térmico en función del coeficiente global de pérdidas”

Al establecer el análisis térmico del colector solar se considera que el sistema gana calor por efecto de un balance de energía el cual depende de la energía absorbida, la energía perdida con el ambiente y la eficiencia del sistema aletado para la remoción de calor.

Esa eficiencia se refiere al factor de remoción de calor; el cual incluye las características geométricas del colector, flujo másico que atraviesa el sistema, así como a las temperaturas de placa y fluido. A partir de un balance de energía en el elemento aletado y a través de la ecuación conducción de calor se puede analizar el comportamiento de la temperatura de la placa en una dimensión con la ecuación 3.17 (Duffie y Beckman, 2006).

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \left(\frac{U_L}{k\delta}\right) \left(T - T_a - \frac{S}{U_L}\right) \quad (3.17)$$

La ecuación 3.17 puede analizarse en forma más sencilla al realizar un cambio de variable y aplicando las condiciones de frontera: aleta aislada por efecto de simetría y temperatura específica a la cercanía del tubo. Por lo tanto, esta ecuación se transforma en la ecuación 3.18 (Duffie y Beckman, 2006).

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} - m^2 \Psi = 0 \quad (3.18)$$

$$\Psi = T - T_a - \frac{S}{U_L}$$

$$m^2 = \frac{U_L}{k\delta}$$

Siendo la solución de la ecuación diferencial.

$$\Psi(x) = C_1 \sinh(mx) + C_2 \cosh(mx)$$

Por lo tanto al evaluar a través de la ley de Fourier de Calor se estima la energía conducida y colectada por el sistema por unidad de longitud q'_{FIN} usando la ecuación 3.19.

$$q'_{FIN} = (W - D) [S - U_L (T_b - T_a)] \frac{\tanh(Z)}{Z} \quad (3.19)$$

$$Z = m \frac{W - D}{2}$$

donde la eficiencia de la aleta considerando sus características geométricas es:

$$F = \frac{\tanh(Z)}{Z}$$

Además, debe considerarse la ganancia de calor por el espacio ocupado por los tubos, de igual forma por unidad de longitud. Este calor útil por tubo q'_{Tubo} se estima con la ecuación 3.20.

$$q'_{Tubo} = (D)[S - U_L (T_b - T_a)] \quad (3.20)$$

Donde la ecuación 3.21 denota el calor útil por unidad de longitud q'_u es la suma algebraica de q'_{FIN} y q'_{Tubo} .

$$q'_{u1} = [(W - D)F + D][S - U_L (T_b - T_a)] \quad (3.21)$$

Finalmente, como el calor útil se transfiere al fluido a través de los tubos, este puede expresarse de igual forma en función de la temperatura del fluido, placa y la resistencia térmica combinada de convección y conducción, con la ecuación 3.22.

$$q'_{u2} = \frac{(T_b - T_f)}{\left(\frac{1}{h_{fi}\pi D_i}\right) + \left(\frac{1}{C_b}\right)} \quad (3.22)$$

donde $C_b \geq 30 \frac{W}{m^2 C}$, h_{fi} es el coeficiente convectivo del fluido en tubos, T_b es la temperatura de base, T_f es la temperatura del fluido y D_i es el diámetro interno del tubo.

Por lo tanto al combinar el conjunto de ecuaciones y eliminar la temperatura de placa, se desarrolla la ecuación 3.23 que denota del calor útil q'_u en términos del factor de

eficiencia del colector F' , características geométricas del sistema, coeficiente global de pérdidas U_L , energía absorbida S y temperaturas del fluido y ambiente.

$$q'_{u} = W F' [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (3.23)$$

donde la ecuación 3.24 es el factor de eficiencia del colector F' es la relación entre las resistencias térmicas del sistema.

$$F' = \frac{\left(\frac{1}{U_L}\right)}{W \left[\left(\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]}\right) + \left(\frac{1}{C_b}\right) + \left(\frac{1}{D_i \pi h_{fi}}\right) \right]} \quad (3.24)$$

Este análisis permite comprender la distribución de temperaturas y energía por unidad de longitud del colector, por lo tanto, es necesario analizar lo correspondiente a la transferencia de calor hacia el fluido, debido a que el fluido entra a una temperatura T_{fi} pero incrementa hasta una T_{fo} al salir del colector.

Entonces a través de otro balance de energía se puede analizar el efecto del calor útil aprovechado a lo largo del colector con una ecuación diferencial de primer orden en función de la tasa de flujo a través del colector \dot{m} , número de tubos en paralelo en el colector n y el calor útil del colector por unidad de longitud q'_{u} , con la ecuación 3.25.

$$\dot{m} C_p \frac{dT_f}{dy} = n W F' [S - U_L (T_F - T_a)] \quad (3.25)$$

Por lo que al solucionar la ecuación diferencial y aplicar las condiciones de frontera se obtiene la cantidad que relaciona la ganancia de energía real respecto a la ganancia de energía ideal, y se denomina factor de remoción de calor F_R y se calcula con la ecuación 3.26.

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (3.26)$$

Finalmente aplicando el concepto del factor de remoción de calor, coeficiente global de pérdidas, energía absorbida y las temperaturas de entrada del fluido y ambiente se puede estimar el calor útil del sistema Q_u con la ecuación 3.27.

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (3.27)$$

Por efectos del sistema térmico se establece que la mínima cantidad de energía para lograr una ganancia útil de calor en el colector es la energía crítica S_c , misma que refiere a la razón entre los efectos de pérdidas respecto a los efectos de absorción de energía y se calcula con la ecuación 3.28. Por lo tanto, ésta siempre debe ser menor que la energía absorbida S para generar una ganancia de calor útil mayor a cero.

$$S_c = \frac{F_R U_L (T_{fi} - T_a)}{F_R (\tau \alpha)} \quad (3.28)$$

Para efectos de análisis se establece la ecuación 3.29 que permite estimar la temperatura media del fluido a partir del calor útil del colector Q_u y el factor de remoción de calor F_R .

$$T_{fm} = T_{fi} + \left(\frac{\left(\frac{Q_u}{A_c} \right)}{F_R U_L} \left(1 - \frac{F_R}{F'} \right) \right) \quad (3.29)$$

Entonces cuando el colector produce energía útil la temperatura media de la placa será siempre mayor que la temperatura media del fluido por efecto de las resistencias térmicas del sistema. Se considera que esta diferencia es mínima para el calentamiento de líquidos. Por lo tanto es posible estimar la temperatura media de la placa T_{pm} con la ecuación 3.30. Como parámetro inicial $T_{pm} = T_{fi} + 10^\circ C$ y el flujo másico está dentro de un rango de 0.02 a 0.01 kg/s.

$$T_{pm} = T_{fi} + \left(\frac{\left(\frac{Q_u}{A_c} \right)}{F_R U_L} (1 - F_R) \right) \quad (3.30)$$

Además de este análisis térmico básico de los colectores solares se han desarrollado modelos matemáticos, como el que se observa en la Figura 3.11, con el fin de evaluar la capacidad de los colectores solares y se identifican como índices de rendimiento. Algunos de estos índices son la curva de potencia, el índice de fracción solar SF, el análisis de rendimiento específico de energía solar SE y la eficiencia del sistema solar SN el desarrollo de los modelos se ve con más detalle en US ARMY CORP, (2011).

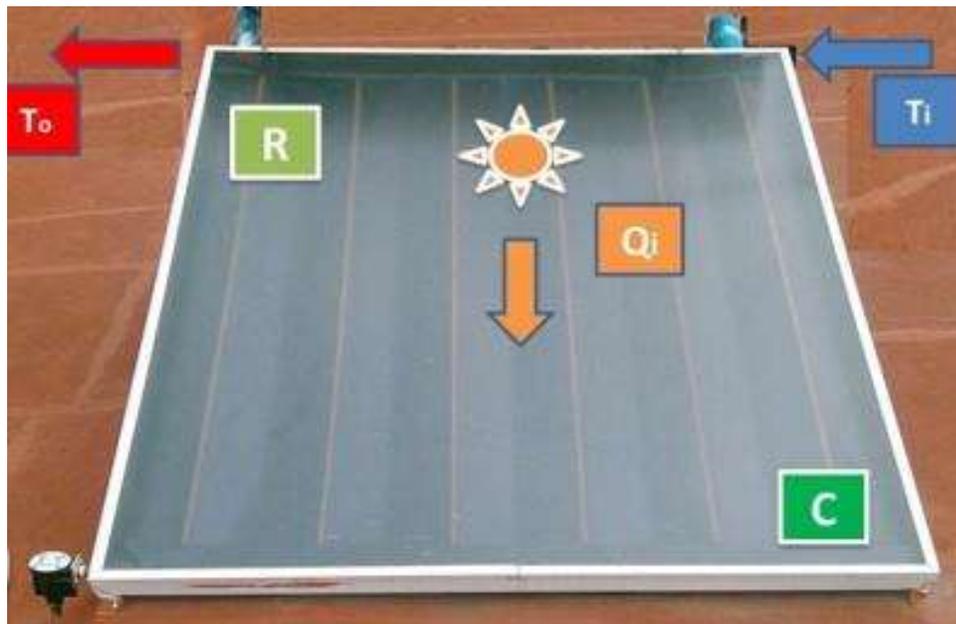


Figura 3.11 “Modelo de simulación de resistencias térmicas en colector solar”

3.1.4. Celdas de Hidrógeno

El concepto de electrolisis renovable es un término actual, donde se conjuga la disociación molecular del agua por los efectos generados en un sistema fotoelectroquímico. Es decir, se tiene un sistema complejo donde se confinan un par de electrodos, una solución

electrolítica a base de agua en una carcasa polimérica, siendo ahí donde se produce el fenómeno de electrolisis al inducirse sobre él un flujo de corriente de forma continua como se observa en la Figura 3.12 (Oruc et al., (2016)).

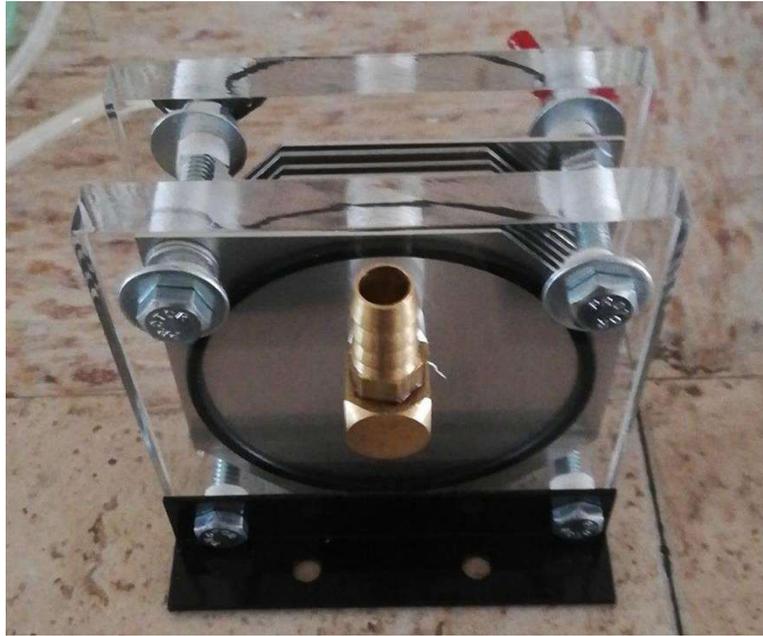


Figura 3.12 “Modelo de Celda de Hidrogeno HHO”

En forma general el sistema está formado de una carcasa de material polimérico donde comúnmente se utiliza polietileno de baja densidad. En esta carcasa es donde se lleva a cabo la reacción oxidoreducción al mezclar una solución electrolítica a base de agua e hidróxido de sodio con el flujo de corriente continua que se genera desde una fuente de voltaje de ciclo profundo.

Al llevarse a cabo el proceso de electrolisis se obtiene una mezcla de los gases Hidrogeno - Oxigeno denominada Hidroxyl, misma que se hace pasar por una mezcla de agua con el propósito de disolver el Oxígeno y así liberar el Hidrogeno, como se observa

en la Figura 3.13. Por lo tanto, es de particular interés saber que la tasa de producción depende de forma significativa de la mezcla electrolítica y su concentración, electrodos, espacio de confinamiento, flujo de corriente, pero también de la temperatura de la mezcla alcalina. Siendo aquí un punto particular de análisis ya que es posible mejorar la eficiencia de generación de hidrógeno adicionando energía térmica al sistema (Oruc et al., (2016)).



Figura 3.13 “Modelo de Celda de Hidrogeno PEM”

Estos sistemas consideran que el volumen producido por la reacción de electrolisis de la mezcla se puede estimar a través de la Ley de electrolisis de Faraday. Recordando que la masa molar del Hidrogeno es equivalente a $1.008 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$, y la masa molar del Oxigeno es equivalente a $15.999 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$, por lo tanto, una molécula de agua tendrá una masa molar de $18.015 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$.

Además, es necesario considerar que la reacción Redox en el Cátodo depende de la siguiente ecuación de balance 3.31 (Ajayi y Akerele, (2013)).



Para el caso de la reacción Redox en el Ánodo depende de la siguiente ecuación de balance Redox 3.32.



Considerando un flujo de corriente continuo (I) por un periodo determinado de tiempo (Δt) es posible calcular los moles electrones generados del proceso de electrolisis de la mezcla alcalina. Entonces estos moles electrones se calculan considerando el número de Faraday en el proceso. Donde el producto del flujo de corriente por el tiempo de generación es el número de Coulomb, y para transformarlos en número de Faraday se toma en cuenta la constante de Faraday que es equivalente a 96485 C. Por lo tanto el número de mol electrón generado, ecuación 3.33, es equivalente al número de Faraday generados por el flujo de corriente consumida en el proceso de electrolisis.

$$No. mol electron = I * \Delta t * \frac{1}{96485} \quad (3.33)$$

Por lo tanto, para estimar el volumen producido de gas Hidrogeno se considera la Ley de Gas Ideal, bajo condiciones de temperatura y presión estándar. Es necesario comprender que en la electrolisis de la mezcla alcalina se involucran directamente con la

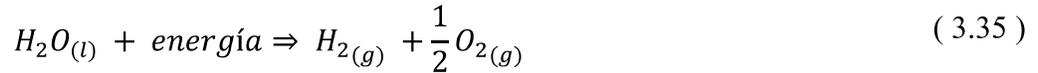
reacción dos electrones y que por cada unidad de volumen de gas Oxígeno disuelto se han producido dos unidades de volumen de Hidrogeno, es decir existe una relación 1:2.

Entonces, con la siguiente ecuación 3.34 se estima el volumen de gas Hidrogeno producido tomando en cuenta la Ley de Gas Ideal. Donde $R = 8.3141 \frac{J}{mol \cdot K}$, $T = 298 \text{ K}$, $p = 101.3 \times 10^3 \text{ Pa}$, $n = \text{No. mol electrón}$.

$$V = \frac{nRT}{P} \quad (3.9)$$

Otro concepto importante en los sistemas de generación de hidrogeno bajo el concepto de energía sustentable es el electrolizador de agua alcalina con una base de hidróxido de potasio, mezcla considerada de optima conductividad cuando se utiliza alrededor del 30 % de concentración. Además, se considera que las temperaturas de operación optimas están en rangos de 70 °C a 100 °C y con presiones dentro de rangos de 1 a 30 bar. Este tipo de sistemas pueden diseñarse del modo monopolar, es decir un solo cátodo y ánodo en un arreglo en paralelo. En su caso puede ser también del modo bipolar con un elemento que contiene al cátodo y ánodo en una misma placa donde su arreglo es en serie (Ono, (2016)).

Entonces el principio de operación del electrolizador se basa en la descomposición del electrolito en Hidrogeno y Oxigeno. En forma general el balance de materia que permite analizar la reacción oxido - reducción es conforme se describe en la siguiente ecuación 3.35.



Por lo tanto, es posible analizar el sistema a través de un modelo termodinámico para tener un marco de referencia y así analizar a detalle la reacción de equilibrio y los efectos térmicos en el reactor electroquímico. Este modelo relaciona la cinética del electrodo en el electrolizador a través de una correlación empírica de corriente-voltaje bajo diversas condiciones de temperatura. En la ecuación 3.36 se describe este modelo termodinámico que es no lineal y relaciona principalmente al voltaje y la corriente demandados por el electrolizador bajo los efectos de la temperatura, resistencia óhmica del electrolito y los efectos resistivos en los electrodos (Ulleberg, (2003)).

$$U = U_{rev} + \frac{r * I}{A} + s \log\left(\frac{t}{A} + 1\right) \quad (3.36)$$

Este modelo tiene una dependencia intrínseca de la energía de Gibbs. En la ecuación 3.37 se denota como estimar la energía de Gibbs en función de la entalpia y entropía del sistema.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta s \quad (3.37)$$

Esta relación se debe en forma particular porque el voltaje de celda reversible U_{rev} , ecuación 3.38, es la variable que relaciona la energía de Gibbs con la Ley de Faraday. Por tal razón, es importante saber que la Ley de Faraday relaciona la energía eléctrica requerida para separar la molécula del agua bajo una tasa constante de unidades molares en la

reacción química producida. Donde z es igual al número de electrones transferidos por reacción, y F es la constante de Faraday.

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{zF} \quad (3.38)$$

3.1.5. Sistemas Híbridos

El sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico se considera como aquel arreglo conformado entre un panel fotovoltaico y un colector solar que se encuentra adherido al panel fotovoltaico a través de un adhesivo térmico, como se observa en la Figura 3.14. El objetivo de este sistema es generar energía eléctrica y térmica al mismo tiempo, además de alargar el ciclo de vida del panel. Pues el calor absorbido por el colector llega a ser tres veces mayor que la energía eléctrica producida. Por lo tanto, estos sistemas suelen direccionarse como un soporte de los requerimientos de energía eléctrica y térmica de uso residencial.

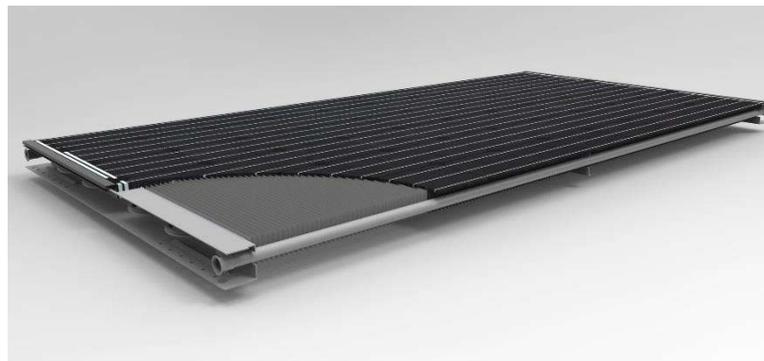


Figura 3.14 “Modelo de sistema PVT” (Triple Solar®-System)

El sistema híbrido que ha sido más evaluado es el de placa plana. Esto se debe al dispositivo de enfriamiento que se adhiere a la celda, ya que está basado en un intercambiador con aletas y busca mantener la temperatura de operación del panel lo más baja posible. Por lo tanto, la optimización de los sistemas híbridos debe maximizar la energía transformada por la celda, además de innovar en sistemas de acoplamiento y materiales para el beneficio térmico entre el contacto celda y placa absorbadora, como se observa en la Figura 3.15.



Figura 3.15 “Modelo de sistema C-PVT” (Thermaltricity International)

Existen una serie de modelos matemáticos que representan las condiciones de operación del SHCT-FV, estas ecuaciones se basan en las principales características de los sistemas térmico y fotovoltaico. Es decir, a partir de estas ecuaciones es posible evaluar el calor útil generado por el sistema, la energía eléctrica efectiva a la salida, además del

rendimiento global del SHCT-FV. En Andrews (1981) se desarrolló un modelo matemático que describe la energía térmica colectada por el sistema híbrido $Q_{U,SH}$, es decir, la energía absorbida a través de la celda. Entonces $Q_{U,SH}$ se calcula a partir de la ecuación 3.39.

$$Q_{U,SH} = A_C \overline{F_R} [\overline{S} - \overline{U_L} (T_{fi} - T_a)] \quad (3.39)$$

donde $\overline{F_R}$ es el factor de remoción de calor modificado, \overline{S} es la energía absorbida por el sistema híbrido, $\overline{U_L}$ es el coeficiente global de pérdidas del sistema híbrido y T_{fi} es la temperatura del fluido a la entrada.

En forma semejante se desarrolló un modelo para calcular el rendimiento térmico del colector $\eta_{T,SH}$, el cual se calcula con la ecuación 3.40 (Andrews, 1981).

$$\eta_{T,SH} = (\overline{F_R} * \tau * \overline{\alpha}) - \frac{\overline{F_R} \overline{U_L} (T_{fi} - T_a)}{H_T} \quad (3.40)$$

donde $\overline{\alpha}$ es la absortancia modificada del sistema híbrido y H_T es la irradiación solar por día a la inclinación del panel.

En forma análoga se desarrolló un modelo que describe la cantidad de energía eléctrica útil en el sistema híbrido $Q_{E,SH}$. Entonces $Q_{E,SH}$ se calcula con la ecuación 3.41 (Andrews, 1981).

$$Q_{E,SH} = \frac{A_C * S * \eta_{PVa}}{\alpha} \left(1 - \frac{\beta_r * \eta_{PVr}}{\eta_{PVa}} \left[(\overline{F_R}) * (T_{fi} - T_a) + \frac{S}{U_L} * (1 - (\overline{F_R})) \right] \right) \quad (3.41)$$

donde α es la absorptancia del panel fotovoltaico, η_{PVa} es la eficiencia del panel a temperatura ambiente, η_{PVr} es la eficiencia del panel a temperatura de referencia y β_r es el coeficiente de temperatura de referencia del panel.

Sin embargo, en Borda-Yepes (2012) se presenta un modelo dinámico del sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico a partir del balance de energía con el fin de estimar la cantidad de energía almacenada, involucrando las condiciones climatológicas, irradiancia solar, temperatura de operación, corriente y voltaje de la celda fotovoltaica.

3.2. Modelado matemático

3.2.1. Principios del modelado matemático

Un modelo puede concebirse como la imitación de la realidad de un sistema, y el modelo matemático es una forma particular de representarlo.

Entonces el modelo matemático de un sistema es la representación de la interacción de factores internos entre sí que permite condicionar el comportamiento y evolución del sistema. En ocasiones esta interacción se ocasiona por el efecto de las perturbaciones o la variación de parámetros. Entonces la dinámica de los sistemas puede tratarse a través de modelos matemáticos que dependen del tiempo.

Un modelo con entrada determinística tiene prescrita una evolución respecto al tiempo, y por lo general se describe a través de una ecuación matemática que puede ser reproducida en cualquier instante de tiempo. Los modelos lineales cumplen con el principio de superposición y homogeneidad. A diferencia de los modelos no lineales donde no es aplicable. Entonces un modelo matemático representa los aspectos esenciales del fenómeno físico en estudio, y por lo general, se describe a través de ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo, ecuaciones diferenciales parciales, ecuaciones diferenciales ordinarias, función de transferencia y ecuaciones en espacio de estado.

El proceso de construcción de un modelo se simplifica al trasladar un problema del mundo real en un problema matemático equivalente, el cual se analiza, se confecciona, se soluciona y se interpreta. Entonces el modelado de procesos en ingeniería se fundamenta según su naturaleza, es decir se busca capturar a través de las ecuaciones todas las características del sistema para un uso específico del modelo. Por lo general, se busca la dirección correcta de la respuesta del sistema a través de las conexiones entre las entradas, salidas y variables internas. El modelo resultante tiene una región específica de aplicabilidad, y depende del uso de experimentos para probar el comportamiento del modelo respecto al real. Por lo tanto, el proceso puede describirse en cuatro fases principales.

La fase uno se describe como la interpretación del proceso real en un modelo matemático. La fase dos es la solución del modelo matemático, donde se busca evaluar las variables desconocidas que representan el sistema. La fase tres se considera como la interpretación de la salida del modelo, donde a través de una serie de pruebas se verifica si el modelo está completamente implementado y si este imita las tareas del sistema real con suficiente precisión. La fase cuatro considera el uso de los resultados obtenidos del modelo en el mundo real. Aquí es donde se realiza la implementación del modelo, y sus resultados se integran en un problema del mundo real para poder direccionarlos.

Entonces el proceso de modelado de sistemas deberá tener lo mínimo necesario para especificar el modelo matemático, una generación clara de las hipótesis y suposiciones, la generación de las ecuaciones que lo describen, una adecuada calibración subsecuente del modelo, así como su validación y aplicación.

3.2.2. Modelos Fenomenológicos

Los modelos fenomenológicos surgen de la aplicación de las leyes que rigen los fenómenos físicos. Los modelos empíricos se obtienen de la observación directa de los resultados después de excitar un proceso con entradas conocidas, y la posterior correlación de la información obtenida. Entonces el desarrollo de los modelos fenomenológicos se basa principalmente, de la aplicación de las leyes de conservación y del principio de mínima acción (Koziel y Yang, 2011).

La forma general que tienen los balances de una propiedad $P(t)$ en el modelado de un sistema en un intervalo de tiempo se describe con la ecuación 3.42:

$$\frac{dP(t)}{dt} = F_e(t) - F_s(t) + C_g(t) - C_c(t) \quad (3.42)$$

Existen dos formas principales de aplicar las ecuaciones de balance para establecer la estructura del modelo: balance macroscópico y balance microscópico. El balance macroscópico es el proceso en donde se consideran las propiedades globales del sistema que no dependen de variaciones espaciales. Así $F_e(t)$, $F_s(t)$, $C_g(t)$ y $C_c(t)$ son sólo función del tiempo y la ecuación que describe el modelo matemático es una ecuación diferencial ordinaria de primer orden. Este modelo corresponde a un sistema de parámetros concentrados.

El balance microscópico es el balance descrito por la ecuación del modelo en donde se analiza un elemento de volumen dV , y de esta forma resulta la dependencia espacial del flujo F_I y la acumulación A_c . Este balance da lugar a un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales tanto con dependencia espacial como temporal. Tales modelos corresponden a un sistema con parámetros distribuidos.

La forma general del principio de mínima acción, se caracteriza por una función de energía $L_X(t)$ cuya evolución entre dos instantes de tiempo t_1 y t_2 es su integral misma que tiende al valor mínimo posible, como se observa en la ecuación 3.43.

$$J = \int_{t_1}^{t_2} L X(t) dt \quad (3.43)$$

El vector $X(t)$ representa el vector de variables de estado del sistema. La función \mathcal{L} se le denomina como Lagrangiano, el cual corresponde a la diferencia entre la energía cinética y potencial. La condición necesaria del mínimo para la función \mathcal{L} se describe con la ecuación 3.44.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}_i} \right) - \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_i} \right) = Q_i \quad (3.44)$$

$$i = 1, \dots, n$$

donde los Q_i representan las señales externas asociadas a la variable de estado x_i .

La mayoría de los sistemas tienen comportamientos que pueden ser asociados a sistemas de primer y/o segundo orden, con o sin retardo. Un sistema de primer orden se puede modelar con la ecuación 3.45a. Entonces la representación en el espacio de Laplace en condiciones iniciales igual a cero se observa en la ecuación 3.45b.

$$\dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_0 u(t) \quad (3.45a)$$

$$H(s) = \frac{b_0}{(s + a_0)} = k \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3.45b)$$

Donde la respuesta del sistema de primer orden a una entrada escalón, se obtiene con la ecuación 3.46

$$y(t) = k \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) u(t) \quad (3.46)$$

Evaluando el sistema en el tiempo $t = \tau$, se tiene la representación de la respuesta $y(\tau) = 0.632 k$; es decir, la respuesta alcanza el 63.2 % de su valor final. Evaluando la respuesta del sistema en el espacio de estados, se tiene que $y(\infty) = k$, que concuerda con la ganancia del sistema, pues $h(0) = k = y(\infty)$.

Un sistema de segundo orden se puede modelar con la ecuación 3.47a, y su representación en el espacio de Laplace se observa en la ecuación 3.47b.

$$\ddot{y}(t) + 2\xi \omega_n \dot{y}(t) + \omega_n^2 y(t) = k \omega_n^2 u(t) \quad (3.47a)$$

$$H(s) = k \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.47b)$$

donde k corresponde a la ganancia, ξ es el factor de amortiguamiento y ω_n corresponde a la frecuencia natural de oscilación. El sistema no tiene ceros y tiene dos polos que están dados por $-\xi \omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1}$. Es evidente que dependiendo del valor de los parámetros se pueden dar varias combinaciones posibles para los polos del sistema.

Los modelos matemáticos de los sistemas dinámicos por lo general consisten en una colección de ecuaciones diferenciales o en diferencias. Por lo general algunas de las señales externas que influyen en el sistema también son modeladas con el propósito de entender y simular sus efectos sobre el sistema. Otra perspectiva del modelado es a través del diagrama de bloques, el cual es la descomposición lógica de las funciones del sistema y se muestra como las diferentes partes del sistema influyen entre sí.

Para un sistema dinámico la salida depende de todos los valores de entrada anteriores. Por lo tanto, no solo es suficiente saber la entrada en todo instante de tiempo para poder calcular la salida. Es decir, necesitamos más información del sistema. Entonces para el estado del sistema en un tiempo t_0 se conoce la suficiente información tal que con ese estado y la entrada conocida se pueda calcular la salida. Un modelo en espacio de estados describe al estado como aquella información exacta que ha sido almacenada y actualizada en la simulación con el propósito de poder calcular la salida. El espacio de estados se representa bajo la ecuación 3.48.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= [A]x(t) + [B]u(t) \\ y(t) &= [C]x(t) + [D]u(t)\end{aligned}\tag{ 3.48 }$$

En algunos casos la entrada se mantiene constante sobre largos periodos de tiempo, por lo que al resolver la ecuación diferencial que representa al modelo y su condición inicial, la solución se denomina estacionaria y se tiene una salida invariante en el tiempo. Así es posible establecer puntos de equilibrio del sistema, y tales puntos en ocasiones corresponden a comportamientos deseados del sistema. Considerando una solución estacionaria, la solución respecto a un valor inicial dado puede comportarse de dos maneras

puede ser asintóticamente estable cuando las soluciones cercanas al valor inicial convergen hacia él, o una solución global y asintóticamente estable cuando cualquier valor de solución converge hacia él.

Otro concepto importante es la constante de tiempo, el cual representa la escala de tiempo y la salida se aproxima a un valor estacionario. Entonces para el caso de un sistema no lineal con una solución estacionaria, este modelo se puede linealizar alrededor de la solución estacionaria, a través de pequeñas desviaciones, es decir al realizar una aproximación. Linealizar los modelos matemáticos de sistemas por lo general se realiza para el estudio de propiedades locales en la vecindad de una solución estacionaria. Además de que resulta complejo estimar que tan buena es la aproximación de la solución linealizada.

En algunos sistemas la señal de perturbación tiene obvia influencia en el comportamiento del sistema. La construcción de un modelo utilizando las señales de perturbación depende si estas son separadamente medibles y a menudo son cantidades físicas bien conocidas y el punto de origen conocido.

En ocasiones la señal de perturbación puede ser de una fuente conocida o medible. Por lo tanto, el modelo general queda en función de la entrada, salida y la perturbación.

3.2.3. Modelos Mecanicistas

Los modelos mecanicistas son referidos también como modelos fenomenológicos porque parten de un fenómeno o mecanismo como la transferencia de masa, calor y

momento. Por lo general se utilizan en el diseño y optimización de procesos. Además, se consideran como modelos de caja blanca.

Los modelos empíricos son resultantes de la observación y experimentación, no se basan de los conocidos principios básicos o mecanismos que podrían representar al sistema. Esencialmente se usa una ecuación de ajuste donde los parámetros no tienen significado físico. Además, se consideran como modelos de caja negra, lo que refleja el poco conocimiento del mecanismo real del proceso.

Los modelos mecanicistas parten del postulado de las ecuaciones básicas de balance.

El Balance de masa se describe con la ecuación 3.49:

$$\frac{dm}{dt} = m_1 - m_2 \quad (3.49)$$

El Balance de energía se obtiene con la ecuación 3.50:

$$\frac{dE}{dt} = m_1 h_1 - m_2 h_2 \quad (3.50)$$

El Balance de momento se describe con la ecuación 3.51:

$$\frac{dM}{dt} = A_m(P_1 - P_2) + F_{net} \quad (3.51)$$

Entonces las ecuaciones formales del proceso de modelado mecánico parte de las Ecuaciones algebraicas lineales (LAEs), Ecuaciones algebraicas no lineales (NLAEs), Ecuaciones diferenciales ordinarias (ODEs), Ecuaciones diferenciales parciales elípticas (EPDEs) y Ecuaciones diferenciales parciales parabólicas (PPDEs). Por esta razón al desarrollar los modelos es sumamente importante definir las regiones en el sistema donde se aplican los principios de conservación y las leyes físicas y químicas básicas para generar la descripción matemática del modelo.

3.2.4. Identificación de sistemas para construcción de modelos

A partir del modelo matemático generado del sistema en estudio a través de las leyes conservativas y las relaciones constitutivas se busca el formalismo considerando a este como el espacio de estados del sistema. Para describir formalmente el espacio de estados de un sistema es necesario seleccionar una serie de variables de estado, expresar las derivadas de cada variable de estado respecto al tiempo en función de las variables y entradas de interés, expresar la salida en función de la variable de estado y la entrada. Todas las variables internas corresponden al almacenamiento de diferentes cantidades mismas que son candidatas a variables de estado, y además esta variable de estado representa la memoria de lo que sucede en la cercanía del sistema. Las cantidades almacenadas consideradas son: Posición del punto de masa (almacén de energía potencial), Velocidad del punto de masa (almacén de energía cinética), Carga del capacitor (almacén de energía del campo eléctrico), Corriente a través del inductor (almacén de energía del campo magnético), Temperatura (almacén de energía térmica) y Nivel del tanque (almacén de volumen). Para verificar si las variables de estado fueron seleccionadas correctamente, se

prueba que las derivadas respecto al tiempo se expresen usando solo las variables de estado, las cantidades constantes y las entradas.

Todos los modelos por lo general contienen simplificaciones del proceso real, debido a que no se conocen las relaciones exactas entre las variables de entrada-salida del sistema. Pero si fuesen conocidas las relaciones sería posible construir modelos simplificados bajo aproximaciones, con el propósito de que el modelo sea manejable para los propósitos de uso. Es posible considerar la constante de tiempo en el modelado, siempre y cuando esta sea de interés. Considerando esta condición se establece lo siguiente: los subsistemas donde su dinámica es rápida, sus características se aproximan con relaciones estáticas. Cuando los subsistemas tienen una dinámica lenta se aproximan como constantes. Por lo tanto, al ignorar los cambios dinámicos muy lentos o rápidos, se reduce el orden del modelo.

La técnica para construir y completar modelos matemáticos utilizando mediciones experimentales se denomina identificación de sistemas, y principalmente existen tres métodos particulares. El primero es realizar experimentos simples para facilitar la estructura del problema y construir modelos para describir como las salidas dependen de la entrada las cuales no se basan en una entrada física de lo que sucede en el sistema. Principalmente se buscan modelos arbitrarios y sistemas lineales para estimar la respuesta al impulso o función de frecuencia.

El segundo es estimar modelos confeccionados donde el número n de variables, y los parámetros a_i y b_i son ajustados de datos observados. El último es utilizar los datos medibles para determinar los parámetros desconocidos del modelo obtenido.

3.2.5. Simulación, validación y uso del modelo

En la actualidad podemos concebir en forma efectiva el modelado y simulación de procesos o sistemas utilizando equipos de cómputo de alta gama y desarrollo tecnológico, es decir en forma clara se puede entender el comportamiento de un sistema complejo que transforma energía, sin la necesidad de conocer a detalles su funcionamiento a través del proceso de modelado computacional. Además de poder visualizar el proceso de transformación de energía, la simulación permite evaluar sistemas bajo diversas condiciones de operación reduciendo costos y tiempo, principalmente en la etapa de diseño y control. Por lo tanto, esto nos lleva a optimizar sistemas y procesos complejos en tiempos mucho más cortos y con menores riesgos de falla en su aplicación por la capacidad de interacción que el modelado y simulación tiene con el mundo real.

Si nos enfocamos al modelo, este puede ser considerado como la imitación de la realidad bajo ciertos límites de un fenómeno físico, biológico o de transformación. Técnicamente el modelar nos lleva a representar al fenómeno observado en una forma particular a través de una serie de ecuaciones de balance o estado que al ser solucionadas bajo diversas condiciones de frontera nos permite interpretar los resultados en forma efectiva. Entonces durante el proceso de modelar se trasladan los problemas del mundo real a un problema equivalente matemático que a través de un cambio de escala nos permite valorar los parámetros de mejora en un sistema o proceso particular, o en su caso comprender un fenómeno físico o biológico.

Por lo tanto, en ingeniería el modelado computacional sirve para capturar a través de las ecuaciones matemáticas ciertas características de un sistema, generar una respuesta efectiva al conjunto de soluciones posibles, interpretarlas y validarlas para satisfacer las especificaciones o requerimientos del diseño o control. Pero es necesario tener en cuenta

la respuesta correcta a la salida del modelo, es decir tener una estructura valida que represente en forma adecuada las conexiones del sistema.

Una estructura generalizada del proceso de modelado se basa en cuatro pasos simplificados que parten de la representación del proceso real en forma sintética, posterior es la interpretación del problema desde el punto matemático, seguido por la solución del problema estrictamente matemático para finalizar con la interpretación de los resultados y así retroalimentar al proceso real. Cada una de estas etapas del proceso de modelado puede analizarse mejor si se considera establecer preguntas clave que permitan alcanzar una conexión clara entre etapa y etapa, como se observa en la Figura 3.16.

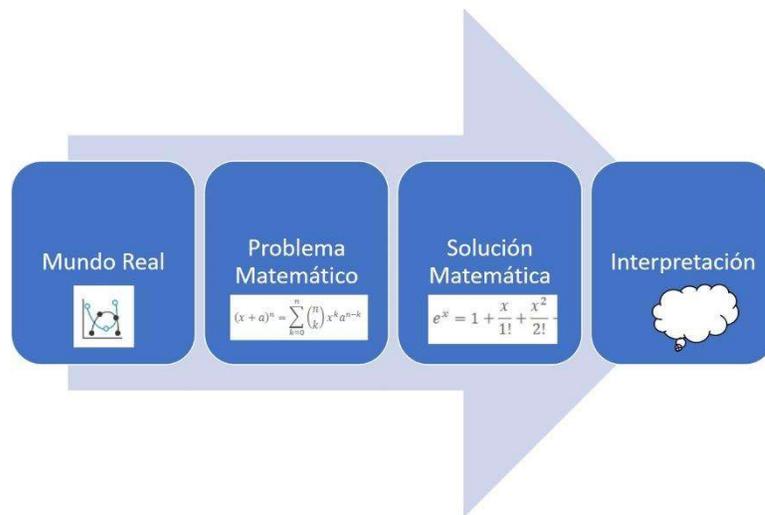


Figura 3.16 “Modelo de cuatro pasos”

Para enlazar el proceso real con la interpretación matemática se establecen las siguientes preguntas como conectores de diseño. La primera de ellas es: ¿Que entendemos del problema o proceso del mundo real?, ¿Cuál es la intención al usar el modelo matemático? ¿Qué fenómeno gobierna el sistema o proceso? ¿Qué forma del modelo es requerido? ¿Qué tan preciso es el modelo? ¿Qué datos están disponibles del proceso o

sistema? ¿Cuál es la calidad y precisión de los datos? ¿Cuáles son las entradas, salidas, estados y perturbaciones?

Para enlazar la interpretación matemática con la solución del modelo matemático se establecen las siguientes preguntas como conectores de diseño. ¿Qué variables deben seleccionarse en el modelo para satisfacer los grados de libertad?, ¿Es solucionable el modelo?, ¿Qué solución numérica debe usarse?, ¿Que tan sensible es la solución?, ¿En base a la estructura del problema se puede mejorar la velocidad de la solución?

Para enlazar la implementación del modelo se establecen las siguientes preguntas como conectores de diseño. ¿Qué tipo de validación es apropiada y útil en el modelo?, ¿El modelo resultante es identificable?, ¿Que se necesita cambiar del modelo resultante en función de la validación?, ¿Qué nivel de simplificación se justifica?, ¿Qué calidad y cantidad de datos son necesarios para la validación y estimación de parámetros?, ¿Que parámetros son necesarios de conocer para asegurar la calidad predictiva del modelo?

Finalmente, para interpretar los resultados al mundo real se consideran las siguientes preguntas como conectores de diseño. ¿Es necesario reducir la complejidad del modelo?, ¿Cómo se puede actualizar el modelo?, ¿Cómo se usan los datos en el modelo?, ¿Quién utilizara los resultados y como deben aparecer? Por lo tanto, el modelar va más allá que simplemente generar una serie de ecuaciones para solucionar un problema.

3.2.6. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad es considerado como la técnica para determinar el cómo diferentes valores de una variable independiente impactan drásticamente en una variable dependiente específica bajo un conjunto de suposiciones, por lo general esta técnica se utiliza dentro de límites específicos que dependen de una o más variables de entrada. Este análisis puede considerarse como una forma de predecir el resultado de una decisión dada bajo un cierto rango de variables (Campolongo y Saltelli, 1997), (Frey y Patil, 2002).

El objetivo es que construido un modelo de simulación que ya ha sido probado y calibrado, se desea saber cómo responde éste ante cambios en los parámetros utilizados. Es decir, cuán sensibles son los resultados obtenidos del modelo a los cambios en diversos parámetros de diseño. Es necesario tomar en cuenta, que el modelo deberá ser de parámetros con variables continuas distribuidas en forma normal ya que se deberá simular el proceso un gran número de veces adoptando cada vez valores diferentes en los parámetros. Por lo general se considera utilizar el Método Montecarlo para simular el modelo objetivo, debido a que éste permite simular un proceso que contiene elementos aleatorios y repetirlo infinitas veces para observar su comportamiento (Wotawa et al., 1997).

Entonces en forma particular el análisis de sensibilidad permite investigar el efecto de modificar una entrada fija o un parámetro de distribución de una entrada simulada a través de un conjunto específico de valores. Se considera que es de gran utilidad en estudios y análisis de procesos de caja negra, donde la salida es una función opaca de varias entradas. Los más usuales son los modelos climáticos, porque permite identificar puntos críticos de control priorizando una colección de datos adicionales para verificar y validar un modelo. Por lo tanto, el análisis sensitivo tiene un papel importante en los análisis

energéticos y se usa para identificar las variables clave que afectan al rendimiento térmico tanto de simulaciones de energía como en estudios experimentales (Looss y Lamaitre, 2015).

Algunos autores consideran que el análisis de sensibilidad es el estudio de cómo la incertidumbre en la salida de un modelo puede atribuirse a diferentes fuentes de incertidumbre en la entrada (Wei, 2013). Entonces lo que permite es comprender cómo los parámetros y estados de un modelo influyen en la función de costos de optimización, en la Figura 3.17 se muestra el punto de inserción del análisis de sensibilidad. Por lo tanto, matemáticamente hablando la sensibilidad de la función objetivo con respecto a ciertos parámetros es igual a la derivada parcial de la función de costo con respecto a esos parámetros locales, donde local refiere al hecho de que todas las derivadas se toman en un solo punto (Saltelli et al., 2008).

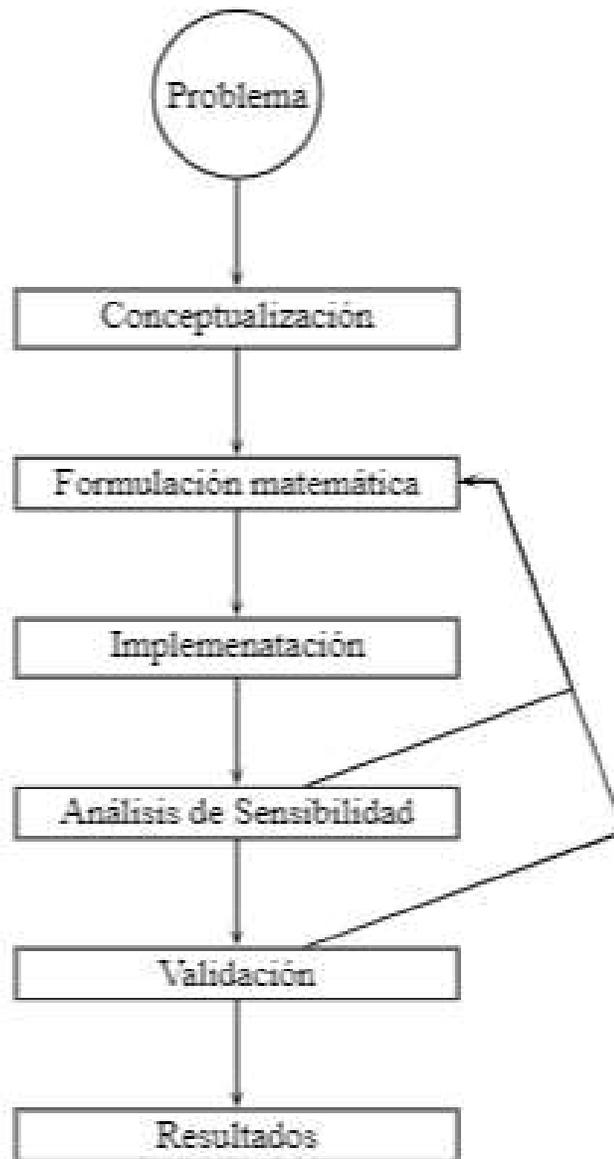


Figura 3.17 “Inserción del análisis de sensibilidad”

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Considerando que la metodología de investigación enfatiza las decisiones que un investigador toma para lograr sus objetivos. Estas decisiones principalmente se enfocan en los aspectos como: el diseño de la investigación, la estrategia metodológica, la selección de la muestra de estudio, los métodos de recolección de datos, las técnicas para el análisis y validación de la información entre algunos otros criterios más (Azüero, 2019). Por lo tanto, en esta sección se describen los métodos y materiales utilizados en la investigación.

4.1. Marco metodológico

El marco metodológico es considerado uno de los elementos fundamentales en el desarrollo de la investigación, debido a que marca la ruta de trabajo para lograr los objetivos asignados por el investigador. Teniendo en cuenta esto y a través de un análisis de la literatura se encontró que, en Azüero, (2019), se menciona que el diseño efectivo del marco metodológico en cualquier tipo de investigación permite al investigador descubrir los supuestos de un estudio con el propósito de reconstruirlo, tomando en cuenta los conceptos teóricos operacionalizados. Es decir, explicar a detalle el desarrollo de la investigación, respondiendo el cómo de la misma. Por lo tanto, es necesario exponer a detalle los datos que se requieren para lograr los objetivos, que métodos y técnicas serán utilizadas para adquirir esta información y como serán validados para dar certeza al proyecto de investigación.

En la misma dirección al revisar lo que menciona Hernández y Flores (2016), Franco (2011), y Arias (2012) sobre el marco metodológico, nos permitió apropiarnos del concepto y determinar: que a partir de un conjunto de procedimientos estandarizados es posible describir y analizar el problema de investigación, para así alcanzar los objetivos planteados. Además, consideramos que estas acciones en conjunto nos permiten recolectar, analizar, interpretar y validar la información con una alta precisión. Estableciendo así un proceso sistematizado para dar resultados en el desarrollo de la investigación. Por lo tanto, en la siguiente sección describimos a detalle el marco metodológico que permitió el desarrollo efectivo de esta investigación.

4.1.1. Diseño de la investigación

Como el objetivo de estudio fue el desarrollo de un modelo matemático para simular el comportamiento multifísico de un sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico-celda de hidrógeno, se consideró pertinente llevar a cabo un diseño del tipo experimental ya que éste nos permitió generar estímulos y tratamientos sobre las variables de estudio. Pero, además se analizaron las características correlacionales-causales del fenómeno de generación de energía a través de una celda fotovoltaica para realizar cuasiexperimentos utilizando métodos computacionales con las variables independientes de estudio.

El diseño experimental fue posible, debido a que se construyó una planta piloto para el estudio de las celdas fotovoltaicas bajo condiciones de un sistema híbrido de generación de energía múltiple, es decir, eléctrica, térmica y combustible. Por lo tanto, se cumplió con las características de un estudio experimental al analizar la relación causa-efecto del fenómeno de generación de energía (Hernández, 2003).

4.1.2. Enfoque de investigación

El presente trabajo tuvo un enfoque metodológico cuantitativo debido a que se midió la realidad del estudio que se investigó. El fenómeno en estudio fue la generación de energía eléctrica, por lo tanto, la energía generada fue considerada como la variable dependiente y la temperatura de la celda fue la variable independiente. Además, se analizó la causa-efecto del fenómeno de generación de energía múltiple para comprobar la hipótesis.

Debido a que el enfoque cuantitativo requiere de la recolección y análisis de datos, se tomaron como técnicas de recolección la observación y medición del fenómeno de estudio, basándose en un instrumento de medición regido por una guía de observación que permitió tener los datos necesarios para la realización del estudio.

Por lo tanto, el alcance de la investigación fue correlacional debido a que se buscó la relación existente entre las variables de estudio, se analizó y cuantificó el efecto de la variable independiente respecto a la dependiente. Además, se buscó un modelo matemático para la predicción de datos a través de un valor de causalidad.

4.1.3. Población Muestra y Muestreo

Dado que se construyó una planta piloto para el estudio del fenómeno de la generación de energía múltiple, fue seleccionada una muestra representativa de los

dispositivos para la generación de energía: eléctrica como los fotovoltaicos, térmica como los colectores solares y de combustible como las celdas de hidrogeno. Teniendo en cuenta que la población eran todo el conjunto de dispositivos de generación de energía eléctrica fotovoltaica, energía térmica y química. Por lo tanto, el método de muestreo utilizado fue no probabilístico, ya que solo se tomaron los equipos disponibles para el estudio. Pero cada equipo fue instrumentado para muestrear las variables dependiente e independiente.

4.1.4. Técnicas de recolección de datos

La técnica de recolección de datos en el proceso de investigación es sumamente importante, y debe considerarse como un procedimiento sistematizado para la obtención de la información, misma que será resguardada mediante el uso de un instrumento de recolección de datos estandarizado. Por lo tanto, en este proyecto de investigación se seleccionó como técnica: la observación y medición cuantitativa del fenómeno en estudio y como instrumento: una guía de observación en donde se especificaron las características que debían cumplir los datos recolectados a través de los dispositivos mecánicos de adquisición de datos.

La observación y medición cuantitativa del fenómeno fue para nosotros el pilar para el desarrollo del proyecto, debido a que a través de la observación y análisis de los datos fue posible establecer las relaciones existentes entre las variables dependientes e independientes. De esta manera se pudo desarrollar con base a la teoría fundamental el modelo de simulación que reprodujo el comportamiento del fenómeno de estudio. Los datos medidos fueron las condiciones climatológicas del sitio donde está la planta piloto; radiación solar, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento y temporalidad de

los datos. Para el caso de los dispositivos analizados fue la temperatura de la celda, temperatura ambiente a sus alrededores, corriente, voltaje y tipo de dispositivo.

4.1.5. Instrumento de recolección de datos

En cuanto al instrumento de recolección de datos se desarrolló una guía de observación que nos permitió establecer qué tipo de datos requeríamos observar, como deberían recolectarse los datos y en qué condiciones serían válidos para el proceso de análisis. El instrumento mecánico de medición utilizado fue un dispositivo de adquisición de datos diseñado y construido para este proyecto en particular, el cual permitió medir sistemáticamente las características de los dispositivos generadores de energía, y además se utilizó una estación meteorológica que se instaló en las cercanías de la planta piloto para la adquisición de los datos climatológicos.

La guía de observación se utilizó para validar los datos que fueron adquiridos con el dispositivo mecánico de muestreo. El dispositivo de adquisición de datos realizó la captura y almacenamiento de la radiación solar, temperatura ambiente, temperatura de celda, corriente, voltaje, velocidad y dirección de viento, además de la escala de temporalidad de los datos. Donde la frecuencia de muestreo fue de 0.016 Hz, es decir, un dato cada minuto.

Teniendo en cuenta que los datos de medición del fenómeno debían ser confiables y válidos, se consideró la medida de estabilidad para determinar la confiabilidad y correlación de los datos adquiridos. Por lo tanto, la validez de los datos se obtuvo al asegurarse que los instrumentos de medición del dispositivo de adquisición estuvieran calibrados, considerando que la medición del fenómeno de estudio fue directa.

4.1.6. Técnicas de procesamiento de datos

La técnica que se utilizó para el procesamiento de la información, validación de los datos muestreados y el desarrollo de los resultados del modelo de simulación fue la estadística descriptiva. Se consideró el uso de esta técnica porque a través de un conjunto de procedimientos estandarizados es posible presentar masas de datos a través de tablas y gráficas, además se calcularon parámetros estadísticos sobre ese conjunto de datos. Es decir, nos permitió describir a las variables del fenómeno de estudio de una forma cuantitativa (Rendon,2016).

La estadística descriptiva nos permitió medir la tendencia y la variabilidad de los datos utilizados como muestra para el análisis del fenómeno de estudio. Por ejemplo, el uso de la desviación estándar en la medición nos permitió determinar el margen de error que tenían los datos experimentales recolectados. Entonces al realizar el análisis de los indicadores pudimos observar y considerar los valores significativos cuando éstos estaban más allá de dos desviaciones estándar (Rendon,2016). Un indicador bastante importante fue la raíz del error cuadrático medio ya que es la forma de medir la diferencia existente entre los valores estimados por un modelo y los observados. Pero hay que recordar que pueden considerarse como residuos cuando se calculan con la muestra de la estimación o

pueden denominarse errores de predicción si se usan con otra muestra. Además, si se obtiene un valor de cero puede entenderse como un ajuste perfecto, entonces el tener un valor lo más bajo posible era determinante en el estudio. (Hyndman y Koehler,2006)

Otra medida utilizada fue el error cuadrático medio ya que, al considerarse como una función de riesgo, estima la diferencia entre el modelo y el valor real por efecto de la aleatoriedad (Bermejo y Cabestany, 2001). Finalmente, otro indicador importante fue el error porcentual absoluto medio, ya que este es un indicador del desempeño del pronóstico y mide el tamaño del error absoluto en porcentaje (Myttenaere,2015).

4.1.7. Herramientas de procesamiento de datos

En este trabajo de investigación se utilizaron herramientas de cómputo como lo fue el software MatLab (2017) para el procesamiento de datos, modelado y simulación, SOLIDWORKS (2017) para el diseño de la planta piloto, WeatherLink 6.0.4 para la adquisición de los datos climatológicos, Arduino (2017) para la adquisición de datos de los dispositivos generadores de energía.

El hardware que se utilizó en el proyecto fue: sensores de temperatura, sensores de corriente DC, sensores de voltaje DC, sensor de radiación solar, tarjeta de adquisición de datos Arduino Mega 2560 y circuitos electrónicos de propio diseño. La computadora donde se realizó la simulación y procesamiento de datos fue una Desktop-Inspiron 5567 con un procesador Intel-Corei7-7500U, CPU a 2.9 GHz, 8.00 GB RAM y sistema operativo Windows 10 de 64 bits.

4.2. Fase experimental

El diseño de la serie de experimentos en ésta investigación se enfatizó en el desarrollo del modelo de simulación del comportamiento multifísico del SHCT-FV-HHO. A través de los datos obtenidos de la planta piloto en donde se caracterizó una serie de equipos de generación de energía. Es decir, un conjunto de paneles fotovoltaicos, un colector solar y un par de celdas de Hidrogeno. Los datos recolectados de los equipos de generación de energía permitieron obtener las características de causa-efecto del proceso de generación de energía en el sistema híbrido y así poder determinar las condiciones del comportamiento multifísico para construir el modelo matemático del sistema híbrido triangulando la información observada y el fundamento teórico de los sistemas híbridos.

Este modelo logro evaluar también los mecanismos de transferencia de calor en el sistema, y se observó sistemáticamente el proceso de conducción desde la parte trasera del panel hasta el fluido de trabajo en el intercambiador de calor. Además, se evaluó con el modelo el comportamiento de la temperatura en la celda fotovoltaica y así se pudo cuantificar la cantidad de calor generada a través del SHCT-FV-HHO.

Por lo tanto, el diseño de experimento propuesto se realizó en tres fases. Fase uno fue el modelado del SHCT-FV-HHO en estado estacionario, fase dos fue el desarrollo del modelo dinámico del SHCT-FV-HHO y la fase tres fue el análisis de los resultados de cada modelo y la prueba de hipótesis. Se tuvo lugar una etapa de diseño en donde se hizo la selección de la muestra para el desarrollo del experimento. Las variables recolectadas en la investigación fueron la radiación solar bajo un ángulo de inclinación I_T para Ciudad

Juárez Chihuahua y lo observado en la estación meteorológica, la velocidad de viento y temperatura ambiente en el mismo periodo de tiempo para la localidad en cuestión.

La fase uno se desarrolló en tres etapas; la etapa uno fue el desarrollo del modelo del SHCT-FV-HHO en estado estacionario, es decir se enfatizó el análisis del mecanismo de transferencia de calor por conducción desde la placa absorbidora hasta el fluido de trabajo. Considerando a la temperatura de la celda como una condición de frontera a temperatura constante. La etapa dos fue la discretización del modelo para determinar el comportamiento de la evolución de la temperatura y la dirección del flujo de calor en el modelo. Así, en la etapa tres se realizó la validación a través de un análisis de sensibilidad.

En forma análoga la fase dos se realizó en tres etapas, primero se desarrolló el modelo dinámico del SHCT-FV-HHO y se analizó la transferencia de calor por conducción con generación de calor y en estado transitorio. Por lo tanto, la celda fotovoltaica se considera como un generador de calor. Posteriormente se evaluó el modelo dinámico de forma análoga a la fase 1 para determinar el comportamiento de la temperatura y la dirección del flujo de calor en el modelo, y validar el sistema a través del análisis de sensibilidad.

Finalmente, en la fase tres se validaron los dos modelos propuestos del SHCT-FV-HHO. Esta fase incluye el análisis de resultados y la prueba de hipótesis de investigación. El algoritmo de simulación se describe en forma sintética a partir del diagrama de flujo de la Figura 4.1.

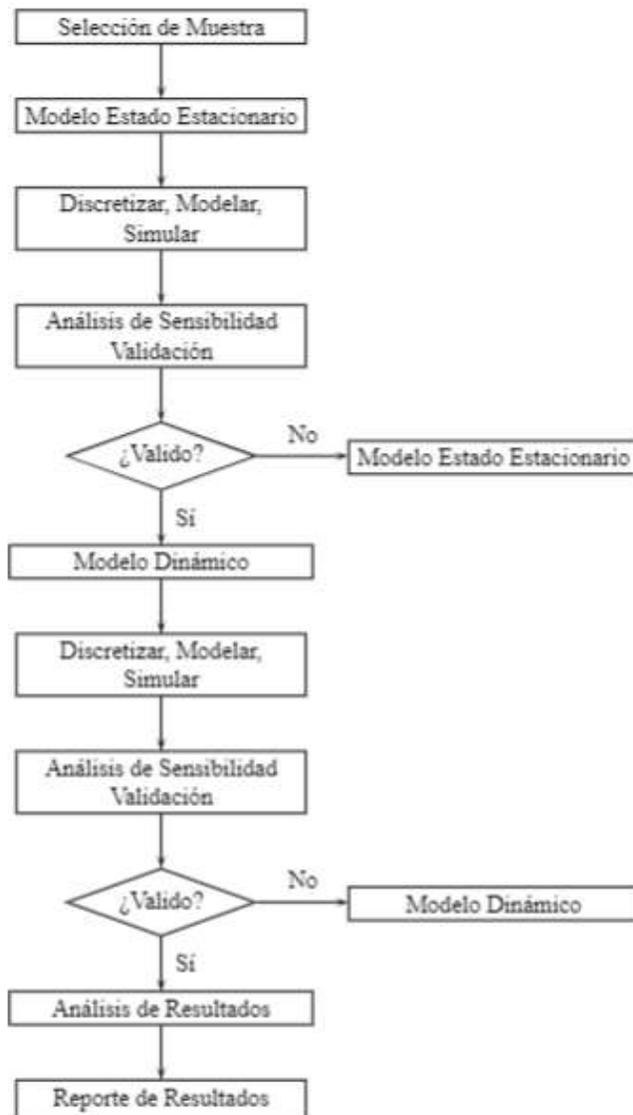


Figura 4.1 “Algoritmo de simulación Estacionario y Dinámico”

5. DESARROLLO

En esta sección se presentan las acciones realizadas con base a la metodología expuesta para el desarrollo del proyecto de investigación. Como primer punto se describe el proceso de diseño e implementación de la planta piloto, posterior a eso se enuncia el procedimiento seguido para la validación del modelo en estado estacionario; contemplando desde la fase de desarrollo, simulación y validación. Bajo la misma secuencia se trata el desarrollo del modelo dinámico del sistema híbrido, y para finalizar se describe el desarrollo de la metodología de análisis multifísica del sistema híbrido.

5.1. Planta Piloto

Las plantas piloto son vitales en la generación de conocimiento y experiencia para fundamentar la toma de decisiones en el diseño de procesos. Aunado a esto y con el creciente desarrollo tecnológico, las técnicas como modelación y simulación han sido parte del nuevo método para la generación de conocimiento y desarrollo de investigación cuasiexperimental. Por lo tanto, se sabe que con una adecuada relación entre la modelación matemática y la experimentación en instalaciones de tipo piloto es posible desarrollar investigación efectiva para el know-how del proceso tecnológico aplicado al diseño de nuevos sistemas complejos (Pino-García, 1997).

En lo esencial se ve reflejada la necesidad de una planta piloto que tenga un diseño efectivo, de carácter multipropósito y con la flexibilidad necesaria para el estudio de

procesos diversos. Es importante reconocer que una planta piloto permite obtener la información experimental necesaria para precisar los balances de materia y energía en cualquier proceso en estudio. Por lo tanto, la planta piloto según refiere (Díaz, 1996) es aquella “unidad a pequeña escala que contempla los pasos más importantes de un proceso que requiere la investigación experimental imprescindible para el diseño de selección de una unidad futura”.

Dentro de este orden de ideas, es necesario tener en cuenta que una buena planta piloto realmente constituye una escala baja de una planta industrial y no un experimento de laboratorio de alta gama. Así mismo es importante saber que “el escalamiento es el proceso mediante el cual se desarrollan los criterios y las reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas para llevar de un tamaño dado a otro mayor o menor una operación o un proceso”, tal como lo define (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008). Entonces, un paso fundamental en el escalamiento consiste en pasar los datos obtenidos en la planta piloto a un modelo. Por lo tanto, el uso de plantas de proceso de escala piloto se fundamenta para predecir el comportamiento de una planta comercial operando a las mismas condiciones, y replicarlo así a través de un modelo de simulación.

Los modelos pueden clasificarse como: modelo fenomenológico donde el razonamiento teórico genera las condiciones de referencia desde el punto de vista microscópico, el modelo empírico se postula sin una base teórica y se ajusta a través de la interacción de los datos en un intervalo de experimentación, el modelo de similaridad se desarrolla a partir del análisis de similitudes respecto a diversas analogías físicas del tipo térmico, mecánico, geométrico y químico. Por lo tanto, el tipo de modelo de escalamiento dependerá del tipo de proceso (Díaz, 1996).

Sin duda, es necesario considerar que la similaridad denota la relación que existe entre sistemas físicos y el tamaño de estos, además es básico en el escalamiento de procesos físicos y químicos. Por esta misma razón se enuncian las definiciones de las similaridades

geométrica, mecánica y térmica. Entonces dos cuerpos son geoméricamente similares cuando para todo punto en el primer cuerpo existe un punto en el segundo, y no es necesario que la relación de escalamiento sea la misma en cada uno de los ejes. La similaridad mecánica puede relacionarse bajo condiciones de la estática, cinemática y dinámica. Primero, la similaridad estática en dos cuerpos sólidos sujetos a esfuerzos constantes se considera como cuerpos geoméricamente similares son estáticamente similares cuando al estar sujeto a esfuerzos constantes sus deformaciones relativas son de tal forma que son geoméricamente similares.

De este modo, la similaridad cinemática es aplicada a sólidos y fluidos, se consideran tres coordenadas espaciales además de la dimensión del tiempo. Donde los tiempos se miden desde un criterio arbitrario para cada sistema y se definen como aquellos para los cuales T es constante. Entonces, un sistema en movimiento con similaridad geométrica está en similaridad cinemática cuando partículas correspondientes trazan trayectorias geométricas correspondientes en intervalos de tiempo también correspondientes. Por lo tanto, la similaridad dinámica está relacionada con las fuerzas que aceleran o retardan el movimiento de las masas dentro de sistemas dinámicos, sistemas en movimiento con similaridad geométrica son dinámicamente similares cuando las relaciones de todas las fuerzas correspondientes son iguales.

Finalmente, la similaridad térmica involucra a los sistemas en los cuales se presenta flujo de calor por lo que se introduce la dimensión de temperatura longitud fuerza y tiempo. Por lo tanto, los sistemas que presentan similaridad geométrica son térmicamente similares cuando la diferencia de temperatura conserva una relación constante entre ellos y cuando los sistemas están en movimiento son sistemáticamente similares.

5.1.1. Diseño de Sistema PVT-HHO

El diseño de la planta piloto se realizó a través de los requerimientos técnicos y tecnológicos para la construcción del sistema híbrido térmico-fotovoltaico-HHO. Dentro de este marco se contemplaron la localización de la planta piloto, las variables críticas a medir, las variables de monitoreo, las características mecánicas de la estructura de soporte, las características de los equipos fotovoltaicos, celda de Hidrógeno, estación meteorológica y colector solar, además de algunos otros aspectos no críticos del sistema. En la Tabla 5.1 se enuncian los requerimientos técnicos de los equipos que conforman a la planta piloto, en la Figura 5.1 se observa el concepto del sistema y en la Figura 5.2 se observa el diseño en software CAD de la planta piloto.

Tabla 5.1 Requerimientos Planta Piloto

Equipo	Características	Capacidad
Electrolizador Alcalino	No. de Celdas	24
	Corriente	5 A
	HHO Generado	6 L
	Tanque recirculación	1.5 L
Colector Solar	Área de apertura	1.57 m ²
	Placa absorbadora	Aluminio-Cobre- Cromo/Negro
	Capacidad volumétrica	1.5 L
	Termotanque	150 L
	Aislamiento térmico	Poliuretano
Celda Fotovoltaica	Tipo de Celda	Policristalino 28 Celdas
	Corriente MP	8.25 A
	Voltaje MP	15.68 V
	Potencia M	130 W
	Tipo de Celda	Monocristalino 28 Celdas
	Corriente MP	9.38 A
	Voltaje MP	15.6 V
Potencia M	150 W	

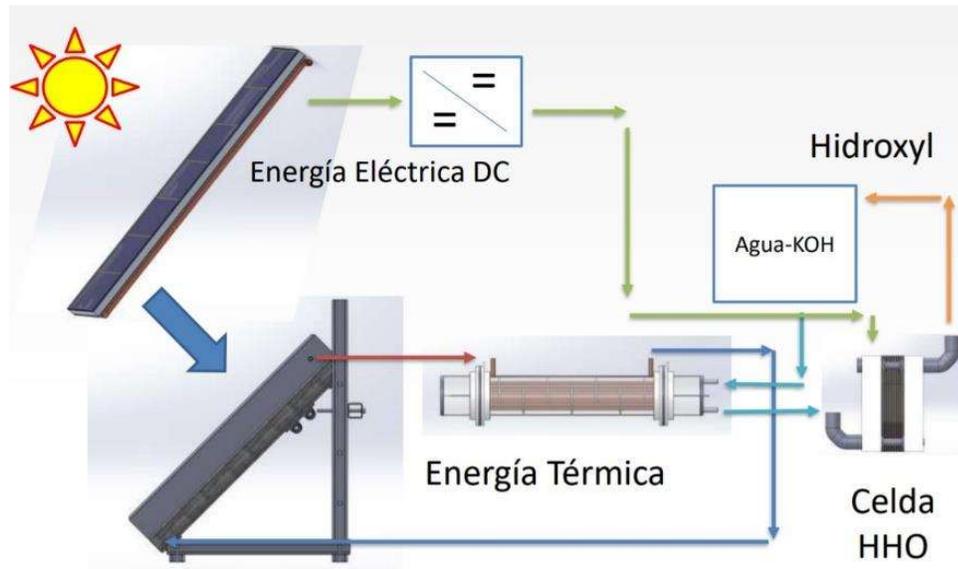


Figura 5.1 “Concepto planta piloto sistema hibrido PVT-HHO”

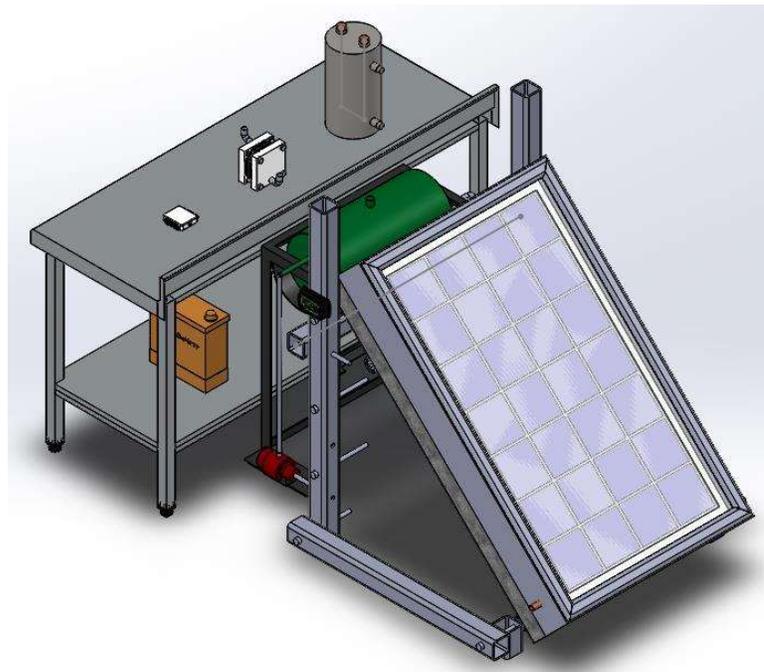


Figura 5.2 “Diseño planta piloto sistema hibrido PVT-HHO en CAD”

La planta piloto se diseñó con el propósito de monitorear el comportamiento dinámico del sistema híbrido, es decir determinar el comportamiento de la generación de energía eléctrica, térmica y combustible hidrogeno. El monitoreo del sistema fue posible a través del diseño de un sistema de adquisición de datos, ahora bien, la temperatura de la celda fotovoltaica se cuantifico a través del uso de termopares tipo k principalmente para el monitoreo del comportamiento térmico en el panel fotovoltaico y colector solar. Por otra parte, se utilizaron un sensor de corriente y uno de voltaje para el monitoreo de la generación de energía eléctrica en el panel fotovoltaico, y finalmente se utilizó también un sensor de flujo para el monitoreo de la generación de combustible hidrógeno. En la Tabla 5.2 se enuncian las características de operación de cada sensor utilizado y en la Figura 5.3 se observa el sistema de adquisición instalado.

Tabla 5.2 Características de operación sistema de adquisición de datos

Equipo	Características	Capacidad
Sensor	Tipo de sensor	Termopar tipo K
Temperatura	Rango de medición	-20 °C a 300 °C
	Sensibilidad	40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
	Precisión	$\pm 2.2\ ^\circ\text{C}$
Sensor	Tipo de sensor	Corriente por efecto Hall
Corriente	Rango de medición	-20 A a 20 A
	Sensibilidad	100 mV/A
	Precisión	$\pm 1.5\ \%$
Sensor	Tipo de sensor	Piranómetro-Radiación Global
Radiación	Rango de medición	0 a 1800 W/m^2
Solar	Sensibilidad	1.67 mV/Wm^2
	Precisión	$\pm 5\ \%$
Sensor	Tipo de sensor	Divisor de voltaje
Voltaje	Rango de medición	0 V a 5 V
	Sensibilidad	7.6369
	Precisión	$\pm 5\ \%$

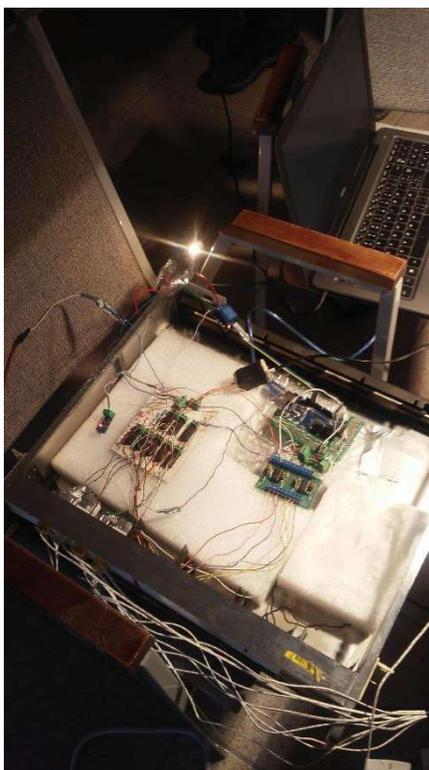


Figura 5.3 “Sistema de Adquisición de Datos”

5.1.2. Caracterización, recolección y procesamiento de datos del sistema PVT-HHO

Todos los datos monitoreados fueron observados y analizados, y en conjunto con el marco teórico se formuló el modelo en estado estacionario del sistema fotovoltaico y el del sistema híbrido. A su vez los datos permitieron formular y establecer el modelo dinámico del sistema fotovoltaico y del sistema híbrido. Sin embargo, los modelos en estado estacionario y dinámico del sistema híbrido térmico-fotovoltaico-HHO se formularon a través de las ecuaciones de gobierno del proceso de generación y conversión

de energía. Por lo tanto, estos modelos matemáticos se utilizaron para desarrollar el algoritmo de simulación del sistema híbrido a través del software Matlab-Simulink.

Como primer punto, la planta piloto se instaló en el Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, en el espacio asignado para el laboratorio experimental de energía solar aplicada. En este espacio se instalaron 4 paneles fotovoltaicos de diferente tecnología y potencia, mismos que se mantienen bajo monitoreo, además de un par de colectores solares de agua y la planta piloto del sistema híbrido térmico-fotovoltaico-HHO. La localización geográfica del laboratorio experimental de energía solar aplicada es 31.7183 grados de latitud norte, 106.4217 grados longitud oeste y una altitud de 1127 metros sobre el nivel del mar. El espacio del laboratorio es a cielo abierto, con un área aproximada de 75 m^2 , sin sombras provocadas por los edificios circunvecinos, por lo tanto la radiación solar incide directo en el espacio de trabajo. En la Figura 5.4 se muestra la localización geográfica del laboratorio experimental de energía solar aplicada, en la Figura 5.5 se muestra el equipo solar instalado y en la Figura 5.6 se muestra la planta piloto instalada.

Debe señalarse que la estructura del sistema híbrido se diseñó y manufacturo en el laboratorio de metal mecánica del mismo instituto, considerando las dimensiones del colector solar y el panel fotovoltaico que en conjunto tienen un área de colección de 1.57 m^2 , en la Figura 5.7 se muestra el área de colección del sistema híbrido. El sistema híbrido térmico-fotovoltaico tienen un área total de trabajo de 2.2 m^2 y una altura de 0.9 m, donde la capacidad del tanque de almacenamiento del sistema híbrido es de 150 litros y el circuito hidráulico se construyó con manguera flexible bajo los requerimientos del termo tanque, en la Figura 5.8 se observa el sistema híbrido térmico-fotovoltaico. Además, se construyó una mesa de trabajo con un área aproximada de 0.55 m^2 en donde se instalaron el sistema de adquisición de datos, el electrolizador alcalino y una batería de gel solar recargable. Así pues, se colocó sobre la mesa de trabajo el tanque de almacenamiento de agua del

electrolizador alcalino que tiene una capacidad de 1.5 litros mismo que se construyó en base a la necesidad de la celda electrolizadora alcalina de 24 placas. Al igual que el tanque sobre la mesa de trabajo se instaló el electrolizador alcalino junto con sus conexiones eléctricas e hidráulicas. Finalmente, sobre la mesa de trabajo se tiene también una batería de gel solar como sistema de respaldo para el electrolizador alcalino y el almacenamiento de energía eléctrica del sistema híbrido, en la Figura 5.9 se observa la planta piloto instalada.



Figura 5.4 “Localización Laboratorio experimental de energía solar”



Figura 5.5 “Equipo solar instalado”

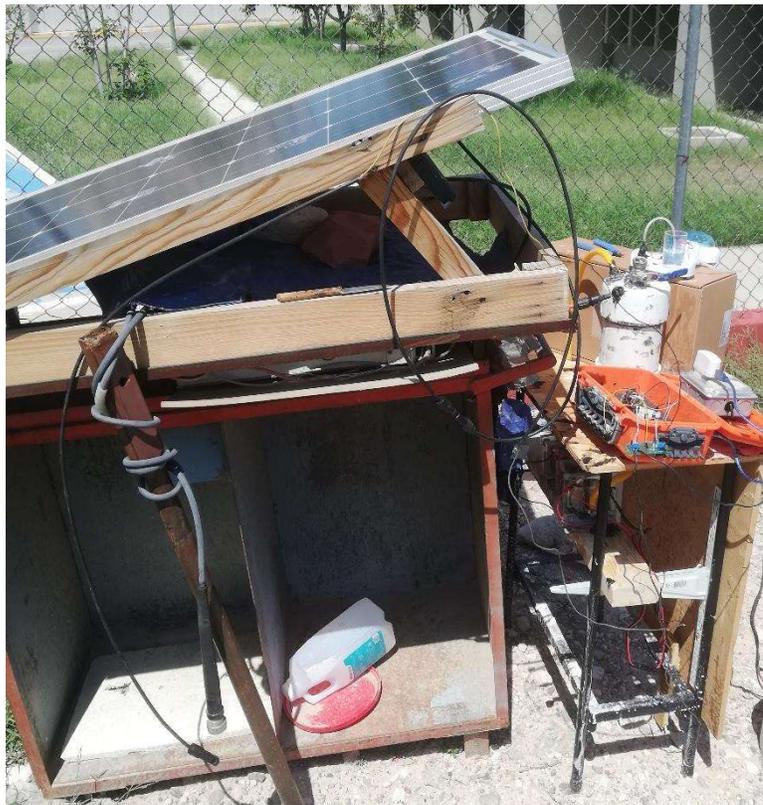


Figura 5.6 “Planta piloto instalada”



Figura 5.7 “Área de colección del sistema híbrido”



Figura 5.8 “Sistema híbrido térmico-fotovoltaico”

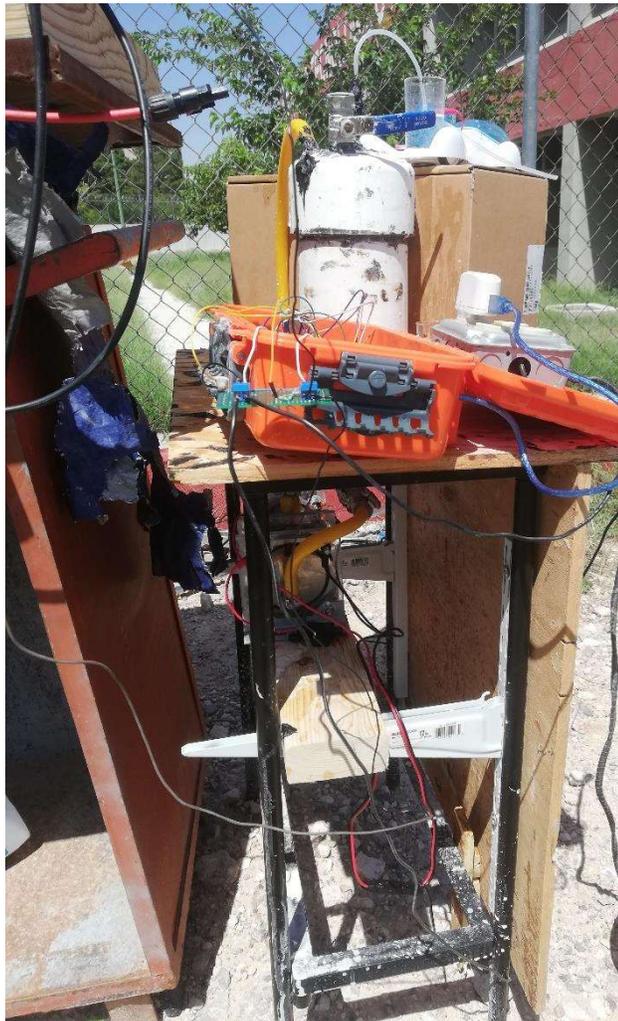


Figura 5.9 “Planta Piloto PVT-HHO”

Es por ello que el sistema de adquisición de datos fue diseñado respecto a las necesidades del proyecto, por ende, se desarrolló un sistema aislado para el almacenamiento de los datos muestreados a través de una memoria externa de tipo SD, que está integrada en el hardware como se muestra en la Figura 5.10. Así mismo, el diseño electrónico y mecánico del sistema de adquisición de datos fue propio, al igual que el programa para el control del monitoreo en donde se desarrolló una interfaz gráfica

multipropósito, como se observa en la Figura 5.11. Adicional al sistema de adquisición de datos, se tiene una estación meteorológica que monitorea las condiciones climatológicas y la información se almacena y trata a través del software de la estación meteorológica como se observa en la Figura 5.12.

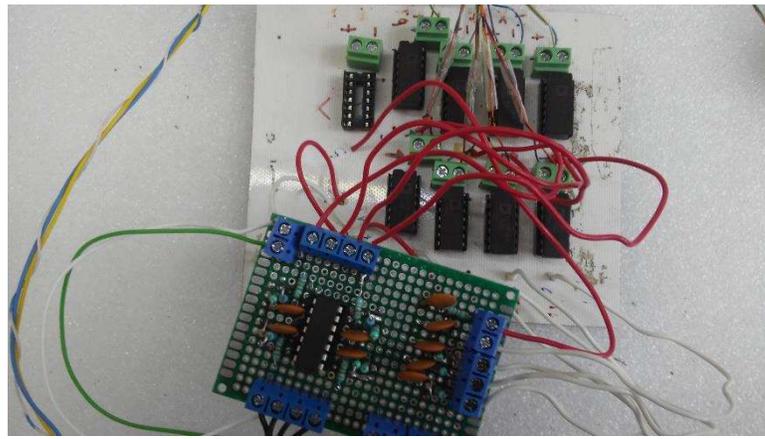


Figura 5.10 “Hardware del sistema de adquisición de datos”

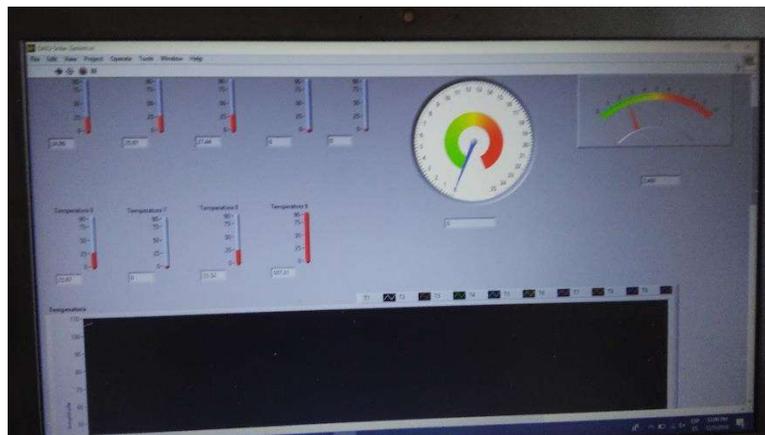


Figura 5.11 “Interfaz gráfica multipropósito”



Figura 5.12 “Estación meteorológica”

De esta manera, las conexiones eléctricas del sistema completo se diseñaron y manufacturaron a necesidad del proyecto. Así pues, se tiene conectado el sistema fotovoltaico a una carga eléctrica; misma que es multipropósito ya que puede tener un sistema de iluminación que cumple la función de carga eléctrica, o al electrolizador alcalino que se alimenta de flujo de energía generado por el sistema. Las conexiones fueron distribuidas a través de un controlador de carga y una batería de gel solar, considerando las normas oficiales mexicanas para las conexiones eléctricas. En particular, en la Figura 5.13 se muestra las conexiones eléctricas entre el sistema fotovoltaico y el sistema de almacenamiento de energía de respaldo, además de las conexiones entre el sistema y el electrolizador alcalino.



Figura 5.13 “Conexiones eléctricas sistema PVT-HHO”

Uno de los componentes más importantes de la planta piloto es el sistema híbrido térmico-fotovoltaico-HHO y es por lo que se deben enunciar en forma explícita todas sus características. Este sistema quedó conformado por un colector solar de agua con una capacidad de 150 litros de almacenamiento y un área de apertura de 1.57 m^2 , mismo que fue adaptado como el sistema de captación de calor residual del proceso de generación de energía eléctrica. Así mismo, se cuenta con un panel fotovoltaico del tipo monocristalino de 150 W de potencia con un área de apertura de 0.79 m^2 y con un panel fotovoltaico del tipo policristalino de 130 W de potencia con un área de apertura de 0.79 m^2 ; el sistema

permite intercambiar el panel fotovoltaico debido a que se tienen dos tipos de tecnologías la monocristalina y la policristalina. Además, se conectó un electrolizador alcalino de 24 placas a la potencia eléctrica entregada por el panel fotovoltaico; en donde se contemplan dos opciones de operación: una de forma aislada y otra en línea. Es decir, el electrolizador puede evaluarse mediante un día de operación normal de generación de energía del sistema híbrido, en donde electrolizador alcalino se convierte en la carga eléctrica. Por otro lado, el electrolizador puede evaluarse mediante un día de operación normal utilizando el sistema de respaldo de energía con la batería de gel solar.

Por lo que se refiere, al procesamiento y análisis de la información se llevó a cabo mediante el uso del software Matlab. Aquí se desarrolló un algoritmo para el tratamiento de los datos; principalmente se ordenaron los datos adquiridos, se implementó el filtrado de la información para suprimir ruido externo, se obtuvo la estadística descriptiva de las variables de monitoreo y se prepararon los datos para convertirlos en entradas del modelo de simulación. Finalmente, se estableció que la planta piloto tiene la capacidad de generar la información necesaria para la construcción de un modelo de simulación a través de redes neuronales para la predicción del comportamiento del sistema híbrido térmico-fotovoltaico-HHO mediante simulación.

5.2. Modelo en estado estacionario

En la actualidad es tan natural hablar del uso de la energía solar, las aplicaciones comerciales y los incentivos económicos que se otorgan por el uso de esta, pero a la vez es importante saber cómo a través de su uso se reducen las emisiones de carbono. Lo contradictorio a todo esto es que persiste el alto costo, la baja eficiencia y hasta cierto punto llegan a ser inalcanzables para la sociedad. Entonces, ¿Qué sabemos de la energía solar?

5.2.1. Modelo térmico y eléctrico de Panel Fotovoltaico

Entonces, la base del modelo que a continuación se describe es referida a los diversos mecanismos de transferencia de calor en el sistema, es decir calor absorbido y cedido por efecto de la conducción, convección y radiación en el sistema. Como parte medular se consideró que la conversión de energía en el sistema PV-T-HHO depende de la radiación solar transferida, las condiciones climatológicas que producen pérdidas por convección y radiación, así como el conjunto de celda fotovoltaica y colector térmico que conducen la energía para generar energía eléctrica y calor de proceso.

El primer elemento de análisis fue el modelo acoplado entre la celda fotovoltaica y el sistema aletado del tipo colector placa plana como se muestra en la Figura 5.14. Donde se considera que ingresa un flux de calor completamente normal al sistema PV-T-HHO, el cual transfiere la energía al atravesarlo y por ende es posible analizarlo a través de un balance de energía. Por lo tanto, se modelo una sección simétrica en dos dimensiones, considerando que la temperatura es la variable que rige el comportamiento del sistema y que esta variable es la esencia del análisis energético.

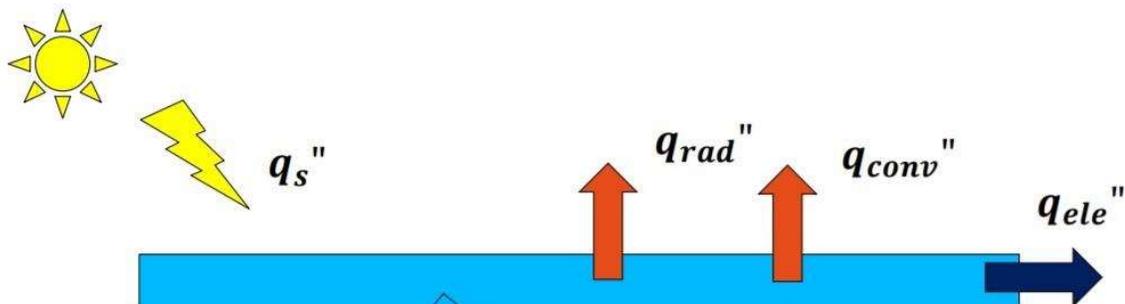


Figura 5.14 “Modelo de simulación estacionaria”

En otras palabras, el balance de energía de la celda fotovoltaica se sintetizó en la energía que entra al sistema considerada como energía solar absorbida, misma que fue convertida en energía eléctrica y energía térmica generada, como referencia se plantea la ecuación 5.1.

$$\frac{\text{Energía Solar}}{\text{Absorbida}} = \frac{\text{Energía Eléctrica}}{\text{Generada}} + \frac{\text{Energía Térmica}}{\text{Generada}} \quad (5.1)$$

El modelo se fundamentó a través de un balance de la densidad de flujo de energía en el sistema, considerando la densidad de flujo de energía solar q_s'' como la cantidad entrante, la densidad de flujo de energía eléctrica producida q_E'' y la densidad de flujo de energía térmica q_{Th}'' como la saliente. La ecuación 5.2 describe la conceptualización del balance de la densidad de flujo de energía en estado estacionario.

$$q_s'' = q_E'' + q_{Th}'' \quad (5.2)$$

Dicho de otro modo, el modelo del balance de la densidad de flujo energía queda en función de las variables y parámetros que constituyen al sistema. Es decir, la irradiancia solar G_T , las características ópticas del sistema ($\tau \alpha$), eficiencia eléctrica de la celda η_c , la temperatura de superficie del sistema, del fluido y del ambiente, así como las constantes de proporcionalidad en cada mecanismo de transferencia de calor. La ecuación 5.3 describe al modelo de balance en función de eficiencia eléctrica y óptica de la celda fotovoltaica, en donde q_{lost}'' representa a la densidad de flujo de energía térmica.

$$(\tau\alpha)G_T = (\tau\alpha)G_T\eta_c + q_{lost}'' \quad (5.3)$$

Desde la perspectiva más general, el balance de energía en estado estacionario de cualquier sistema relaciona la energía que entra y la energía que sale del mismo, como se observa en la ecuación 5.4 donde se representa de la forma más sintética un balance de energía. Para nuestro caso en particular, la energía de entrada es representada por la energía solar entrante descrita en función de la irradiancia solar G_T sobre el plano del sistema, mismo que puede ser inclinado u horizontal, y el producto de la transmitancia (τ) y absorptancia (α) de la celda fotovoltaica. La energía entrante al sistema o también conocida como la densidad de flujo de energía solar q_s'' , se denota en la ecuación 5.5.

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0 \quad (5.4)$$

$$\dot{E}_{in} = q_s'' = \tau \alpha G_T \quad (5.5)$$

En este sentido se comprende, que la energía eléctrica producida o también conocida como la densidad de flujo de energía eléctrica producida q_E'' se establece en función de la irradiancia solar G_T sobre el plano del sistema, el producto de la transmitancia (τ) y absorptancia (α) de la celda fotovoltaica, además de la eficiencia eléctrica de la celda (η_c). Es importante mencionar que la eficiencia eléctrica de la celda fotovoltaica (η_c) puede quedar en función de la temperatura de superficie del panel (T_c). La densidad de flujo de energía eléctrica producida se describe en la ecuación 5.6.

$$q_E'' = (\tau\alpha)G_T (\eta_c) \quad (5.6)$$

Cabe considerar, por otra parte que la energía térmica perdida o también conocida como la densidad de flujo de energía térmica q_{Th}'' representa la cantidad de energía cedida al ambiente por el sistema en forma de calor, que se describe en la ecuación 5.7. Por lo tanto, los mecanismos de transferencia de calor considerados son convección y radiación, los cuales están en función de la temperatura de superficie de la celda (T_c), temperatura ambiente (T_a), temperatura de cielo (T_{sky}), además de sus coeficientes de transferencia de calor (h_c) y ($\epsilon \sigma$). En la ecuación 5.8 se describe el calor perdido por convección y en la ecuación 5.9 el calor perdido por radiación.

$$q_{lost}'' = q_{Th}'' = q_{rad}'' + q_{conv}'' \quad (5.7)$$

$$q_{conv}'' = h_c (T_c - T_a) \quad (5.8)$$

$$q_{rad}'' = \epsilon \sigma (T_c^4 - T_a^4) \quad (5.9)$$

De este modo, es posible describir el modelo del sistema en cuestión bajo el énfasis de la densidad de flujo de energía, y el cual queda en función de la temperatura de la celda (T_c). Por lo tanto, puede considerarse a esta representación como el modelo térmico del sistema fotovoltaico. En la ecuación 5.10 se describe el modelo térmico del sistema en su forma explícita.

$$q_s'' = q_{rad}'' + q_{conv}'' + q_{elec}'' \quad (5.10)$$

Finalmente, el modelo eléctrico del panel fotovoltaico puede considerarse como el más representativo, aquel descrito en la sección 3 con la ecuación 3.15 y denominado como el modelo diodo simple.

5.2.2. Modelo térmico del sistema híbrido

El sistema que fue desarrollado para este trabajo consiste en el ensamble de una celda fotovoltaica con una placa absorbadora, la cual permite refrigerar el módulo fotovoltaico a través del paso de un flujo de fluido. En este trabajo se describe el modelo matemático del sistema híbrido colector celda fotovoltaica, el cual permite evaluar el comportamiento térmico y eléctrico del sistema híbrido. Además, el mismo modelo permite analizar la sensibilidad del sistema en función del fluido de trabajo y la geometría de la placa absorbadora. La conceptualización del modelo térmico del sistema híbrido se observa en la Figura 5.15.

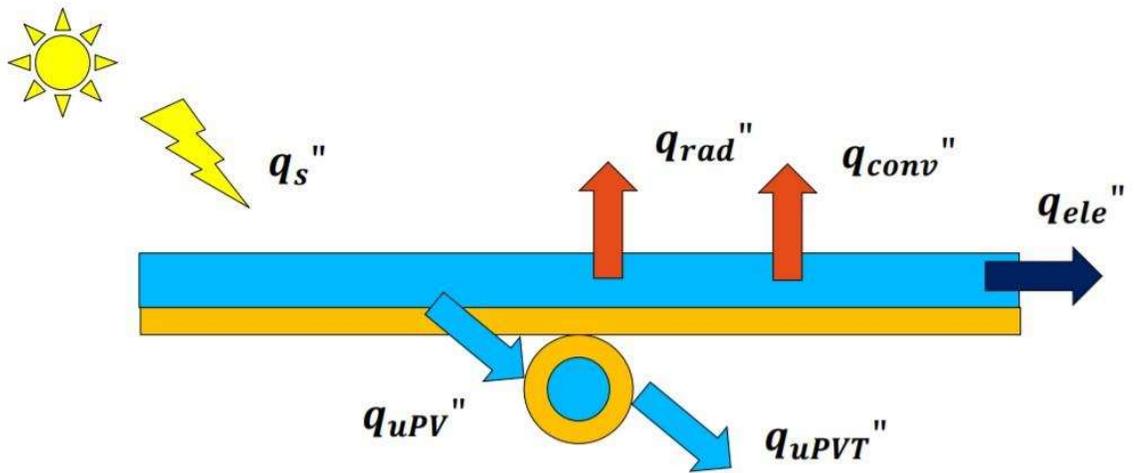


Figura 5.15 “Modelo de simulación estacionaria PVT”

El modelo matemático se desarrolló a partir de un balance de energía considerando la primera ley de la termodinámica, así como de la correlación de los mecanismos de transferencia de calor en el sistema en estado estacionario. El sistema híbrido tiene como entrada fija la intensidad de la radiación solar con respecto al plano de inclinación, la temperatura ambiente circundante al sistema, y la velocidad de viento promedio del medio circundante. Además de las entradas fijas es posible considerar como entrada: el caudal del fluido que pasa a través del colector, la geometría del sistema y el posicionamiento con respecto a la horizontal. Entonces las principales salidas del sistema son la potencia eléctrica producida, y el calor absorbido por la placa a través del fluido. En la Figura 5.16 se observa la relación intrínseca existente entre la cantidad de energía entrante al sistema y la evolución de la temperatura superficial del sistema, así como la temperatura del agua.

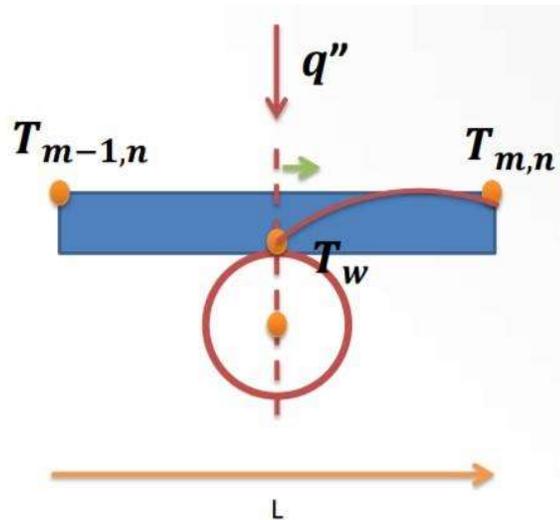


Figura 5.16 “Balance de energía de placa colectora”

El modelo matemático del sistema híbrido se describe en forma general a través de una analogía de resistencias térmicas, como se observa en la Figura 5.17. Donde el primer balance de energía se lleva a cabo en el módulo fotovoltaico. Aquí se considera que la energía entrante es la radiación solar efectiva (q_s''), y la energía saliente es la potencia eléctrica efectiva (q_{elec}''), calor perdido por convección (q_{conv}''), calor perdido por radiación (q_{rad}'') y el calor residual del sistema fotovoltaico es (q_{upv}''); donde las unidades del balance de energía se dan en unidad de potencia por unidad de área. En la Figura 5.18 se puede observar la representación de los flujos de energía.

El modelo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico en estado estacionario se basa en el modelo térmico del panel fotovoltaico descrito en la ecuación 5.10, pero se realiza una abstracción del modelo debido a que en el sistema híbrido es posible extraer calor a través del flujo de fluido en una placa absorbidora de calor. Por lo tanto, la ecuación 5.11 describe al modelo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico en estado estacionario.

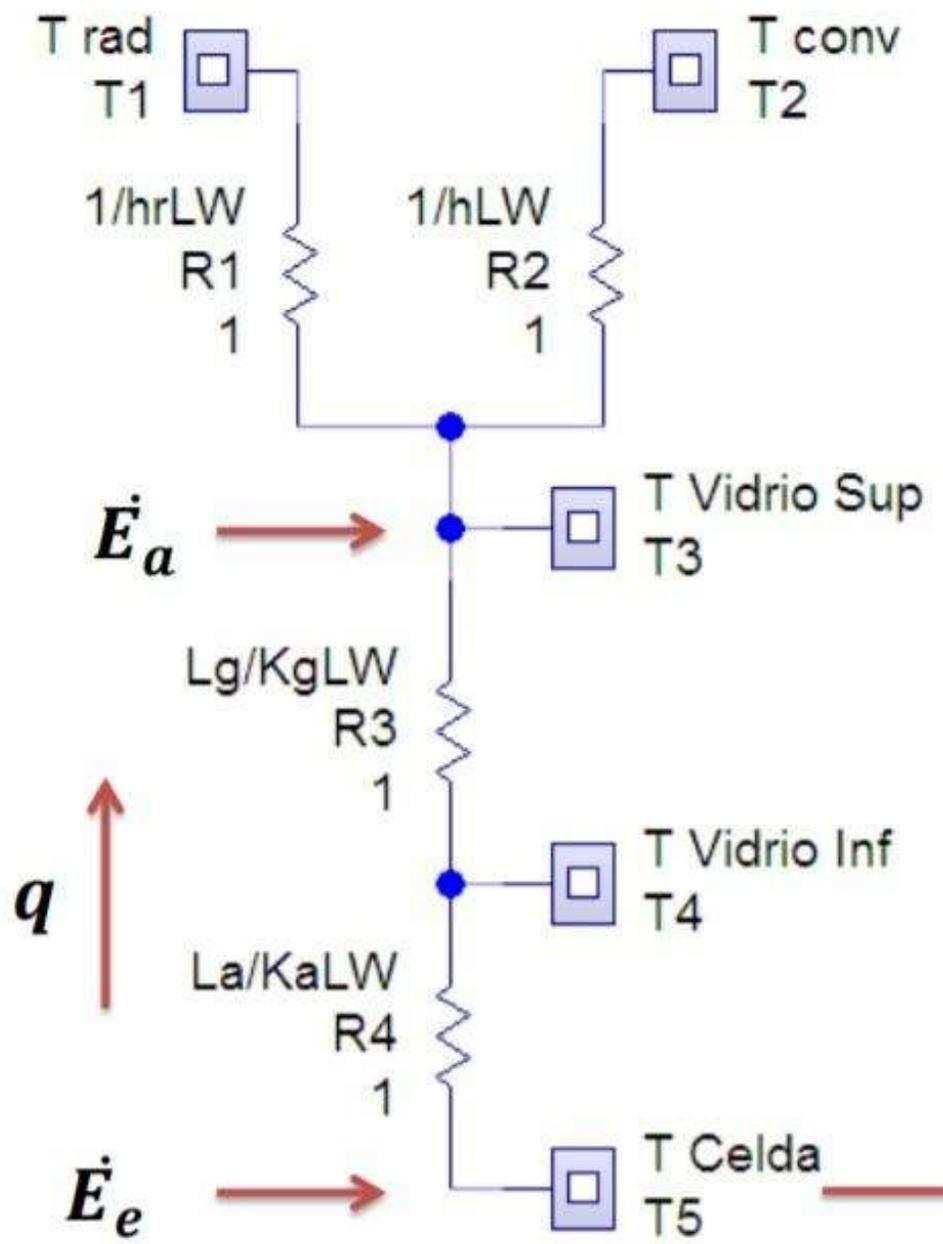


Figura 5.17 “Primer modelo de resistencias”

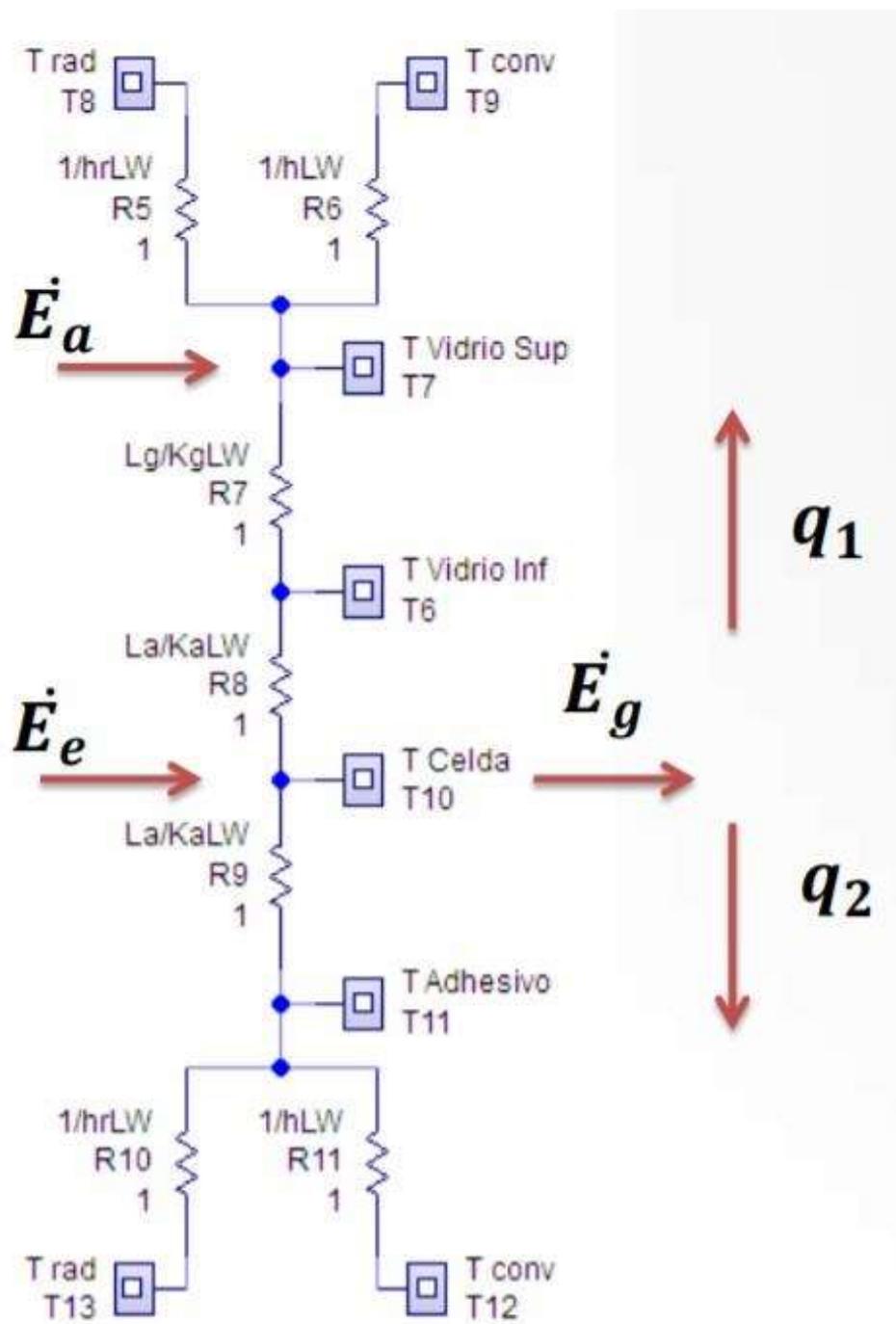


Figura 5.18 “Segundo modelo de resistencias”

$$q_s'' = q_{upv}'' + q_{rad}'' + q_{conv}'' + q_{elec}'' \quad (5.11)$$

donde el calor extraído por el flujo de fluido a través de la placa absorbadora de calor (q_{upv}''), representa el calor residual entre las pérdidas con el ambiente, la energía solar incidente y la generación de potencia eléctrica.

El segundo balance de energía se realiza en la placa absorbadora considerando que desde el panel fotovoltaico se obtiene un calor residual (q_{upv}''), el cual se transfiere al fluido a través de un intercambiador de calor del tipo sistema aletado, mejor conocido como colector de placa plana. En particular, para este sistema debe considerarse que en su desarrollo existe un factor de remoción de calor (Fr) y una mínima cantidad de pérdidas de energía por convección. Por lo tanto, este sistema absorbe el calor residual del módulo fotovoltaico y lo transfiere al fluido para tener un calor útil de proceso denominado (q_{uPVT}'') como se describe en la ecuación 5.12.

$$q_{uPVT}'' = Fr [q_{upv}'' - Up(T_1 - T_a)] \quad (5.12)$$

Entonces para ajustar el modelo y dejarlo en función de la temperatura se describe un modelo empírico lineal de la eficiencia del panel fotovoltaico ($\eta_{c,emp}$). El cual correlaciona la eficiencia eléctrica del panel con la temperatura alcanzada por la celda en operación normal de trabajo, como se describe en la ecuación 5.13.

$$\eta_{c,emp} = \eta_c = 0.553 - 0.001298675 T_c \quad (5.13)$$

Finalmente y adicional a este modelo se proporciona la ecuación 5.14 para ajustar la temperatura de la celda en base a la estimación del calor residual y útil de proceso posible a extraer del sistema y así obtener la temperatura de la celda calculada en base al modelo propuesto ($T_{c,c}$).

$$T_{c,c} = \frac{(q_{upv}'' - q_{uPVT}'')}{U_p} + T_a \quad (5.14)$$

El modelo requiere de un proceso iterativo para el ajuste y estimación de los parámetros dependientes de la temperatura de la celda, pero además requiere de los vectores y parámetros de entrada. Considerando que son dos sistemas independientes entre sí, pero acoplados para la formación de uno todo, el sistema será dependiente de los parámetros del módulo fotovoltaico y colector solar. Por lo tanto, el modelo deberá ser alimentado con los parámetros y vectores de entrada del panel fotovoltaico, colector y energía solar.

Para el caso de la celda fotovoltaica se requieren los parámetros constructivos del tipo de celda solar. Además, el algoritmo considera en su iteración el modelo diodo simple de una celda fotovoltaica, descrito en la sección 3 con la ecuación 3.15, para estimar sus parámetros y comportamiento en función de la radiación. Los parámetros que se estiman son corriente generada (I), voltaje desarrollado (V), potencia eléctrica (P) y eficiencia eléctrica (η_e).

En forma semejante se tiene embebido el modelo que establece los parámetros característicos del colector solar, es decir se estiman los coeficientes de pérdida por convección, radiación, factor de remoción a través de los parámetros constructivos y el coeficiente global de pérdidas (U_p). Por lo tanto, con estos parámetros es posible estimar el calor útil y la eficiencia térmica del sistema.

Para el análisis de la sensibilidad del algoritmo se permite modificar los parámetros constructivos del sistema híbrido, fluido de trabajo y vectores de entrada como irradiación y temperatura ambiente. A la entrada se tienen considerados algunos de los parámetros constructivos relacionados con el tipo de celda a evaluar (policristalino-monocristalino), área de colección, temperatura del fluido de trabajo, caudal de operación, los cuales son ingresados por el usuario.

Posterior al proceso de estimación del modelo matemático del sistema híbrido colector térmico-fotovoltaico. Se obtiene el análisis de rendimiento térmico del sistema híbrido en función del calor absorbido por el colector, descrito en la ecuación 5.15.

$$\eta_{th} = \frac{q_{uPVT}''}{q_s''} \quad (5.15)$$

Al igual que el rendimiento térmico estimado por el algoritmo, se obtiene el rendimiento eléctrico de la celda al ajustar la eficiencia eléctrica del panel fotovoltaico misma que es dependiente de la temperatura de la celda ajustada, descrita en la ecuación 5.13. Finalmente se obtiene el rendimiento global del sistema híbrido como la sumatoria de la eficiencia térmica y eléctrica, como se describe en la ecuación 5.16.

$$\eta_G = \eta_{th} + \eta_{c,emp} \quad (5.16)$$

A título ilustrativo, se indica a través de una secuencia de pasos el algoritmo de evaluación del modelo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico en estado estacionario, donde el proceso completo se muestra en el Anexo A.

1. – Proponer $T_{c,p}$ y resolver q''_{upv}

$$q''_{upv} = \tau \alpha G_T - (\tau \alpha) G_T (\eta_{c,emp}) - \epsilon \sigma (T_{c,p}^4 - T_{sky}^4) - h (T_{c,p} - T_a)$$

2. – Resolver q''_{uPVT}

$$q''_{uPVT} = F_R [q''_{upv} - U_p (T_{in} - T_a)]$$

3. – Calcular T_c y comparar $T_{c,p}$ propuesta

$$[T_c - T_a] = \frac{(q''_{uPV} - q''_{uPVT})}{U_p}$$

4. – Criterio de paro de algoritmo

$$[T_{cp} - T_c] < 1 K$$

VARIABLES Y PARÁMETROS DEL PROCESO

$$\text{Transmitancia} - \text{Absortancia} = \tau \alpha = 0.9$$

$$\text{Función de radiación solar} = G_T = f(t)$$

$$\text{Emitancia} = \epsilon = 0.9$$

$$\text{Coeficiente de Stefan Boltzman} = \sigma = 5.67 \times 10^{-8}$$

$$\text{Temperatura ambiente} = T_a = f(t)$$

$$\text{Temperatura propuesta de placa} = T_{cp}$$

$$\text{Eficiencia de celda} = \eta_c, \quad \text{para } 298 \text{ K} < T_{cp} < 425 \text{ K}$$

$$\text{Flujo másico propuesto} = 0.033 \frac{\text{kg}}{\text{s}} < \dot{m} < 0.02 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Área de colección} = A_c = l_1 * l_2$$

$$\text{Calor específico del fluido} = C_p = 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$\text{Pérdidas globales de calor} = U_p = U_e + U_b$$

$$\text{Eficiencia de aletas} = F' = f(U_p, d_e, 2W)$$

$$\text{Factor de remoción de calor} = F_R = f(\dot{m}, C_p, U_p, A_c, F')$$

5.3. Simulación en estado estacionario

En esta sección se describe el proceso de diseño e implementación del modelo de simulación en estado estacionario del sistema fotovoltaico y el sistema híbrido térmico-fotovoltaico. Ambos modelos fueron implementados a través de código en el software MatLab.

5.3.1. Diseño e implementación del modelo fotovoltaico

Desde una perspectiva más general, se presenta el proceso de diseño e implementación del modelo de simulación del sistema fotovoltaico. Considerando el modelo térmico descrito a través de la ecuación 5.10, y el modelo eléctrico descrito por la ecuación 3.15.

En primer lugar, el modelo eléctrico que se implemento requiere de la estimación de cuatro parámetros, los cuales se obtienen a partir del algoritmo de cálculo para la obtención de la corriente eléctrica generada por el panel fotovoltaico en función de la radiación solar incidente. En este sentido, la Figura 5.19, nos describe el modelo eléctrico del sistema fotovoltaico, ecuación 3.15, y además describe la interacción con el usuario al solicitar información en base al tipo de simulación a realizar.

En la Figura 5.20 se observa la codificación de los parámetros constantes del modelo eléctrico. Principalmente se ingresan los parámetros y características del tipo de celda fotovoltaica a modelar, todos los datos son entregados por el fabricante de los módulos fotovoltaicos.

En la Figura 5.21 se presenta la codificación de los parámetros para la estimación del voltaje en la celda. Por lo general, se utiliza un vector que estima el voltaje generado en función del voltaje a circuito abierto, obtenido de los parámetros del tipo de celda a modelar.

En la Figura 5.22 se presenta la codificación de los parámetros para la estimación de la radiación solar incidente. Por lo general, se utiliza un vector que estima la radiación solar en función del tiempo y la máxima amplitud de radiación incidente.

En la Figura 5.23 se presenta la codificación de los parámetros para la estimación de la temperatura de celda. Por lo general, se utiliza un vector que estima la temperatura de celda en función del tiempo y la temperatura ambiente.

En la Figura 5.24 se presenta la codificación de los modelos para la estimación de la Corriente Fotogenerada (I_L) y la Corriente de Saturación (I_o). Estos dos modelos están en función de los parámetros de referencia de la celda fotovoltaica y de los vectores de entrada, como son radiación solar y temperatura de celda.

En la Figura 5.25 se presenta la codificación de los modelos para la estimación del Factor de Voltaje térmico (a) y la Resistencia en Serie (R_s). Estos dos modelos están en función de los parámetros de referencia de la celda fotovoltaica y de los vectores de entrada, como son temperatura de celda, voltaje a circuito abierto y corriente a corto circuito.

En la Figura 5.26 se presenta la codificación del modelo para la estimación de la corriente generada por el módulo fotovoltaico (I). Este modelo se describe con la ecuación 3.15, y se resuelve a través de un método iterativo de punto fijo donde su convergencia está basada en el error absoluto del punto fijo inicial y el estimado. Por lo tanto, después de obtener el valor de (I), se estima la potencia (P) obtenida por el modelo de celda fotovoltaica.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Circuito Equivalente Simplificado
% Modelo de 4 parametros
% I = IL - ID= IL - Io [exp((V + I*Rs)/(a))-1]
% IL= Corriente Fotogenerada           I= Corriente de Carga
% Io= Corriente de Saturación          V= Voltaje de Salida
% Rs= Resistencia en Serie
% a = Factor de Voltaje Termico
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

disp('Defina tipo de Celda')
disp('1 para 130 W')
disp('2 para 150 W')
disp('3 para 180 W')
celda=input('Tipo de celda (1,2,3)');

disp('Defina tipo de Simulación')
disp('1 para Simple')
disp('2 para Vector')
disp('3 para FVI')
simple=input('Tipo de Simulación (1,2,3)');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Figura 5.19 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Entradas”

```

.....
% Constantes de Celda 130 W%
if celda == 1

Pmp=129.42; % W
Imp= 8.254; % A
Vmp= 15.68; % V
Isc= 9.12; % A
Voc= 18.23; % V
Ns= 28; % Celdas en serie
A= 1.3; % Factor de idealidad del diodo
Gref= 1000; % W/m2
Tcref= 298; % K
AM= 1.5; % Aire Masa
usc= 0.00053; % Coeficiente de temperatura sc A/K
sb= 1.3810e-23; % Constante Stefan Boltzmann J/K
q= 1.602e-19; % Carga del electron Coulombs
egev= 1.12; % Ancho de banda de energia del Si en eV
eg=1.60218e-19*egev;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Figura 5.20 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Características del Panel Fotovoltaico”

```

%%
%% Mediciones en tiempo Real %%
%TC= input('Ingrese Temperatura de Celda estable propuesta (°C)');
%g= input('Ingrese Irradiancia propuesta constante (W/m^2)');

% Activar modelo simple
%V=0:((Voc-0.8)/99):Voc-0.8; % Voltaje de Calculo
% Activar modelo pvt
V=0:((Voc-0.8)/47):Voc-0.8; % Voltaje de Calculo
%V=10:((Voc-10.8)/47):(Voc-0.8); % Voltaje de Calculo

%V=0:((Voc)/99):Voc; % Voltaje Total
%RL=1.663113;
%V=12;
%%
%V=VCR1'; % Voltaje Real Opcion 4
%%

```

Figura 5.21 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Vector de voltaje de celda”

```

Ac=0.78416; %m2
%Ac= 1.25;%m2 Prueba
if simple== 1
    G=1000;
    %G = 1000*ones(1,length(V)); % STC
elseif simple==2
    g=[200; 400; 600; 800; 1000]; % Radiación Variable
    G = g.*ones(1,length(V)); % Activar modelo simple
else
    G=Gt; % Activar para modelo pvt
end
%%
%G=GCR1'; % Radiación Real Opcion 4
%%

```

Figura 5.22 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Vector de radiación solar incidente”

```

if simple== 1
tc = 25; % STC
Tc= (tc+273.15); % Activar modelo simple
elseif simple==2
%tc=25;
TC=[25; 35; 50; 60; 75]; % Temperatura Variable
tc = TC.*ones(1,length(V));
Tc= (tc+273.15); % Activar modelo simple
else
%tc=25; % Activar modelo simple
%Tc= (tc+273.15); % Activar modelo simple
end

Vocref=Voc;
Iscref=Isc;
ILref=Isc;

```

Figura 5.23 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Vector de temperatura de celda”

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Primer Parametro %

IL= (G./Gref).*(ILref + usc.*(Tc-Tcref));

% Segundo Parametro %

aref= ((2.* Vmp)- Voc)./(((Isc)/(Isc-Imp))+log(1-((Imp)/(Isc))));

Io= (ILref).*(exp(-Vocref./aref)).*((Tcref./Tc).^3).*(exp((Ns.*eg./q.*aref)
1./Tc))); % (exp((Ns.*eg./q.*aref).*((1)-(Tcref./Tc)))); % (exp((Ns.*eg./q.*aref

```

Figura 5.24 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Parámetro 1 y 2”

```

%a= ((Tc) ./ (Tcref)) .* aref;%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a= ((Tcref) ./ (Tc)) .* aref;

% Cuarto Parametro %

%Rs= (((aref.*log(1-((Imp) ./ (Isc)))))+(Voc)-(Vmp)) ./ (Imp));
Rs= (((2.* Vmp)- Voc) ./ (((Isc) / (Isc-Imp))+log(1-((Imp) / (Isc))))
Voc)-(Vmp)) ./ (Imp));

```

Figura 5.25 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Parámetro 3 y 4”

```

% Calculo de Rp (Dependencia de Ic)

%Rp= abs((((Vmp)+(Imp.*Rs)) ./ ((Isc)-(Isc.*(exp(((Vmp)+(Rs.*Imp)-(Voc)) ./ (a))))+(Isc.*(exp((-Voc) ./ (a))))-((Emp) ./ (Vmp)))));
%Rp=300;

% Corriente generada

%I = IL - Io.*(exp((V + I*Rs)/(a))-1);

I= 5;
Ip=[];
for i=1:10

    %Ic=(IL - (Io.*(exp((V + I.*Rs) ./ (a))-1)))/(-Io.*(exp((V +
    %I.*Rs) ./ (a)))+(Rs./a)); rev

    %Ic = IL - ((1.4*Io.*(exp((V + I.*0.7*Rs) ./ (a))-1)));

    Ic = IL - ((Io.*(exp((V + I.*Rs) ./ (a))-1)));

    %Ic = IL - ((Io.*(exp(((I.*RL) + (I.*Rs)) ./ (a))-1)));

    epv = abs(Ic-I);
    Ip=[epv Ip];
    I = Ic;
end

Il= I;
%V=Il.*RL;
P= Il.*V;

Noel=(P) ./ (G.*Ac);

```

Figura 5.26 “Algoritmo del modelo 4 Parámetros: Estimación de P e I”

5.3.2. Diseño e implementación del modelo híbrido

Cabe considerar, por otra parte, el proceso de diseño e implementación del modelo de simulación del sistema híbrido térmico-fotovoltaico que aquí se presenta. El modelo fue implementado a través de la ecuación 5.12, y el modelo descrito por la ecuación 5.14.

En primer lugar, el modelo del sistema híbrido que se implemento requiere de la estimación de parámetros referentes a los coeficientes de transferencia de calor y temperatura de celda del sistema térmico-fotovoltaico. Estos se obtienen a partir de un algoritmo de cálculo para el calor útil del PVT en función de la radiación solar incidente, temperatura ambiente, temperatura del fluido de ingreso al sistema. En este sentido, la Figura 5.27, nos describe el modelo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico, ecuación 5.12, y además describe las condiciones estándar del sistema fotovoltaico.

En la Figura 5.28 se presenta la codificación de los modelos para la estimación de los vectores de entrada como son: radiación solar, temperatura ambiente, velocidad de viento, temperatura de celda y eficiencia de celda; todos en función de un vector de tiempo.

En la Figura 5.29 se presenta la codificación de los parámetros característicos del sistema híbrido térmico-fotovoltaico. Además, se muestra la interacción que tiene el algoritmo de simulación con el usuario al solicitarle parámetros de entrada.

En la Figura 5.30 se presenta la codificación de los parámetros característicos del colector de placa plana. Todos estos parámetros son considerados críticos en el diseño e

implementación del modelo, esto es debido a su injerencia en la estimación de los coeficientes de transferencia de calor.

En la Figura 5.31 se presenta la codificación de los modelos de estimación de los parámetros característicos del fluido en el colector de placa plana. Estos modelos permiten estimar números adimensionales; que son la base de la estimación del coeficiente de transferencia de calor por convección.

En la Figura 5.32 y en la Figura 5.33 se presenta la codificación de los modelos de estimación de los números adimensionales Nusselt parcial y Prandtl. Debe señalarse que el número de Nusselt permite la estimación del coeficiente de transferencia de calor por convección, que a su vez está en función del número de Prandtl.

En la Figura 5.34 se presenta la codificación de los modelos de estimación de los números adimensionales Nusselt total y el coeficiente convectivo para el flujo de fluido en el colector. Es necesario tener en cuenta que el coeficiente convectivo del flujo de fluido establece la capacidad de extracción de calor en la placa colectora.

En la Figura 5.35 se presenta la codificación de los modelos de estimación de los coeficientes de transferencia de calor en el sistema híbrido térmico-fotovoltaico. Es decir, se realiza la estimación del coeficiente global de transferencia de calor (U_p) y el factor de remoción de calor del colector (FR).

En la Figura 5.36 se presenta la codificación de los modelos de estimación del calor útil en el PVT y la temperatura de celda. Estos modelos se describen en la ecuación 5.12 y la ecuación 5.14, mismos que se resuelven a través de un método iterativo de punto fijo donde su convergencia está basada en el error absoluto del punto fijo inicial y el estimado.

Finalmente, después de haber obtenido los valores de temperatura del sistema híbrido a través de su modelo térmico se evalúa el modelo eléctrico del panel fotovoltaico descrito en la sección 3 con la ecuación 3.15 y denominado como el modelo diodo simple. En el anexo B se encuentra el algoritmo de simulación completo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico en estado estacionario.

```

%%
%% Modelo Sistema Hibrido PV-T Model 2
%%
%% Autor: Jeovany Rafael Rodriguez Mejia
%% Programa : Doctorado en Ciencias de la Ingenieria
%%
%%
clear all
close all
clc

%% Condiciones Estandar Modelo Solar
%%
%%
%%Temperatura de Celda NOCT
TcNOCT= 45; % Temperatura de Celda NOCT
TaNOCT= 20; % Temperatura Ambiente NOCT
GNOCT= 1000; % Irradiancia NOCT
nc=0.19; % Eficiencia Inicial
ta= 0.9; %Producto Transmitancia-Absortancia

%% Geometria Solar
tr=6; % Tiempo salida de sol
td=12; % Tiempo duracion de dia solar
Amp=950; % Amplitud irradiancia maxima

%% Inicializar Vectores
GT=[];
ti=[];
Tam=[];
Vv=[];
Icel=[];
NCEL=[];

```

Figura 5.27 “Algoritmo del modelo híbrido: Condiciones estándar PV”


```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parametros Colector Solar de placa plana
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Ka= 0.038;           % Aislante fibra de vidrio           (W/m K)
Kp= 50;             % Placa de cobre 385                             (W/m K)
tp= 0.3e-3;        % Espesor de la placa                                 (m)
eaf= 5e-2;         % Espesor aislante de fondo                          (m)
eab= 2.5e-2;       % Espesor aislante de laterales                       (m)
l1= 1;            % Ancho de colector                                  (m)
l2= 2;            % Largo de colector                                  (m)
Pc= 2*(l1+l2);    % Perimetro de Bordes                               (m)
AC= l1*l2;        % Area de colector                                  (m^2)
Cp= 4186;         % Calor especifico del agua                          (J/Kg K)
Cs= 102;          % Conductividad termica del estaño                   (W/m K)
Ct= 7e-2;         % Alto del colector                                  (m)
W= 10e-2;         % Distancia entre centros                            (m)
de= 15.9e-3;      % Diametro externo                                  (m)
di= 14.3e-3;      % Diametro interno                                  (m)
Kt= 250;          % Tubo de cobre 250                                 (W/Km)
nT= l1/W;         % Numero de tubos en colector
%hfi= 1500;       % Coeficiente fluido tubo                          (W/m^2 K)
% Calcular con Reynolds y Nu%
den= 1000;
caud= Caudal *( 1/1000)*(1/60);
fm= den*caud;     % Flujo masico kg/seg 2 lpm = 0.033
%fm= 0.3;        % Flujo masico kg/seg 2 lpm = 0.033
fmxT= fm/nT;     % Flujo masico kg/seg por tubo

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Figura 5.30 “Algoritmo del modelo hibrido: Parámetros Colector Placa Plana”

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Flat Plate Collector Model
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Fluid properties
cpf= 4210.1 - 1.313162*Tf + 0.01352294*(Tf^2);
rof= 1002.1 - 0.1728604*Tf - 0.002600578*(Tf^2);
kf= 0.57098 + 0.001746321*Tf - (6.42969e-6)*(Tf^2);
muF= (1.736107e-3)-((4.87698e-5)*Tf) + ((7.409839e-7)*(Tf^2))-((6.075131e-9)*(Tf^3)) + ((2.489452e-11)*(Tf^4)) -((3.9750877e-14)*(Tf^5));
%hfi
%Re= (Vel*di)/(vis);
Re= (4*fmxT)/(pi*di*muF);
Pr= (muF*cpf)/(kf);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if Re < 2300

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Figura 5.31 “Algoritmo del modelo hibrido: Parámetros fluido en colector”

```

%%
%% constant heat flow
if fq==1;

Nua= 4.4;
if Pr<= 0.7
%Pr= 0.7
a1= 0.00398;   b1= 0.0114;   m1= 1.66;   n1= 1.12;
elseif Pr<= 10
%Pr= 10
a1= 0.00236;   b1= 0.00857;   m1= 1.66;   n1= 1.13;
else
%Pr= 1000;
a1= 0.00172;   b1= 0.00281;   m1= 1.66;   n1= 1.29;
end
%%

```

Figura 5.32 “Algoritmo del modelo hibrido: Números adimensionales Nu y Pr”

```

%%
%% Wall temperature
else

Nua= 3.7;
if Pr<= 0.7
%Pr= 0.7
a1= 0.0791;   b1= 0.0331;   m1= 1.15;   n1= 0.82;
elseif Pr<= 10
%Pr= 5
a1= 0.0534;   b1= 0.0335;   m1= 1.15;   n1= 0.82;
else
%Pr= 1000;
a1= 0.0461;   b1= 0.0316;   m1= 1.15;   n1= 0.84;
end
%%

```

Figura 5.33 “Algoritmo del modelo hibrido: Números adimensionales”

```

% Nusselt
Nu= Nua+ ((a1*(Re*Pr*(di/12))^m1)/(1+(b1*(Re*Pr*(di/12))^n1)));

else

Nu= 0.023* (Re^(4/5))* (Pr^(1/3));

end

hfi=(Nu*kf/di); % (W/m^2 K)

```

Figura 5.34 “Algoritmo del modelo hibrido: Números adimensionales Nu y h”

```

Upf= Ka/eaf; % wall heat lost coeficient (W/m^2 K)
Upb= ((Ka/eab)*(Pc*Ct))/(AC); % back heat lost coeficient (W/m^2 K)
Up= Upf+Upb; % overall heat lost coeficient (W/m^2 K)
m= ((Up)/(Kp*tp))^(0.5);
na= (tanh((m/2)*(W-de)))/((m/2)*(W-de));
Fp= (1/Up)/(W*((1/(Up*(de+((W-de)*na)))+(1/Cs)+(1/(pi*di*hfi))));
FR= ((fm*Cp)/(Up*AC))*(1-exp((-Up*AC*Fp)/(fm*Cp)));

```

Figura 5.35 “Algoritmo del modelo hibrido: Coeficientes de transferencia de calor”

```

%% Ecuacion 1 Modelo
%%
%% qupv = (ta*Gt) - (ta*Gt*ncel) - (em*sb*(Tc^(4)-(Ta^(4)))) - (hw*(Tc-Ta))
%%
%% qupvt = FR*(qupv-(Up*(Ti-Ta)))
%%
%% Tcc= (qupv-qupvt)/Up + Ta

for i=1:50

    ncel= 0.553 - 0.001298675*Tc;
    % W/m^2 W/m^2 W/m^2 W/m^2 W/m^2
    qupv = (ta.*Gt) - (ta.*Gt.*ncel) - (em.*sbn.*(Tc.^(4)-(Ta.^(4)))) - (hw.*(Tc-Ta));
    % W/m^2 W/m^2 W/m^2
    qupvt = FR.*(qupv-(Up.*(Ti-Ta)));
    % K W/m^2 W/m^2 K K
    Tcc= (qupv-qupvt)./Up + Ta;

    e = abs(Tcc-Tc);
    j=i;

    if e<0.00001
        Tc=Tcc;
        break
    else
        Tc=Tcc;
    end

end

Powers= Gt.*ta.*ncel;
% °C W/m^2 m^2 kg/s (J/Kg °C) °C
T2=((qupvt.*AC)./(fm.*Cp))+Tf;
%%

```

Figura 5.36 “Algoritmo del modelo hibrido: Modelo Hibrido térmico-fotovoltaico”

5.4. Análisis de sensibilidad y Validación

Para evaluar el comportamiento del modelo matemático del sistema hibrido es necesario seguir el algoritmo descrito en el Anexo B, que denota las características particulares del modelo de simulación, en forma sintetizada la Figura 5.37 describe los pasos a seguir para la simulación en estado estacionario del sistema hibrido.

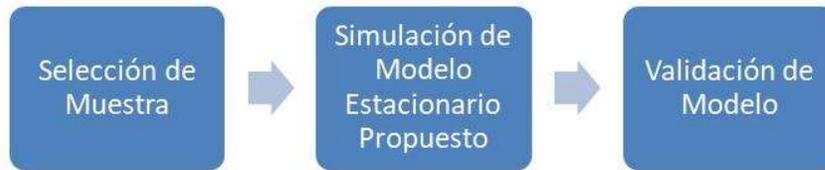


Figura 5.37 “Algoritmo de simulación estacionaria”

El modelo eléctrico del panel fotovoltaico está basado en un modelo de diodo simple, para este caso se considera el análisis a través de los parámetros NOCT y parámetros constructivos de la celda fotovoltaica, descritos en la Tabla 5.3 y Tabla 5.4 respectivamente. Posteriormente, se evalúa el modelo de simulación del sistema híbrido térmico-fotovoltaico, mismo que simula la absorción del calor residual proveniente de la celda fotovoltaica, es decir la fuente de energía deja de ser el sol y se convierte en la celda fotovoltaica. Para el análisis de este modelo se requieren los parámetros constructivos del colector de placa plana descritos en la Tabla 5.5.

Tabla 5.3 Parámetros NOCT

Parámetro	Valor
$T_{c,NOCT}$	45 °C
$T_{a,NOCT}$	20 °C
$G_{T,NOCT}$	800 W/m ²
η_c	19 %
$\tau\alpha$	0.9

Tabla 5.4 Parámetros Celda Fotovoltaica

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
P_{MP}	129.42 W	G_{ref}	1000 W/m ²
I_{MP}	8.254 A	$T_{c,ref}$	298 K
V_{MP}	15.68 V	AM	1.5
I_{SC}	9.12 A	μ_{sc}	0.00053 A/K
V_{OC}	18.23 V	k	1.381 e ⁻²³ J/K
N_c	28	q	1.602 e ⁻¹⁹ C
A	1.3	eg_{ev}	1.12 eV

Tabla 5.5 Parámetros Colector Placa Plana

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
K_a	0.038 W/mK	P_c	2*(L ₁ + L ₂)
K_p	50 W/mK	C_p	4186 J/KgK
t_p	0.3 e ⁻³ m	C_s	102 W/mK
e_{af}	5 e ⁻² m	C_t	7 e ⁻² m
L_1	1 m	W	10 e ⁻² m
L_2	2 m	q	15.9 e ⁻³ m
AC	L ₁ *L ₂	di	14.3 e ⁻³ m
KT	250 W/mK	nT	L ₁ /W m

Finalmente, para iniciar la evaluación del modelo del sistema híbrido se requiere de los parámetros de entrada representativos, como lo son: la radiación solar, temperatura ambiente, temperatura de celda, velocidad de viento, temperatura de fluido, geometría solar, tiempo de simulación y caudal. En la Tabla 5.6 se describen a detalle los valores que deberán ingresarse.

Tabla 5.6 Parámetros Representativos de Entrada

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
T_{if}	19 °C	δ_t	0.25
Q	2 lpm	$T_A(t)$	$18 + 17 * \text{sen}(\pi * 18 * (t - t_r))$
ϵ	0.9	$G_T(t)$	$800 * \text{sen}\left(\pi * \left(\frac{t-t_r}{t_l}\right)\right)$
t_r	6 hrs	$T_c(t)$	T_A $+ \left[\left(T_{c,NOCT} \right. \right.$ $\left. \left. - T_{a,NOCT} \right) \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left(\frac{9.5}{(5.7 + 3.8 * V_v)} \right) \right.$ $\left. * \left(1 - \frac{\eta_c}{0.9} \right) \right]$
t_l	12 hrs	$V_v(t)$	$3.5 * \text{sen}\left(\frac{\pi}{18} * (t - t_r)\right)$

Considerando los parámetros descritos desde la Tabla 5.3 hasta la Tabla 5.6, fue posible simular el comportamiento del sistema tomando en cuenta como variables del algoritmo: a la magnitud del caudal que se hace pasar a través del colector, así mismo a la temperatura a la cual entra el fluido al sistema. Por lo tanto, estos dos parámetros se consideran como las variables de control del sistema, debido a que estas pueden ser controladas durante la evolución del sistema, con el propósito de maximizar las condiciones de operación en cuanto a la extracción de calor de la celda fotovoltaica.

Entonces, para evaluar el algoritmo de simulación se realiza una combinación con las variables de control como se muestra en la Tabla 5.7. La primera simulación mantiene fijos los parámetros de temperatura de fluido a la entrada y magnitud de caudal y puede considerarse como el punto de referencia debido a que son los mismos valores descritos

con anterioridad. Para el caso de la segunda simulación se mantiene fijo el caudal de ingreso del agua en el sistema y la temperatura del fluido se reduce a la mitad. En la tercera simulación la temperatura del fluido a la entrada se mantiene fija y el caudal se incrementa al doble. Finalmente, en la cuarta simulación la temperatura del fluido a la entrada se reduce a la mitad, y el caudal se incrementa al doble. Estas combinaciones nos permiten evaluar el comportamiento del sistema, así como el algoritmo de simulación bajo sus condiciones de sensibilidad.

Tabla 5.7 Combinaciones de las Variables de Control

Parámetro	Valor	Simulación
T_{if}	19 °C	1
Q	2 lpm	1
T_{if}	9 °C	2
Q	2 lpm	2
T_{if}	19 °C	3
Q	4 lpm	3
T_{if}	9 °C	4
Q	4 lpm	4

5.5. Modelo en estado transitorio del sistema PV-T-HHO

En la actual sección se presenta el modelo térmico-eléctrico del sistema PV-T-HHO bajo condiciones dinámicas, desarrollado para el análisis del potencial energético de la región bajo condiciones transitorias en este proyecto de investigación. Aquí se describe el análisis térmico en estado transitorio de la celda fotovoltaica, colector solar y celda de hidrógeno, además de los nodos comunes que conforman el sistema. Por lo tanto, es notoria la existencia de una relación directa del tiempo con el sistema, adicional a la dependencia de la temperatura y la generación de potencia respecto a la evolución con el tiempo.

5.5.1. Modelo térmico y eléctrico del sistema PV/T-HHO en estado transitorio

La base del modelo descrito a lo largo de esta sección denota los mecanismos de transferencia de calor que se suscitan en el sistema, es decir calor absorbido y cedido por efecto de la conducción, convección y radiación en el sistema. Además de los mecanismos de transferencia de calor, en el sistema se lleva a cabo un proceso de transformación de energía de solar a eléctrica, por lo tanto, la generación de potencia es sumamente importante analizarla. Es notorio que la conversión de energía en el sistema PV-T-HHO depende de la radiación solar transferida, las condiciones climatológicas de estado transitorio que generan las pérdidas por convección y radiación, además de que el conjunto de celda fotovoltaica y colector térmico conducen y almacenan energía por efecto de las condiciones transitorias a las cuales están sujetos para generar energía eléctrica y calor de proceso.

Como elemento principal de análisis se tomó el modelo acoplado entre la celda fotovoltaica y el sistema aletado del tipo colector placa plana como se muestra en la Figura 5.38. Donde se considera que ingresa un flujo de calor completamente normal al sistema PV-T-HHO, el cual transfiere, transforma y almacena cierta energía al atravesarlo y por ende es posible analizarlo a través de un balance de energía en estado transitorio. Por lo tanto, se modeló una sección simétrica en dos dimensiones, considerando que la temperatura es la variable que rige el comportamiento del sistema en estado transitorio.

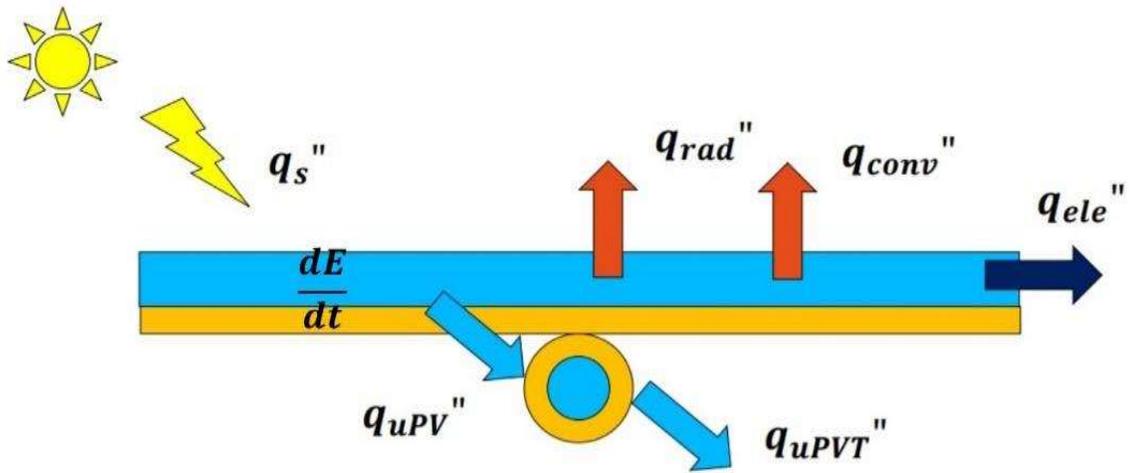


Figura 5.38 “Modelo de simulación transitoria”

En otras palabras, el balance de energía del sistema PV-T-HHO se sintetizó en la energía que entra al sistema como lo es la energía solar absorbida, y que fue convertida en energía eléctrica, energía almacenada y energía térmica generada, como referencia se plantea la ecuación 5.17.

$$\frac{\text{Energía Almacenada}}{\text{Absorbida}} = \frac{\text{Energía Eléctrica Generada}}{\text{Generada}} - \frac{\text{Energía Térmica Generada}}{\text{Perdida}} \quad (5.17)$$

El modelo se desarrolló a través de un balance de energía en estado transitorio, considerando la energía solar absorbida $q_{s,abs}$ como la cantidad entrante, la energía eléctrica producida q_e , la energía almacenada q_{st} , la energía térmica útil q_u y la energía térmica $q_{Th,L}$ como la pérdida. La ecuación 5.18 describe la conceptualización del balance de energía en estado transitorio.

$$q_{s,abs} = q_e + q_{st} + q_u + q_{Th,L} \quad (5.18)$$

Es decir, el modelo del balance de energía queda en función de las variables y parámetros que constituyen al sistema. Entonces, la irradiancia solar G_T , las propiedades ópticas del sistema ($\tau \alpha$), eficiencia eléctrica de la celda η_c , la temperatura de superficie del sistema T_s , del fluido T_{fi} y del ambiente T_a , el coeficiente convectivo h_c , el coeficiente por radiación h_r y el coeficiente global de transferencia de calor U , son indispensables para la realización del modelo. Además, es necesario tomar en cuenta que la energía almacenada en estado transitorio se describe en función del tiempo y depende de la densidad del material que la almacena ρ , su capacidad calorífica C_p y volumen V . La ecuación 5.19 describe al modelo de balance en función de sus constantes de proporcionalidad y variables de análisis.

$$\begin{aligned} (\rho C_p V) \frac{dT_s}{dt} = & (\tau \alpha A)G_T - \eta_c(\tau \alpha A)G_T - h_c A (T_s - T_a) \\ & - h_r A (T_s^4 - T_a^4) - UA (T_s - T_i) \end{aligned} \quad (5.19)$$

El modelo matemático obtenido representa una ecuación diferencial no lineal que requiere de un método numérico para su solución, particularmente el término de la temperatura de superficie elevado a la potencia cuarta es lo que provoca la no linealidad del modelo. Este modelo puede ser linealizado a través de la expansión de la serie de Taylor alrededor de un punto de operación estacionario del sistema. Considerando que son dos sistemas acoplados entre sí, el modelo deberá ser alimentado con los parámetros y vectores de entrada del panel fotovoltaico, colector y energía solar. Por lo tanto, es necesario considerar el uso de software como MatLab para la solución del modelo en estado transitorio del sistema PV-T-HHO.

5.6. Simulación estado transitorio

En esta sección se describe el proceso de diseño e implementación del modelo de simulación en estado transitorio del sistema fotovoltaico y el sistema híbrido térmico-fotovoltaico. Ambos modelos fueron implementados a través de código y la plataforma de desarrollo Simulink en el software MatLab.

5.6.1. Diseño e implementación del modelo fotovoltaico en estado transitorio

El modelo térmico eléctrico de simulación del sistema PVT en estado transitorio se implementó a través de diagramas de bloques utilizando la herramienta MatLab-Simulink. Este se desarrolló tomando como base para su formulación la ecuación 5.19, que describe al sistema PVT-HHO, para este modelo en particular se consideró nula la acción del coeficiente de transferencia de calor U . Por lo tanto, el modelo matemático del sistema PVT es descrito por la ecuación 5.20 en donde se considera sólo la modelación del comportamiento térmico y eléctrico.

$$\begin{aligned} (\rho C_p V) \frac{dT_s}{dt} = & (\tau \alpha A) G_T - \eta_c (\tau \alpha A) G_T - h_c A (T_s - T_a) \\ & - h_r A (T_s^4 - T_a^4) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Con el propósito de dar solución a la ecuación diferencial no lineal que describe al modelo térmico eléctrico del sistema PVT se realiza la programación a través de bloques en el software MatLab. En donde se desarrolla un bloque denominado PV-Cell-Convección Modelo Térmico Dinámico que en su interior desglosa en pequeños subsistemas a la ecuación 5.20 en donde se desprecian los efectos de la radiación. Cada uno de estos subsistemas han sido transformados al espacio de Laplace, con el propósito de simular y evaluar el comportamiento de la temperatura de un espacio temporal del modelo térmico eléctrico del sistema PVT. En la Figura 5.39 se observa el bloque principal PV-Cell-Convección Modelo Térmico Dinámico el cual tiene como entradas los parámetros de radiación solar, temperatura ambiente, y características de diseño según el módulo solar que se esté configurando. Teniendo como salida del bloque a la temperatura de celda en función de los parámetros de entrada, así como de la conversión y absorción efectiva de energía del módulo.

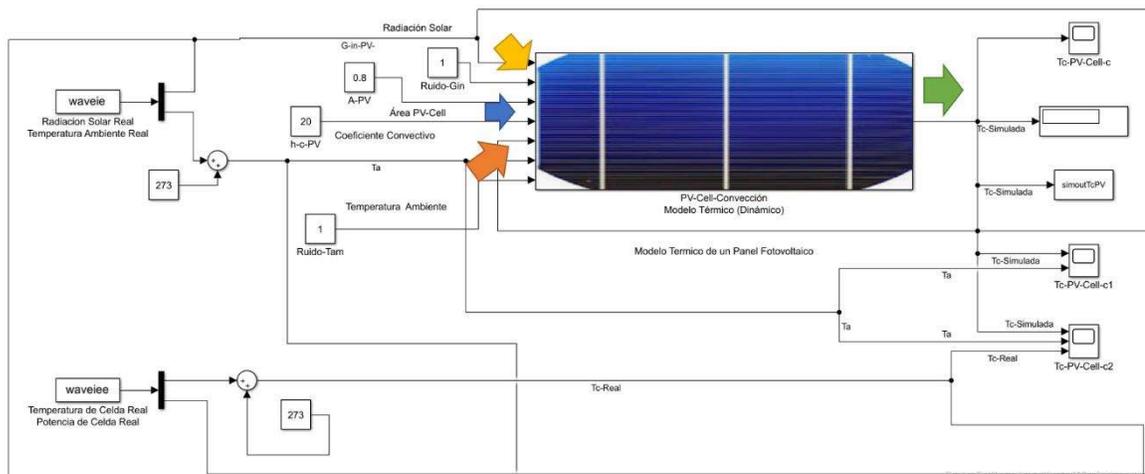


Figura 5.39 “PV-Cell-Convección Modelo Térmico Dinámico”

En la Figura 5.40 se observa la manera en la que la programación en bloques permite implementar el modelo matemático descrito con la ecuación diferencial 5.20. Es necesario comentar que la programación es sencilla, debido a que el modelo se compone de bloques de operaciones matemáticas simples los cuales se une a través de nodos permitiendo la interconexión del sistema. Como criterio de diseño del bloque se consideró que los efectos de pérdidas por radiación serian despreciables, y además se incluye el bloque operacional denominado integrador, mismo que permite dar solución al modelo de ecuación diferencial.

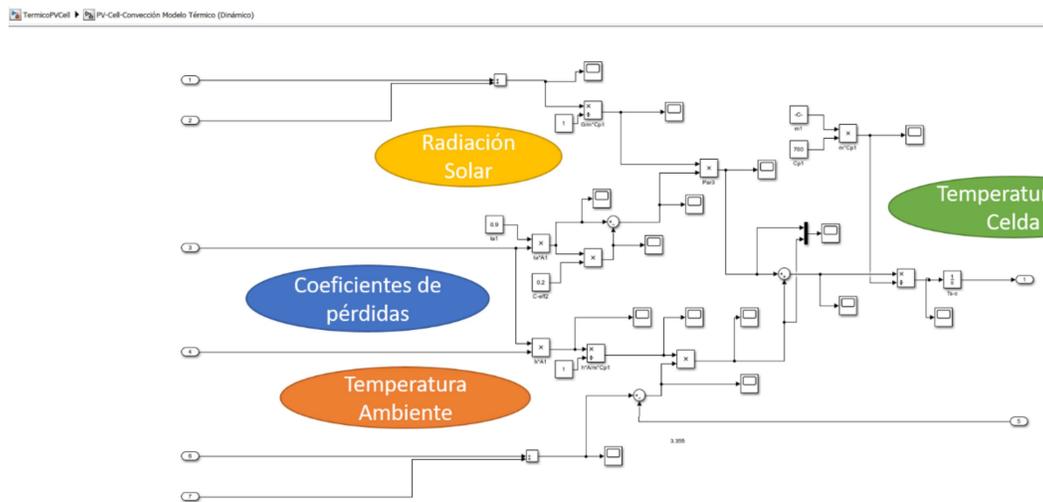


Figura 5.40 “Conexiones del Modelo PV-Cell-Convección”

En la Figura 5.41 se describe el bloque PV-Cell-Convección-Radiación Modelo Térmico Dinámico el cual a la entrada tiene los datos de radiación solar, temperatura circundante, y parámetros de diseño como el área de captación y los coeficientes de convección y radiación. Por lo tanto, a la salida del bloque se obtiene la temperatura de celda.

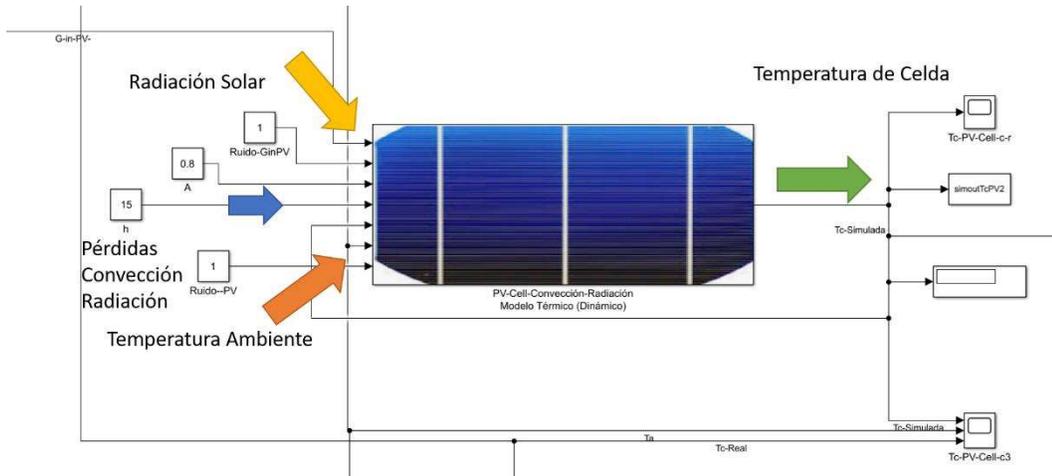


Figura 5.41 “PV-Cell-Convección-Radiación Modelo Térmico Dinámico”

En la Figura 5.42 se describe el módulo PV-Cell-Convección-Radiación Modelo Térmico Dinámico en el cual se consideran las pérdidas de energía por convección y radiación. Por lo tanto, la ecuación diferencial que lo fundamenta presenta una no linealidad al considerar una diferencia de temperaturas a una potencia de grado cuarto causado por el efecto de las pérdidas por radiación.

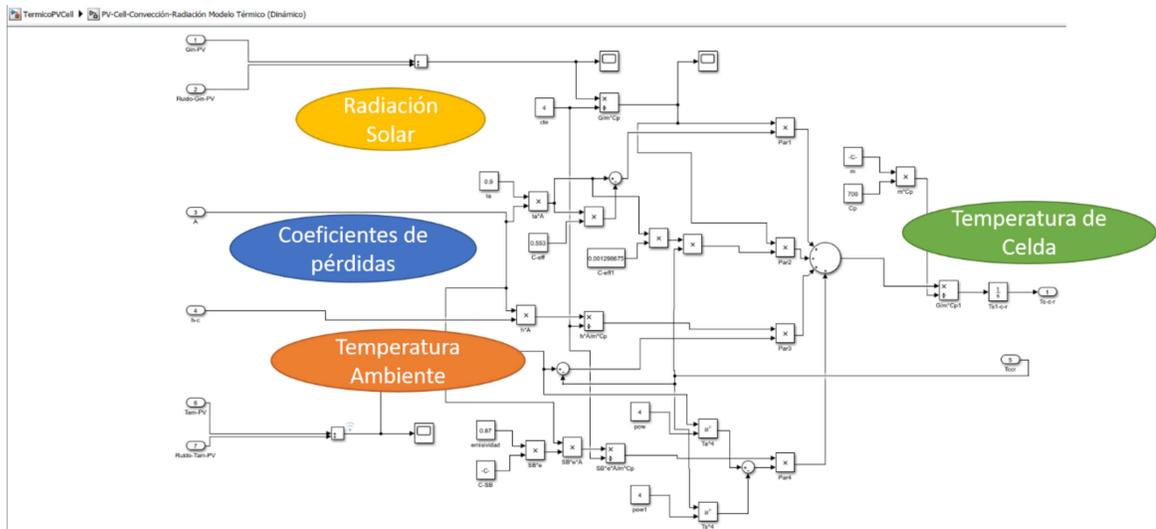


Figura 5.42 “Conexiones del modelo PV-Cell-Convección-Radiación”

En la Figura 5.43 se presenta el desarrollo del módulo PV-Cell-EGE Cuatro Parámetros en donde se modela el comportamiento eléctrico de la celda fotovoltaica. En éste módulo se consideran como variables de entrada la radiación solar y la temperatura de celda simulada a través del bloque térmico. Entonces a la salida se obtiene la potencia eléctrica del panel, el voltaje y corriente desarrollados a lo largo del día.

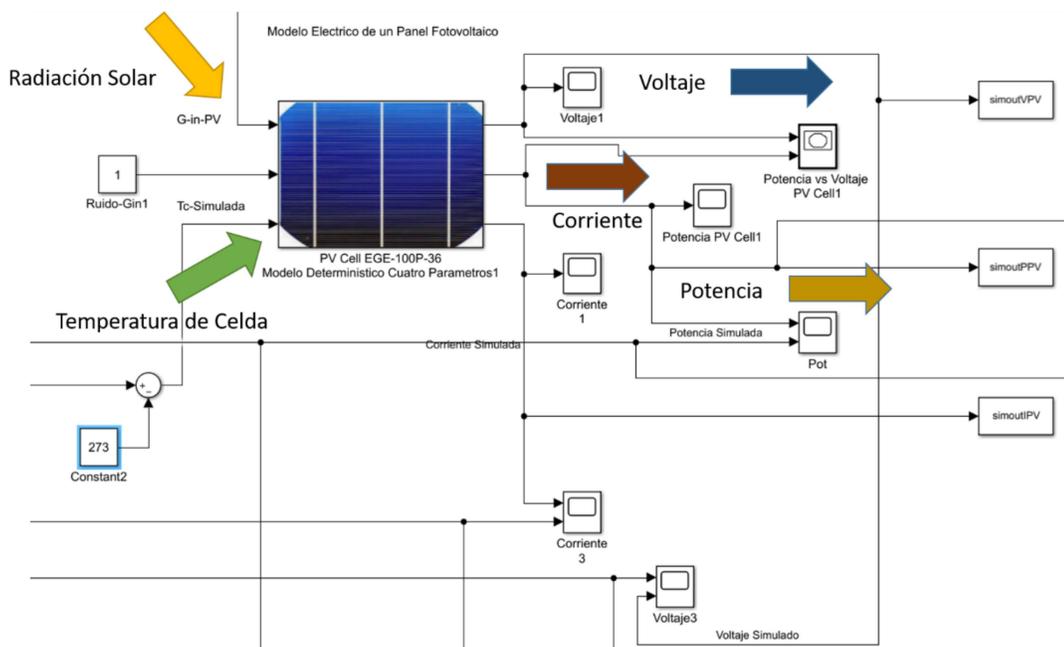


Figura 5.43 “PV-Cell-EGE Cuatro Parámetros”

En la Figura 5.44 se puede ver como el módulo PV-Cell-EGE Cuatro Parámetros se basa en la ecuación de corriente del panel, ecuación 3.15. En donde a partir de cuatro parámetros es posible simular el comportamiento eléctrico del panel fotovoltaico, considerando los parámetros característicos como son corriente a corto circuito, voltaje a circuito abierto y coeficientes térmicos, entre algunos otros.

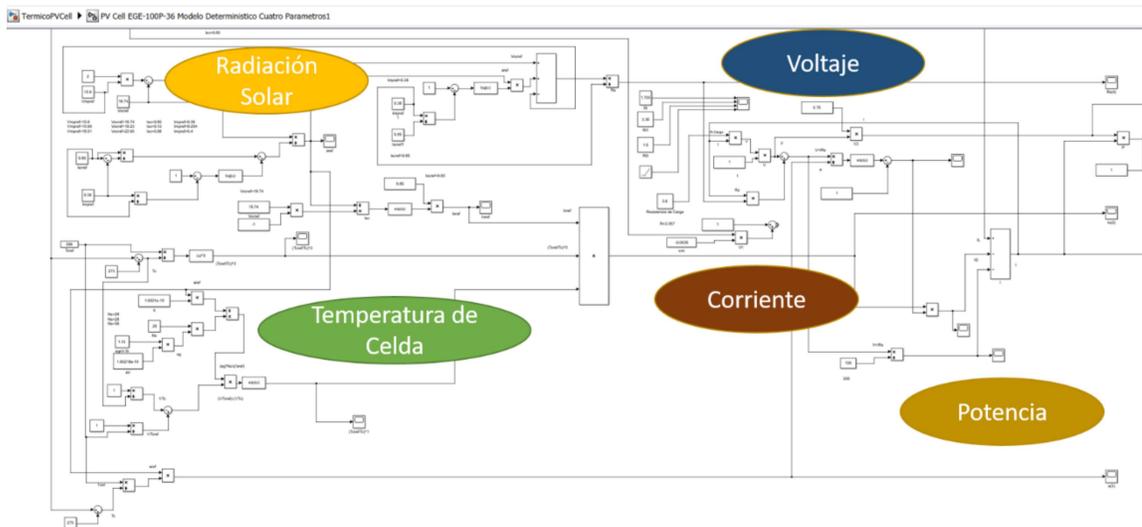


Figura 5.44 “Conexiones del modelo PV-Cell-EGE”

Finalmente, en la Figura 5.45 se describe el bloque del Modelo Electrolizador Alkalino el cual permite modelar el comportamiento de un electrolizador alcalino para la producción de hidrogeno verde. En donde la entrada al módulo es la potencia generada por la celda fotovoltaica y la salida es el caudal de hidrogeno generado a lo largo del día en análisis. El modelo polinomial de segundo orden que describe el comportamiento de la generación de hidrogeno en el electrolizador alcalino se observa en la ecuación 5.21. Este modelo se obtuvo a través de experimentos con un sistema electrolizador alcalino de veintinueve placas, logrando un $RMSE=0.1829$.

$$Q_{H_2} = 0.0001164 x^2 + 0.009134 x - 0.00001837 \quad (5.21)$$

donde x representa a la potencia de entrada a la celda de hidrógeno en watts y Q_{H_2} el caudal de hidrógeno producido en $\frac{ml}{s}$.

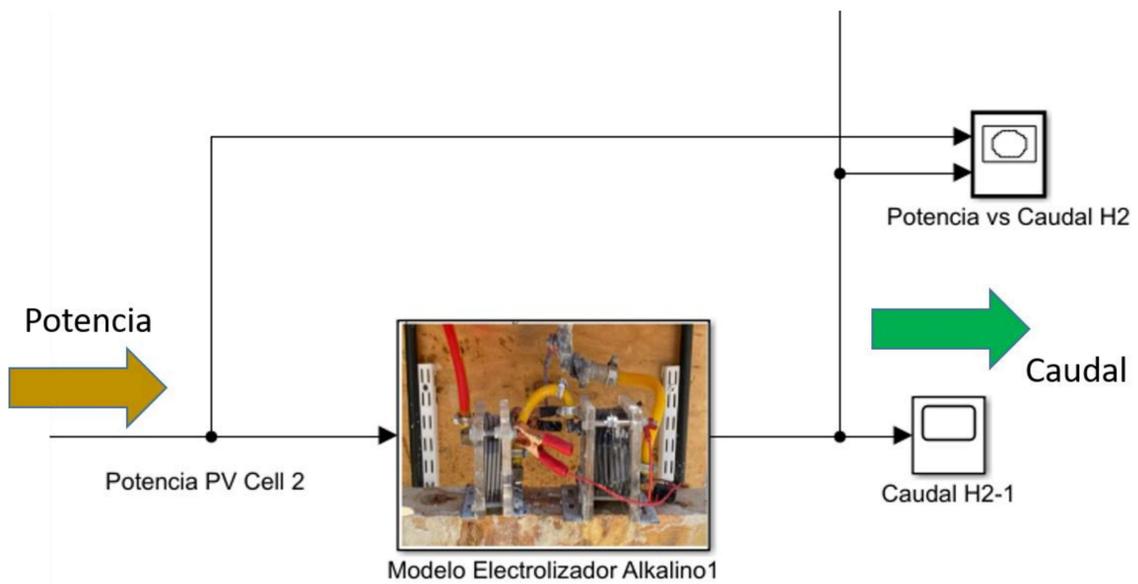


Figura 5.45 “Modelo Electrolizador Alkalino”

5.6.2. Diseño e implementación del modelo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico en estado transitorio

Cabe mencionar que en el proceso de diseño del modelo de simulación del sistema híbrido térmico-fotovoltaico que en esta sección se presenta se consideró incluir los efectos de las pérdidas por convección y radiación con el ambiente, además de integrar un colector de calor residual el cual depende del coeficiente global de transferencia de calor U para determinar la cantidad de calor regenerado durante el proceso de conversión de energía.

El módulo que a continuación se presenta con la herramienta de MatLab-Simulink se basa en la ecuación 5.19. En primer lugar, se menciona que el modelo del sistema híbrido que se implemento requiere del uso de métodos numéricos para la solución o en su caso puede linealizarse a través de la expansión de la serie de Taylor.

En la Figura 5.46 se observa el módulo PV-T-Convección Modelo Térmico Dinámico el cual tiene como entradas la radiación solar, temperatura ambiente, parámetros de diseño del modelo, coeficientes de pérdida por convección, radiación y el coeficiente global de transferencia de calor del colector térmico. El bloque a la salida presenta solo la temperatura de celda, este módulo sólo permite evaluar el comportamiento térmico del sistema PV-T. En la Figura 5.47 se observa a detalle la particularidad de las conexiones térmicas y eléctricas del sistema.

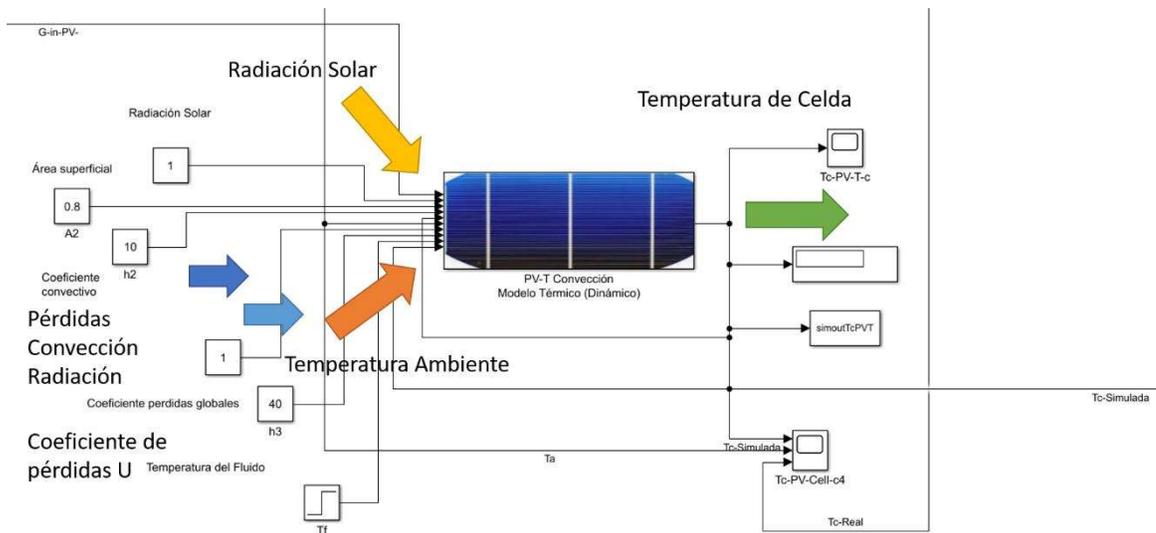


Figura 5.46 “PV-T-Convección Modelo Térmico Dinámico”

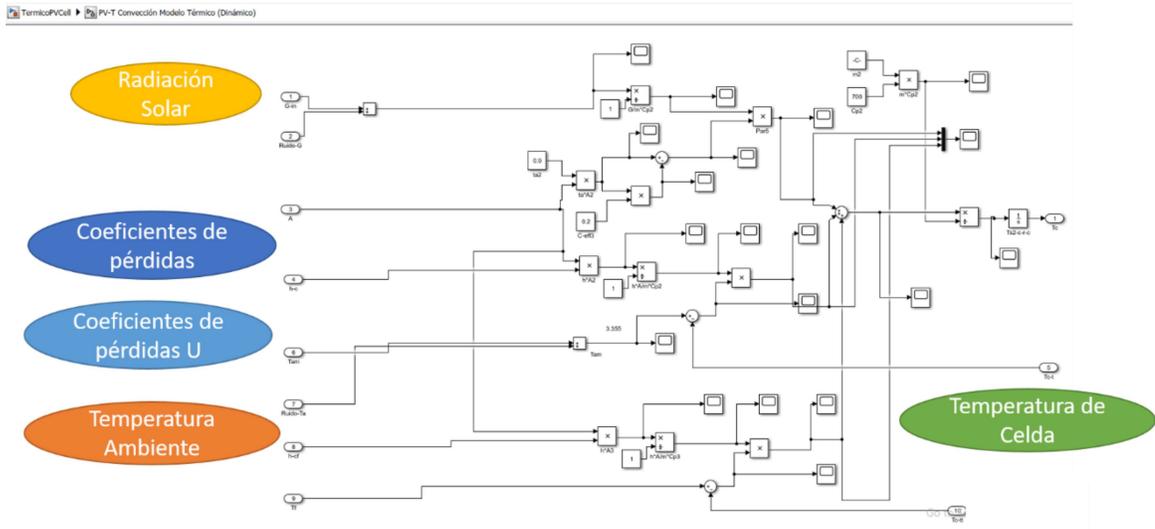


Figura 5.47 “Conexiones del modelo PV-T-Convección”

Finalmente, en la Figura 5.48 se observa el bloque PV-T-HHO el cual vincula los tres módulos anteriormente descritos. El bloque completo permite simular el comportamiento térmico y eléctrico del panel fotovoltaico con un colector de calor residual, además del comportamiento de un electrolizador alcalino para la generación de hidrogeno verde. Las entradas que tiene el bloque son los parámetros de diseño de cada subsistema en forma independiente, además de la radiación solar y temperatura ambiente. En este caso, las salidas son la temperatura de celda, la potencia generada por la celda, corriente, voltaje y caudal de hidrogeno producido durante el ciclo de conversión de energía.

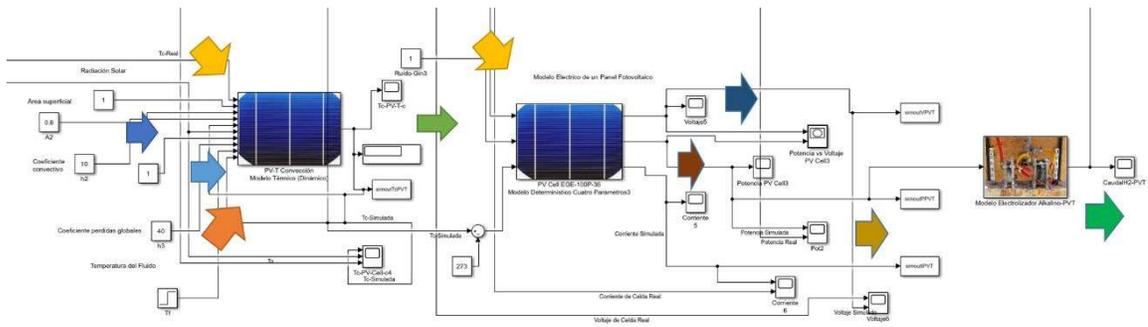


Figura 5.48 “Modelo PV-T-HHO”

5.7. Metodología de análisis multifísica

En esta sección se describe a detalle la metodología de análisis multifísica de un sistema de generación y transformación de energía. En gran medida el análisis se enfoca al diseño, modelación y validación de un sistema híbrido de generación de energía a través de la conversión de energía solar a energía térmica, eléctrica y química por el efecto de generación de hidrogeno verde. En forma general la metodología se describe en cuatro fases la de conceptualización, la de síntesis de diseño, la de modelación y finalmente la de optimización. Para este trabajo de investigación se hace el énfasis en la fase de síntesis de diseño y la fase de modelación; por lo tanto, las otras fases de la metodología se explican en forma breve sin un profundo detalle.

La metodología de análisis aquí desarrollada establece como actividades prioritarias para el diseño, desarrollo y análisis de sistemas de transformación de energía la fase de conceptualización que propiamente permite definir el problema, establecer las características y particularidades del proyecto en base a su utilidad y aplicabilidad a desarrollar. La fase de síntesis se focaliza en el diseño mecánico del sistema energético, así como en el análisis integral a través del balance energético del sistema multifísico. La fase

de modelación se orienta de forma particular al modelado y simulación del sistema a través del método de elemento finito en la parte estructural y térmica. Además, en esta fase se realizan las simulaciones a base de balance de energía y exergía que permitan establecer de manera adecuada las especificaciones del sistema a desarrollar. En la fase final denominada de optimización se desarrollan las validaciones del sistema energético de conversión y se establecen las necesidades de monitoreo e inclusión de herramientas de la industria 4.0 como es el internet de las cosas (IoT). En la Figura 5.49 se observa el diagrama de flujo de la metodología de análisis multifísica desarrollada.



Figura 5.49 “Metodología de Análisis Multifísica”

En éste proyecto la fase de síntesis de diseño es considerada como el elemento clave de la metodología debido a que en esta etapa se dimensiona y establece la magnitud del sistema energético a desarrollar. A través del diseño mecánico de un sistema es posible potencializar los rendimientos no solo térmicos sino estructurales del sistema de generación de energía, ya que se puede seleccionar el material adecuado para cada elemento que constituye al sistema de generación y por lo tanto racionalizar las pérdidas globales del sistema. Por lo tanto, aplicando las técnicas de modelación como el método de elemento finito y la simulación dinámica desde la parte térmica hasta la estructural las fases de diseño

se vinculan de forma natural. En la Figura 5.50 se observan a detalle los criterios de la metodología de análisis multifísica con un énfasis en la fase de síntesis y modelación.

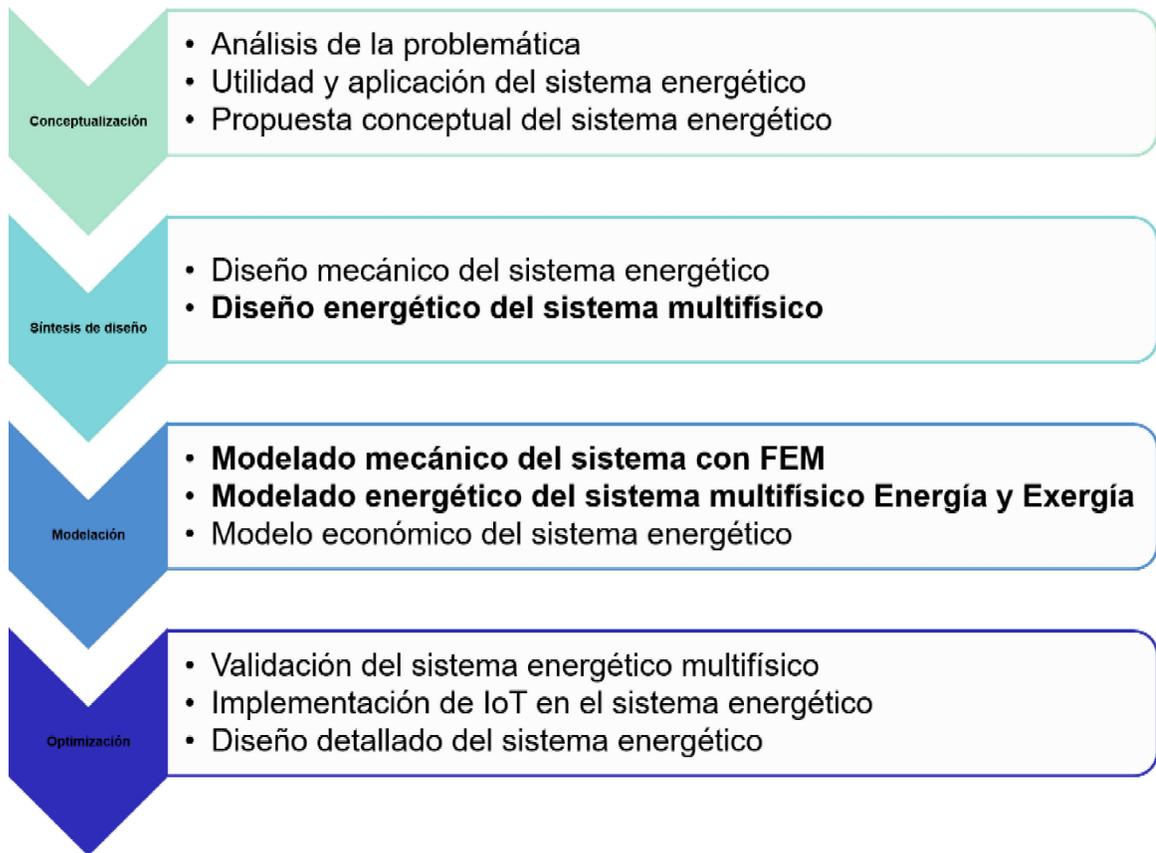


Figura 5.50 “Criterios de la Metodología de Análisis Multifísica”

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos del proceso de modelación y simulación del sistema híbrido PV/T-HHO, bajo las condiciones de estado estacionario y transitorio. Además, se presentan a detalle los resultados de los modelos térmicos, eléctricos y el análisis multifísica desarrollado del sistema híbrido térmico-fotovoltaico-HHO teniendo en cuenta la metodología propuesta.

6.1. Modelado y Simulación en Estado Estacionario

La esencia de éste proyecto de investigación es el modelado y la simulación de procesos de conversión de energía. En esta primera fase se presenta el modelado y simulación del proceso de generación de energía a través del efecto fotovoltaico, es decir, la generación de una corriente eléctrica en respuesta a la exposición de radiación electromagnética en un material semiconductor. Esta producción de corriente continua se logra cuando la radiación solar incidente en un material semiconductor, principalmente silicio dopado con impurezas, permite el desplazamiento de electrones entre capas de unión P-N siempre y cuando la fuerza de impacto del fotón de energía sea de 1.2 eV. Por lo tanto, no todos los fotones de energía incidentes sobre la celda fotovoltaica son convertidos en corriente eléctrica, es decir solo se produce un par electrón-hueco por cada fotón que logre superar la banda de conducción de al menos 1.2 eV y el electrón liberado durante el proceso sea conducido.

Entonces este proceso de producción de energía de corriente continua puede modelarse a través del modelo definido en la sección tres, específicamente con la ecuación 3.15, o modelo de diodo simple. En la Figura 6.1 se observa la primera sección del algoritmo que permite estimar los parámetros de la celda fotovoltaica y simular el comportamiento de la corriente eléctrica considerando un estado estacionario; en función de un valor de radiación solar incidente y temperatura de celda.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Programa de estimacion de parametros de una celda fotovoltaica y simulacion de su comportamiento V-1
% MC. Jeovany Rafael Rodriguez Mejia.
% Celda Fotovoltaica EGE-100P-36 Policristalino
% Pmp= 100 W, Imp= 5.4 A, Vmp= 18.51 V, Isc= 5.88 A, Voc= 22.65 V, Ns= 36,
% A= 1.3, Gref= 1000 W/m^2, Tcref= 298 K, AM= |.5, usc= 0.0006 A/K
% Condiciones Ambientales de Ciudad Juarez Chihuahua
% Longitud Lloc= 106.486666° Latitud fi= 31.758611° El Paso Texas
% Longitud Lloc= 106.483055° Latitud fi= 31.733055° Cd. Juarez Chihuahua
% Longitud Lloc= 106.421944° Latitud fi= 31.720277° ITCJ
% Meridiano Estandar Lst= 105° Inclinacion Bta= latitud +- 15°
% Angulo Azimuth Z=0°
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all
clc
close all

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Entradas

tc= input('Ingrese Temperatura de Celda estable propuesta (°C)');
Tc= tc+273;

g= input('Ingrese Irradiancia propuesta constante (W/m^2)');
Gv= g;

G= [200 400 600 800 1000];

```

Figura 6.1 “Algoritmo de Simulación Diodo Simple Sección 1”

En la Figura 6.2 se presenta la segunda sección del algoritmo de Simulación Diodo Simple, donde se estiman los parámetros del modelo Diodo Simple, se estima el valor de la corriente eléctrica producida y generan las gráficas que relacionan la corriente con el voltaje, la potencia con el voltaje y la eficiencia con respecto al voltaje.

```

%%
%%
%% Constantes segun tipo de Panel

CtePV

%%
%%
%% Vmx= Voc-0.05104; %%

%%
%%
%% Calculo de 4 Parametros del Panel y Corriente

G200
G400
G600
G800
G1000
GV
GVb

%%
%%
%% Graficas de Corriente y Potencia del Panel

GraficasPV

```

Figura 6.2 “Algoritmo de Simulación Diodo Simple Sección 2”

En la Figura 6.3 se observan las curvas de evolución de la corriente eléctrica producida por una celda fotovoltaica simulada con el modelo de la ecuación 3.15. Estas curvas representan el efecto que tiene la radiación solar incidente sobre la generación de corriente continua en la celda, para este caso se consideraron cinco diferentes valores de radiación solar incidente y una temperatura de celda constante. En forma semejante en la Figura 6.4 se presentan las curvas características del comportamiento de la potencia en función de la radiación solar, donde se observa que la máxima potencia, 100 W, se logra con una radiación solar incidente de $1000 \frac{W}{m^2}$ y la potencia más baja fue de 18 W con una radiación de $200 \frac{W}{m^2}$.

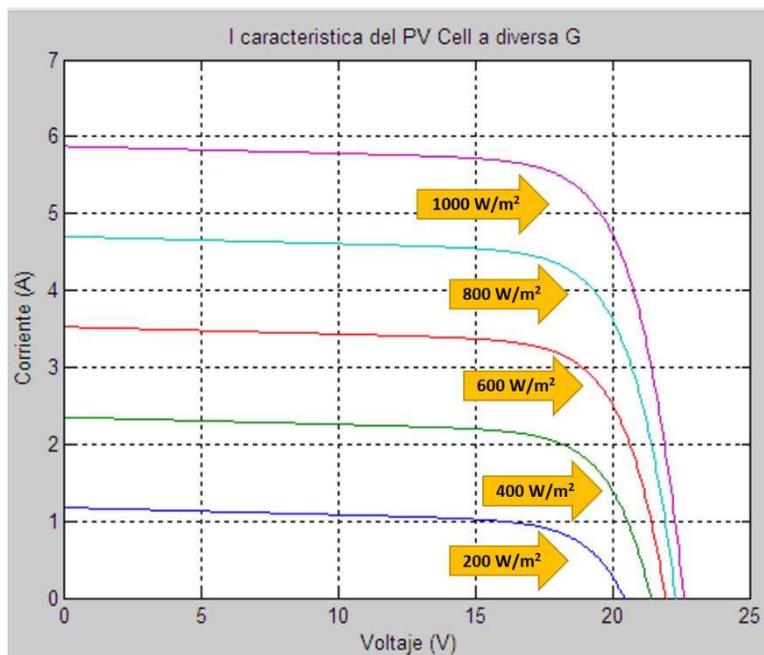


Figura 6.3 “Corriente Característica de Celda Fotovoltaica”

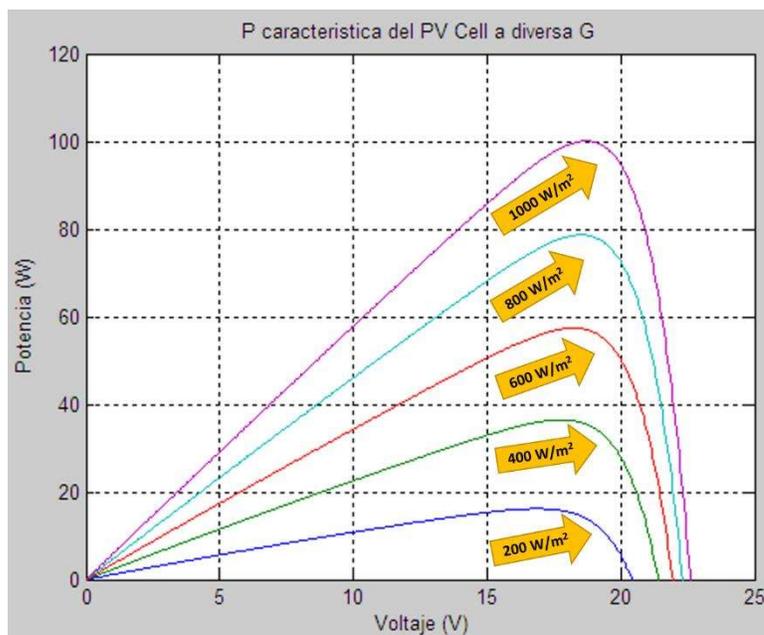


Figura 6.4 “Potencia Característica de Celda Fotovoltaica”

En la Figura 6.5 es notorio que la eficiencia de la celda fotovoltaica se atenúa con respecto a la caída de la radiación solar, en este caso se identifica que se alcanza una eficiencia máxima de 16 % cuando la radiación incidente se mantiene constante a $1000 \frac{W}{m^2}$, y alcanza un máximo de 12.5 % cuando irradiancia es de $200 \frac{W}{m^2}$. Es decir, el mayor efecto que se tiene sobre la celda fotovoltaica se presenta en la caída de la corriente y no en el voltaje, según la radiación solar incida sobre esta.

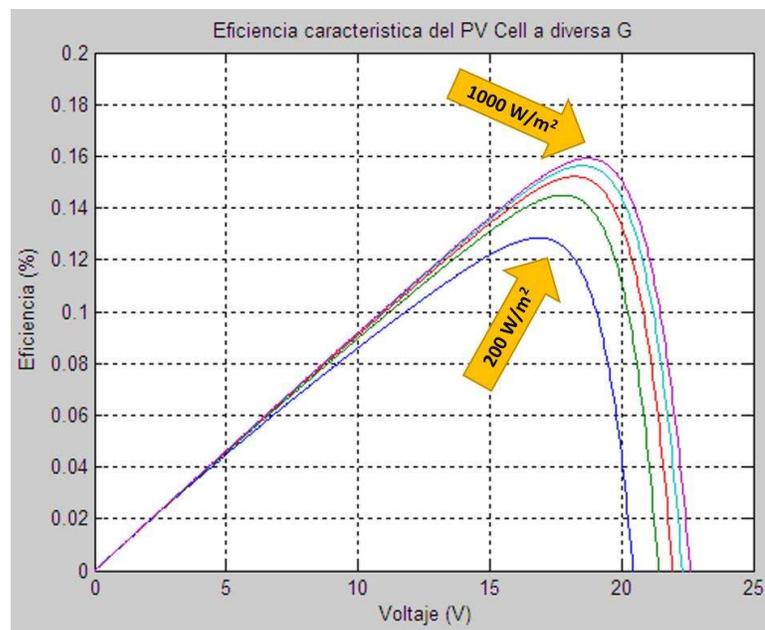


Figura 6.5 “Eficiencia Característica de Celda Fotovoltaica”

Los efectos que se presentan respecto a la eficiencia y generación de corriente en función de la radiación solar incidente se observan en la Figura 6.6. Aquí se alcanza un nivel de generación de corriente máximo de 1 A cuando la radiación es de $200 \frac{W}{m^2}$ y una eficiencia de 12.5 %. Pero al tener las mejores condiciones de radiación solar incidente, la corriente alcanzada es de 5.8 A y una eficiencia del 16%. Finalmente, en la Figura 6.7 se presentan los resultados combinados de la potencia y corriente de la celda fotovoltaica en

función del voltaje generado, teniendo en cuenta que para este caso en particular se consideró una radiación incidente de 800 W/m².

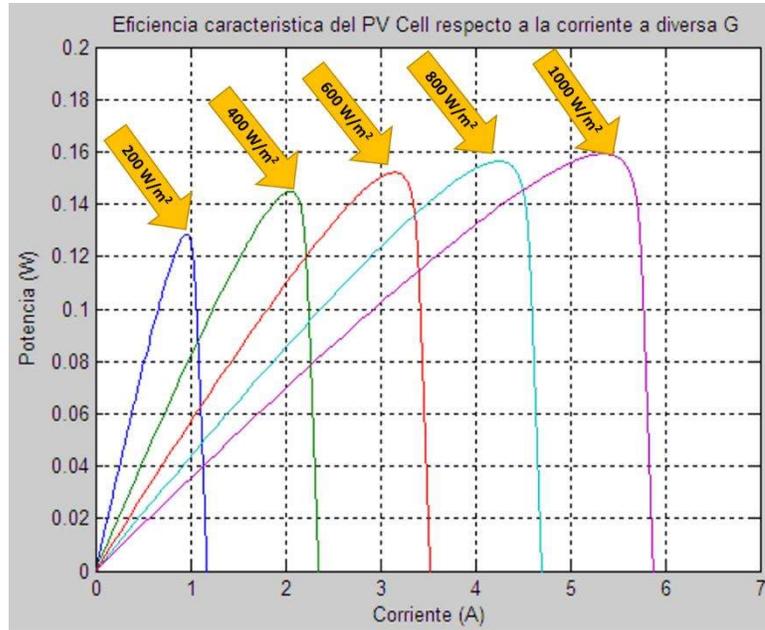


Figura 6.6 “Eficiencia respecto a la Corriente de Celda Fotovoltaica”

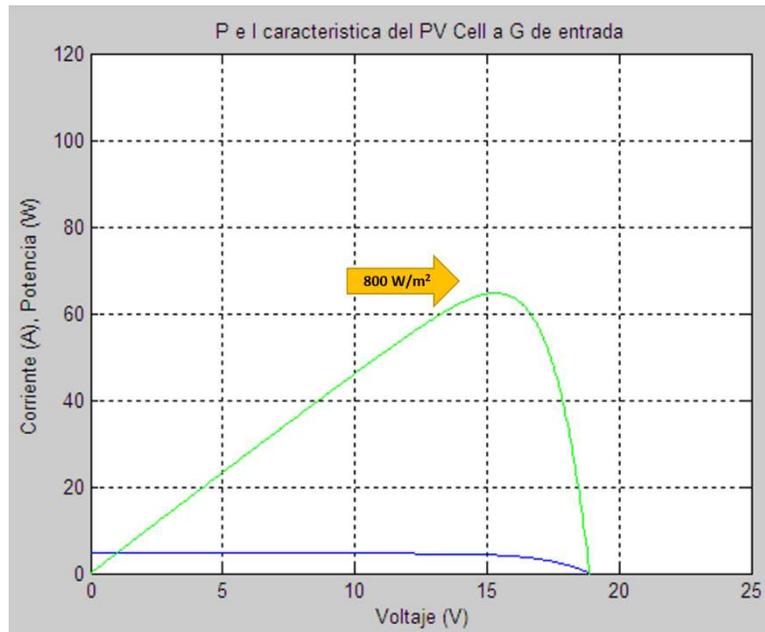


Figura 6.7 “Potencia y Corriente respecto al Voltaje de Celda Fotovoltaica”

6.1.1. Modelo Fotovoltaico

El modelo fotovoltaico basado en la ecuación 3.15 se diseñó e implemento con la herramienta MatLab-Simulink. Este desarrollo permitió simular en forma estática y dinámica el sistema fotovoltaico a través de las ecuaciones de balance de energía. Por lo tanto, en la Figura 6.8 se presenta el modelo sintético de la celda fotovoltaico en donde se agrega el efecto de la temperatura de celda del sistema, en este caso fue de 15 °C a diferentes magnitudes de irradiación solar.

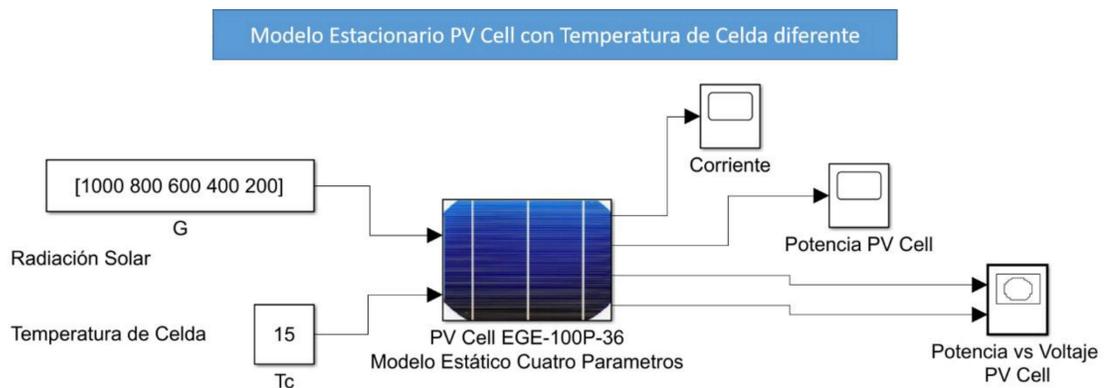


Figura 6.8 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ Tc=15 °C”

En la Figura 6.9 se presenta el comportamiento de la corriente del sistema bajo la temperatura de celda a 15 °C, donde la corriente alcanza los 6 A como punto máximo de generación. Es decir, el efecto es mínimo debido a que la temperatura de operación de la celda es considerada por encima de los 25 °C.

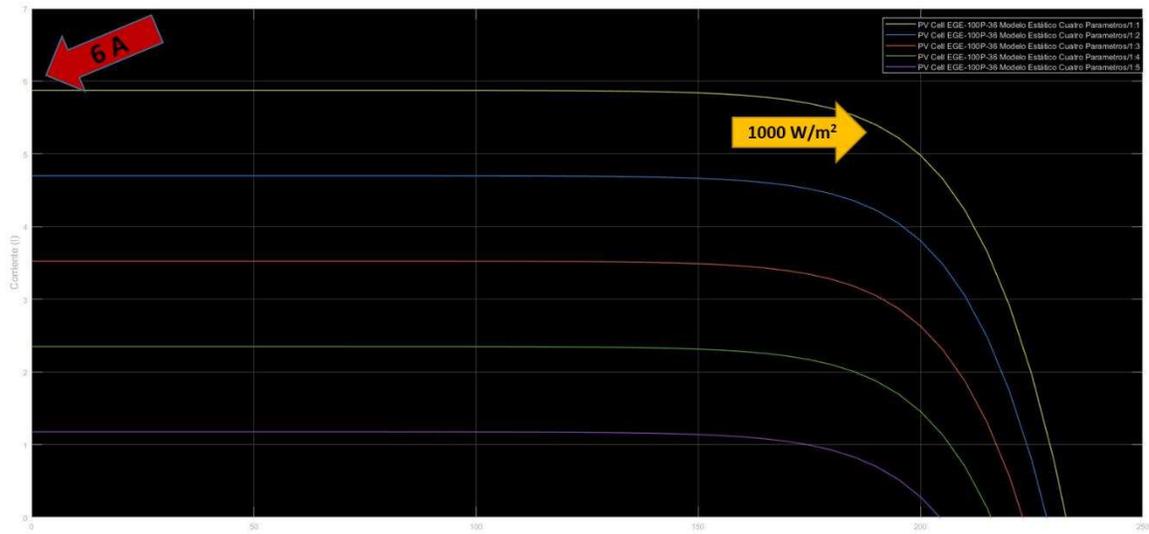


Figura 6. 9 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=15 °C”

En forma análoga en la Figura 6.10 se presenta el comportamiento de la potencia del sistema bajo la temperatura de celda a 15 °C, en donde se alcanzan los 100 W.

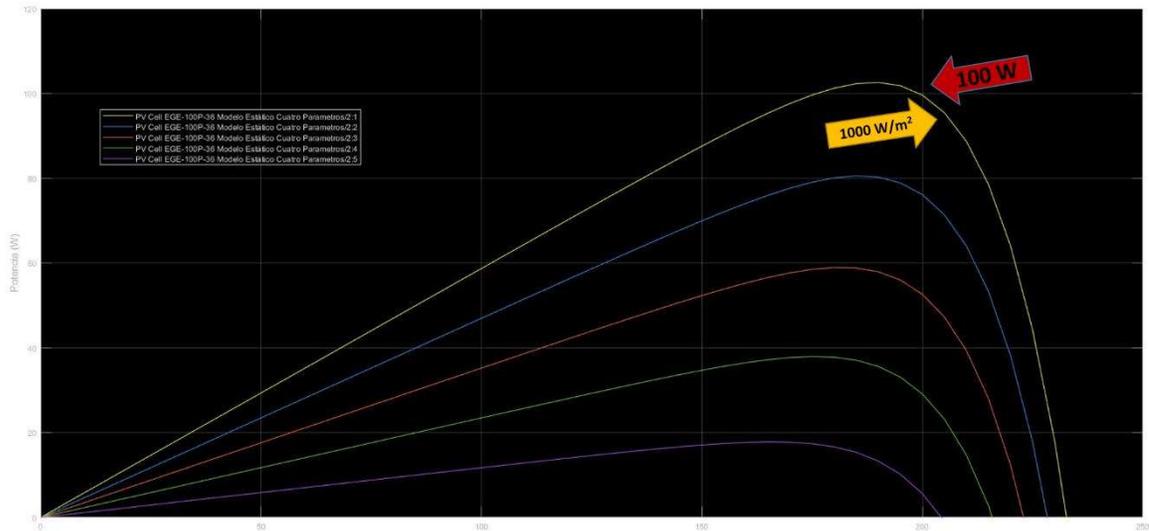


Figura 6.10 “Curva Potencia vs Voltaje @ Tc=15 °C”

El modelo sirvió para simular el comportamiento del sistema fotovoltaico para las temperaturas de celda de 25°C, 35 °C, 45 °C y 55 °C. En la Figura 6.11 se observa el modelo de simulación con una temperatura de celda de 25°C. La Figura 6.12 muestra el nulo efecto de la temperatura de celda en el comportamiento de la corriente del sistema cuando la temperatura de celda a 25 °C, donde la corriente alcanza los 5.95 A. En la Figura 6.13 se presenta la curva de operación de potencia del sistema cuando la temperatura de celda es de 25°C, de igual manera los efectos sobre esta son nulos.

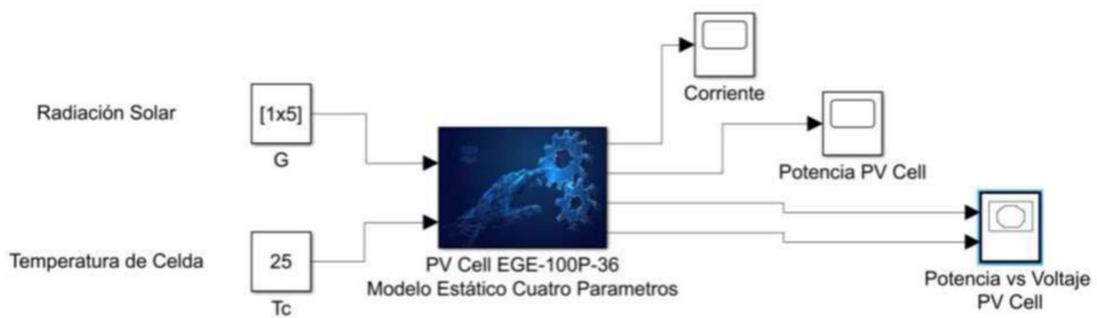


Figura 6.11 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ Tc=25 °C”

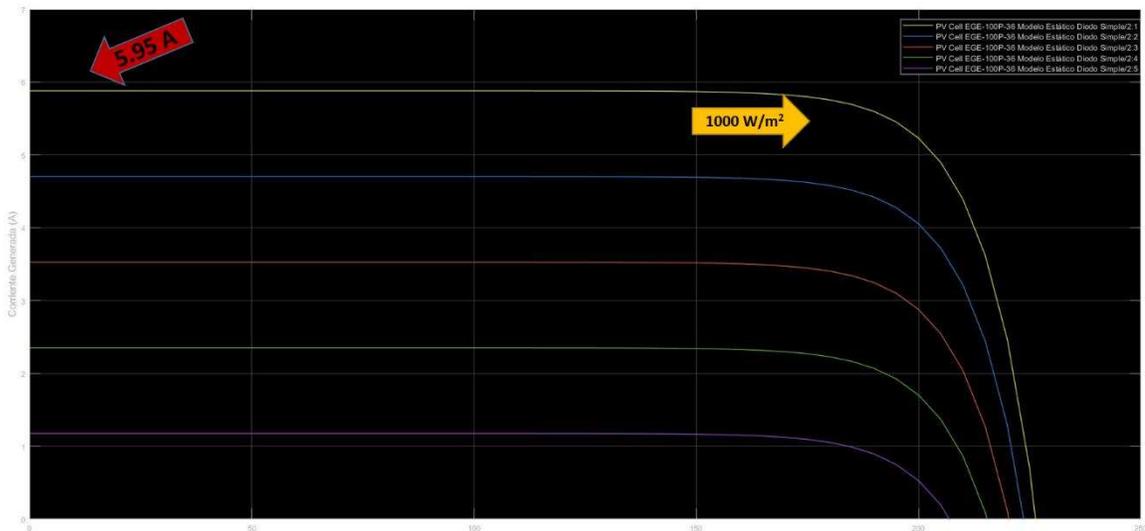


Figura 6.12 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=25 °C”

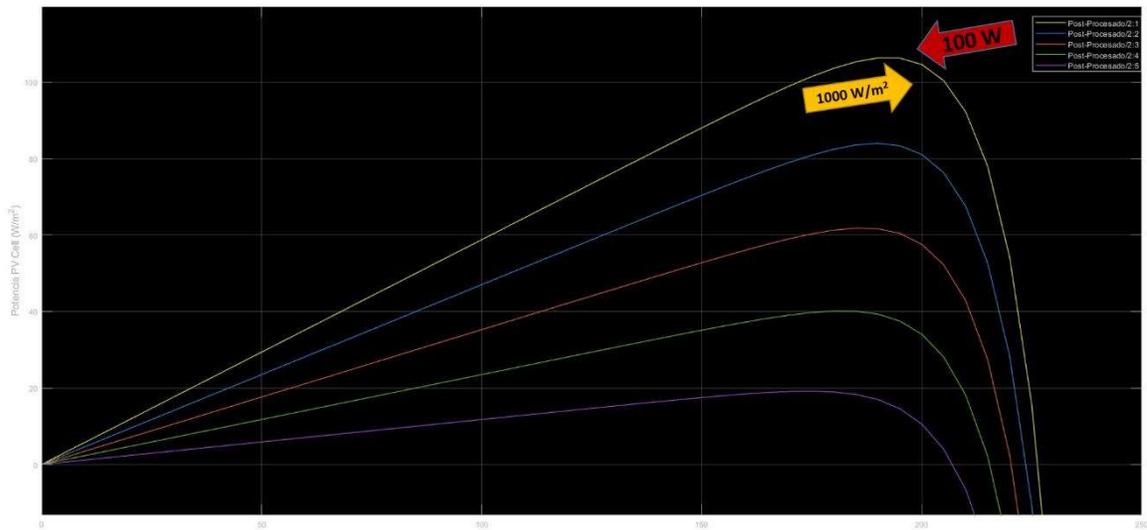


Figura 6.13 “Curva Potencia vs Voltaje @ Tc=25 °C”

En la Figura 6.14 se observa el modelo de simulación con una temperatura de celda de 35°C.

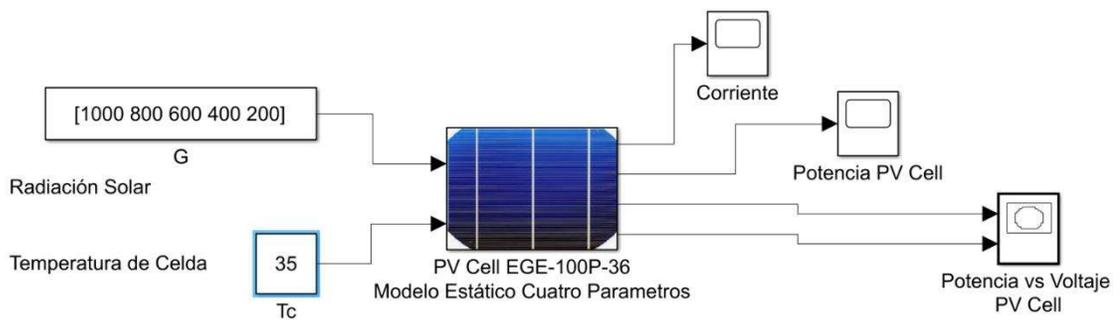


Figura 6.14 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ Tc=35 °C”

La Figura 6.15 muestra el efecto que tiene la temperatura de celda en el comportamiento de la corriente del panel fotovoltaico cuando esta es de 35 °C, logrando

un valor máximo de 5.8 A. En la Figura 6.16 se observa la curva de potencia del sistema cuando la temperatura de celda es de 35°C, en donde se comienza a notar el efecto de la temperatura sobre el sistema debido a que la potencia máxima alcanzada es de 96 W.

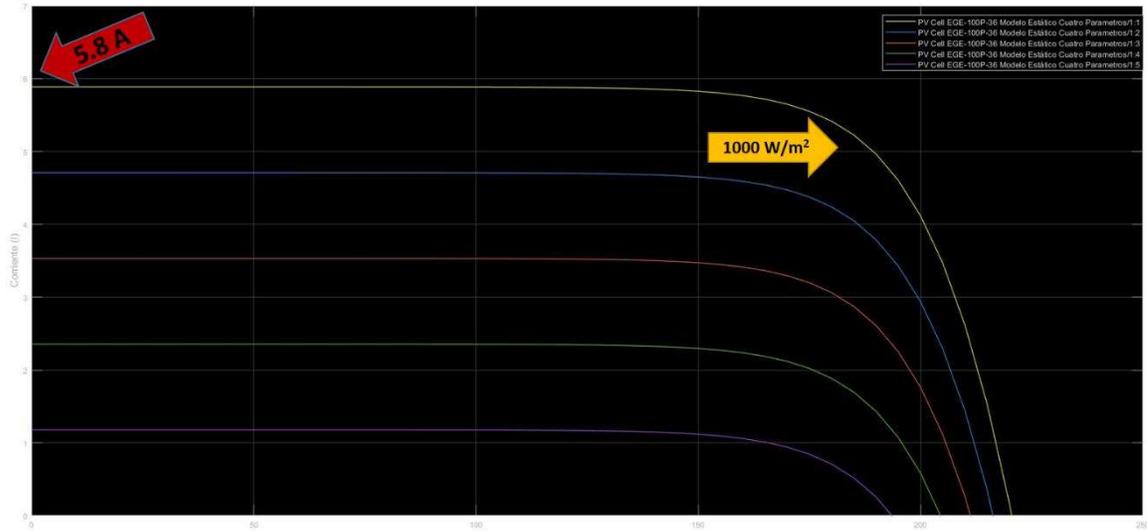


Figura 6.15 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=35 °C”

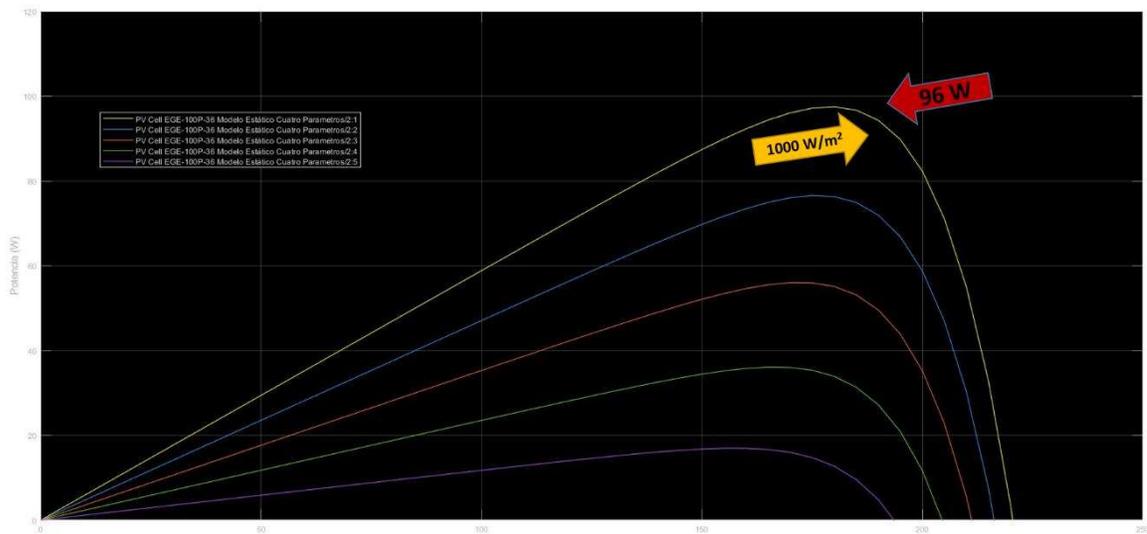


Figura 6.16 “Curva Potencia vs Voltaje @ Tc=35 °C”

La Figura 6.17 muestra el modelo estático del panel fotovoltaico con una temperatura de celda de 45°C.

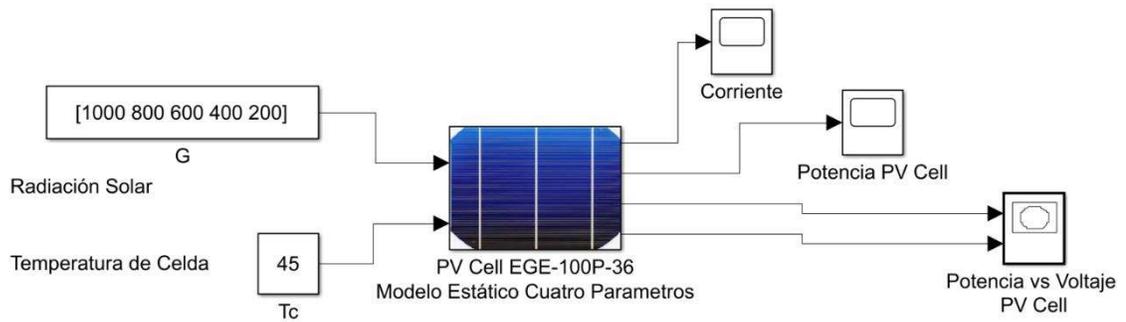


Figura 6.17 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ Tc=45 °C”

La Figura 6.18 muestra el efecto sobre la corriente que tiene la temperatura de celda de 45 °C, logrando un valor máximo de 5.6 A. En la Figura 6.19 se presenta la curva de potencia a 35°C como temperatura de celda, en donde alcanzada una potencia de 92 W.

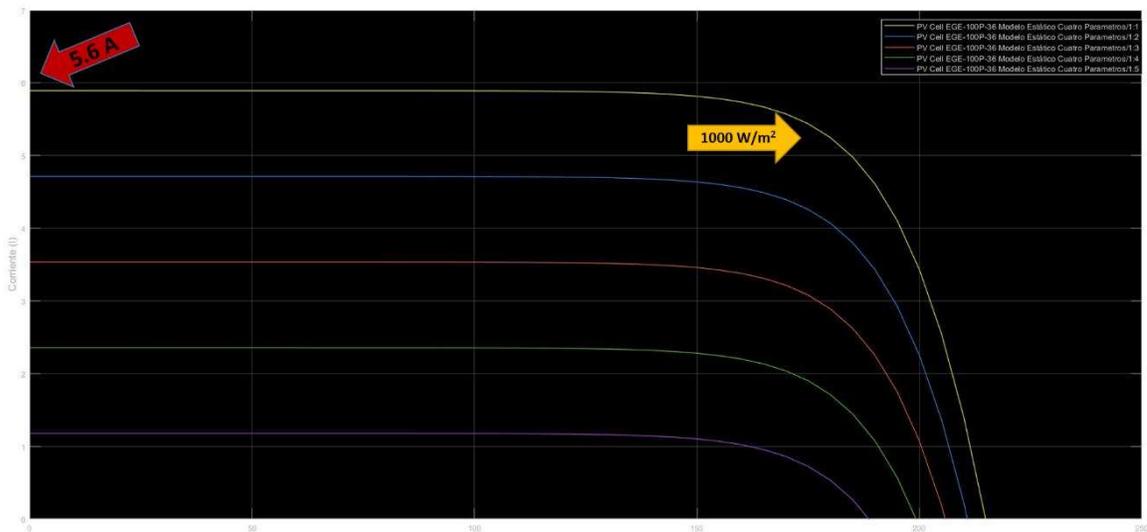


Figura 6.18 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=45 °C”

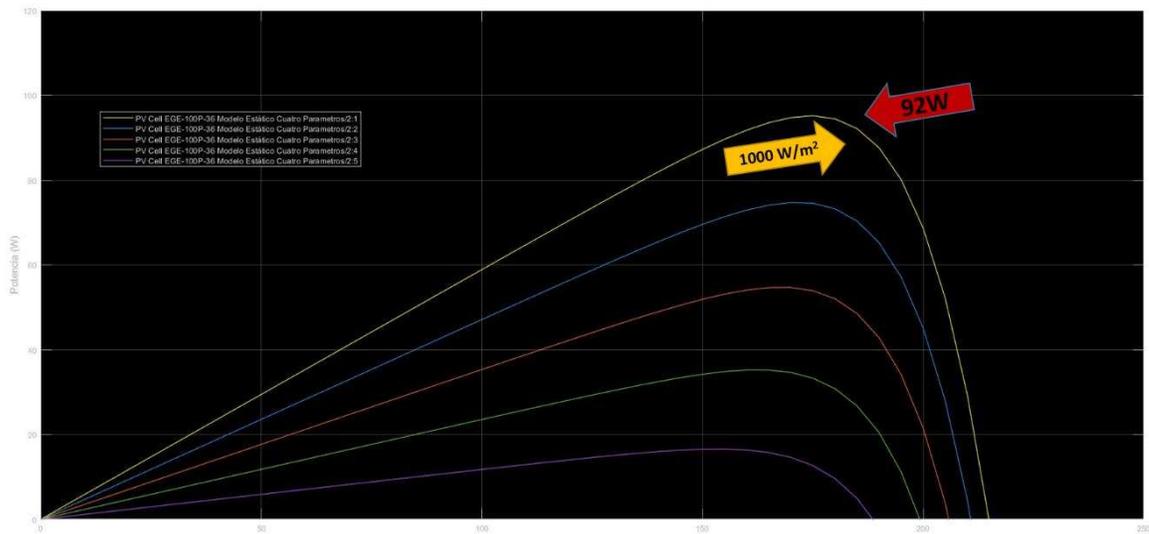


Figura 6.19 “Curva Potencia vs Voltaje @ $T_c=45^\circ\text{C}$ ”

La Figura 6.20 muestra el modelo del panel fotovoltaico con una temperatura de celda de 55°C .

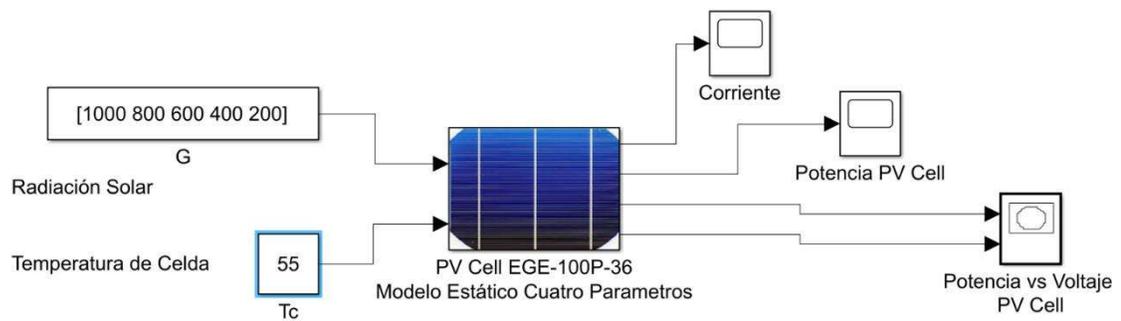


Figura 6.20 “Modelo Estático Cuatro Parámetros @ $T_c=55^\circ\text{C}$ ”

La Figura 6.21 muestra el comportamiento de la corriente respecto a la temperatura de celda de 55 °C, logrando un valor máximo de 5.4 A. En la Figura 6.22 se observa la curva de potencia a 55°C como temperatura de celda, en donde se alcanza una potencia de 90 W.

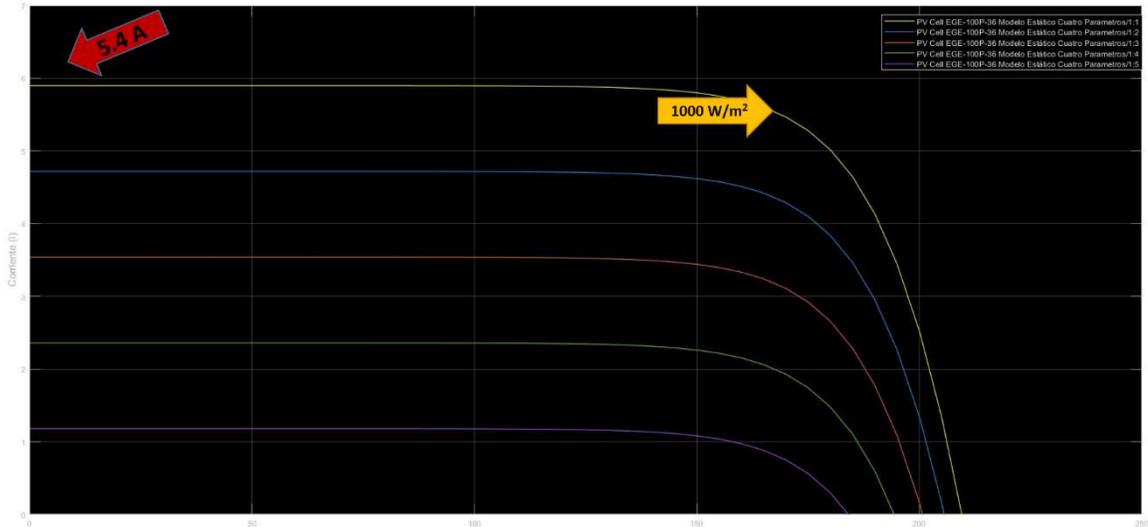


Figura 6.21 “Curva Corriente vs Voltaje @ Tc=55 °C”

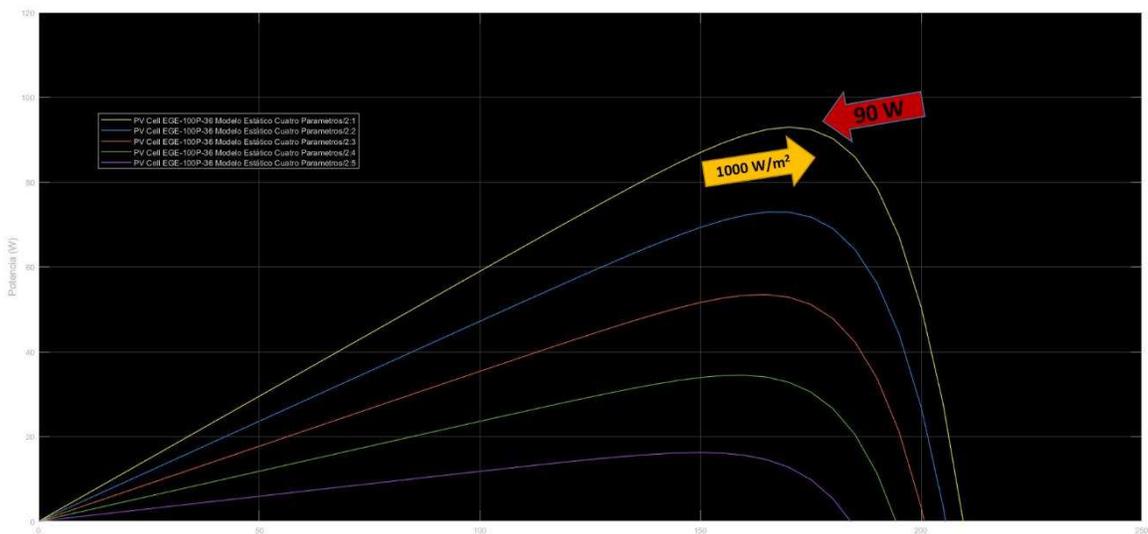


Figura 6.22 “Curva Potencia vs Voltaje @ Tc=55 °C”

6.1.2. Modelo Híbrido

El modelo híbrido es basado en la ecuación 5.12 el cual se diseñó e implemento con MatLab. Este desarrollo permitió simular en forma estática el sistema híbrido térmico-fotovoltaico a través de sus ecuaciones de balance de energía. Además, con este algoritmo es posible introducir los valores de temperatura del fluido, caudal y coeficiente convectivo que son los principales parámetros de diseño del sistema híbrido de generación. Por lo tanto, en la Figura 6.23 se presenta el algoritmo principal del modelo sintético híbrido térmico-fotovoltaico.

```
55
56 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
57 %Parámetros Constantes
58 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
59 disp('Parametros entrada modelo colector híbrido')
60 % Tam=input('Temperatura Ambiente (°C)');
61 % G=input('Radiación promedio (W/m^2)');
62 % Tcel=input('Temperatura Celda (°C)');
63 Tif=input('Temperatura Entrada Fluido (°C)');
64 Caudal=input('Caudal del agua de flujo (lpm)');
65
66 Ta= Tam+273.15;      %Temperatura ambiente (K)
67 Gt= GT;             %Radiacion solar      (W/m^2)
68 Tc= Tcel+273.15;    %Temperatura de Celda (K)
69 Ti= Tif+273.15;    %Temperatura de fluido de entrada (K)
70 Tf= Ti-273.15;     %Temperatura de fluido de entrada (°C)
71 ta= 0.9;           %Producto Transmitancia-Absortancia
72 em=0.9;           %Emisividad
73 sbn=5.67e-8;      %Constante de Steffan-Boltzmannf (W/m^2 K^4)
74 hw= 10 ;          %Coef HT (W/m^2 K)
75 %hw= 3.74*Vv^(0.6); %Coef HT (W/m^2 K)
76
77 fq=0;
78
```

Command Window

```
Parametros entrada modelo colector híbrido
Temperatura Entrada Fluido (°C)20
Caudal del agua de flujo (lpm)15
fx >>
```

Figura 6.23 “Modelo Estático Sistema Híbrido Térmico-Fotovoltaico”

La simulación del sistema híbrido se focalizó principalmente en el comportamiento de la temperatura de la celda. En la Figura 6.24 se logró comparar la temperatura de celda alcanzada con y sin el sistema colector térmico, y es notoria la reducción de la temperatura de la celda por el efecto del sistema colector de energía térmica. La línea roja nos muestra solo al panel fotovoltaico y la línea azul nos muestra el comportamiento de la temperatura del sistema híbrido en donde la máxima fue de 313 K en contraste con los 318 K alcanzados por el panel fotovoltaico.

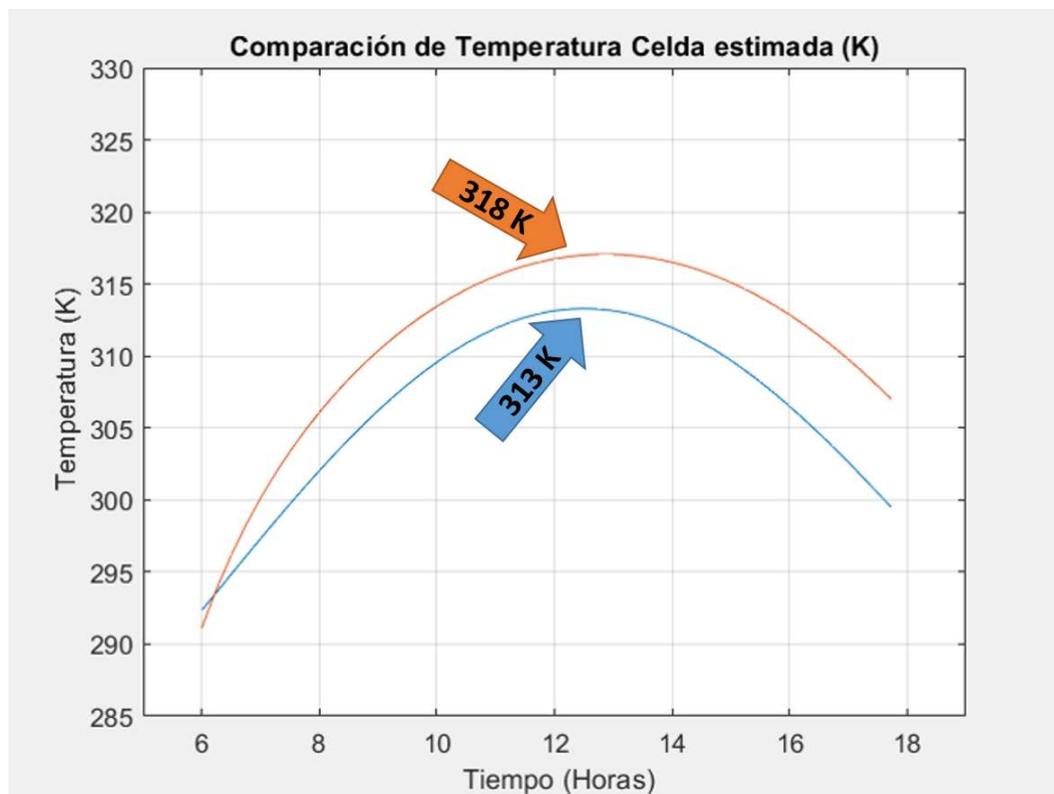


Figura 6.24 "Curva de Temperatura de Celda Sistema Híbrido"

En la Figura 6.25 se comparó la potencia de celda alcanzada con y sin el sistema colector, del sistema híbrido térmico-fotovoltaico, y en la Figura 6.26 se compara la eficiencia alcanzada por el sistema.

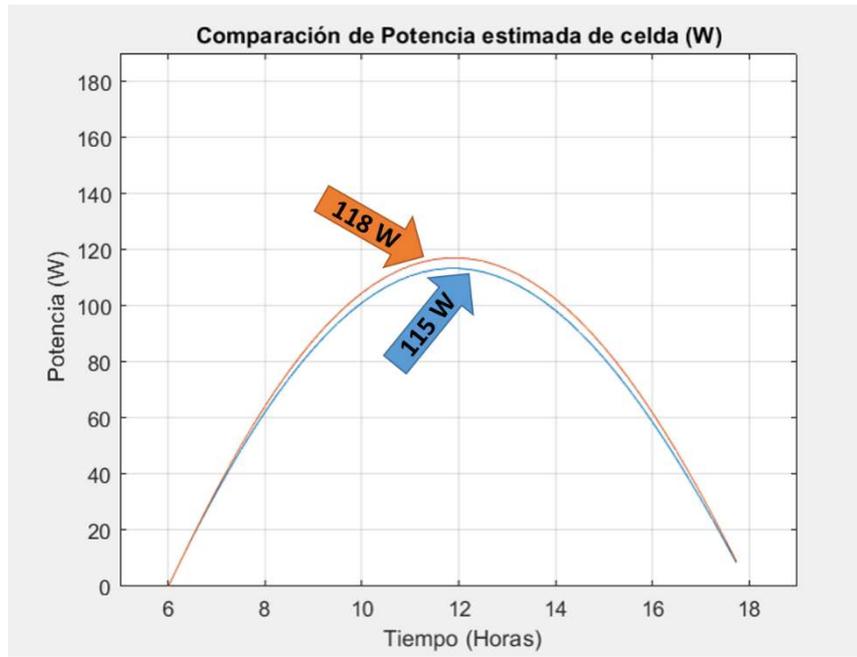


Figura 6.25 “Curva de Potencia de Celda Sistema Híbrido”

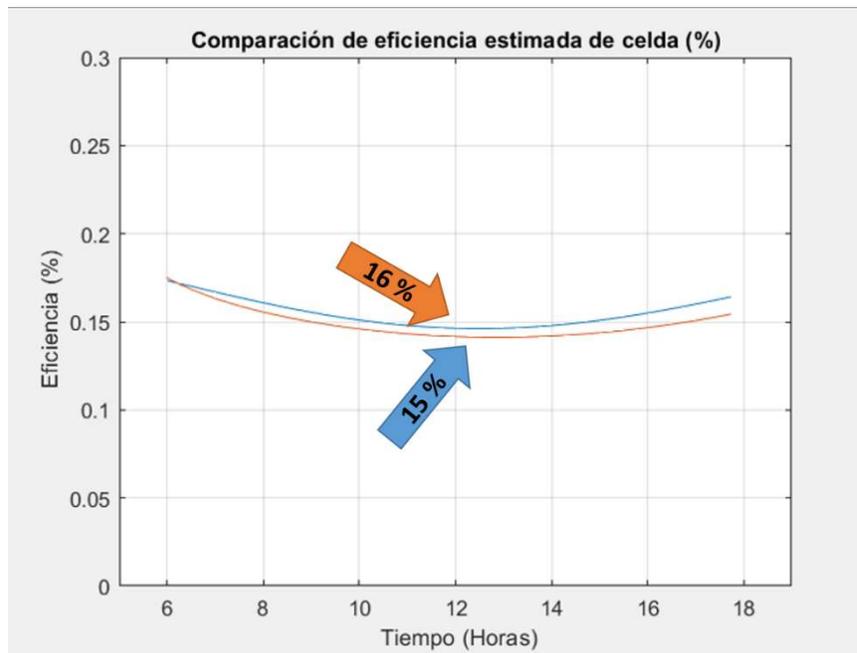


Figura 6.26 “Curva de Eficiencia de Celda Sistema Híbrido”

La Figura 6.27 muestra el comparativo de la temperatura de la celda en una segunda iteración con nuevos parámetros de control de diseño del sistema híbrido, en donde es notoria la reducción de la temperatura de la celda al utilizar el colector térmico ya que al ajustar los parámetros de diseño se maximiza el proceso de transferencia de calor.

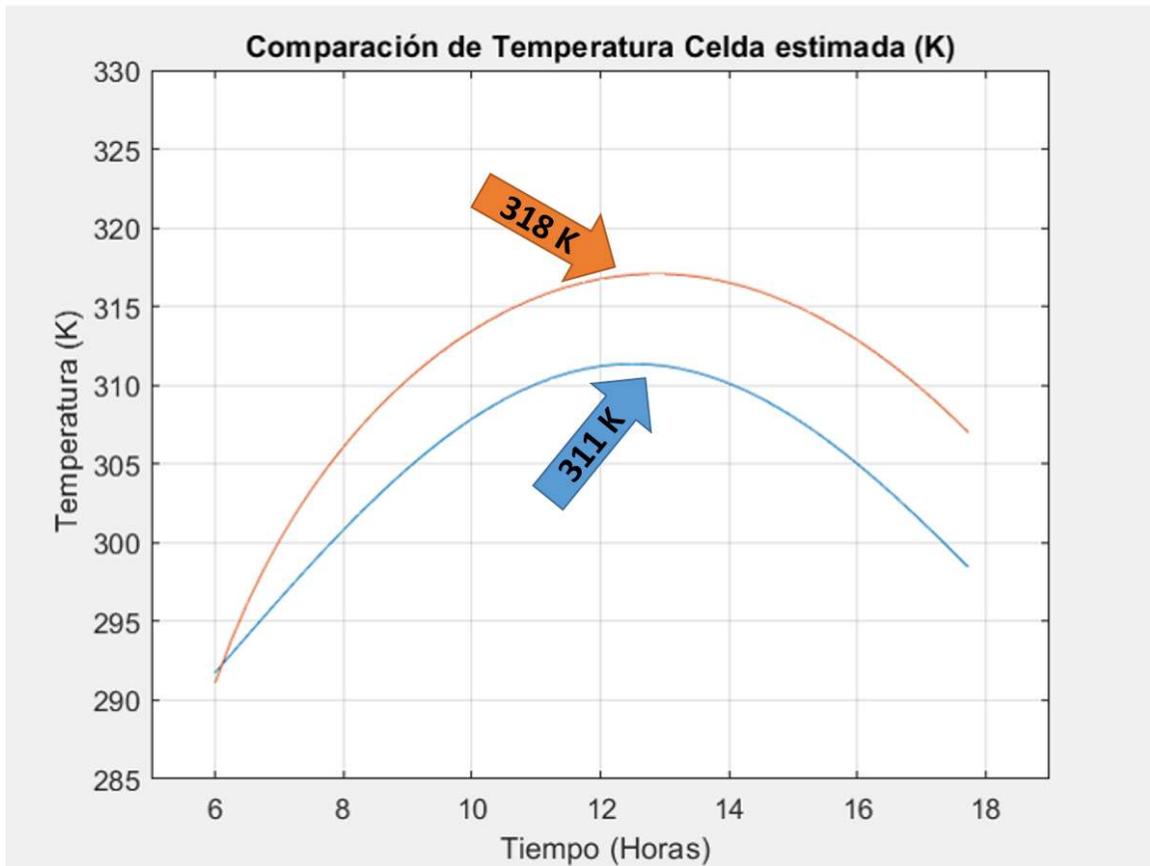


Figura 6.27 "Curva de Temperatura de Celda Sistema Híbrido Sim-2"

En la Figura 6.28 se comparó la potencia de celda entre el sistema híbrido térmico-fotovoltaico y el panel fotovoltaico, y en la Figura 6.29 se compara las eficiencias logradas por ambos sistemas.

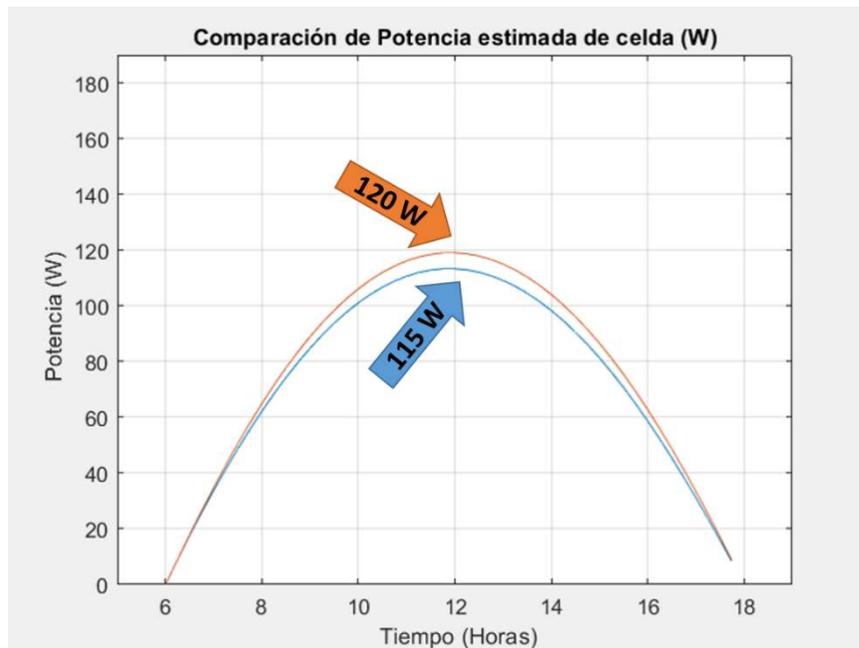


Figura 6.28 “Curva de Potencia de Celda Sistema Híbrido Sim-2”

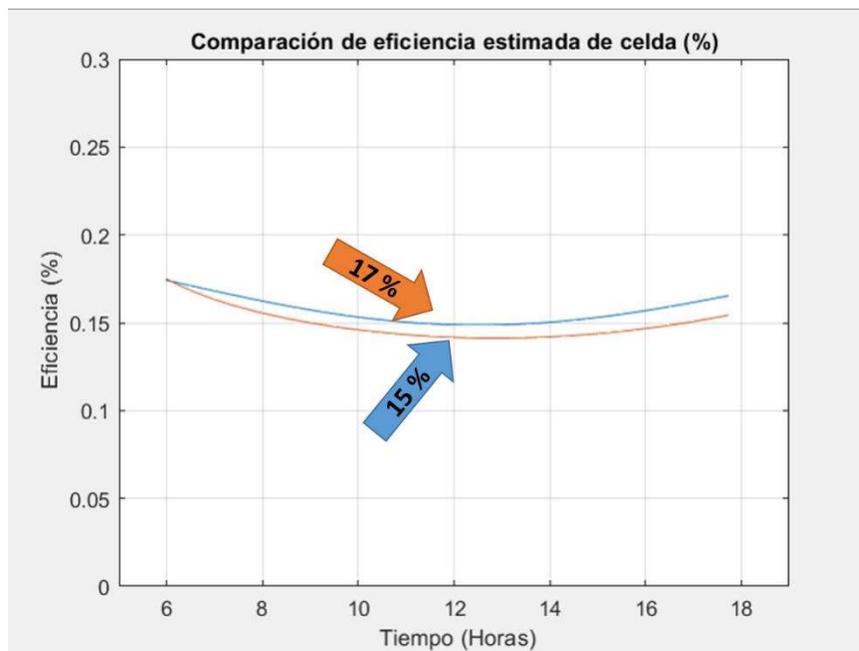


Figura 6.29 “Curva de Eficiencia de Celda Sistema Híbrido Sim-2”

6.2. Modelado y Simulación en Estado Transitorio

El modelo de simulación en estado transitorio de cualquier sistema nos permite evaluar el comportamiento dinámico y la transición de las variables de estado conforme se logra alcanzar la estabilidad. Entonces para un sistema de generación de energía es de suma importancia conocer y evaluar la evolución dinámica de las variables de estado, y más cuando su fuente de energía es completamente dinámica.

En esta investigación se desarrolló el modelo de un sistema híbrido térmico-fotovoltaico el cual fue descrito en la sección cinco, y en esencia su comportamiento dinámico se evalúa con la ecuación 5.2. Por lo tanto, en esta sección presentaremos los resultados obtenidos del proceso de simulación del modelo en estado transitorio implementado con la herramienta MatLab-Simulink

6.2.1. Modelo Térmico-Eléctrico Convección

El primer modelo de simulación que se muestra es el del sistema térmico eléctrico que incluye pérdidas de energía por convección y radiación. Este modelo permitió evaluar el comportamiento dinámico de un sistema fotovoltaico en donde mediante los balances de energía se incluyó el efecto de las pérdidas de energía, fuente primaria de energía para la conversión, las variables climatológicas de la región y como salida del sistema se tiene la evolución de la temperatura de la celda. En la Figura 6.30 se muestra el modelo sintético del sistema térmico eléctrico, el cual tiene como entradas la radiación solar y temperatura ambiente; estas dos entradas pueden ser valores simulados o en su caso muestreados por una estación meteorológica.

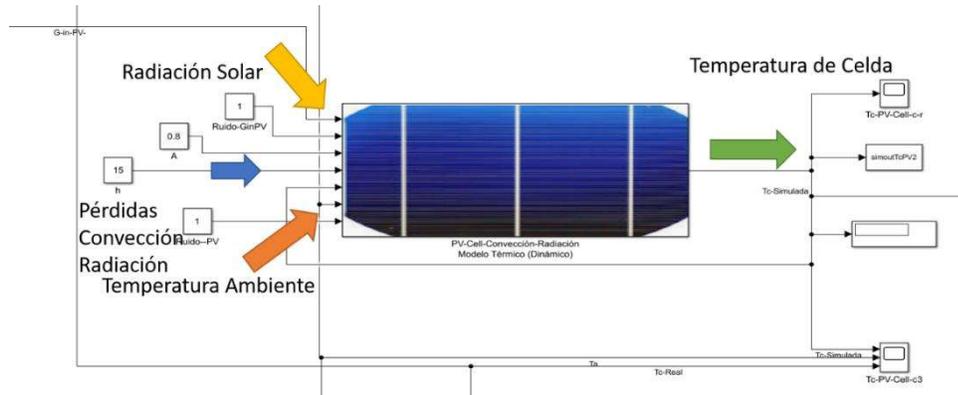


Figura 6.30 “Modelo Sintético del Sistema Térmico Eléctrico”

En la Figura 6.31 se muestran los valores de la radiación solar incidente muestreada a través de la estación meteorológica de la planta solar en el día promedio del mes de abril del año 2019. Los valores de radiación se presentan en unidades de potencia respecto a unidad de área. Al igual en la Figura 6.32 se observa la curva de temperatura ambiente muestreada por la estación meteorológica en el mismo día de la radiación solar incidente.

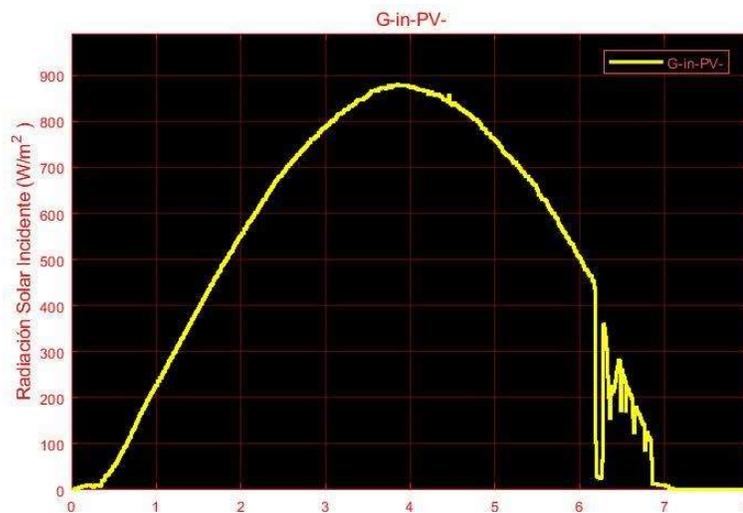


Figura 6.31 “Curva de Radiación Solar Incidente Muestreada”

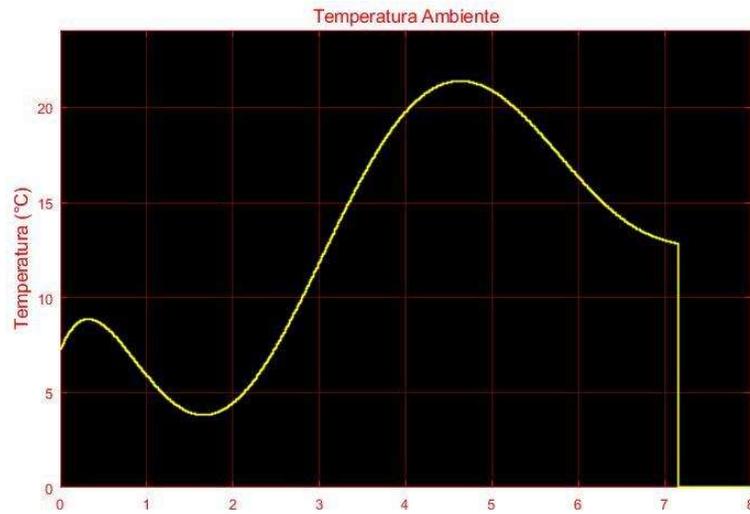


Figura 6.32 “Curva de Temperatura Ambiente”

La Figura 6.33 representa la Temperatura de celda que se obtiene del modelo de simulación sistema térmico eléctrico con convección. La temperatura de celda se muestra en unidades de temperatura absoluta, es decir grados Kelvin. En la Figura 6.34 se observan en un mismo grafico la temperatura de celda y temperatura ambiente en grados Kelvin.

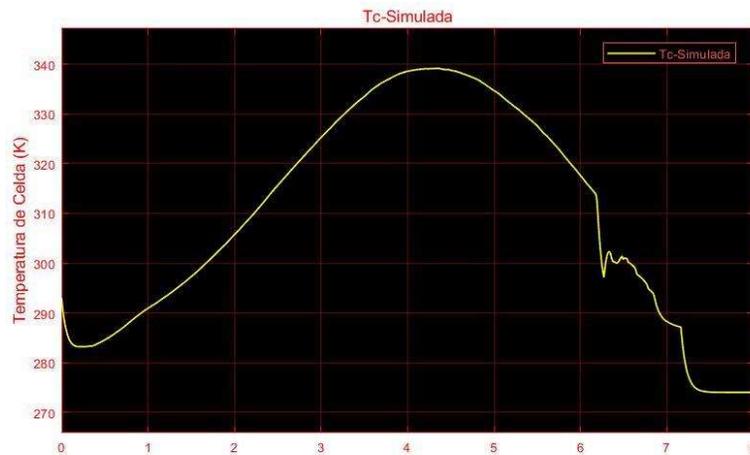


Figura 6.33 “Curva de Temperatura de Celda Modelo Convección”

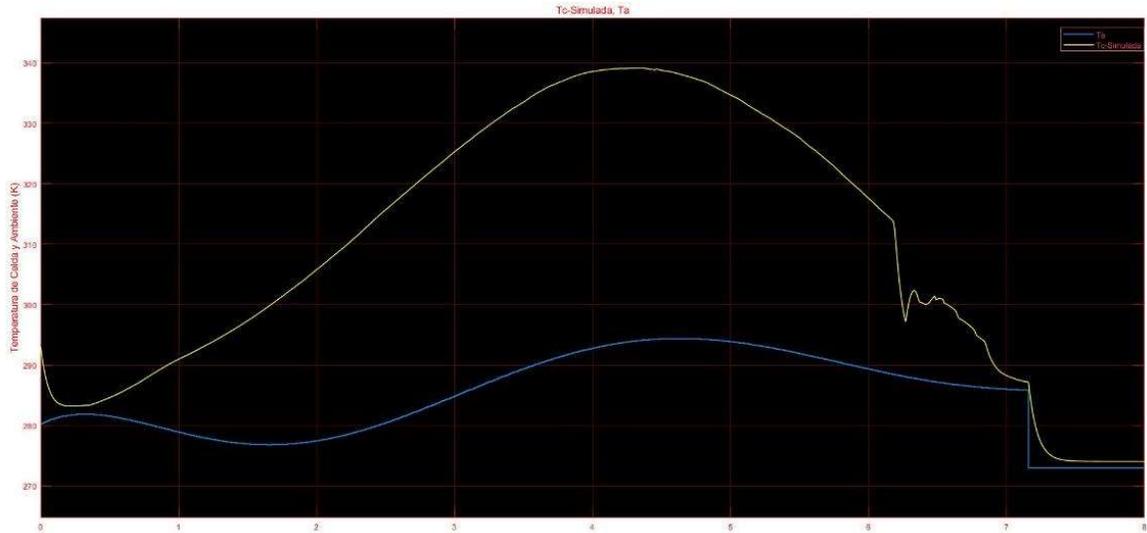


Figura 6.34 “Curva de Temperatura de Celda y Ambiente M-Convección”

En forma representativa y a modo de comparación en la Figura 6.35 se observan la temperatura de celda muestreada y simulada del sistema fotovoltaico en análisis, además de la temperatura ambiente en grados Kelvin.



Figura 6.35 “Curva de Temperatura de Celda Real y Simulada M-Convección”

En la Figura 6.36 se observan las curvas de comportamiento de corriente de celda muestreada del sistema fotovoltaico y la del sistema térmico eléctrico con convección simulado. En donde observamos que la curva de corriente simulada se encuentra por debajo de los valores medidos en el sistema fotovoltaico, es necesario tomar en cuenta que la radiación solar incidente en el modelo de simulación es la misma que la que produce la corriente de celda muestreada, y la resistencia de carga es la misma en ambos sistemas.

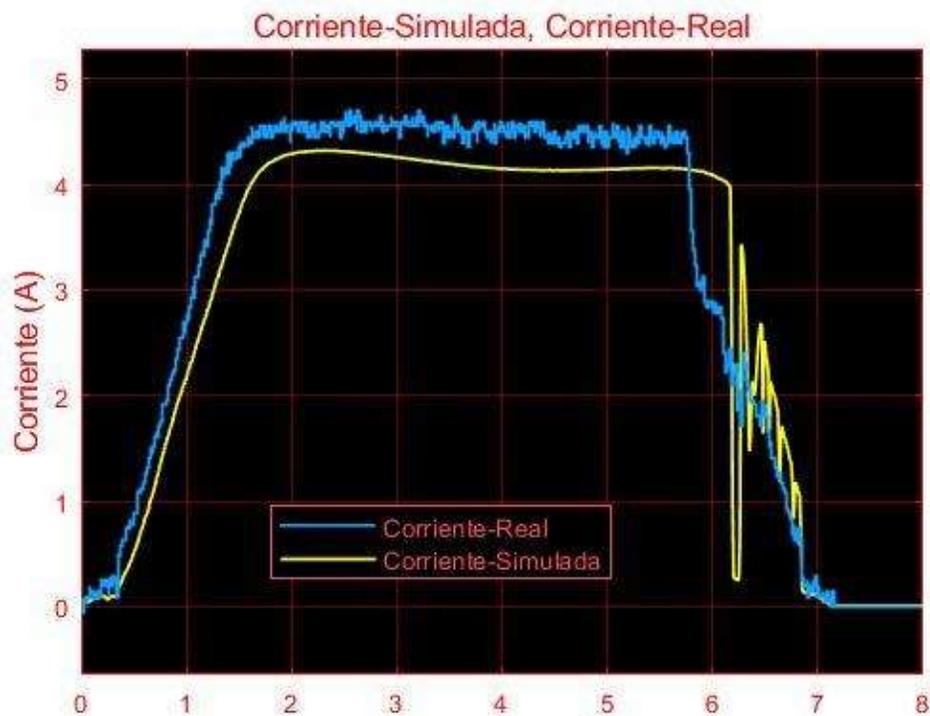


Figura 6.36 “Curva de Corriente Real y Simulada M-Convección”

La Figura 6.37 muestra las curvas de comportamiento de voltaje de celda del sistema fotovoltaico muestreado y la del sistema térmico eléctrico con convección simulado. Es notoria la semejanza que tiene el sistema en cuanto a magnitud en el voltaje, ya que la temperatura de celda afecta en forma directa al voltaje generado por la celda.

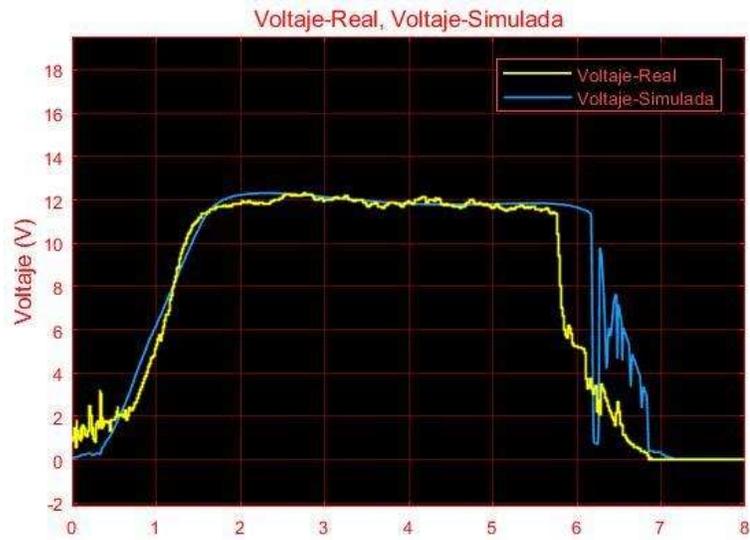


Figura 6.37 “Curva de Voltaje Real y Simulada M-Convección”

En la Figura 6.38 se observan las curvas de potencia de la celda muestreada del sistema fotovoltaico y la del sistema térmico eléctrico con convección simulado, es notorio el efecto que tiene la temperatura de celda en ambos sistemas.

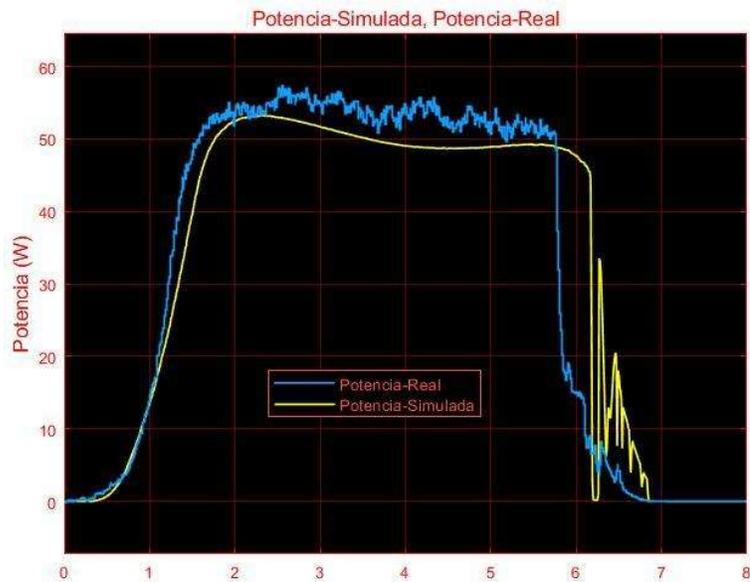


Figura 6.38 “Curva de Potencia Real y Simulada M-Convección”

En forma adicional se pudo simular el comportamiento del electrolizador alcalino si éste fuese conectado al sistema fotovoltaico y en la Figura 6.39 se observa la curva de comportamiento de generación de hidrógeno por efecto de la potencia obtenida a la salida del modelo de simulación del sistema térmico eléctrico con convección.

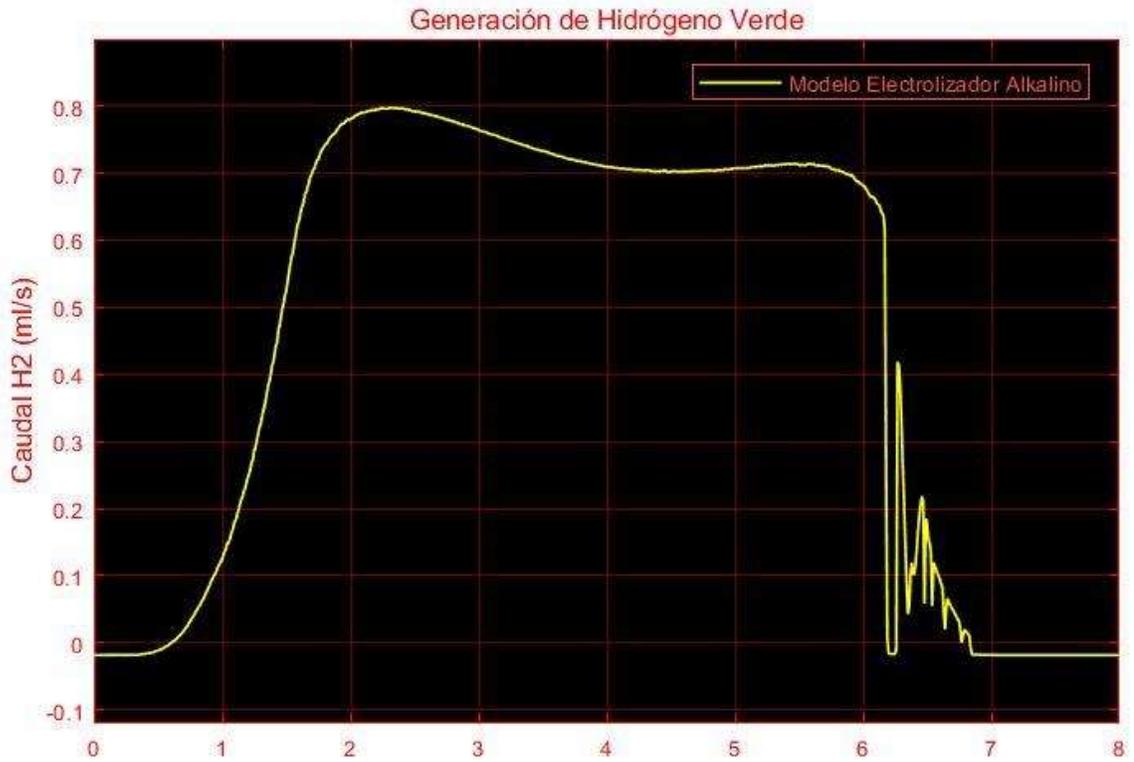


Figura 6.39 “Curva de Hidrógeno Generado en M-Convección”

En la Figura 6.40 se presenta la curva que representa el error entre la temperatura del sistema muestreado y el simulado, en donde el mayor error entre ambos sistemas fue de quince grados Kelvin. En base a esta curva podemos identificar la sensibilidad que tiene el modelo de simulación, debido a que este sistema de simulación es el más representativo para comparar el sistema fotovoltaico. En forma análoga en la Figura 6.41 se muestra la curva del error entre la corriente del sistema muestreado y el simulado.



Figura 6.40 “Variación de Temperatura de Celda Real y Simulada M-Convección”



Figura 6.41 “Variación de Corriente Real y Simulada M-Convección”

En la Figura 6.42 se muestra la curva de error entre el voltaje del sistema muestreado y el simulado. En donde la mayor variación se observa al final del proceso y esto es por efecto de una atenuación abrupta en la radiación solar incidente, en cambio a lo largo del proceso de conversión la variación máxima alcanzada es de casi dos Volts.

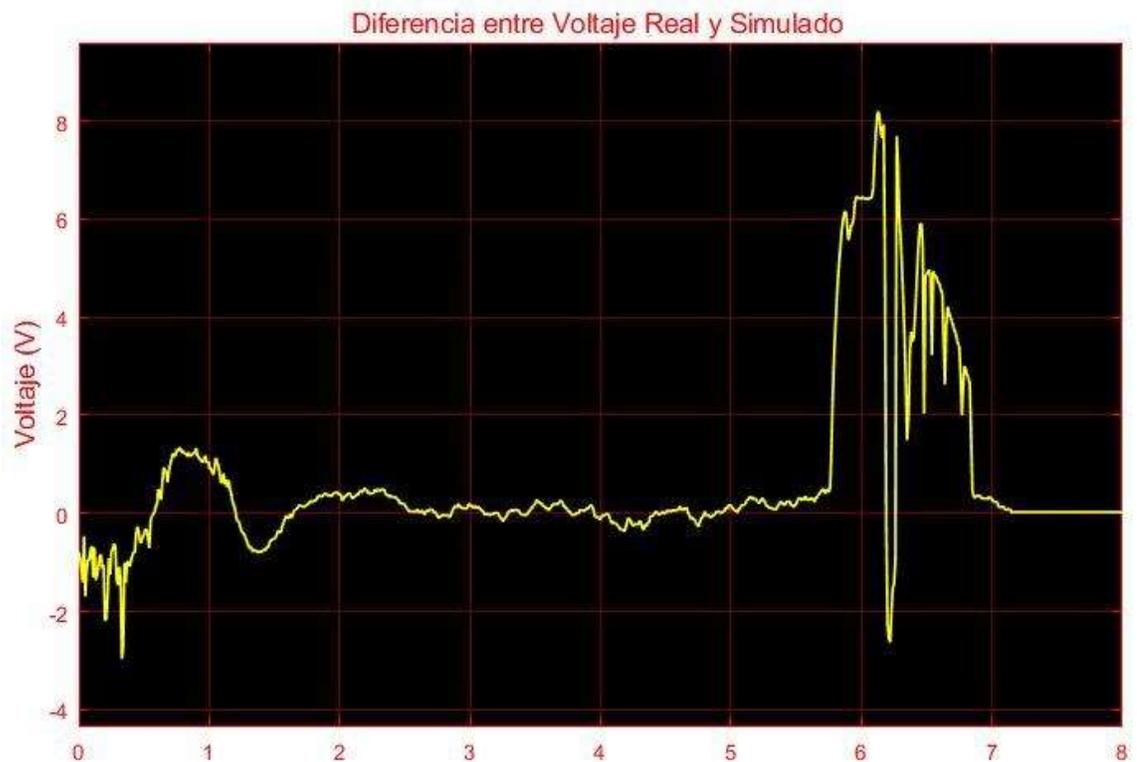


Figura 6.42 “Variación de Voltaje Real y Simulada M-Convección”

En forma semejante en la Figura 6.43 se muestra la curva de error entre la potencia del sistema muestreado y el simulado, que refleja los efectos del voltaje y en la operación normal el sistema alcanza una variación de no más de diez Watts.

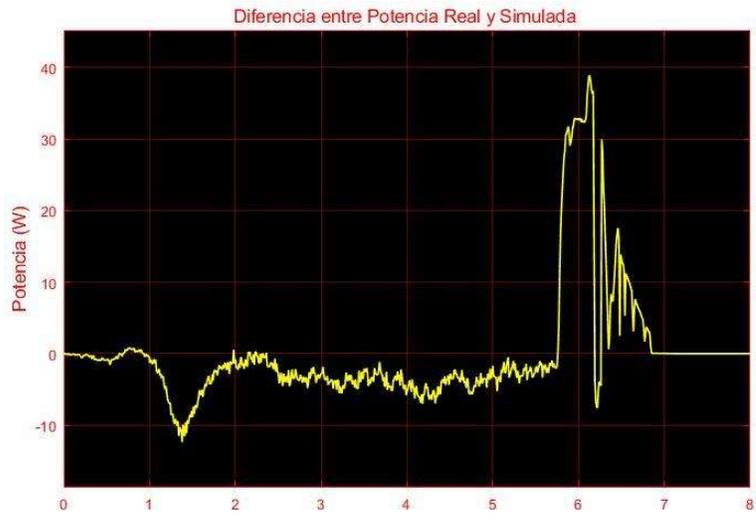


Figura 6.43 “Variación de Potencia Real y Simulada M-Convección”

En la Figura 6.44 se muestra la curva de variación de corriente entre el sistema muestreado y el simulado con el modelo de 4 parámetros con una temperatura de celda constante de veinticinco grados centígrados.

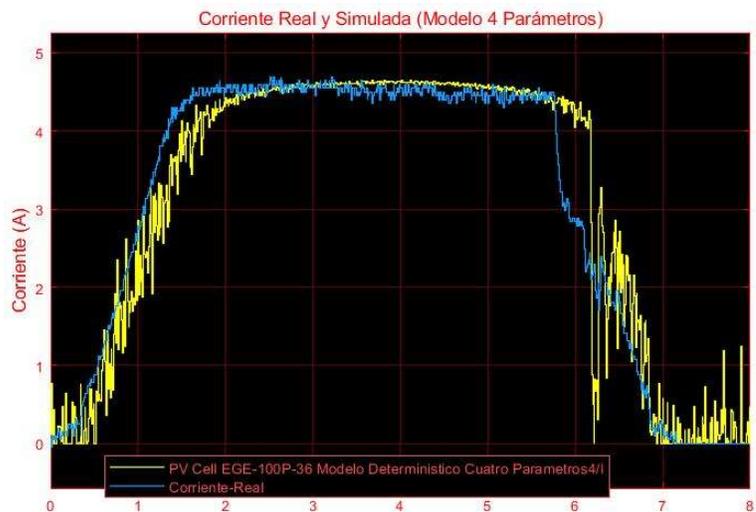


Figura 6.44 “Curva de Corriente Real y Simulada M-4-Parámetros”

En la Figura 6.45 se presenta la curva de variación de voltaje entre el sistema muestreado y el simulado con el modelo de 4 parámetros con una temperatura de celda constante, en donde es notorio el efecto de la temperatura de celda ya que en el sistema real está no es constante si no que crece con respecto a la evolución del día solar.

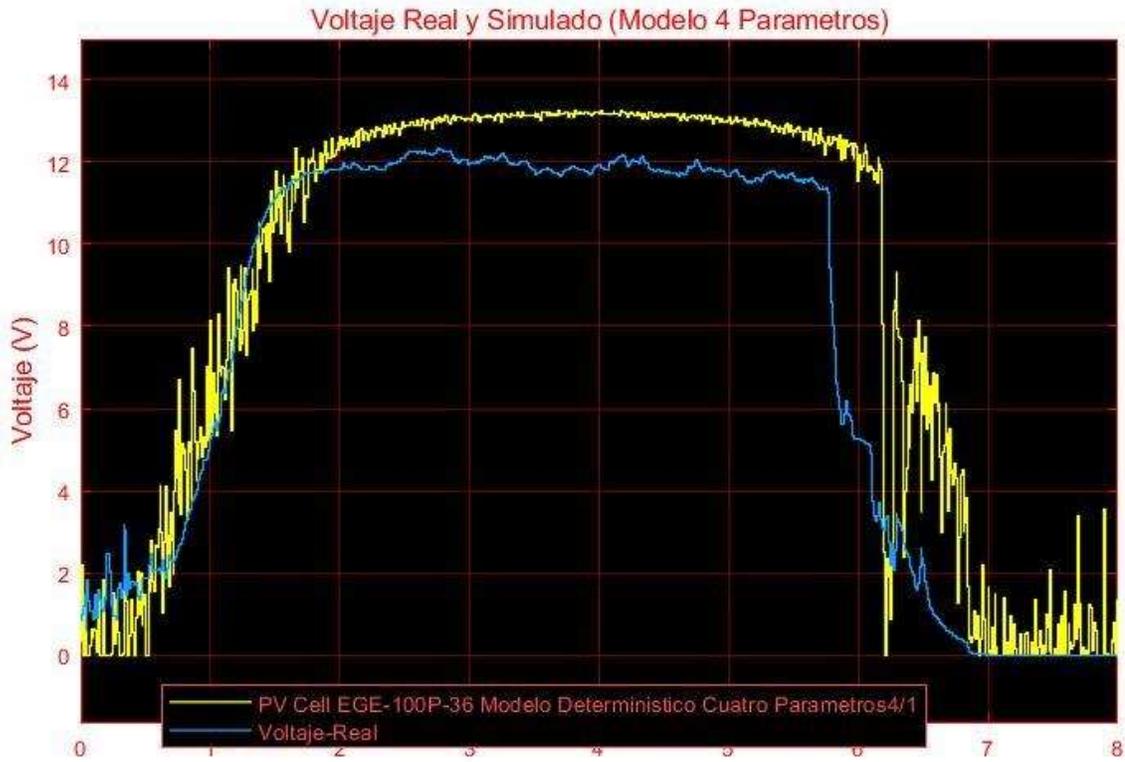


Figura 6.45 “Curva de Voltaje Real y Simulada M-4-Parámetros”

En la Figura 6.46 se observa la curva de variación de potencia entre el sistema muestreado y el simulado con el modelo de 4 parámetros con una temperatura de celda constante, y de igual forma es notorio el efecto sobre la potencia en la simulación respecto al sistema fotovoltaico instalado y muestreado.

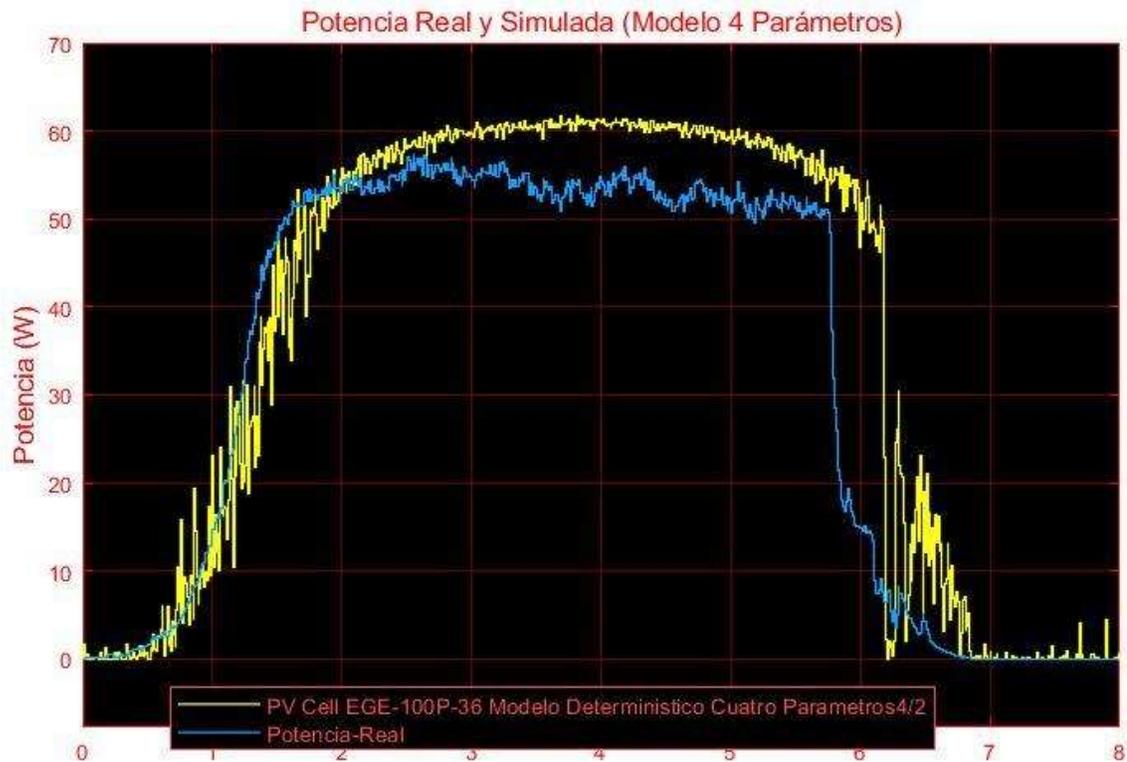


Figura 6.46 “Curva de Potencia Real y Simulada M-4-Parámetros”

6.2.2. Modelo Híbrido Térmico-Fotovoltaico

El segundo modelo de simulación que se muestra es el del sistema híbrido térmico fotovoltaico en el cual se incluyen las pérdidas de energía por convección y radiación, pero además se incluye un colector térmico que transfiere la energía absorbida de la celda a un fluido de trabajo denominado como fluido térmico. Este modelo permitió evaluar el comportamiento dinámico del sistema híbrido con el propósito de cuantificar la energía térmica y eléctrica producida con la misma fuente de energía entrante. El efecto producido

por el fluido térmico permitió identificar los parámetros de diseño para los sistemas híbridos térmicos-fotovoltaicos. Por lo tanto, al conocer las características de diseño de este tipo de sistemas, se pueden dimensionar y simular para cuantificar el potencial energético producido en una región particular. En la Figura 6.47 se muestra el modelo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico, el cual permite como entrada a las variables de radiación solar, temperatura ambiente y parámetros de diseño para calcular los coeficientes de transferencia de calor, es necesario tener en cuenta que las entradas pueden ser valores simulados o en su caso muestreados por una estación meteorológica. La Figura 6.48 presenta el modelo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico, desde su panorámica de la conversión de energía solar a energía eléctrica por el efecto fotovoltaico.

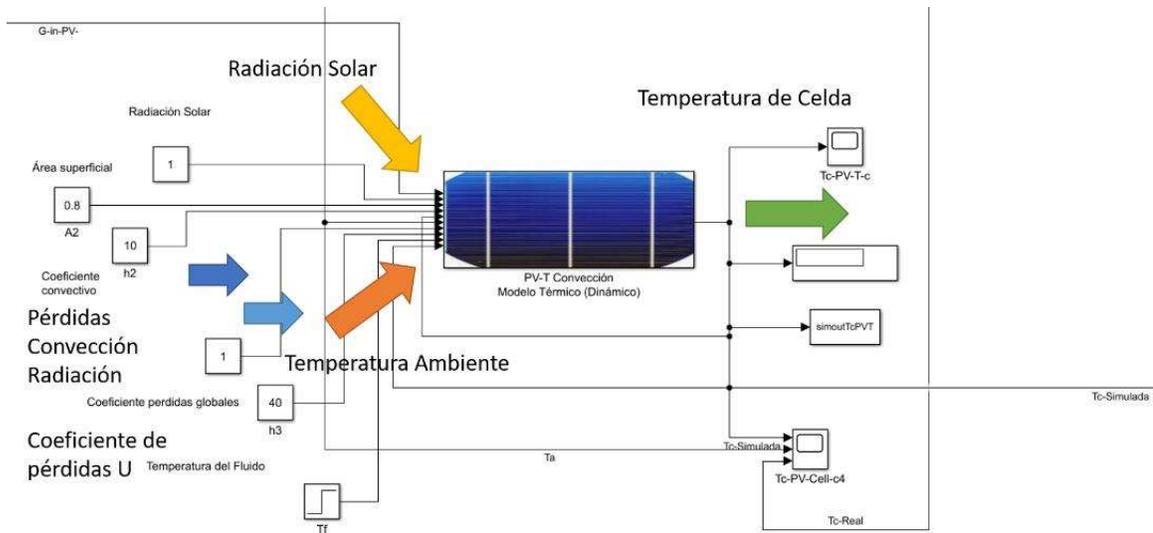


Figura 6.47 “Modelo del Sistema Híbrido Térmico”

A modo comparativo en la Figura 6.49 se presentan las curvas de temperatura de celda, y temperatura ambiente en grados Kelvin. En el caso de la temperatura de celda se presenta el sistema muestreado y el simulado con el modelo de simulación sistema térmico eléctrico con convección-radiación; donde es notorio la reducción de la temperatura por efecto de las pérdidas de calor combinadas.

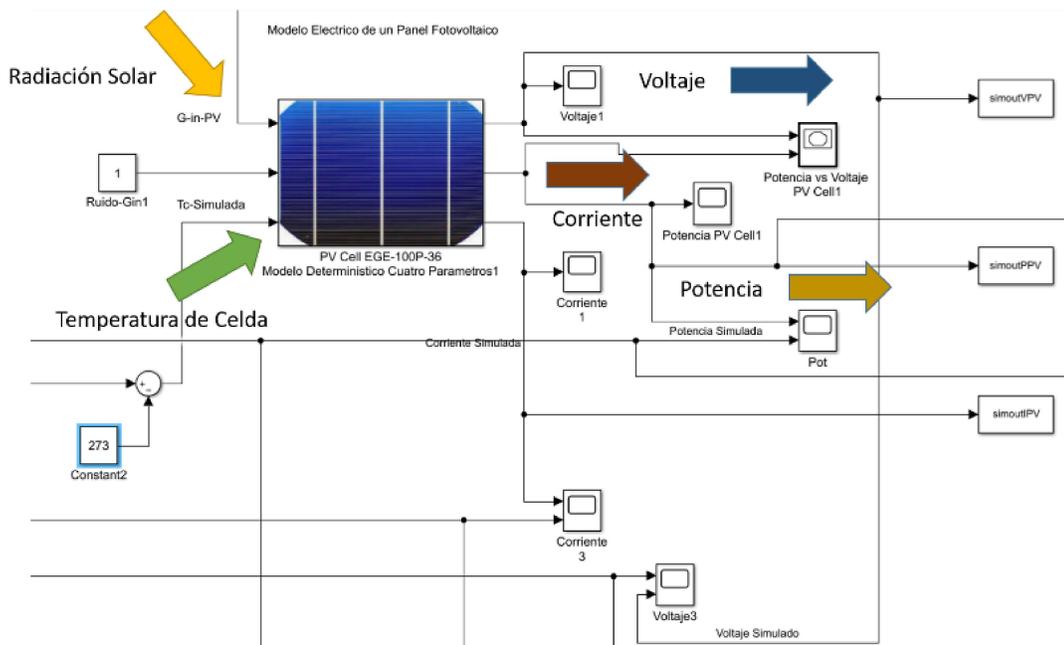


Figura 6.48 “Modelo del Sistema Híbrido Térmico-Eléctrico”

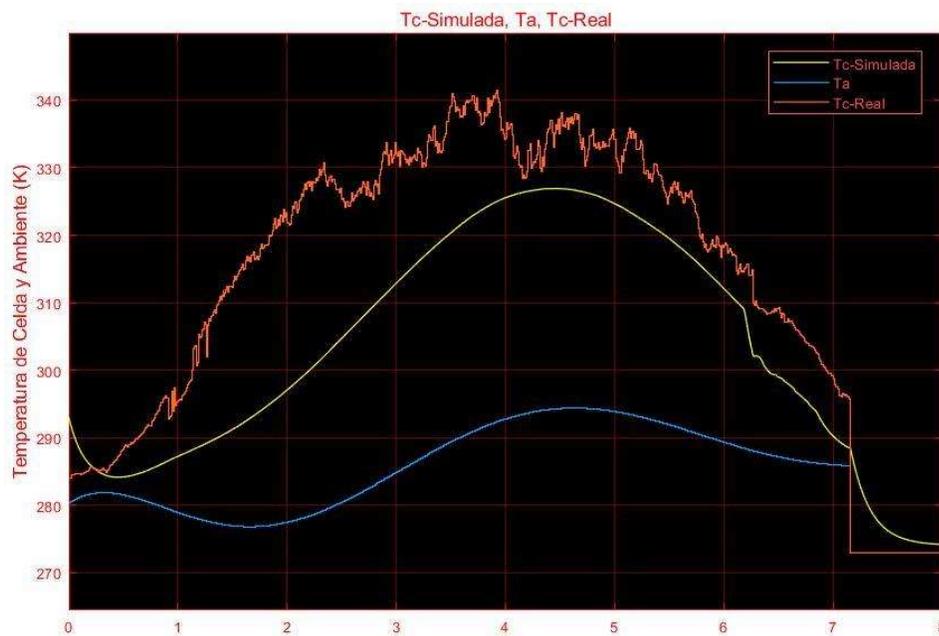


Figura 6.49 “Curva de Temperatura de Celda Real y Simulada M-Radiación”

En la Figura 6.50 se presenta la curva de corriente entre el sistema real y el simulado con el modelo eléctrico de cuatro parámetros con una temperatura de celda simulada a través del modelo térmico de convección-radiación.

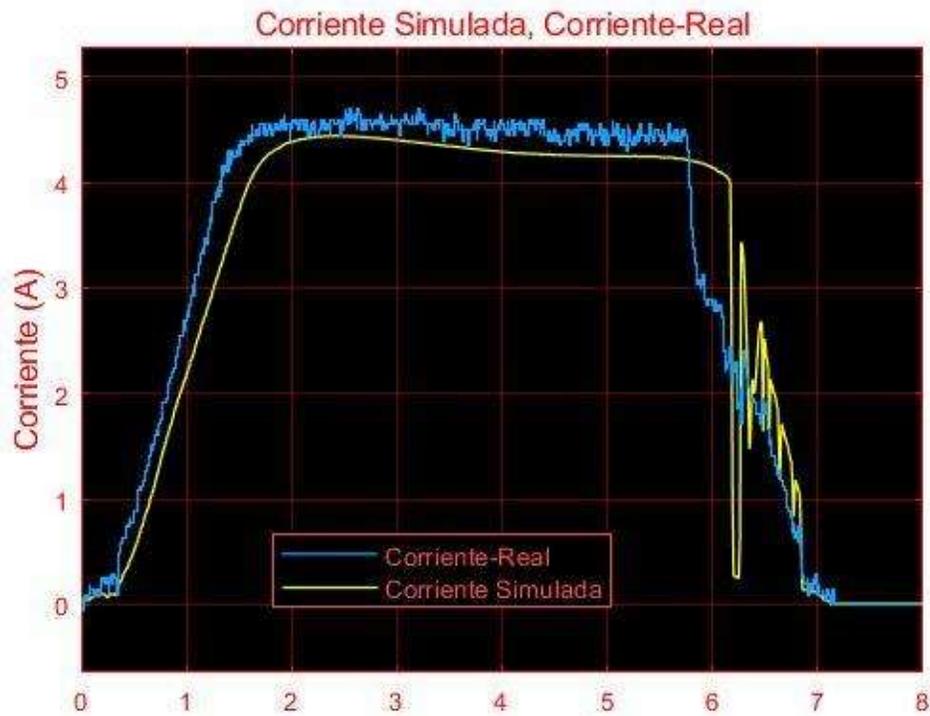


Figura 6.50 “Curva de Corriente Real y Simulada M-Radiación”

La Figura 6.51 muestra la curva de voltaje entre el sistema real y el simulado con el modelo eléctrico-térmico de convección-radiación, en donde es notorio el efecto de la temperatura de celda; ya que el voltaje incrementa conforme la temperatura de celda reduce. En la Figura 6.52 en forma análoga se presentan los resultados obtenidos de la curva de potencia entre ambos sistemas, el simulado y el real del sistema fotovoltaico.

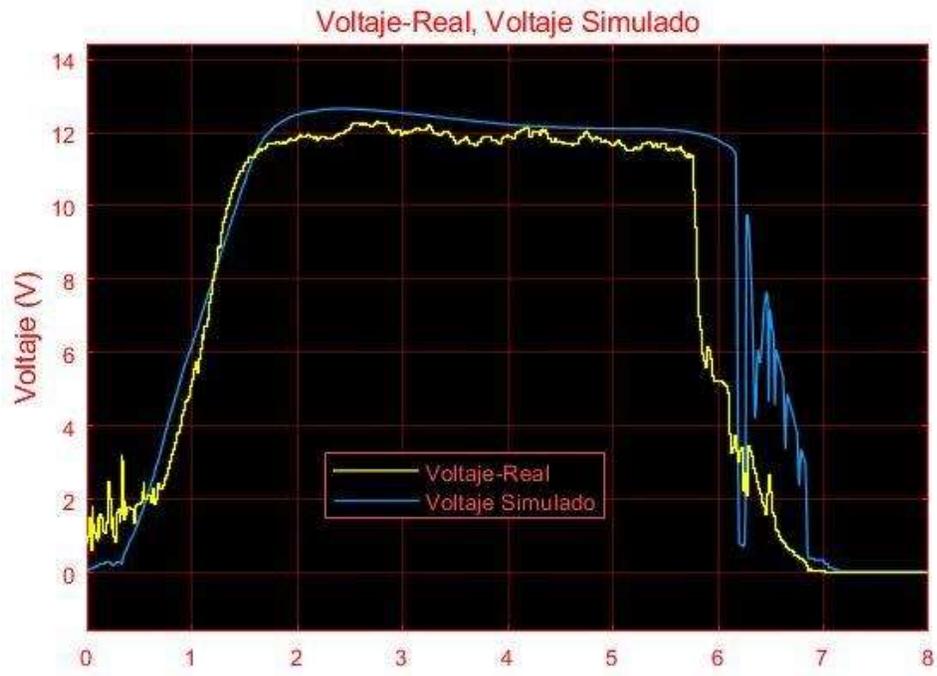


Figura 6.51 “Curva de Voltaje Real y Simulada M-Radiación”



Figura 6.52 “Curva de Potencia Real y Simulada M-Radiación”

En la Figura 6.53 se presenta la simulación del comportamiento del electrolizador alcalino para la generación de hidrogeno por efecto de la potencia obtenida a la salida del modelo de simulación del sistema térmico eléctrico con convección-radiación, en donde se logra producir un caudal máximo de 0.85 ml/s.



Figura 6.53 “Curva de Hidrógeno Generado en M-Radiación”

En la Figura 6.55 se comparan las curvas de temperatura de celda y ambiente. En donde la temperatura de celda mostrada es la del sistema muestreado y el simulado con el modelo de simulación sistema híbrido térmico eléctrico PVT-HHO. Donde es notoria la reducción de la temperatura de celda al alcanzar un máximo de 300 K, por efecto de las pérdidas de calor combinadas y el colector de calor residual.

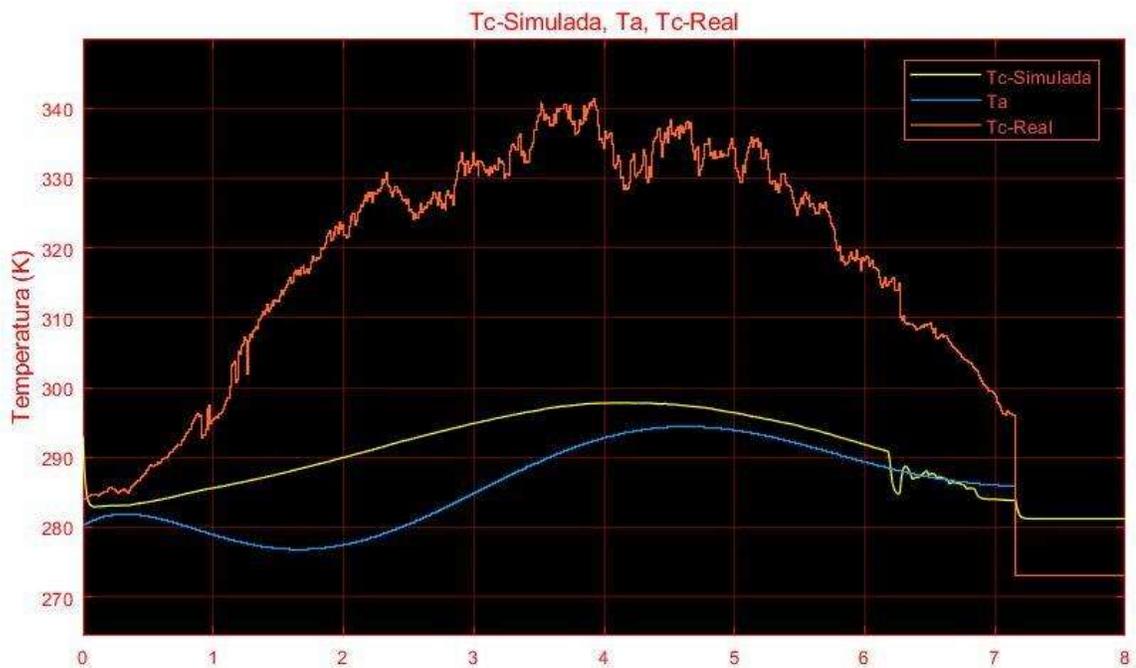


Figura 6.55 “Curva de Temperatura de Celda Real y Simulada M-PVT”

La Figura 6.56 muestra las curvas de corriente de ambos sistemas real y simulado. En este caso la corriente tiene un efecto mínimo ya que no se ve influenciada por la temperatura de la celda, la cual reduce en gran medida con el modelo de simulación del sistema híbrido térmico eléctrico PVT-HHO. En la Figura 6.57 se observan las curvas de voltaje de ambos sistemas, en este caso el efecto por la reducción de la temperatura de celda es bastante notorio ya que la temperatura afecta directamente al voltaje generado por el sistema fotovoltaico.

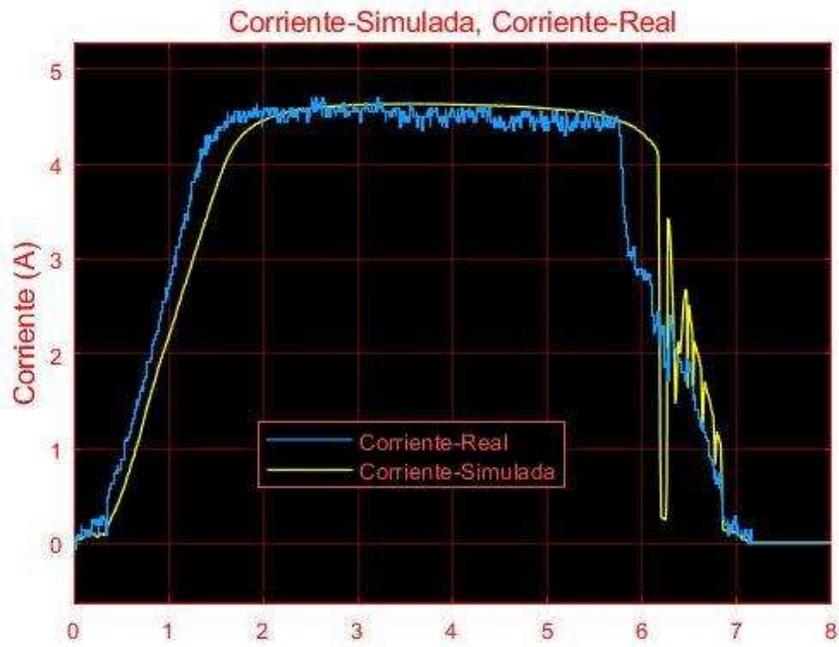


Figura 6.56 “Curva de Corriente Real y Simulada M-PVT”

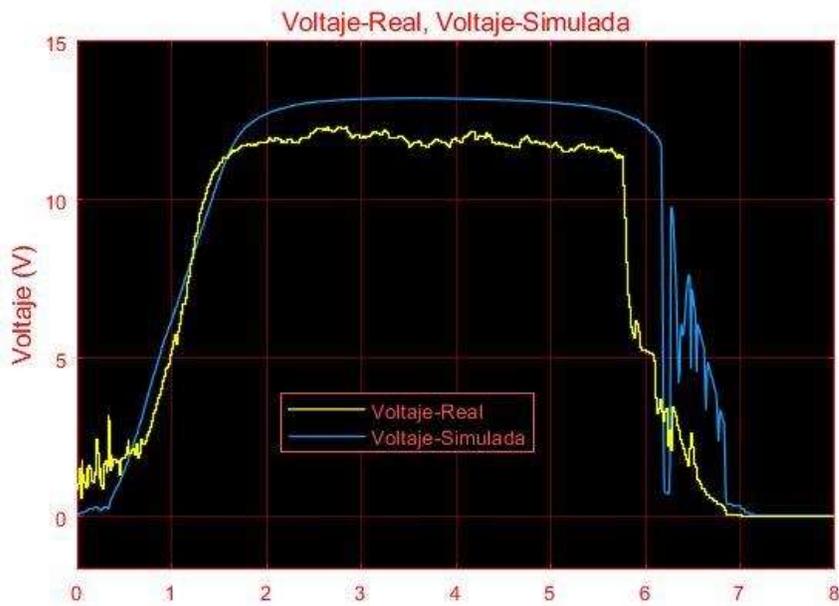


Figura 6.57 “Curva de Voltaje Real y Simulada M-PVT”

La Figura 6.58 muestra el efecto por la reducción de la temperatura de celda con el modelo de simulación del sistema híbrido térmico eléctrico PVT-HHO, ya que se presentan las curvas de evolución de la potencia respecto a la radiación solar incidente de ambos sistemas y para el caso del modelo de simulación se alcanzan como máximo sesenta watts a diferencia que el real no supera los 55 watts con la misma resistencia de carga.

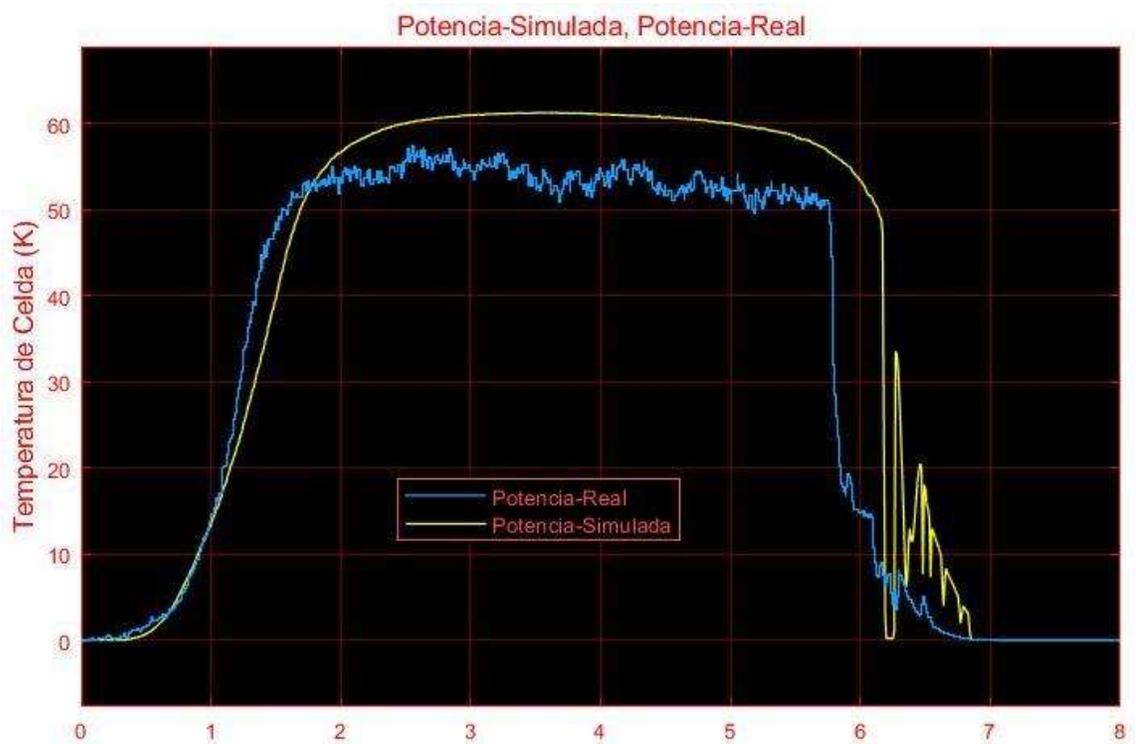


Figura 6.58 “Curva de Potencia Real y Simulada M-PVT”

En la Figura 6.59 se observa el comportamiento del electrolizador alcalino para la generación de hidrogeno por efecto de la potencia simulada a la salida del modelo de simulación del sistema híbrido térmico eléctrico PVT-HHO, en donde se logra producir un caudal máximo de 1 ml/s.



Figura 6.59 “Curva de Hidrógeno Generado en M-PVT”

En forma adicional en la Figura 6.60 se observa el comportamiento de la temperatura de celda en los tres modelos de simulación y es notoria la reducción de la temperatura en el sistema híbrido.

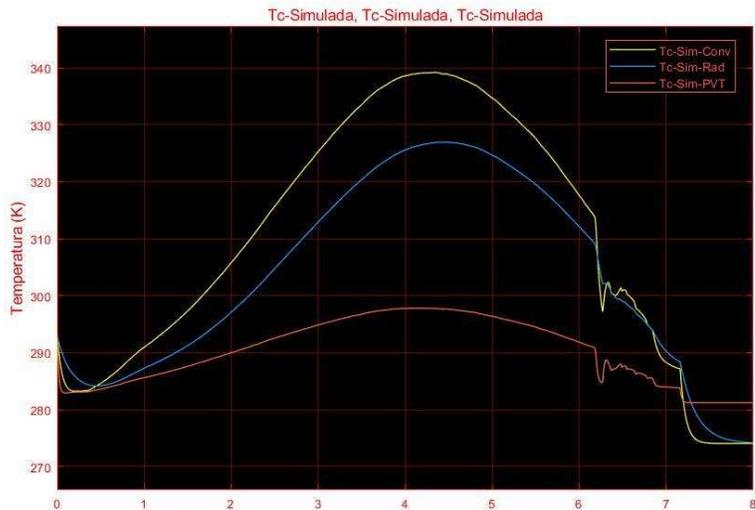


Figura 6.60 “Curva de Temperatura de Celda Simulada 3 Casos”

6.3. Metodología de Análisis Multifísica

Finalmente, todo aquello que logró conjuntar el proyecto de diseño y desarrollo de sistemas energéticos híbridos se fundamenta en la metodología de análisis multifísica que se describió en la sección cinco, pero que en realidad es solo un método para lograr un diseño efectivo de un sistema de generación de energía. Este método establece una serie de pasos para diseñar y desarrollar un sistema híbrido de generación de energía. Pero además de eso establece una serie de pasos para cuantificar el potencial energético extraído del mismo.

6.3.1. Diseño de Sistema PVT-HHO

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología de análisis multifísica en el diseño del sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO, (PVT-HHO), para la generación de energía eléctrica, térmica de proceso e hidrogeno verde. En ese mismo sentido en la Figura 6.61 se muestra el diseño en CAD de la celda fotovoltaica que se considera para el diseño del sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO. Por lo tanto, en la Figura 6.62 se muestra el detalle del sistema híbrido, es decir el acople entre la celda fotovoltaica y el colector térmico; conformado por una placa plana y un circuito de tubos por donde circula un fluido térmico para la extracción de calor residual.

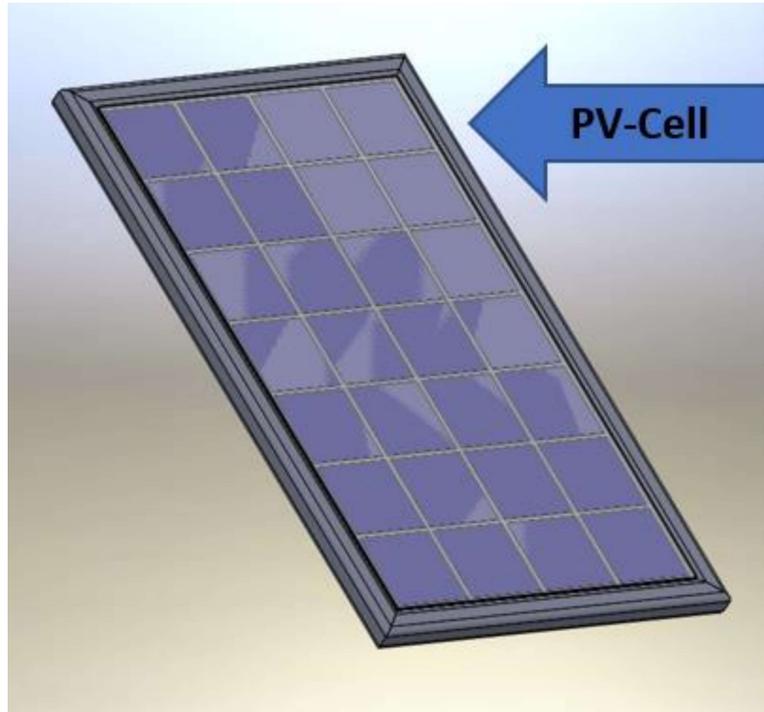


Figura 6.61 “Modelo CAD de Celda Fotovoltaica”

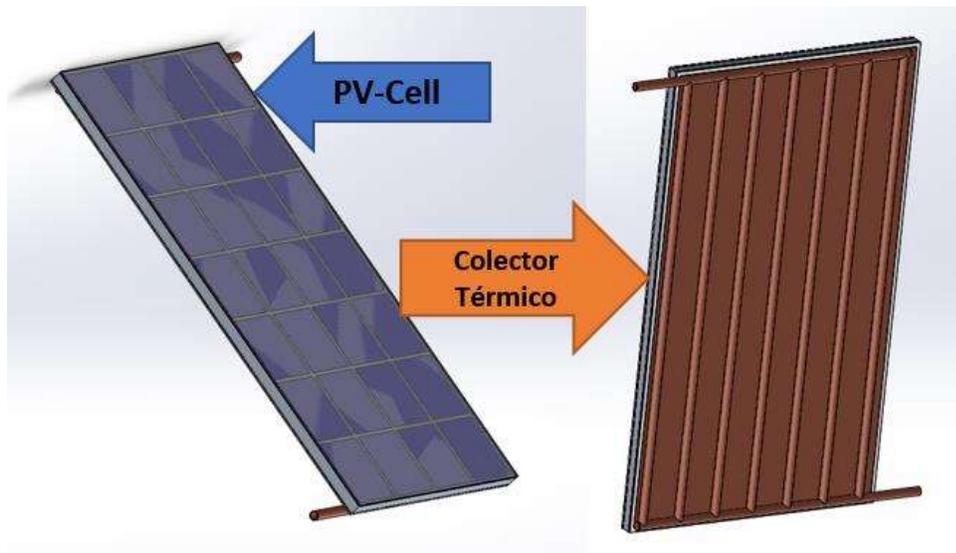


Figura 6.62 “Modelo CAD del Sistema Híbrido”

En la Figura 6.63 se muestra el sistema híbrido PVT, es decir el acople entre la celda fotovoltaica, el colector térmico y el sistema de aislamiento de pérdidas con el ambiente.



Figura 6.63 “Modelo CAD del Sistema PVT”

En la Figura 6.64 se observa a detalle el modelo CAD del diseño final del Sistema híbrido térmico-eléctrico PVT. En forma análoga, en la Figura 6.65 se observa el modelo en CAD del Sistema Fotovoltaico instalado en la planta solar.



Figura 6.64 “Modelo CAD del Sistema PVT Estructura Final”

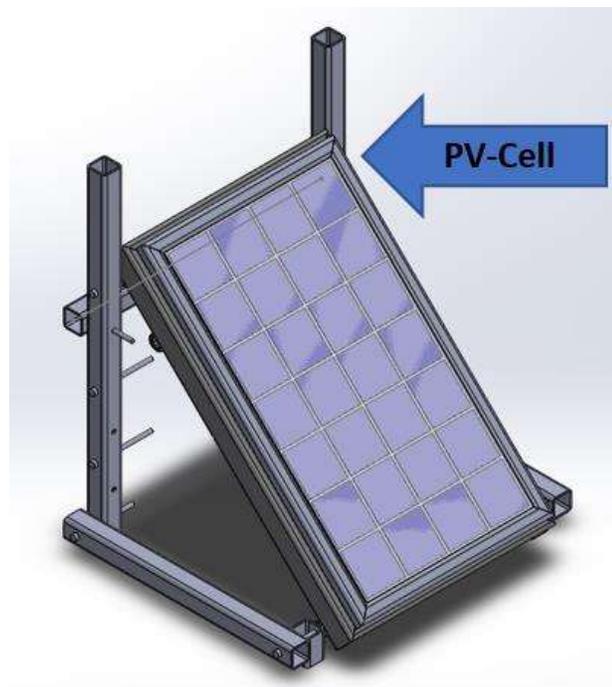


Figura 6.65 “Modelo CAD Estructura Sistema Fotovoltaico”

En la Figura 6.66 se muestra el modelo CAD de la estructura final del Sistema híbrido térmico-eléctrico PVT.

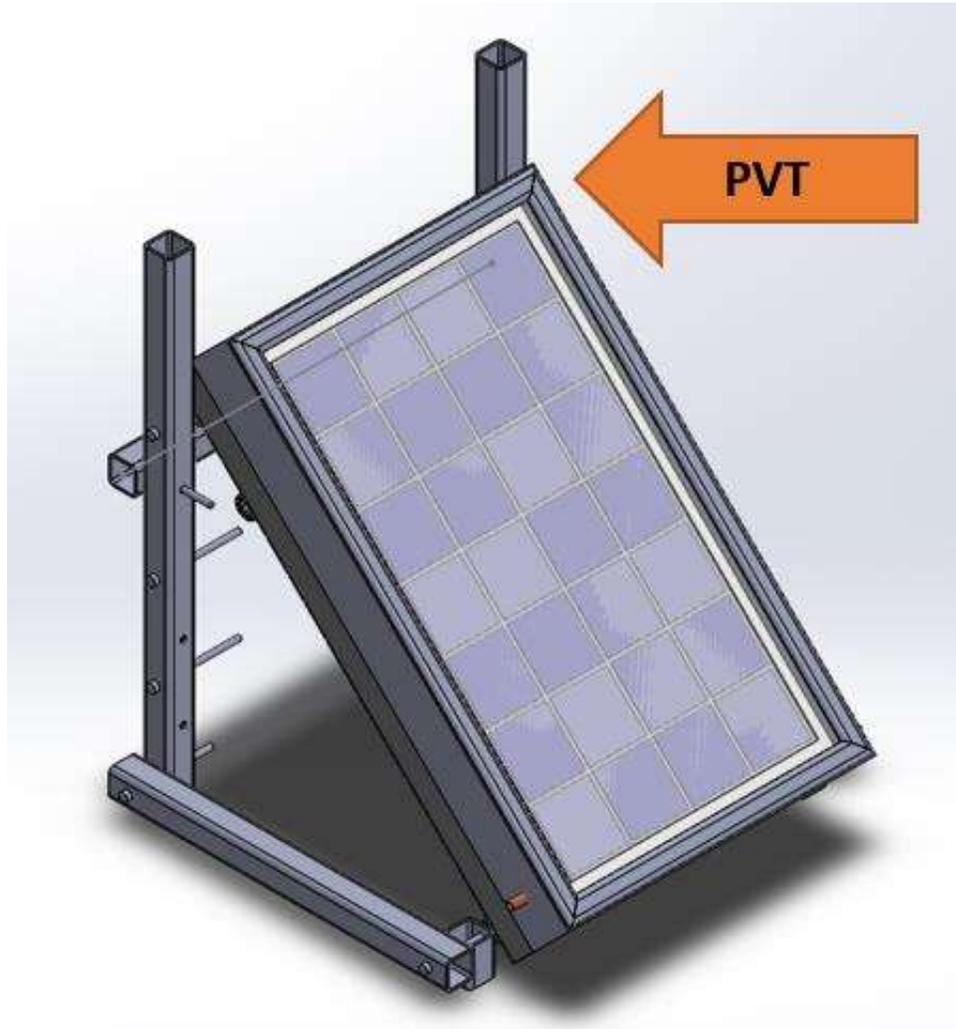


Figura 6.66 “Modelo CAD Estructura Sistema PVT”

La Figura 6.67 muestra el modelo completo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO, en donde se observa la interacción de los tres distintos sistemas de generación de energía, térmica, eléctrica e hidrógeno a partir de la misma fuente de energía primaria, es decir la energía solar.

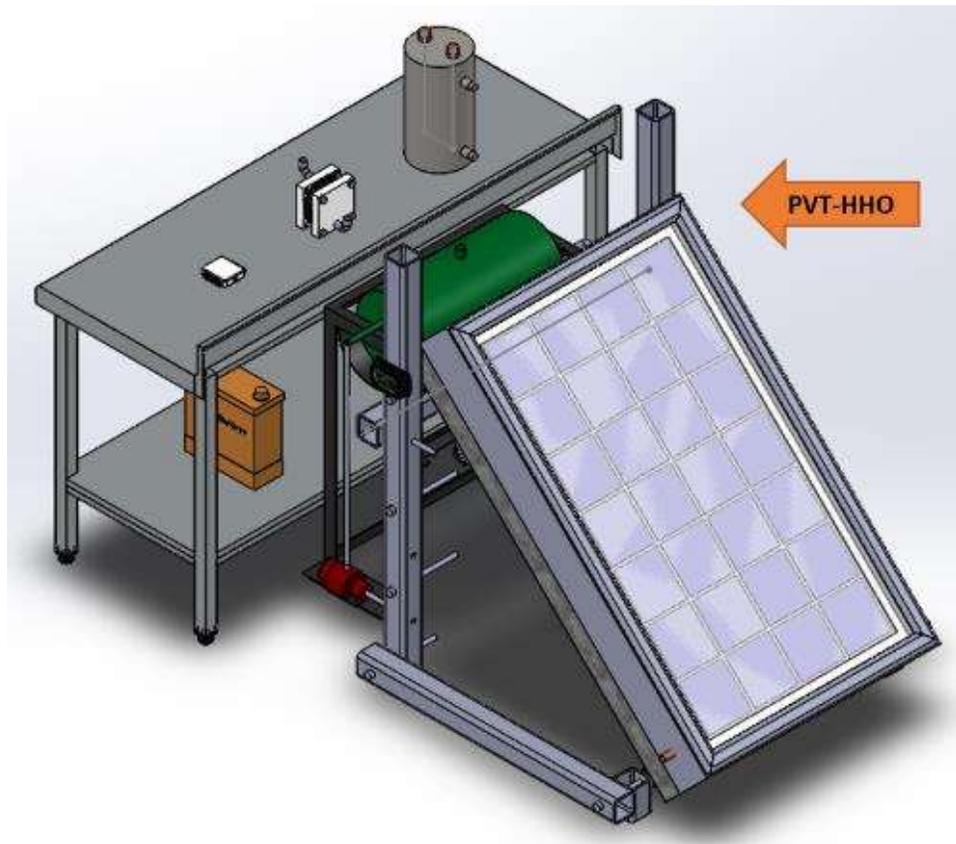


Figura 6.67 “Modelo CAD Estructura Sistema PVT-HHO”

Posterior al diseño en CAD del sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO, se realiza una simulación a través del método de elemento finito para evaluar el comportamiento del sistema en función de las condiciones térmicas a las cuales opera el sistema híbrido diseñado. En la Figura 6.68 se muestra el modelo de simulación a través de elemento finito de un estudio térmico en donde se realizó una simulación de un flujo de calor constante irradiado sobre la celda fotovoltaica, una temperatura de superficie y pérdidas de calor por convección. En la Figura 6.69 se observa el comportamiento de la temperatura de la celda en función de las condiciones iniciales y parámetros del estudio térmico.

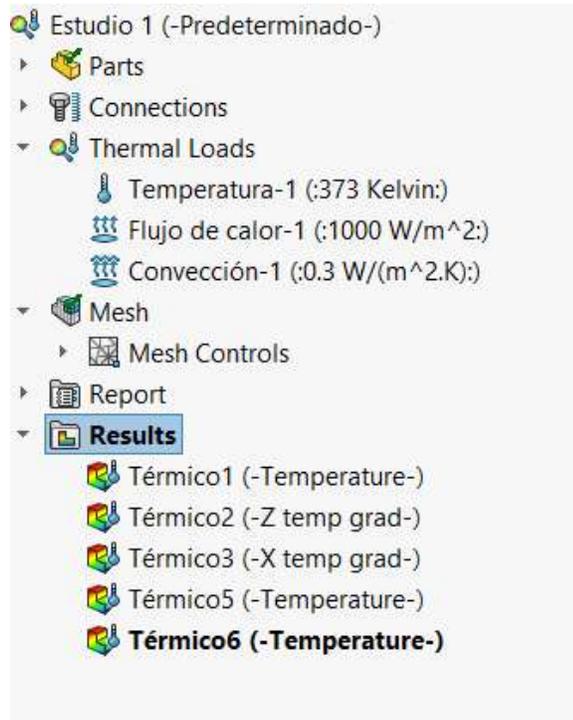


Figura 6.68 “Estudio Térmico del Sistema Fotovoltaico”

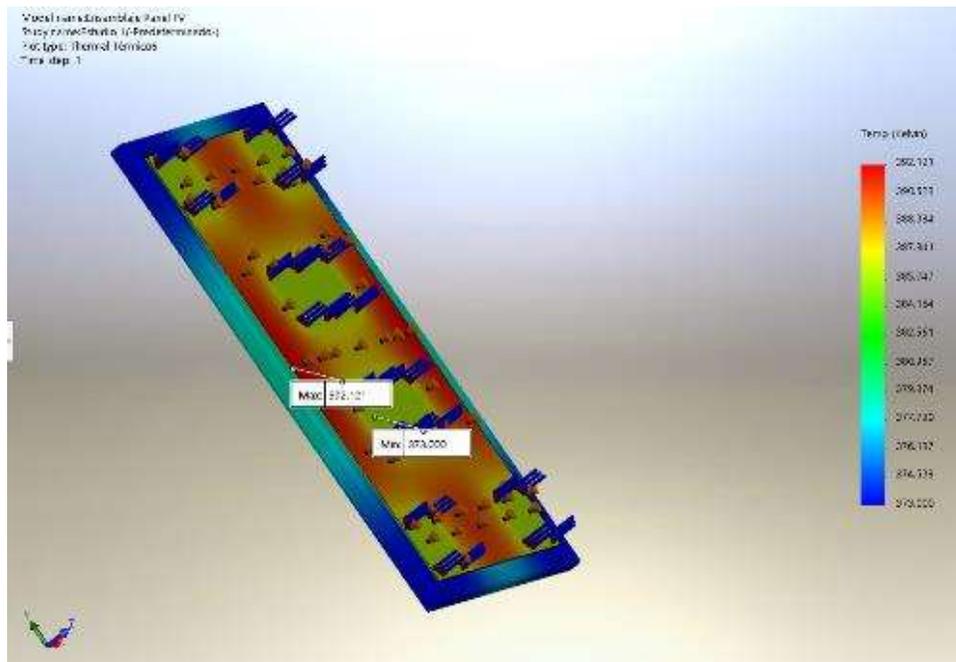


Figura 6.69 “Estudio Térmico Respuesta de Temperatura de Celda”

En la Figura 6.70 se observa el comportamiento de la temperatura de superficie en la celda fotovoltaica, así como los efectos de la pérdida de calor por convección con el ambiente, mismos detalles son utilizados en el proceso de diseño del sistema para optimizar el proceso de selección del material aislante.

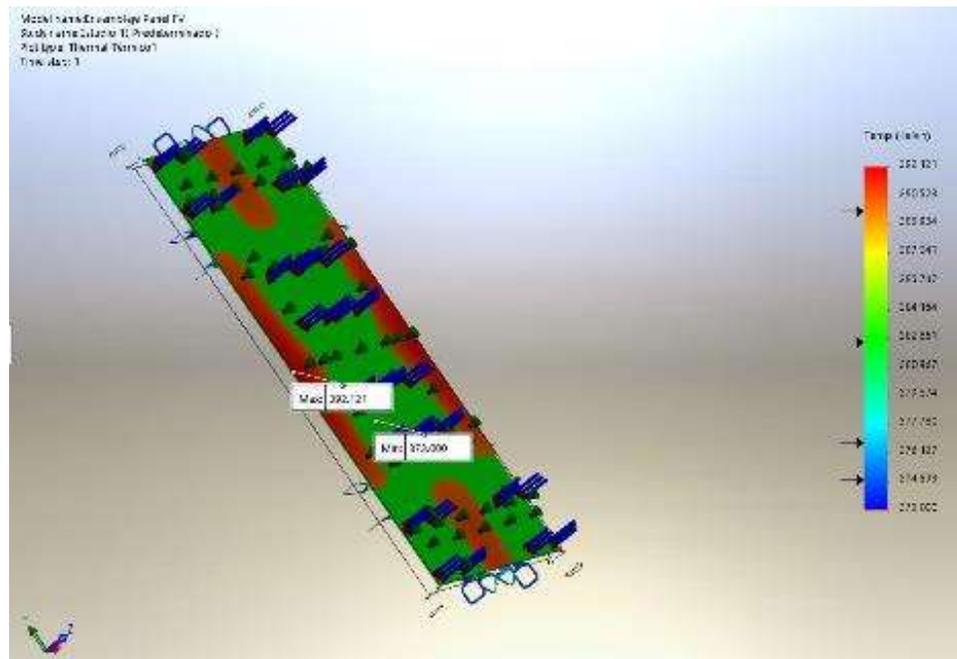


Figura 6.70 “Estudio Térmico Perfil de Temperatura en Convección”

En la Figura 6.71 se observa el modelo de simulación de elemento finito de un segundo estudio térmico en donde se realizó una simulación solo de temperatura de operación de la celda fotovoltaica, esto para evaluar la distribución de temperatura del sistema en análisis. Por lo tanto, en la Figura 6.72 se presenta la distribución de la temperatura de la celda fotovoltaica con interacción directa con el ambiente, y en la Figura 6.73 se observa el sistema sin interacción con el ambiente.

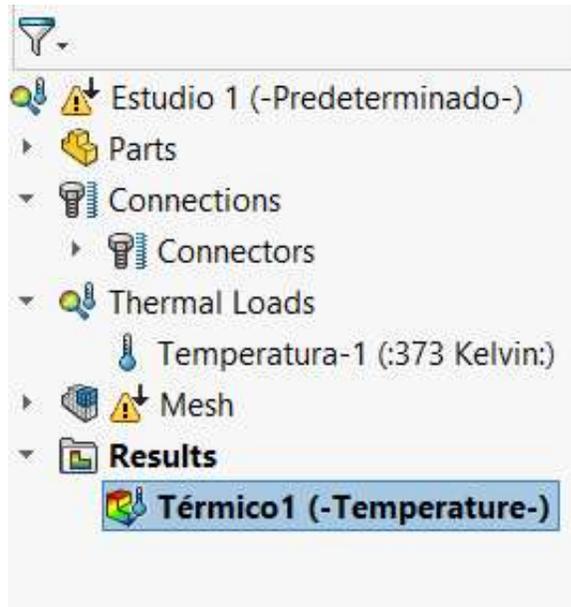


Figura 6.71 “Estudio Térmico de Temperatura de Celda”

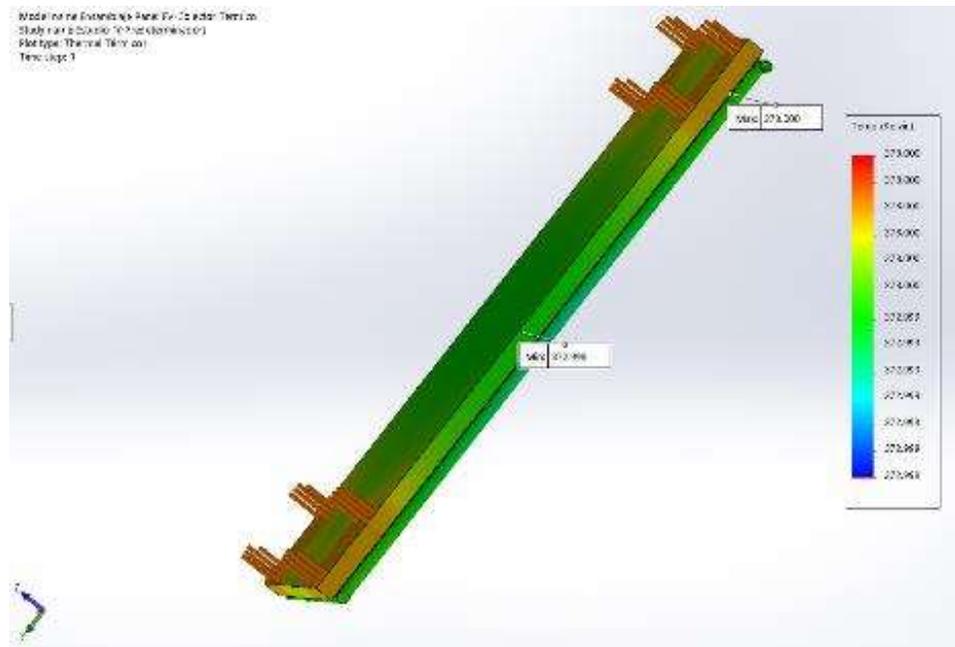


Figura 6.72 “Estudio Térmico 2 Respuesta de Temperatura de Superficie”

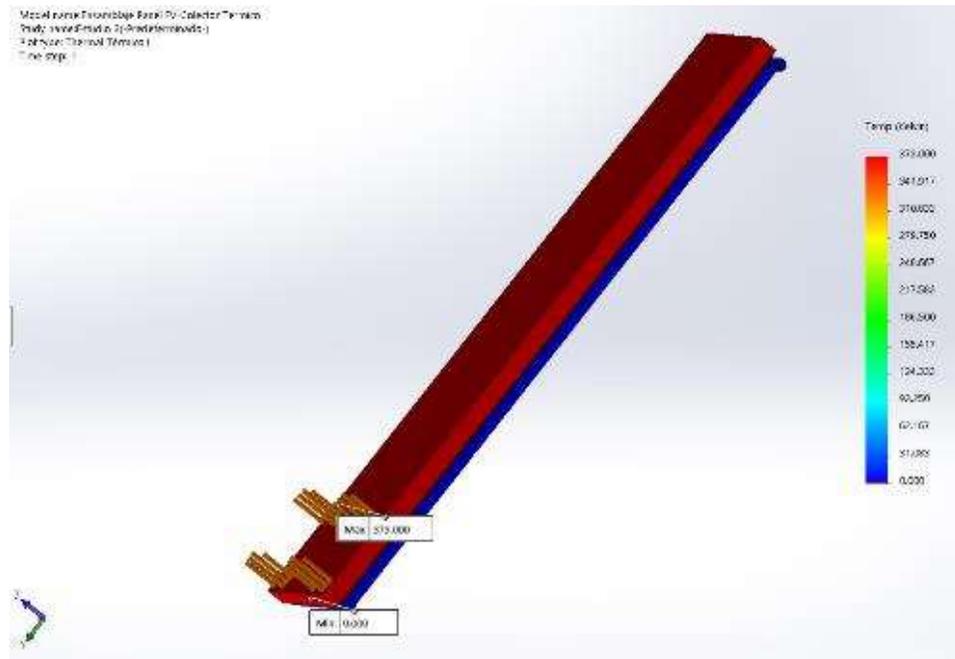


Figura 6.73 “Estudio Térmico 2 Respuesta de Temperatura sin Convección”

Como elemento final, para la toma de decisiones en el diseño y desarrollo del sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO se consideró realizar un análisis de la eficiencia energética y exergética, y así determinar las necesidades del diseño óptimo del sistema PVT-HHO. En la Figura 6.74 se observa el algoritmo diseñado para determinar la eficiencia energética del sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO simulado a partir de la radiación solar incidente en la región de análisis. En forma análoga en la Figura 6.75 se presenta el algoritmo para obtener la eficiencia exergética del sistema en cuestión.

```

% Energy and Exergy Analysis of PV Cell%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Data PV Cell
% Constantes de Celda 130 W%
Pmp1=129.42; % W
Imp1= 8.254; % A
Vmp1= 15.68; % V
Isc1= 9.12; % A
Voc1= 18.23; % V

% Fill Facto of PV cell
FF1= (Vmp1*Imp1)/(Voc1*Isc1);

%Area
A=0.78416; %m2

%Velv;
%Tempa;

Pel= G1.*A;

% Output of PV System

%Qo= Voc*Isc*FF;

%Energy of PV Cell

%Qo=Vm*Im

Ps1= V1.*Irl;

```

Figura 6.74 “Algoritmo Eficiencia Energética”

```

% Eficency

npv1= Psl./Pel;

v=Vw19; %velocidad de viento en (m/s)
Ta=(Taa19) + 273; %temperatura ambiente en (K)
Ts=5777; % temperatura del sol en (K)

%Exergy Solar Radiation

Exs= (1-(Ta./Ts)).*G19.*A;
Exs1= (1-(Ta./((3/4)*Ts))).*G19.*A;
Exs2= (1-((4*Ta)./(3*Ts))+ ((1*(Ta.^4))./(3*(Ts.^4)))).*G19.*A;

Exel= V19.*Ir19;

hca= 5.7 + 3.8.*v;

an1=(1-(Ta./((Tc19+273))));
bn1= hca.*A;
cn1= ((Tc19+273)-Ta);

Exth= an1.*bn1.*cn1;

Expv=Exel - Exth;

nex= Expv./Exs;

```

Figura 6.75 “Algoritmo Eficiencia Exergética”

En la Figura 6.76 se presentan las curvas que describen el comportamiento de la eficiencia energética y exergética en el sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO, se observa que la eficiencia energética no es mayor al diez por ciento considerando un sistema híbrido con convección, radiación y colector térmico, pero la evolución de la eficiencia

energética se mantiene constante, por el efecto de extracción de calor. Para el caso de la eficiencia exergética es bastante baja y se debe a que el posible trabajo extraído del sistema está siendo aprovechado en forma ineficiente, es decir existe una gran cantidad de calor residual que se entrega al ambiente.

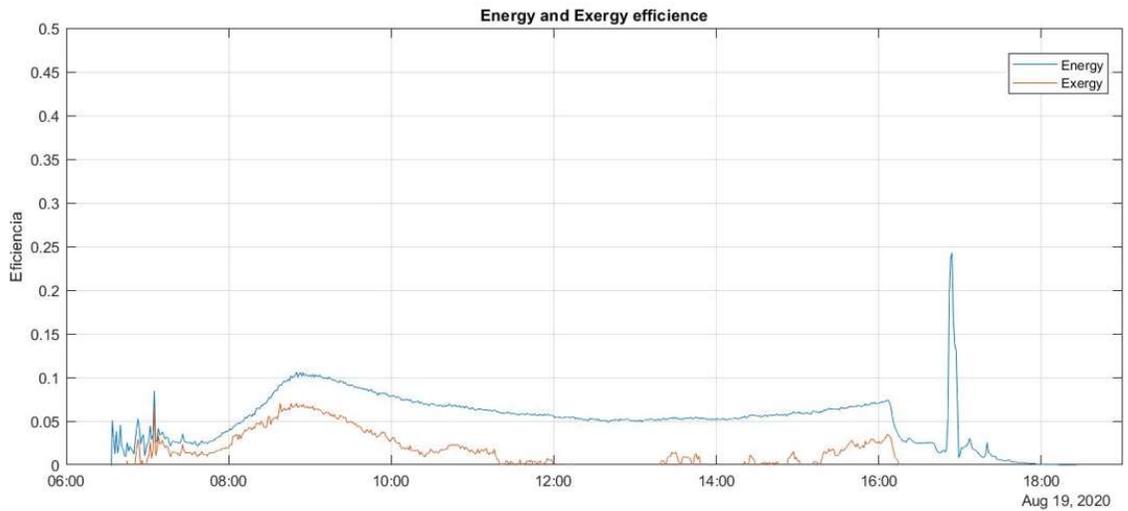


Figura 6.76 “Curvas de Eficiencia Energética y Exergética”

Finalmente, con los datos aportados por el análisis de eficiencias energéticas y exergéticas, y los modelos de simulación fue posible construir un modelo que correlaciona la radiación solar incidente con el comportamiento de la temperatura de la celda. Esto se utiliza para determinar los parámetros de diseño en el colector térmico y los materiales aislantes del diseño, además del dimensionado efectivo de la celda fotovoltaica. Por lo tanto, en la Figura 6.77 se observa el modelo que correlaciona la radiación solar incidente con la temperatura de celda.

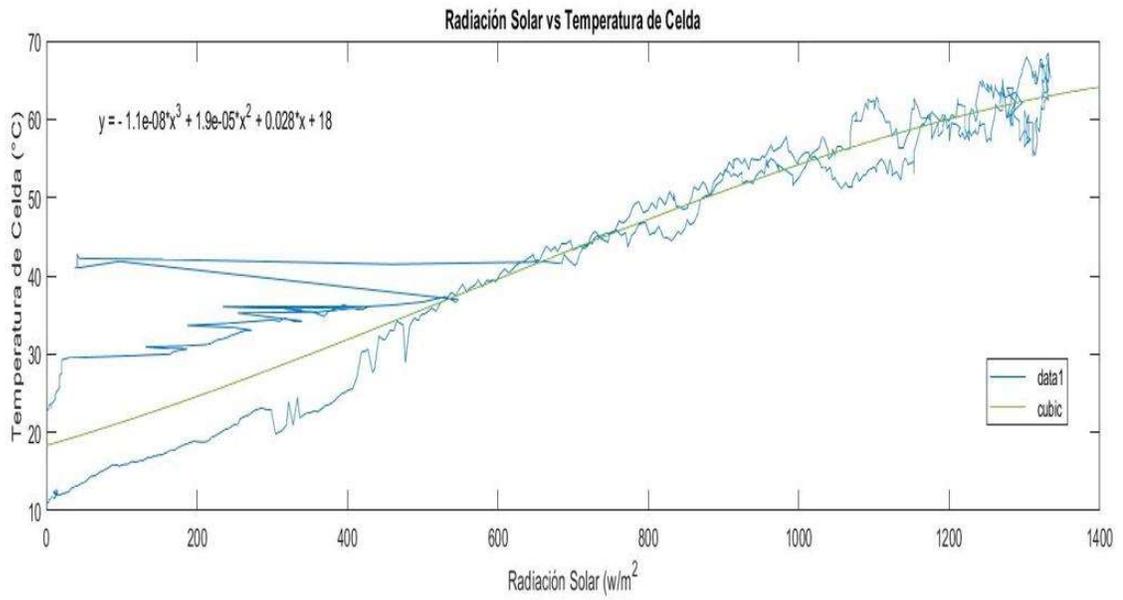


Figura 6.77 “Correlación de variables Temperatura de Celda y Radiación”

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la siguiente sección se presenta una breve discusión de los resultados obtenidos, así como las conclusiones generales y particulares del tema de investigación. En consecuencia, se describen a detalle los resultados obtenidos, las metas alcanzadas y sobre todo el trabajo a futuro que surge de los logros obtenidos principalmente el desarrollo y puesta en marcha del laboratorio de energía solar. En forma adicional se realizan algunas recomendaciones con base al uso y aplicación de los modelos de simulación del sistema híbrido PVT-HHO.

7.1. Conclusiones

El proyecto de investigación permitió el desarrollo profundo sobre un nuevo modelo de simulación de un sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO mismo que se logró a partir de una crítica y exhaustiva revisión de la literatura con base a los sistemas híbridos de generación de energía particularmente los que dependen de la energía solar.

En este trabajo se propuso un nuevo modelo de simulación de un sistema PVT-HHO para modelar y simular su comportamiento dinámico en el proceso de generación de energía eléctrica, térmica y química en forma de hidrógeno. Además del desarrollo de una nueva metodología en la cual es posible incluir la simulación de este tipo de sistemas con el propósito de hacer más eficiente y efectivo el proceso de diseño de sistemas híbridos. En el desarrollo del modelo de simulación se tomó en cuenta un análisis teórico profundo sobre los sistemas de generación de energía, el desarrollo de modelos de simulación en

estado estacionario y transitorio, además del prototipado a escala de laboratorio para la realización de pruebas de campo con el propósito de validar los nuevos sistemas híbridos.

Los logros obtenidos fueron una serie de modelos de simulación por computadora principalmente basados en análisis termodinámicos, balance de energía y transferencia de calor, los cuales fueron validados por experimentación en una planta piloto con sistemas fotovoltaicos, termosolares y electrolizadores alcalinos instalados en el laboratorio de energía solar del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez. Estos modelos matemáticos son caracterizados por las ecuaciones 5.11 y 5.12 que describen en esencia al modelo en estado estacionario y las ecuaciones 5.19 y 5.20 que representa el modelo térmico-eléctrico del sistema híbrido en estado transitorio. Donde la implementación del modelo en estado transitorio del sistema híbrido PVT-HHO se presenta con mayor detalle en la Figura 6.54.

Las conclusiones derivadas de la investigación doctoral son:

El modelo de simulación en estado estacionario de un sistema fotovoltaico, y por ende el del sistema híbrido PVT-HHO, tiene la capacidad de modelar y simular cualquier tipo de celda fotovoltaica siempre y cuando en los parámetros de diseño se establezca el tipo policristalino o monocristalino, cantidad de celdas en serie y paralelo, corriente y voltaje a punto máximo de operación, corriente a corto circuito y voltaje a circuito abierto con una confiabilidad del 92 %, cumpliendo de esta forma los objetivos e hipótesis del proyecto de investigación. Además, es posible modelar la radiación solar y temperatura ambiente como entrada a través de un par de Modelos de Serie de Fourier que dependen del día promedio de análisis en cuestión, o en su caso pueden utilizarse datos muestreados por una estación meteorológica de la región.

El modelo de simulación en estado transitorio del sistema híbrido PVT-HHO y sistema fotovoltaico incluye un modelo térmico para la estimación de la temperatura de celda, un modelo eléctrico que permite estimar la potencia generada por el panel fotovoltaico, el cual está en serie con el modelo térmico, y por último incluye un modelo electroquímico que estima el caudal de gas Hidrógeno también conocido como Hydroxy Gas (HHO) de igual manera con una confiabilidad de entre un 89% al 92 %. Por lo tanto, ambos modelos híbrido y fotovoltaico logran los objetivos de investigación que planteaban el diseño y validación de los modelos de simulación.

Ambos modelos obtenidos se desarrollaron en el software MatLab-Simulink con el propósito de hacer más eficiente el manejo y manipulación de la información, por tal razón los resultados de cada simulación se presentan a través de gráficas estáticas y dinámicas que permiten visualizar las variables de temperatura de celda, corriente, voltaje, potencia y caudal de gas Hidrógeno. Además, la magnitud de cada variable simulada se almacena en una base de datos generada en el software, las cuales estarán disponibles para el usuario al igual que sus variables de entrada. En este caso la base de datos almacena para cada corrida de simulación la radiación solar incidente, la temperatura ambiente, los parámetros de diseño del sistema híbrido PVT-HHO, la temperatura de celda, corriente, voltaje y caudal de gas Hidrógeno estimados.

Los modelos de simulación fueron validados mediante experimentación con la medición y caracterización de los sistemas fotovoltaicos instalados en la placa solar del laboratorio de energía solar del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez. En particular se obtuvieron los valores del error cuadrático medio de al menos seis corridas de simulación en donde se compara la potencia generada mediante el modelo de simulación y los valores de la potencia muestreada por el sistema fotovoltaico, y de esa manera calcular el valor del error cuadrático medio (RMSE). El valor más bajo obtenido en una corrida de simulación fue de $RMSE = 7.3409$ y el valor más alto obtenido fue de $RMSE = 33.07$. En

la Figura 7.1 se observa la gráfica en donde se comparan las curvas de operación de la corriente estimadas y muestreadas de la potencia de un sistema fotovoltaico policristalino para el caso del valor más bajo de $RMSE=7.3409$ y un monocristalino para el valor más alto de $RMSE=33.07$, que se observa en la Figura 7.2

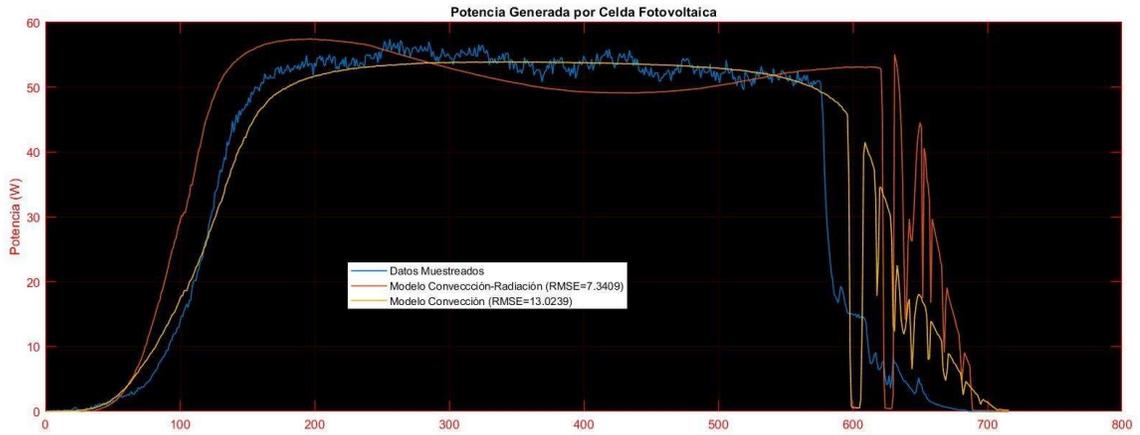


Figura 7.1 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO”

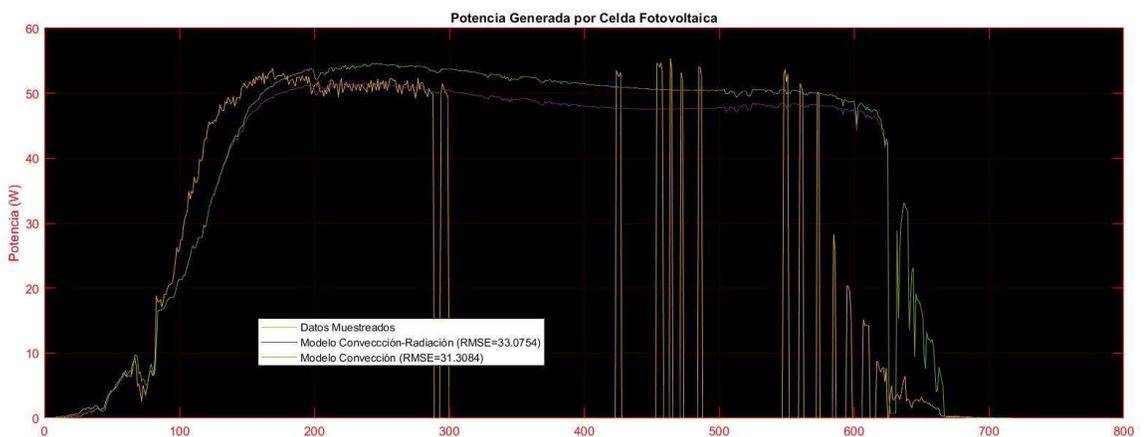


Figura 7.2 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO 2”

Los modelos de simulación obtenidos se integran en una plataforma de desarrollo que es gobernada por la metodología de análisis multifísica, así el modelo tiene la suficiente robustez para ser parametrizado según el tipo de celda fotovoltaico se integre en el diseño del sistema híbrido PVT-HHO. Por lo tanto, cumple su objetivo de estimar las condiciones de operación del sistema según el sistema sea parametrizado siendo una herramienta bastante vital en el proceso de diseño y desarrollo de sistemas de generación de energía.

Considerando que uno de los objetivos era diseñar y desarrollar un modelo que permitiera simular el comportamiento multifísico de un sistema híbrido de generación de energía; este conjunto de modelos permite analizar el comportamiento de este tipo de sistemas y además integra en el proceso de diseño al usuario para especificar las variables de entrada que hacen funcionar el modelo de simulación. En la Figura 7.3 se observan un conjunto de entradas de radiación solar incidente que fueron utilizadas para la validación del conjunto de modelos de simulación y en efecto estos datos de entrada fueron adquiridos de la estación meteorológica que se encuentra instalada en la plaza solar. En la Tabla 7.1 se indican los días del año a los que representa la radiación solar de entrada, asimismo el número de simulación a la cual representa. Entonces con base a la entrada de radiación solar se simuló el comportamiento del sistema híbrido PVT-HHO en donde se logró obtener la potencia a la salida del panel fotovoltaico según el modelo analizado: eléctrico, térmico y PVT. La Figura 7.4 presenta las curvas de potencia obtenidas del modelo eléctrico y se vinculan con la entrada según la numeración mostrada, donde la curva de color amarillo representa a la simulada y la de color azul a la monitoreada. En la Figura 7.5 se presentan las curvas de temperatura de celda simulada en color amarillo, muestreada en color rojo y en color azul temperatura ambiente del sistema híbrido en análisis, es necesario tomar en cuenta que la numeración se vincula con el valor de entrada. En consecuencia, la Figura 7.6 presenta los resultados del modelo térmico eléctrico de las simulaciones realizadas, en donde la curva de potencia de color amarillo representa la influencia de la temperatura de la celda en la simulación y la de color azul la potencia muestreada.

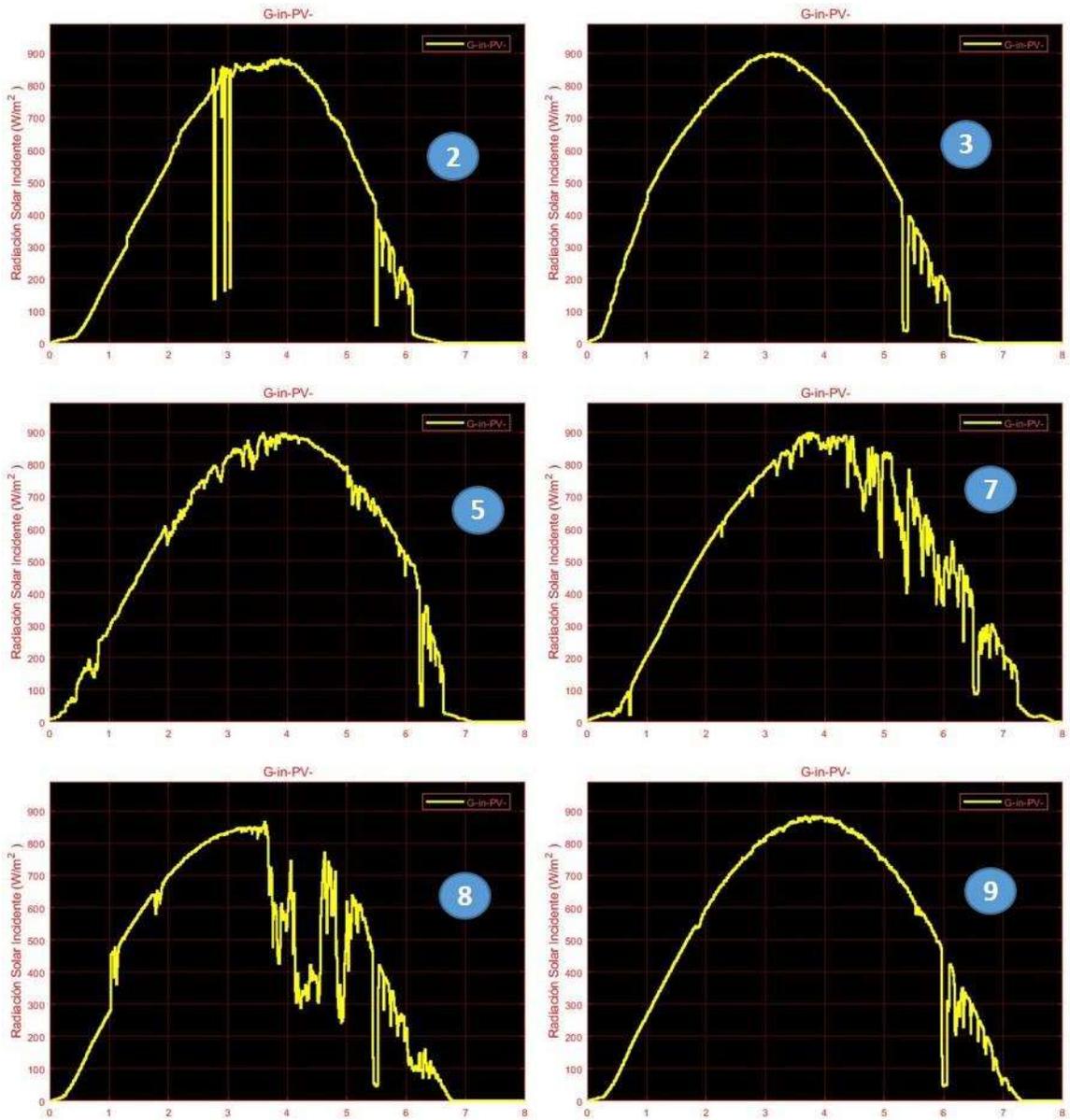


Figura 7.3 “Curvas de Radiación Solar Incidente Entradas del Modelo PVT-HHO”

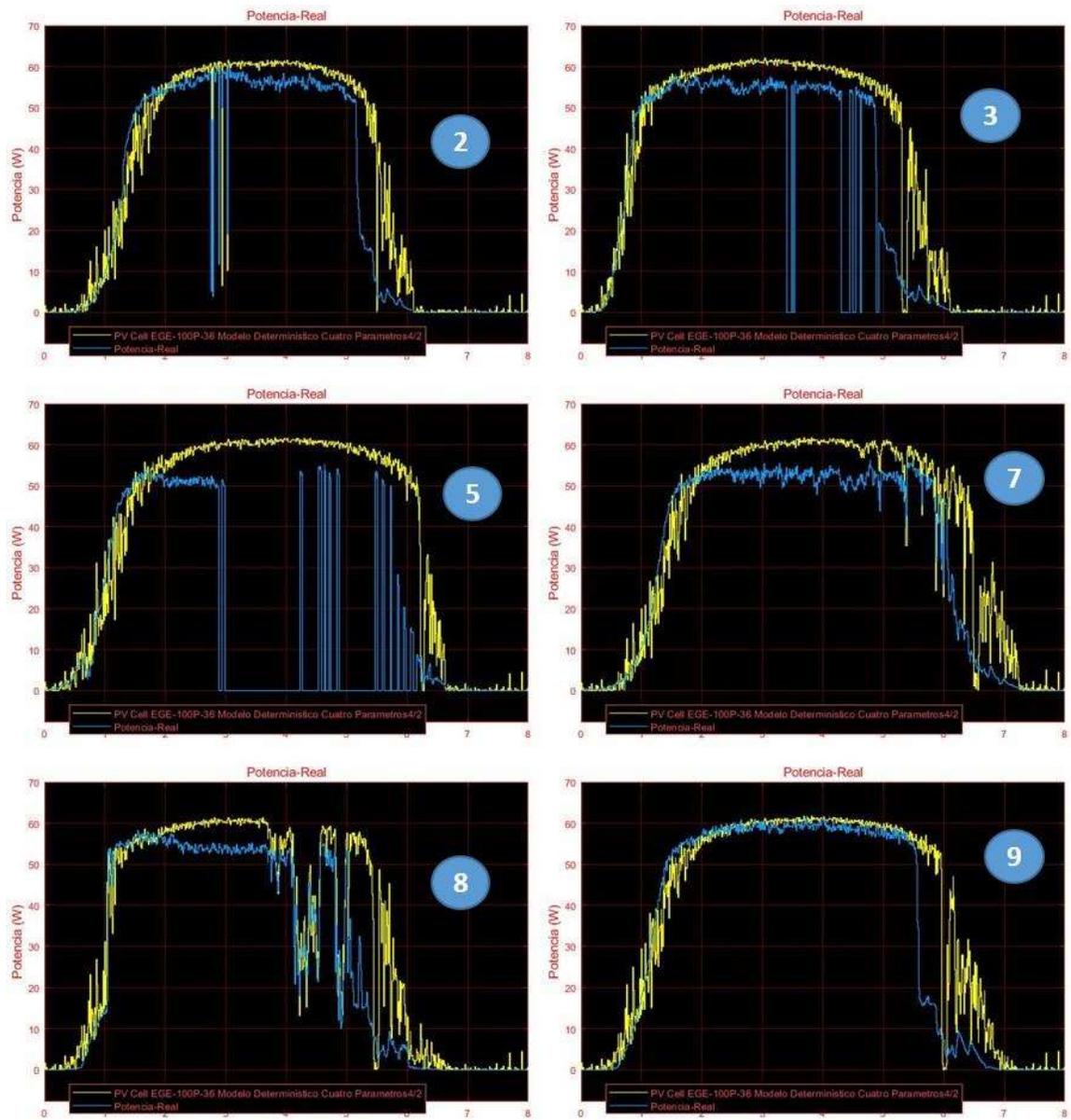


Figura 7.4 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT”

Tabla 7.1 Radiación Solar Incidente para Simulación

No Simulación	Fecha	Rad-Max	Época
1	03/03/2019	825 W/m ²	Invierno
2	18/03/2019	888 W/m ²	Invierno
3	27/03/2019	900 W/m ²	Primavera
4	7/04/2019	835 W/m ²	Primavera
5	16/04/2019	889 W/m ²	Primavera
6	29/04/2019	890 W/m ²	Primavera
7	4/05/2019	889 W/m ²	Primavera
8	18/05/2019	875 W/m ²	Primavera
9	27/05/2019	905 W/m ²	Verano

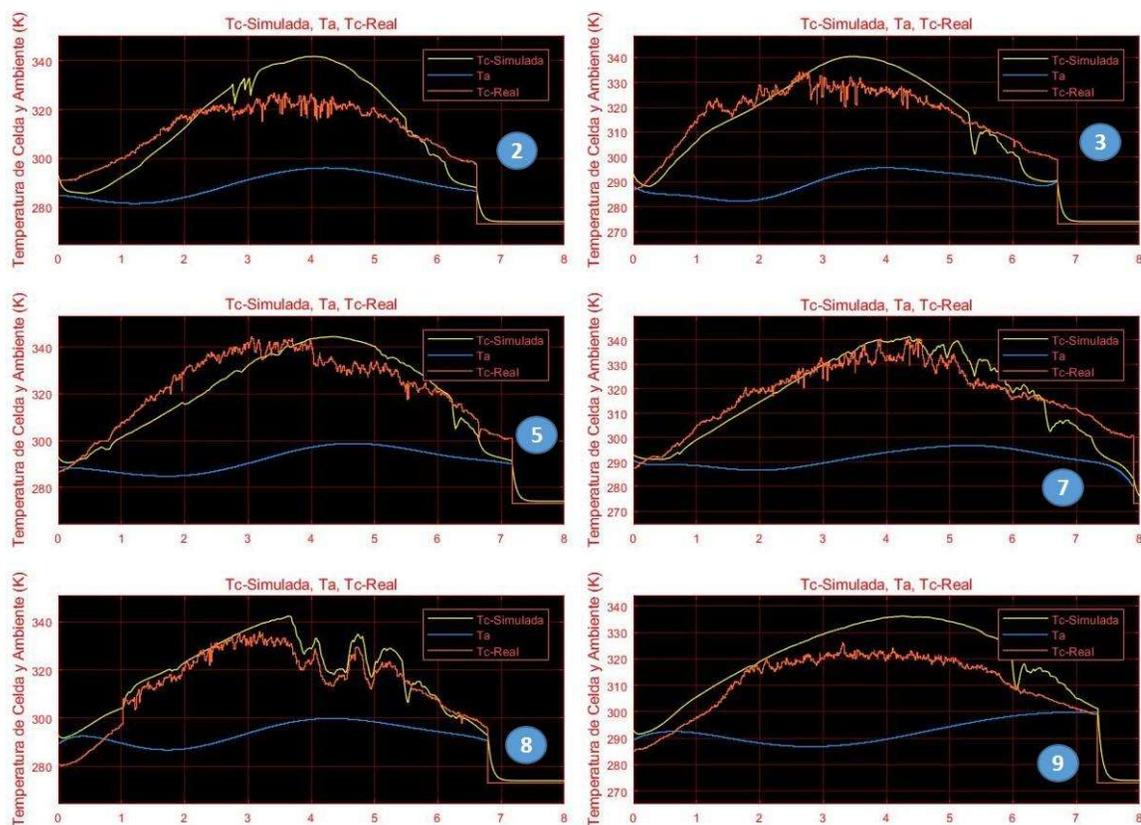


Figura 7.5 “Curvas de Temperatura de Celda del Sistema PVT”

Bajo condiciones semejantes se analiza el sistema PVT-HHO y en la Figura 7.7 se observa la curva de potencia generada en cada simulación, en color amarillo la de simulación y en color azul la de referencia, y es posible observar la dependencia directa de la temperatura de la celda en el modelo de simulación del sistema híbrido. Entonces, las curvas de temperatura del modelo PVT-HHO se observan en la Figura 7.8, aquí la de color amarillo es la temperatura de celda simulada, la de color rojo es la de referencia y la de color azul la temperatura ambiente. En este modelo, el del PVT-HHO es notorio el efecto que se presenta por la atenuación de la temperatura de celda, y se observa en forma directa sobre la potencia generada donde alcanza niveles superiores a del sistema fotovoltaico muestreado, por lo tanto, se refleja la importancia de un sistema híbrido que genere energía eléctrica y térmica, ya que incrementa su capacidad de generación y rendimiento.

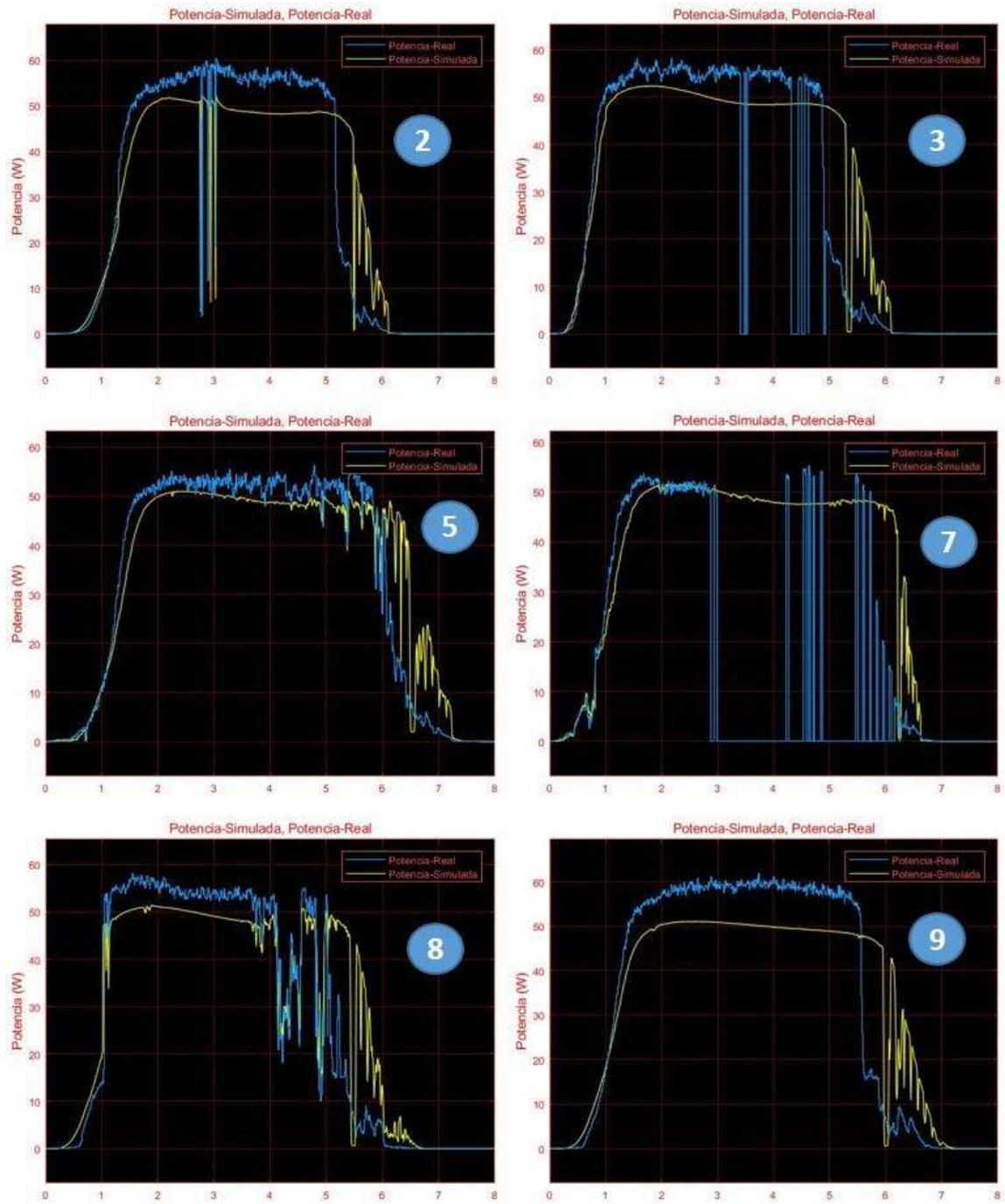


Figura 7.6 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-Convección”

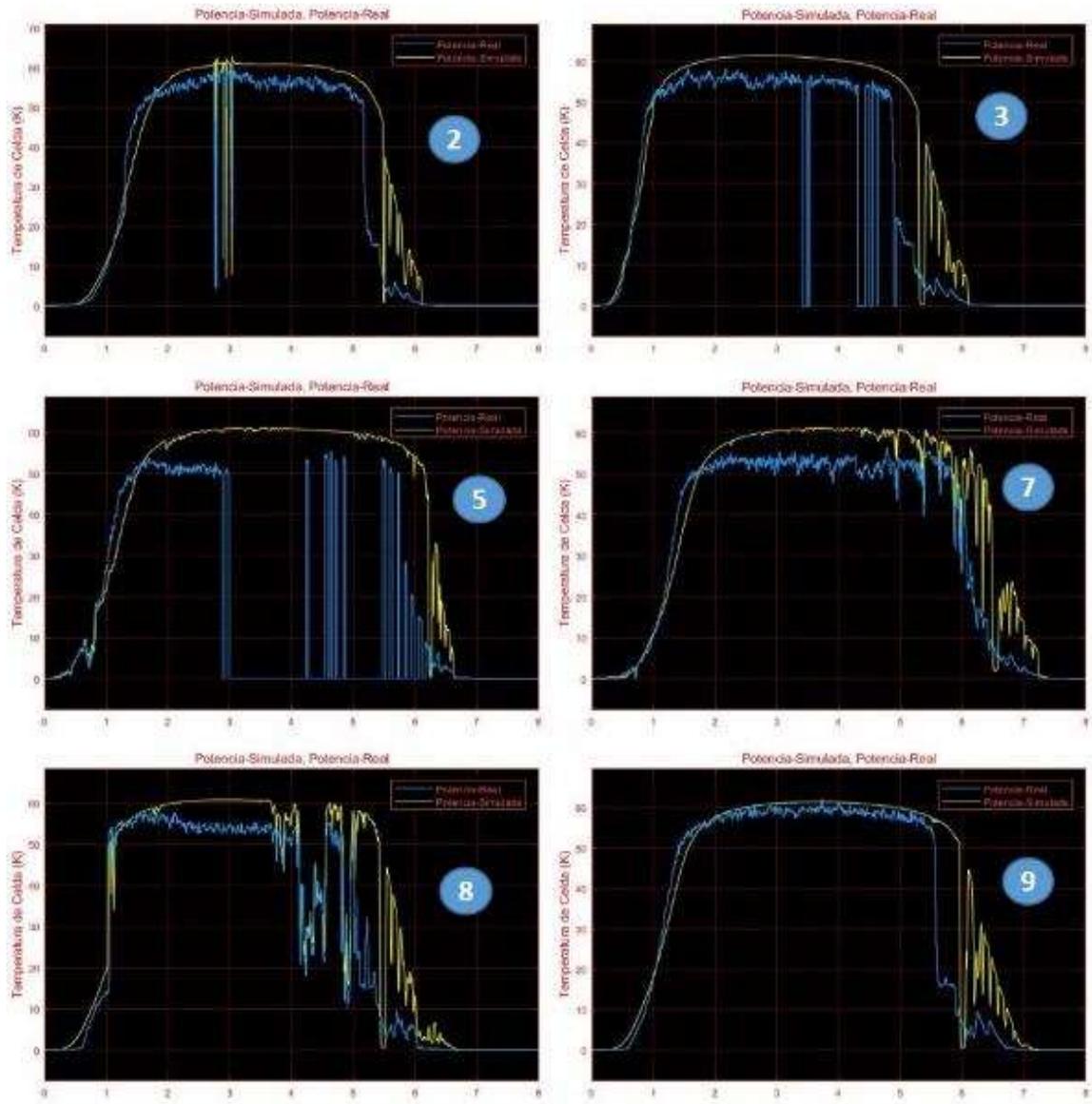


Figura 7.7 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO”

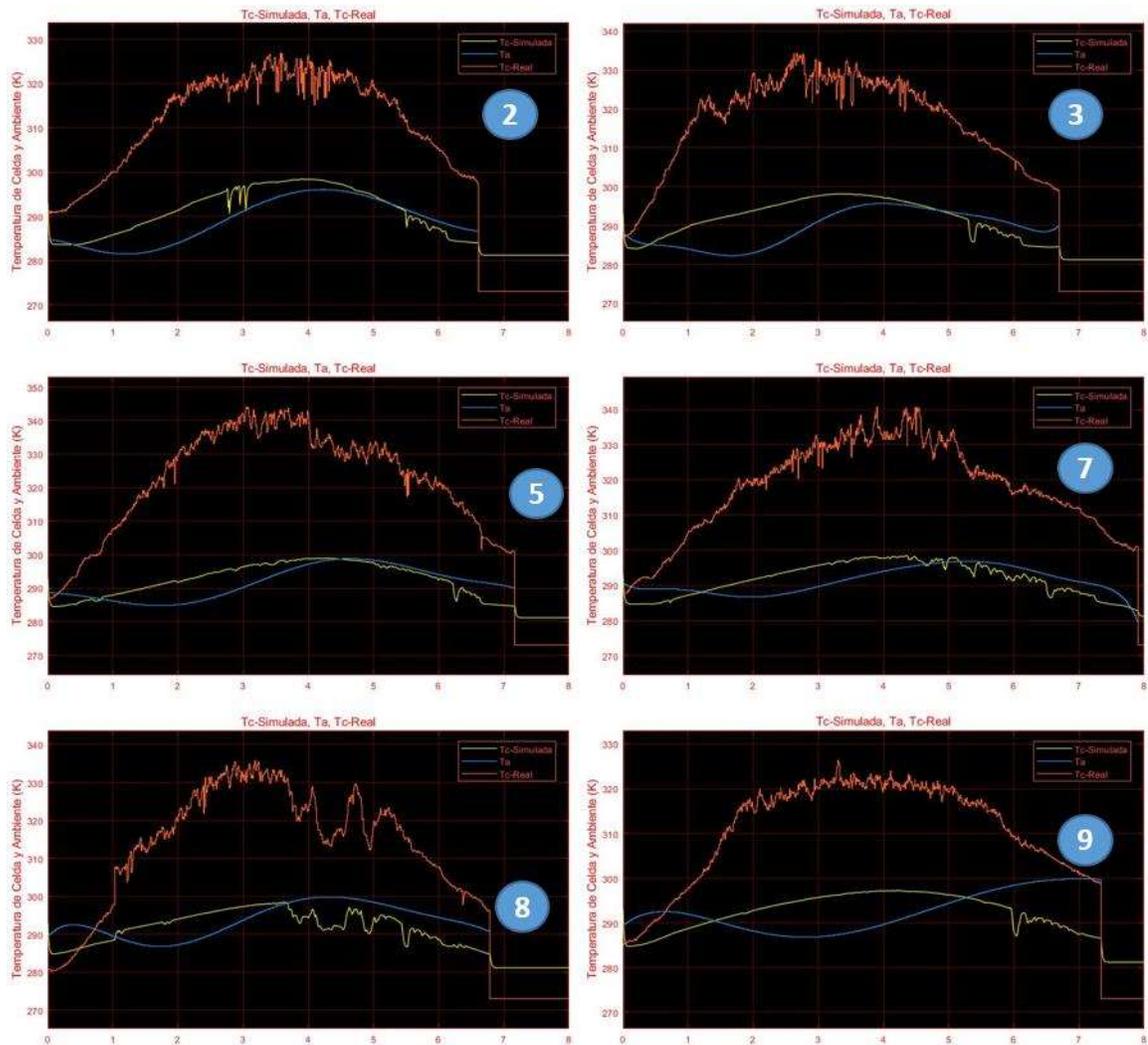


Figura 7.8 “Curvas de Temperatura de Celda del Sistema PVT-HHO”

Finalmente, se determina que el modelo de simulación del sistema híbrido PVT-HHO es un sistema robusto, pero en efecto sensible a la variación de parámetros de diseño del sistema y sobre todo a las variables de entrada. Entonces, para validar el conjunto de modelos de simulación, además de determinar la sensibilidad y confiabilidad del modelo se presentan en la Tabla 7.2 un conjunto de medidas estadísticas como son: el error cuadrático medio (MSE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R Val).

Tabla 7.2 Medidas estadísticas Modelo de Simulación

No Simulación	MSE	R Val	RMSE	NRMSE
Simulación 1-1	169.6212	0.9058	13.0239	0.2266
Simulación 1-2	53.8893	0.9701	7.3409	0.1277
Simulación 2-1	135.9407	0.9237	11.6594	0.1931
Simulación 2-2	126.5918	0.9289	11.2513	0.1863
Simulación 3-1	234.1646	0.8623	15.3024	0.2630
Simulación 3-2	241.9470	0.8577	15.5546	0.2673
Simulación 7-1	72.3184	0.9552	8.5040	0.1510
Simulación 7-2	70.3553	0.9564	8.3878	0.1490
Simulación 8-1	126.4826	0.9189	11.2464	0.1932
Simulación 8-2	126.3882	0.9189	11.2423	0.1932
Simulación 9-1	139.8637	0.9297	11.8264	0.1910
Simulación 9-2	124.1873	0.9376	11.1439	0.1799

Adicionalmente se puede observar la robustez que tiene el modelo de simulación del sistema híbrido, ya que en función de las entradas estima los parámetros de potencia a la salida del sistema eléctrico, el sistema térmico-eléctrico o en su caso el sistema PVT. En la Figura 7.9 se puede observar como la potencia generada se estima en forma efectiva al integrar los valores muestreados del sistema fotovoltaico mismos que en un cierto tiempo son considerados como nulos. En contraste en la Figura 7.10 se observa como el modelo de simulación estima con una gran confiabilidad la potencia generada en un sistema fotovoltaico policristalino muestreado y una R de 95 %. Entonces se puede concluir que el conjunto de modelos de simulación cumple la función del diseño y pueden ser utilizados de forma efectiva en la metodología de análisis multifísica, teniendo en cuenta que no es un modelo único y que en función de los parámetros de diseño deberá calibrarse para hacer más eficiente su uso y aplicación en la metodología.

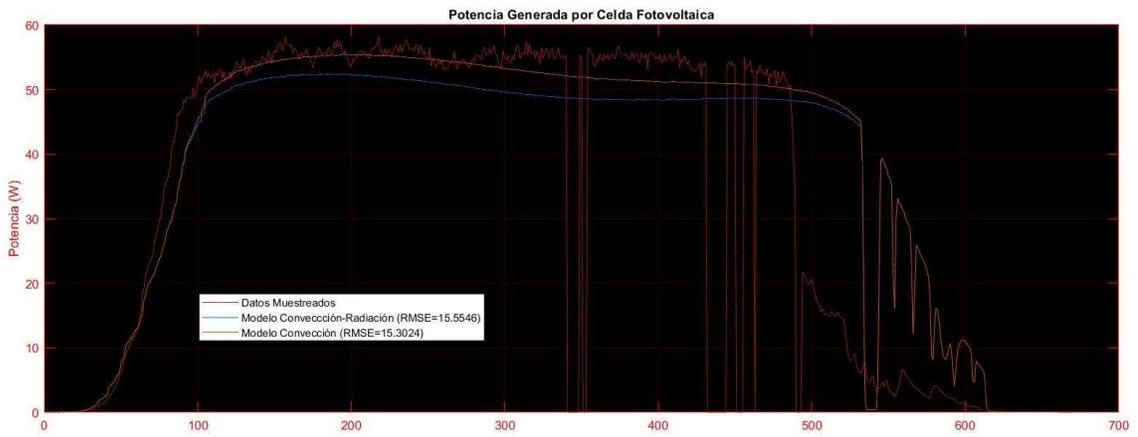


Figura 7.9 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO Datos perdidos”

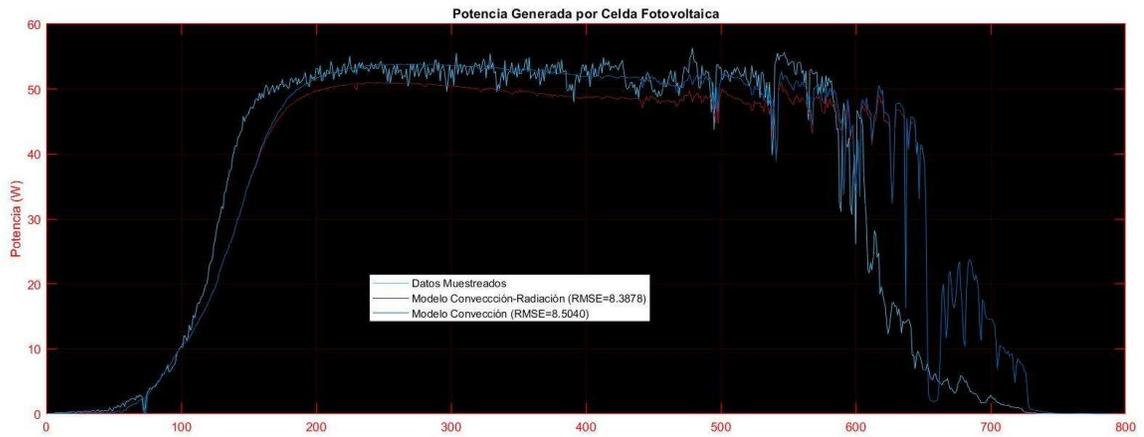


Figura 7.10 “Curvas de Potencia Generada Sistema PVT-HHO R 95%”

7.2. Recomendaciones

Como recomendaciones generales el modelo deberá ajustarse y calibrarse según de cambien los tipos de celdas fotovoltaicas, parámetros y dimensiones de diseño de un sistema híbrido térmico-fotovoltaico HHO.

Es necesario tomar en cuenta también que el modelo de simulación del electrolizador alcalino es dependiente de la potencia energética ingresada, pero en efecto el valor de mayor relevancia es la corriente eléctrica que pasa a través del sistema electrolizador.

Finalmente, es necesario tomar en cuenta que las variables de entrada al modelo de simulación van a regir el comportamiento del proceso de simulación, por lo tanto, es altamente recomendable tener como datos de radiación solar incidente y temperatura ambiente sin datos perdidos y datos nulos.

Como trabajo futuro se tiene la propuesta de continuar con el desarrollo de la metodología de análisis multifísica e integrar un análisis económico y de factibilidad para los sistemas de generación de energía. Además de continuar con el desarrollo de modelos de simulación para los colectores solares de placa y el secador solar instalado en la plata solar del laboratorio de energía solar.

REFERENCIAS

- Furbo S., Shah L. J. (1996). "Optimum Solar Collector Fluid Flow Rates". EuroSun 1996 Internationales Sonnenforu Proceedings Freiburg, Alemania. 10, 189-193.
- Hamidi S., Fayath M. (2011). "Prediction of Thermal Characteristics for Solar Water Heater". Anbar Journal for Engineering Sciences. 4 (2), 18-32.
- Dean J., McNutt P. Lisell L. Burch J. Jones D. Heinicke D. (2015). "Photovoltaic Thermal New Technology Demonstration", General Services Administration By National Renewable Energy Laboratory, USA.
- Chaturvedi, S. K., Gagrani V. D., Abdel-Salam T. M. (2014). Solar-assisted heat pump-a sustainable system for low-temperature water heating applications. Energy conversion and management, 77, 550-557.
- Department of Energy and Climate Change. D. E. C. C. (2014). Energy consumption in the UK (2013) Chapter 3, Domestic energy consumption in the UK between 1970 and 2013. Published on 31 July 2014.
- Hosni and Mulaweh A (2012) Design and development of solar water heating system experimental apparatus. Global Journal of Engineering Education 14(1): 99–105.
- Nshimyumuremyi E., Junqi W., (2019) Thermal efficiency and cost analysis of solar water heater made in Rwanda. Energy Exploration & Exploitation 37(3): 1147–1161.
- Vikram D, Kaushik S, Prashanth V, et al. (2006) An improvement in the solar water heating systems using phase change materials. In: Proceedings of the international conference on renewable energy for developing countries, India, 8–13 July, 2006, American Society of Mechanical Engineers, Denver, pp.1–10.
- Tripanagnostopoulos Y., Huang G., Wang K., Markides C. N., (2021) Photovoltaic/Thermal Solar Collectors. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences 2021.
- Krismadinata N., Rahim A., Ping H., Selvaraja J., (2013) Photovoltaic module modeling using simulink/matlab. Procedia Environmental Sciences 17 (2013) 537 – 546.

- Habbati B., Ramdani Y., Moulay F., (2014) A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics* (2014).
- Saad-Alam M., Alouani A., (2013) Dynamic modeling of photovoltaic module for real-time maximum power tracking. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2, 043102 (2010).
- De Soto, W., (2006). Improvement and Validation Of A Model For Photovoltaic Array Performance By Solar Energy, 80, 78-88.
- Wang C., (2006). Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel cell Distributed Generation Systems. PhD Dissertation, Montana State University, Bozeman, 2006.
- Bukola O. B., (2006). Flow Design and Collector Performance of a Natural Circulation Solar Water Heater. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 1(1): 7-13, 2006.
- Li H., States U. and Liu Z., (2018) Performance prediction and optimization of solar water heater via a knowledge-based machine learning method. *Research on Power and Energy System Optimization*, 55–74
- Al-Hamadi, H., (2015) Fuzzy Estimation Analysis of Photovoltaic Model Parameters. *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 3, 39-43, 2015.
- Apatekar, S., Mallareddy, Ch., (2015) Mathematical Modeling of Photovoltaic Cell. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 4 Issue 4, April 2015.
- Steven S., Kamran S. (2010). "Investigation of the flow field inside flat-plate collector tube using PIV technique". *Solar Energy*. 84, 917–927.
- Carrillo A. y Cejudo J. (2002). TRNSYS model of a thermosiphon solar domestic water heater with a horizontal store and mantle heat exchanger. *Solar Energy*. 72(2), 89-98.
- Vukman V. Goran S. y Milada L. (2011). "Numerical simulation of the air flow around the arrays of solar collectors". *Thermal Science*. 15(2), 457-465.
- Li Q. y Chen Q. (2012). "Application of entransy theory in the heat transfer optimization of flat-plate solar collectors". *Chinese Science Bulletin*. 57(2), 3.
- Ogbonna C., Ndubuisi S. (2012). "Heat transfer in a low latitude flat plate solar collector". *Thermal Science*. 16 (2), 583-591.
- Radziemska E., (2003). "The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells". *Renewable Energy*. 28, 1–12.

- Huan-Liang T, Ci-Siang T. y Yi-Jie S. (2008). “Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK”. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008. San Francisco, USA
- Mattei M., Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P., (2006). “Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance”. *Renewable Energy*. 31, 553–567.
- Jangwoo P., Hong-geun K., Yongyun C., Changsun S. (2014). “Simple Modeling and Simulation of Photovoltaic Panels Using Matlab/Simulink”. *Advanced Science and Technology Letters*. 73, 147-155.
- Armstrong S., Hurley W. (2010). “A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions”. *Applied Thermal Engineering*. 30, 1488-1495.
- Rekha L., Vijayalakshmi M., Natarajan E., (2013). “Photovoltaic thermal hybrid solar system for residential applications”. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2 (10).
- Nayeem U., Rahman C. (2016) “Design and Experimental Validation of a Photovoltaic Thermal (PVT) Hybrid Collector”. *International Journal of Renewable Energy*. 6 (4).
- Wenke F., Kokogiannakis G., Zhenjun M., Cooper P. (2016). “Development of a dynamic model for a hybrid photovoltaic thermal collector – solar air heater with fins”. *Renewable Energy*.
- Mutombo N., Inambao F. (2016). “Performance analysis of thermosyphon hybrid photovoltaic thermal collector”. *Journal of Energy in Southern Africa*. 27 (1)
- Khudheyer A. y Aldeen M. (2011). “Numerical analysis of combined heat transfer in the laminar boundary layer”. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 6 (11).
- Bilbao J., Sproul A. (2012). “Experimental Results of a PVT-Water Module Design for Developing Countries”. Proceedings of the 50th Annual Conference, Australian Solar Energy Society. Melbourne.
- Ali E., Sopian K., Yusof M., Othman H., Bin-Yatim B. (2007). “Transient mathematical model of both side single pass photovoltaic thermal air collector”. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2 (5).
- Chow T. (2003). “Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model”. *Solar Energy*. 75, 143–152.

- Huang B., Lin T., Hung W., Sun F. (2001) "Performance Evaluation Of Solar Photovoltaic/Thermal Systems". *Solar Energy*. 70 (5), 443–448.
- Belhadj, C., Kassas, M., Essamuddin, S., (2015) LabVIEW Based PV Panel Online Characteristics and Parameters Estimation. *Procedia Computer Science*, vol. 52, 876 – 882, 2015.
- Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., Shamsudin, A., (2011) Parameter Extraction of Photovoltaic Cell Using Differential Evolution Method. *IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 10-15, 2011.
- Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. CONAE, (2007). Programa para la promoción de calentadores solares de agua en México PROCALSOL. México, D.F.
- Duffie J. A., Beckman W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3 ed. New Jersey: Wiley.
- Kalogirou S. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. USA: Elsevier.
- US ARMY CORP. (2011). *Central Solar Hot Water Systems Design Guide*. USA.
- Andrews J. W. (1981). Evaluation of flat-plate photovoltaic/thermal hybrid systems for solar energy utilization. Technical Report Wrote by Solar Technology Group at Brookhaven National Laboratory requested by Jet Propulsion Laboratory. USA.
- Borda-Yepes V. H. (2012). Sistema híbrido Termo-fotovoltaico: Modelo Termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Frey H. C., Patil S. R. (2002). Identification and review of sensitivity Analysis Methods, Risk Analysis an international Journal. V(22), I(3), June 2002.
- International Energy Agency, I.E.A. (2020) *Key World Energy Statistics 2020*.
- Matter and Energy Laws, (2007)
- Buker M. S. (2015). Building integrated solar thermal collectors for heating and cooling applications. PhD Thesis. University of Nottingham.
- Mustafa K. (2013). Thermal and electrical performance evaluation pf PV/T collectors in UAE. MsC Thesis. KTH School of industrial engineering and management.
- Xingxing Z. (2014). Investigation of a novel solar photovoltaic/loop heat pipe heat pump system. PhD Thesis. University of Hull
- Asterios B. (2008). New approaches for cooling PV/T systems. PhD Thesis. University of Nottingham.

- Hangos K. M., Cameron I. T. (2001). *Process Modelling and Model Analysis*. Academic Press. UK
- Ramirez W. F. (1997). *Computational Methods for Process Simulation*. Butterworth Heinemann. USA.
- Spencer, J. W., (1971). Fourier Series Representation of the Position of the Sun. *Search*, 2 (5), 172.
- Benford, F., Bock, J. E. (1939). A Time Analysis of Sunshine. *Trans. Am. Illumin. Eng. Soc.*, 34, 200
- Cooper, P. I. (1969). The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills. *Solar Energy*, 12,3.
- Liu, B. Y. H., Jordan, R. C. (1963). The Long-Term Average Performance of FlatPlate Solar Energy Collectors. *Solar Energy*, 7, 53
- Ospino C. A., Robles A. C., Duran P. A., (2014). Modeling and simulation of a photovoltaic panel using artificial intelligence techniques. *Energética*. 35(3). 225-233.
- Almeida J., Camacho P., Corrales L. (2012). Diseño, construcción e implementación de un sistema de adquisición de datos con transmisión inalámbrica, para evaluar el rendimiento de colectores solares térmicos para el calentamiento de agua. *Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE)*.
- Ulleberg O. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*. 28(2003) 21-33.
- Ajayi A., Akerele O. (2013). Development of Hydrogen Generator for Hydrogen Gas Production. *The International Journal of Engineering And Science*. 2(7).126-130.
- Oruc M., Desai A., Kenis P., Nuzzo R. (2016). Comprehensive energy analysis of a photovoltaic thermal water electrolyzer. *Applied Energy*. 164(2016).294-302.
- Oruc M., Desai A., Kenis P., Nuzzo R. (2016). Design, fabrication and characterization of a proposed microchannel water electrolyzer. *Journal of Power Sources*. 307(2016).122-128.
- Ono K., (2016). Concept of Hydrogen Redox Electric Power Generator. *Innovative Energy and Research*. 5(129).
- Campolongo F., Saltelli A. (1997). Sensitivity analysis of an environmental model; an application of different analysis methods, *Reliability Engineering and System Safety*. V(57), I(1), 1997 (49-69).

- Wotawa G., Stohl A., Kcomp-Kolb H. (1997). Estimating the uncertainty of a Lagrangian photochemical air quality simulation model caused by inexact meteorological input data, *Reliability Engineering and System Safety*. V(57), I(1), 1997 (31-40).
- Looss B., Lamaitre P. (2015). A review on global sensitivity analysis methods, *Uncertainty management in simulation optimization of complex systems, operations research/ computer science interfaces series*. V(59), 2015 (101-122).
- Wei T. (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis, *Renewable and sustainable energy reviews*. V(20),2013 (411-419).
- Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J. Gatelli D., Saisana M. and Tarantola S. (2008). *Global Sensitivity analysis, The Primer*, John Wiley and Sons. 2008.
- Ahmed-Raja A., Huang Y., (2020). Novel parabolic trough solar collector and solar photovoltaic thermal hybrid system for multi-generational systems, *Energy conversion and management*, V(21), I(1). 2020.
- Pardo-Garcia N., Zubi G., Pasauglu G., Dufo-Lopez R., (2017). Photovoltaic thermal hybrid solar collector and district heating configurations for a central european multi-family house, *Energy conversion and management*, V(148), 2017.
- Shyan G., Tiwari G., Al-Helal,I, (2015). Analytical expression of temperature dependent electrical efficiency of N-PVT water collectors connected in series, *Solar Energy*, V(114), 2015.
- Hyndman, Rob J.; Koehler, Anne B. (2006). "Another look at measures of forecast accuracy". *International Journal of Forecasting*. 22 (4): 679–688. doi:10.1016/j.ijforecast.2006.03.001
- Hernández, E and Flores, J (2016) Methodology for the analysis of qualitative data in research aimed at the use of renewable energy sources. *KOINONIA Arbitrated Magazine*. Vol. 1, No. 1 (1): January - June. 2016
- Pino-Garcia O., Jauregui-Haza U. and Quiñones-García I. (1997) La planta piloto y el escalado de procesos de obtención de principios activos para medicamentos por síntesis química. *Acta Farm Bonaerense*. Vol. 16, No. 1. 1997.
- Díaz de los Ríos M. (1996) Experimentación en plantas piloto. *Ingeniería Química*. Vol. 1, No. 1 (1)1996
- Anaya-Durand, A.; Pedroza-Flores, H., (2008) Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina *Tecnología, Ciencia,*

- Educación, vol. 23, núm. 1, enero-junio, 2008, pp. 31-39 Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos A.C Monterrey, México.
- Touafek K., Khelifa A., Adouane M., (2014). Theoretical and experimental study of sheet and tubes hybrid PVT, *Energy conversion and management*, V(80), 2014.
- Taoufik B., Abdelmajid J., (2017). Economical assessment and applications of PVT hybrid solar technology - A review, *Solar Energy*, V(153), 2017.
- Jie J., Gou C., Sun W., He W., Wang Y., Li G. (2014). Experimental investigation of tri-functional photovoltaic/thermal solar collector, *Energy conversion and management*, V (88), 2014.
- Abu-Bakar M., Othman M., HijDin M., Manaf N., Jarimi H. (2014). Design concept and mathematical model of a bifluid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector, *Renewable Energy*, V (87), 2014.
- Zhi Y., Jie J., Sun W., Wang W., Li G., Cai J., Chen H. (2014). Experiment and prediction of hybrid solar air heating system applied on a solar demonstration building, *Energy and Buildings*, V (78), 2014.
- Dupeyrat P., Menezo C., Rommel M., Henning H., (2011). Efficient single glazed flat plate photovoltaic-thermal hybrid collector for domestic hot water system, *Solar Energy*, V (85), I(7) 2014.
- Assoa Y., Menezo C., Fraisse G., Yezou R., Brau J., (2007). Study of a new concept of photovoltaic-thermal hybrid collector, *Solar Energy*, V (81), I(9) 2007.
- Bermejo, Sergio; Cabestany, Joan (2001). "Oriented principal component analysis for large margin classifiers". *Neural Networks*. 14 (10): 1447–1461. doi:10.1016/S0893-6080(01)00106-X
- Petcut, F. M., Dragomir T.L., (2010) Solar Cell Parameter Identification Using Genetic Lgorithms. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, 12, 30-37, 2010.
- Ceron J. F. (2012). Análisis del mecanismo de transferencia de calor en colectores solares térmicos y de la influencia de las condiciones de contorno. Tesis de Ingeniería, Universidad Politécnica de Cartagena, España.
- American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers. (2003). Standard ASHRAE 93:2003, Method of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. USA.
- Eicker U., (2003). *Solar Technologies for Buildings* 1st Edition. Wiley; 1st edition.2003.

- Koziel S., Yang X. (2011). Computational Optimization, Methods and Algorithms. Springer. Poland.
- Azurero A., (2019). Significatividad del marco metodológico en el desarrollo de proyectos de investigación. Revista Arbitrada Interdisciplinaria KOINONIA Año IV. Vol IV. N°8. Julio – Diciembre 2019.
- Uherek E. y Schupbach E., (2008). European Efforts in Earth Science and Climate Change Education. Physical Geography V (29), 2008 - Issue 6: Environmental Literacy.

CURRÍCULUM VITAE



Jeovany Rafael

Rodríguez MejíaCell.

6567048925

Nvo. Urique 1204, Residencial Novel Cd. Juárez

Chihuahua 32540

jrodriguez@itcj.edu.mx

OBJETIVO

Aplicar los conocimientos, habilidades y cualidades adquiridas para el desempeño funcional en la innovación, desarrollo y aplicación de la ingeniería, participando en el desarrollo científico, tecnológico, así como la transmisión del conocimiento.

HISTORIA EDUCACIONAL

2017-2021 Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, Área Modelación y simulación, Tema de Tesis: Metodología de análisis multifísica aplicada a un sistema PV-T-HHO mediante simulación.

2020 Estancia de Investigación en el Nodo de Creatividad Innovación Tecnológica y Emprendimiento del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez en el proyecto Desarrollo de Modelos de Sistemas Energéticos aplicados a la Industria 4.0, 20 enero – 2 de octubre 2020.

2015 Estancia de Investigación en el laboratorio de articulaciones (Joint Lab) de la Universidad de Texas en El Paso (UTEP) en el proyecto aplicación de control avanzado con LabView en un simulador de movimientos básicos de la articulación de

la rodilla del área de investigación de Biomecánica, 1 de Julio – 30 de noviembre 2015.

2015 Estancia de Investigación en el laboratorio de automatización de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, en el proyecto control avanzado de motores, junio - Julio 2015

2014-2015 Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas (Graduado con Mención Honorífica Prom. 9.9/10), Procesamiento Digital de Señales y Mecatrónica, Tema de Investigación (Análisis del rendimiento térmico de un sistema termosifónico con un dispositivo de control de flujo y temperatura).

Consejero Académico de la Unidad de Ingeniería Eléctrica de la UAZ.

2007-2012 Ingeniería Mecánica, línea de especialidad Energía, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco (85.4/100, Graduado); Tesis (Análisis de un calentador solar con el PIV).

EXPERIENCIA LABORAL

2019-Actual Gestor tecnológico en el Nodo de Creatividad Innovación Tecnológica y Emprendimiento del Tecnológico Nacional de México Campus Ciudad Juárez, área estratégica de desarrollo Impresión 3D y Manufactura Aditiva.

2017-Actual Profesor de Asignatura en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, asignado al departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura. Materias impartidas: Introducción a la Ingeniería Mecánica, Ingeniería en Sistemas Dinámicos, Ingeniería en Sistemas Mecánicos, Mecánica II, Mecanismos, Hidrodinámica, Termofluidos, Transferencia de Calor, Diseño e Innovación, Sistemas de Combustión, Vibraciones.

2016-Actual Profesor de Asignatura en el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, asignado al departamento de metal-mecánica. Materias impartidas: Dinámica, Procesos de manufactura; teoría y laboratorio, Automatización Industrial; teoría y laboratorio, Especificación y selección de materiales; teoría y laboratorio. Transferencia de Calor, Máquinas térmicas, Mecanismos, Termodinámica, Diseño e Ingeniería Asistido por Computadora, Mecánica de Materiales, Ciencia e Ingeniería de Materiales, Mecánica de Fluidos, Proyectos de Automatización, Tópicos de Diseño con Software, Diseño Mecánico, Asesor interno residencias profesionales y detitulación, Asesor del capítulo estudiantil Baja SAE y ASME.

2016 Ingeniero de manufactura Jr. en Eaton Bussman. Las actividades principales son en el área de desarrollo y procesos de manufactura en departamento de ingeniería avanzada, desarrollo de experimentos de tensión, resistencia eléctrica, X-Ray testing, sorteo de muestras de producción, administración y seguimiento del sistema de recursos financieros para proyectos del área, bajo la plataforma de Oracle, desarrollo de reportes semanales de los métricos de proyectos del área. Capacitación en 8D's, 5's, FMEA's.

2015-2016 Trabajé como supervisor en el área de fundición en Ahresty Mexicana, Zacatecas. Las actividades principales fueron diseño y dibujo de piezas de maquinaria del área de ingeniería y mantenimiento, control de dibujos y documentos del área, obtuve capacitación en SPC, 8Ds, 5s, PFMEA, DFMEA, DoE.

2015 Trabajé como asistente de investigación en el laboratorio de articulaciones (JointLab) de la Universidad de Texas en El Paso (UTEP) en el proyecto aplicación de control avanzado con LabView en un simulador de movimientos básicos de la articulación de la rodilla del área de investigación de Biomecánica. Mayor participación en la parte de instrumentación, diseño eléctrico y electrónico del simulador y control avanzado en la plataforma LabView Real Time and FPGA.

2014-2015 Trabajé como consultor e ingeniero de diseño en el área de desarrollo de productos ISA Tracto C, en el proyecto de desarrollo de un sistema de refrigeración para transporte de carga aplicando energías alternas para su energización, proyecto dentro de los 10 primeros lugares en el Premio Santander 2015.

2013-2014 Trabajé como supervisor de calidad en la construcción del gasoducto bicentenario de Zacatecas GNI. Actividades realizadas dar seguimiento a las normas constructivas del gasoducto, procesos de soldadura, colocación de aislantes por termofusión, bitácora de diseño del gasoducto.

2012-2013 Trabajé en la evaluación, medición y simulación de la transferencia de calor en aletas, secado de frutos con microondas y túnel de viento en el departamento de energía de la UAM. Ayudante de investigador y docencia.

2012 Trabajé en la evaluación de un generador eólico y el desarrollo de un modelo de evaluación de un calentador solar para la facultad de ingeniería electromecánica de la UAQ.

CERTIFICACION

Certificación de Solid Works Asociado,

CSWA (ITCJ) TOEFL Certificación de inglés

Certificado B1 en Alemán y Certificado B1 en Francés.

PROCADIST curso “El Valor del Trabajo - La Productividad Laboral en mi Vida Profesional –Educación Superior

UAM certificado del curso “Relaciones

Interpersonales” UAM certificado del curso

“Autocad 2011”

Miembro ASME y SAE

PROYECTOS SELECTOS

Competencia Festival de Ingeniería ASME con el capítulo estudiantil ASME del ITCJ, Competencia de Diseño y Presentación Oral 2019 en la Universidad Estatal de Michigan, obteniendo 1er lugar en presentación oral y 2do lugar en competencia de diseño siendoparticipe como asesor del capítulo estudiantil.

Diseño, construcción y evaluación térmica-eléctrica de un sistema híbrido térmico fotovoltaico para la producción de energía eléctrica y calor de proceso, Convocatoria 2018-2: Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica en los Programas Educativos de los Institutos Tecnológicos Federales, Descentralizados y Centros; Responsable: WOOCAYPRIETO, ARTURO; Modalidad: Posgrado PNPC; Sometido: 2018-04-16; Dictamen: Aprobado con financiamiento de 250,000.00 el 2018-05-29. Colaborador técnico de proyecto.

MOOC, “Dinámica, la física más allá del Aula”. Colaboración en el diseño del curso, programación en plataforma y seguimiento de los dos cursos que se impartieron en el semestre Enero-Junio 2018.

Técnicas de control avanzado de un simulador de los movimientos de la articulación de la rodilla utilizando LabView Real Time and FPGA, del área de investigación de Biomecánica aplicada en Joint Lab de UTEP.

Control avanzado de motores bajo el uso de la plataforma LabView Real Time and FPGA en la UACJ.

Diseño y desarrollo del prototipo de sistema de refrigeración para transporte refrigerado en ISATracto C.

Análisis del rendimiento térmico de un sistema termosifónico con un dispositivo de control de flujo de temperatura.

Análisis del rendimiento térmico de un sistema de calentamiento de agua de tubos evacuados del campus UAZ.

Análisis de un calentador solar con el PIV, tesis de la ingeniería mecánica

Investigación académica en secado de frutas por túnel de viento y microondas en la UAM Diseño y desarrollo de un prototipo para evaluación de un calentador de calor solar en la UAQ

Evaluación de un prototipo de generador eólico en un invernadero de San

Juan del Rio, Querétaro

Desarrollo y evaluación de un sistema de refrigeración líquida para procesador de PC, UAQ, SJR, Querétaro.

Intercambio académico a la Universidad Autónoma de Querétaro, semestre de primavera 2012

Diseño y desarrollo de un prototipo de un modelo de calentador de calor solar en el servicio social de la UAM

PUBLICACIONES

Rodriguez Mejia Jeovany Rafael, Woocay Prieto Arturo, et all, Estimation of solar radiation for solar systems application in northwestern Mexico based on the Angstrom model and polynomial regression, Ingeniería Energética (Aplicaciones Industriales), Vol. 43, 2022 ISSN: 1815-5901 (Carta de Aceptación de publicación)

Rodolfo Bailón, Jeovany Rodríguez, Arturo Woocay, Energetic analysis and comparison of a PEM electrolyzer and an alkaline electrolyzer, Congreso Internacional de Energía 2021 (CIE 2021).

Rodolfo Bailón, Jeovany Rodríguez, Arturo Woocay, Energy Efficiency Analysis of a PEM Electrolyzer and a PEM Hydrogen Fuel Cell, Memorias del XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM 22 al 24 de septiembre de 2021 pachuca, Hidalgo, México.

G. Ávila-Isais, J. Rodríguez-Mejía, et all, Design and simulation of a maximum power point tracker for PV-array using perturb & observe technique, Congreso Internacional de Energía 2021 (CIE 2021),

Rodriguez Mejia Jeovany Rafael, Woocay Prieto Arturo, Diseño de un sistema de monitoreo, control y adquisición de parámetros característicos de módulos fotovoltaicos de bajo costo basado en Arduino-octave, XV Semana Nacional de Ingeniería Electrónica, aceptado para su publicación 2019.

Bailon Rodolfo, Rodriguez Mejia Jeovany Rafael, Woocay Prieto Arturo, Energetic Analysis of a monocrystalline photovoltaic panel, Memorias XXV Congreso Internacional Anual de la SOMIM aceptado para su publicación 2019.

Rodríguez Mejía Jeovany Rafael, Araiza Esquivel Ma. Auxiliadora., et all. Design of a solar flatplate collector, Ingeniería Energética (Aplicaciones Industriales), Vol. 37, 2016 ISSN: 1815-5901

Rodríguez Mejía Jeovany Rafael, Araiza Esquivel Ma. Auxiliadora., et all , Simulación

de un sistema termosifónico de calentamiento solar de agua a partir de las variables climatológicas típicas de Zacatecas adquiridas con arduino-matlab, Revista de Ciencia e Ingeniería del instituto tecnologico superior de Coatzacoalcos, Vol, 1, 2014. ISSN:2395-907X

Rodríguez Mejía Jeovany Rafael, Araiza Esquivel Ma. Auxiliadora., et all , Evaluación de la eficiencia de un calentador solar de tubos evacuados implementado con una tarjeta arduino mega, Pistas Educativas (ITC-UAM), Vol 108, 2014. ISSN: 14051249

Rodríguez Mejía Jeovany Rafael, Lopez Monteagudo Francisco Eneldo, Gordon Sánchez Manuel, Velocimetria por imagenes de partículas, Editrial ACADEMICA ESPAÑOLA, 2014 España, ISBN:978-3-659-05428-0

ANEXO A [MODELO DE 4 PARÁMETROS]

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Autor: Jeovany Rafael Rodriguez Mejia
% Programa : Doctorado en Ciencias de la Ingeniería
% Institución: Tecnológico Nacional de México Campus
Ciudad Juárez
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Circuito Equivalente Simplificado
%
% Modelo de 4 parámetros
%
%  $I = I_L - I_D = I_L - I_o [\exp((V + I \cdot R_s) / (a)) - 1]$ 
%
%  $I_L =$  Corriente Fotogenerada  $I =$ 
Corriente de Carga %
%  $I_o =$  Corriente de Saturación  $V =$ 
Voltaje de Salida %
%  $R_s =$  Resistencia en Serie
%
%  $a =$  Factor de Voltaje Termico
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all
close all
clc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Constantes de Celda 130 W%
```

```

% Pmp=129.42; % W
% Imp= 8.254; % A
% Vmp= 15.68; % V
% Isc= 9.12; % A
% Voc= 18.23; % V
% Ns= 28; % Celdas en serie
% A= 1.3; % Factor de idealidad del diodo
% Gref= 1000; % W/m2
% Tcref= 298; % K
% AM= 1.5; % Aire Masa
% usc= 0.00053; % Coeficiente de temperatura sc
A/K
% sb= 1.3810e-23; % Constante Stefan Boltzmann J/K
% q= 1.602e-19; % Carga del electron Coulombs
% eg= 1.12; % Ancho de banda de energia del
Si en eV

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Constantes segun tipo de Panel 150 W

```

```

Pmp=146.328; % W
Imp= 9.38; % A
Vmp= 15.60; % V
Isc= 9.85; % A
Voc= 18.74; % V
Ns= 28; % Celdas en serie
A= 1.2; % Factor de idealidad del diodo
Gref= 1000; % W/m2
Tcref= 298; % K
AM= 1.5; % Aire Masa
usc= 0.00053; % Coeficiente de temperatura sc
A/K
sb= 1.3810e-23; % Constante Stefan Boltzmann J/K
q= 1.602e-19; % Carga del electron Coulombs

```

```

eg= 1.12;          % Ancho de banda de energia del Si
en eV

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Mediciones en tiempo Real %
%TC= input('Ingrese Temperatura de Celda estable
propuesta (°C) ');
%g= input('Ingrese Irradiancia propuesta constante
(W/m^2) ');

V=0:((Voc-0.8)/99):Voc-0.8; % Voltaje
%V=0:((Voc)/99):Voc; % Voltaje

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%V=VCR1';          % Voltaje Real
Opcion 4
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Ac=0.78416; %m2
%G = 1000*ones(1,length(V)); % STC
g=[200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000];
G = g.*ones(1,length(V));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%G=GCR1';          % Radiacion Real
Opcion 4
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

tc = 25*ones(1,length(V)); % STC
%tc = TC.*ones(1,length(V));
Tc= tc+273;

Vocref=Voc;
Iscref=Isc;
ILref=Isc;
Vt= sb.*Tc./q;

```

```

%a= A.*Ns.*Vt;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Primer Parametro %

IL= (G./Gref).*(ILref + usc.*(Tc-Tcref));

% Segundo Parametro %

aref= ((2.* Vmp)- Voc)./(((Isc)/(Isc-Imp))+log(1-
((Imp)/(Isc))));

Io= (ILref).*(exp(-Vocref./aref)).*((Tcref./Tc).^3).*
(exp((q.*eg./A.*sb).*(1./Tcref)-(1./Tc)));
% (exp((Ns.*eg./q.*aref).*(1)-(Tcref./Tc))); % (1-
((Tcref)./(Tc)))%

% Tercer Parametro %

a= ((Tc)./(Tcref)).*aref;

%Vt= sb.*Tc./q;
%a= A.*Ns.*Vt;
%a= A.*Vt;

% Cuarto Parametro %

ARs=(Voc/Isc);
BRs=Pmp*( (Voc/0.0257)+1);
CRs=Isc*Isc;
DRs=(Voc/0.0257)-(log((Voc+0.0185)/0.0257));
RRs=ARs-(BRs/(CRs*DRs));

%Rs= (((aref.*log(1-((Imp)./(Isc))))+(Voc)-
(Vmp))./(Imp));
%Rs= abs(((aref.*log(1-((Imp)./(Isc))))+(Voc)-
(Vmp))./(Imp));
Rs=0.1;

```

```

% Calculo de Rp (Dependencia de Tc)

%Rp= abs((((Vmp)+(Imp.*Rs))./((Isc)-
(Isc.*(exp(((Vmp)+(Rs.*Imp)-
(Voc))./(a)))))+(Isc.*(exp((-Voc)./(a))))-
((Pmp)./(Vmp))));
Rp=300;
% Corriente generada

%I = IL - Io.*(exp((V + I*Rs)/(a))-1);

I= 5;

for i=1:10

    Ic = IL - ((Io.*(exp((V + I.*Rs))./(a))-1))- ((V +
I.*Rs)./(Rp));

    %Ic = IL - ((1.4*Io.*(exp((V + I.*0.7*Rs)./(a))-
1)));

    %Ic = IL - ((Io.*(exp((V + I.*Rs))./(a))-1));

    e = abs(Ic-I);
    I = Ic;
end

I1= I;

%plot(V,I1, 'b'),hold on, plot([V(100) Voc],[I1(100)
0], 'b') % 150W
plot(V,I1, 'b') % 130W
axis([0 20 0 11])
grid

```

ANEXO B [MODELO SISTEMA HÍBRIDO PV-T MODELO 2]

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%           Modelo Sistema Híbrido   PV-T       Model 2
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Autor: Jeovany Rafael Rodriguez Mejia
%   Programa : Doctorado en Ciencias de la Ingenieria
%   Institución: Tecnológico Nacional de México Campus
Ciudad Juárez
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all
close all
clc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   Condiciones Estandar Modelo Solar
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Temperatura de Celda NOCT
    TcNOCT= 45; % Temperatura de Celda NOCT
    TaNOCT= 20; % Temperatura Ambiente NOCT
    GNOCT= 1000; % Irradiancia NOCT
    nc=0.19;    % Eficiencia Inicial
    ta= 0.9;    %Producto Transmitancia-
Absortancia

% Geometria Solar
    tr=6;        % Tiempo salida de sol
    td=12;       % Tiempo duracion de dia solar
    Amp=950;     % Amplitud irradiancia maxima

% Inicializar Vectores
GT=[];
```

```

ti=[];
Tam=[];
Vv=[];
Tcel=[];
NCEL=[];

for t=(tr):0.25:(tr+td-0.01)
    ti=[ti t];% Desarrollo de vector de simulación de
    tiempo
    Gtc=Amp*sin(pi.*(t-tr)./(td));% Radiación solar en
    función del tiempo
    GT=[GT Gtc];% Desarrollo de vector de simulación de
    radiación

    TAM= 18+17*(sin((t-tr)*pi/18));% Temperatura
    ambiente en función del tiempo
    Tam=[Tam TAM];% Desarrollo de vector de simulación
    de temperatura ambiente

    VV= 3.5*(sin((t-tr)*pi/18));% Velocidad de viento en
    función del tiempo
    Vv=[Vv VV];% Desarrollo de vector de simulación de
    velocidad de viento

    TC= TAM+((TcNOCT-
    TaNOCT).*(Gtc./GNOCT).*((9.5)./(5.7+(3.8).*VV))* (1-
    ((nc)/(0.9)))); % Temperatura de celda en función del
    tiempo
    Tc1= TC+273.15;
    Tcel=[Tcel Tc1]; % Desarrollo de vector de
    simulación de temperatura de celda

    NCEL= 0.553 - 0.001298675*Tc1; % Eficiencia de celda
    en función del tiempo
    NCEL=[NCEL NCEL]; % Desarrollo de vector de
    simulación de Eficiencia de celda

    %G=Gtc;
end

```

```

Power= GT.*ta.*NCEL; % Desarrollo de vector de
simulación de potencia de celda

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Parámetros Constantes
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('Parametros entrada modelo híbrido PV-T')
% Tam=input('Temperatura Ambiente (°C)');
% G=input('Radiación promedio (W/m^2)');
% Tcel=input('Temperatura Celda (°C)');
Tif=input('Temperatura Entrada Fluido (°C)');
Caudal=input('Caudal del agua de flujo (lpm)');

Ta= Tam+273.15;          %Temperatura ambiente (K)
Gt= GT;                 %Radiacion solar          (W/m^2)
Tc= Tcel;               %Temperatura de Celda (K)
Ti= Tif+273.15;        %Temperatura de fluido de entrada
(K)
Tf= Ti-273.15;         %Temperatura de fluido de entrada
(°C)
em=0.9;                %Emisividad
sbn=5.67e-8;           %Constante de Steffan-Boltzmannf
(W/m^2 K^4)
hw= 10 ;               %Coef HT (W/m^2 K)
%hw= 3.74*Vv^(0.6);   %Coef HT (W/m^2 K)

fq=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parametros Colector Solar de placa plana
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Ka= 0.038;             % Aislante fibra de vidrio
(W/m K)
Kp= 50;                % Placa de cobre 385
(W/m K)

```

```

tp= 0.3e-3;           % Espesor de la placa
(m)
eaf= 5e-2;           % Espesor aislante de fondo
(m)
eab= 2.5e-2;         % Espesor aislante de laterales
(m)
l1= 1;              % Ancho de colector
(m)
l2= 2;              % Largo de colector
(m)
Pc= 2*(l1+l2);      % Perimetro de Bordes
(m)
AC= l1*l2;          % Area de colector
(m^2)
Cp= 4186;           % Calor especifico del agua
(J/Kg K)
Cs= 102;            % Conductividad termica del estaño
(W/m K)
Ct= 7e-2;           % Alto del colector
(m)
W= 10e-2;           % Distancia entre centros
(m)
de= 15.9e-3;        % Diametro externo
(m)
di= 14.3e-3;        % Diametro interno
(m)
Kt= 250;            % Tubo de cobre 250
(W/Km)
nT= l1/W;           % Numero de tubos en colector
%hfi= 1500;         % Coeficiente fluido tubo
(W/m^2 K)
% Calcular con Reynolds y Nu%
den= 1000;
caud= Caudal *( 1/1000)*(1/60);
fm= den*caud;       % Flujo masico kg/seg 2 lpm =
0.033
%fm= 0.3;           % Flujo masico kg/seg 2 lpm =
0.033
fmxT= fm/nT;        % Flujo masico kg/seg por tubo

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%      Flat Plate Collector Model

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Fluid properties
cpf= 4210.1 - 1.313162*Tf + 0.01352294*(Tf^2);
rof= 1002.1 - 0.1728604*Tf - 0.002600578*(Tf^2);
kf= 0.57098 + 0.001746321*Tf - (6.42969e-6)*(Tf^2);
muf= (1.736107e-3)-((4.87698e-5)*Tf) + ((7.409839e-
7)*(Tf^2))-((6.075131e-9)*(Tf^3)) + ((2.489452e-
11)*(Tf^4)) - ((3.9750877e-14)*(Tf^5));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% hfi
%Re= (Vel*di)/(vis);
Re= (4*fmxT)/(pi*di*muf);
Pr= (muf*cpf)/(kf);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if Re < 2300

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% constant heat flow
if fq==1;

Nua= 4.4;
if Pr<= 0.7
%Pr= 0.7
a1= 0.00398;    b1= 0.0114;    m1= 1.66;    n1= 1.12;
elseif Pr<= 10
%Pr= 10
a1= 0.00236;    b1= 0.00857;    m1= 1.66;    n1= 1.13;
else
%Pr= 1000;
a1= 0.00172;    b1= 0.00281;    m1= 1.66;    n1= 1.29;
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Wall temperature
else

Nua= 3.7;
if Pr<= 0.7
%Pr= 0.7
a1= 0.0791;    b1= 0.0331;    m1= 1.15;    n1= 0.82;
elseif Pr<= 10
%Pr= 5
a1= 0.0534;    b1= 0.0335;    m1= 1.15;    n1= 0.82;
else
%Pr= 1000;
a1= 0.0461;    b1= 0.0316;    m1= 1.15;    n1= 0.84;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Nusselt
Nu= Nua+
((a1*(Re*Pr*(di/l2))^m1)/(1+(b1*(Re*Pr*(di/l2))^n1)));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
else

Nu= 0.023* (Re^(4/5))* (Pr^(1/3));

end

hfi=(Nu*kf/di);           %           (W/m^2 K)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

Upf= Ka/eaf; % wall heat lost
coefficient (W/m^2 K)

Upb= ((Ka/eab)*(Pc*Ct))/(AC); % back heat lost
coefficient (W/m^2 K)

Up= Upf+Upb; % overall heat lost
coefficient (W/m^2 K)

m= ((Up)/(Kp*tp))^(0.5);

na= (tanh((m/2)*(W-de)))/((m/2)*(W-de));

Fp= (1/Up)/(W*((1/(Up*(de+((W-de)*na))))+(1/Cs)+(1/(pi*di*hfi))));

FR= ((fm*Cp)/(Up*AC))*(1-exp((-Up*AC*Fp)/(fm*Cp)));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ecuacion 1 Modelo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% qupv = (ta*Gt) - (ta*Gt*ncel) - (em*sb*(Tc^(4) -
(Ta^(4)))) - (hw*(Tc-Ta))
%
% qupvt = FR*(qupv-(Up*(Ti-Ta)))
%
% Tcc= (qupv-qupvt)/Up + Ta

for i=1:50

    ncel= 0.553 - 0.001298675*Tc;
% W/m^2      W/m^2      W/m^2      W/m^2
W/m^2
    qupv = (ta.*Gt) - (ta.*Gt.*ncel) - (em.*sbn.*(Tc.^(4) -
(Ta.^(4)))) - (hw.*(Tc-Ta));
% W/m^2      W/m^2      W/m^2
    qupvt = FR.*(qupv-(Up.*(Ti-Ta)));
% K      W/m^2      W/m^2 K      K

```

```

Tcc= (qupv-qupvt)./Up + Ta;

e = abs(Tcc-Tc);
j=i;

if e<0.00001
    Tc=Tcc;
    break
else
    Tc=Tcc;
end

end

Powers= Gt.*ta.*ncel;
°C      W/m^2  m^2  kg/s (J/Kg °C)  °C
T2=((qupvt.*AC)./(fm.*Cp))+Tf;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Circuito Equivalente Simplificado
%
% Modelo de 4 parametros
%
% I = IL - ID= IL - Io [exp((V + I*Rs)/(a))-1]
%
% IL= Corriente Fotogenerada           I=
Corriente de Carga                       %
% Io= Corriente de Saturación          V=
Voltaje de Salida                         %
% Rs= Resistencia en Serie
%
% a = Factor de Voltaje Termico
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

disp('Defina tipo de Celda')
disp('1 para 130 W')
disp('2 para 150 W')

```

```

disp('3 para 180 W')
celda=input('Tipo de celda (1,2,3)');

disp('Defina tipo de Simulación')
disp('1 para Simple')
disp('2 para Vector')
disp('3 para PVT')
simple=input('Tipo de Simulación (1,2,3)');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Constantes de Celda 130 W%
if celda == 1

Pmp=129.42; % W
Imp= 8.254; % A
Vmp= 15.68; % V
Isc= 9.12; % A
Voc= 18.23; % V
Ns= 28; % Celdas en serie
A= 1.3; % Factor de idealidad del diodo
Gref= 1000; % W/m2
Tcref= 298; % K
AM= 1.5; % Aire Masa
usc= 0.00053; % Coeficiente de temperatura sc A/K
sb= 1.3810e-23; % Constante Stefan Boltzmann J/K
q= 1.602e-19; % Carga del electron Coulombs
egev= 1.12; % Ancho de banda de energia del
Si en eV
eg=1.60218e-19*egev;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Constantes segun tipo de Panel 150 W
elseif celda==2

Pmp=146.328; % W
Imp= 9.38; % A
Vmp= 15.60; % V

```

```

Isc= 9.85; % A
Voc= 18.74; % V
Ns= 28; % Celdas en serie
A= 1.2; % Factor de idealidad del diodo
Gref= 1000; % W/m2
Tcref= 298; % K
AM= 1.5; % Aire Masa
usc= 0.00053; % Coeficiente de temperatura sc
A/K
sb= 1.3810e-23; % Constante Stefan Boltzmann J/K
q= 1.602e-19; % Carga del electron Coulombs
egev= 1.12; % Ancho de banda de energia del
Si en eV
eg=1.60218e-19*egev;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Constantes segun tipo de Panel 180 W Prueba
else
Pmp=180; % W
Imp= 5.03; % A
Vmp= 35.8; % V
Isc= 5.48; % A
Voc= 43.6; % V
Ns= 72; % Celdas en serie
A= 1.2; % Factor de idealidad del diodo
Gref= 1000; % W/m2
Tcref= 298.15; % K
AM= 1.5; % Aire Masa
usc= 0.00038; % Coeficiente de temperatura sc
A/K
sb= 1.3810e-23; % Constante Stefan Boltzmann J/K
q= 1.602e-19; % Carga del electron Coulombs
egev= 1.12; % Ancho de banda de energia del
Si en eV
eg=1.60218e-19*egev;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Mediciones en tiempo Real %
%TC= input('Ingrese Temperatura de Celda estable
propuesta (°C)');
%g= input('Ingrese Irradiancia propuesta constante
(W/m^2)');
```

```
% Activar modelo simple
%V=0:((Voc-0.8)/99):Voc-0.8; % Voltaje de Calculo
% Activar modelo pvt
V=0:((Voc-0.8)/47):Voc-0.8; % Voltaje de Calculo
%V=10:((Voc-10.8)/47):(Voc-0.8); % Voltaje de Calculo
```

```
%V=0:((Voc)/99):Voc; % Voltaje Total
%RL=1.663113;
%V=12;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%V=VCR1'; % Voltaje Real
```

```
Opcion 4
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
Ac=0.78416; %m2
%Ac= 1.25;%m2 Prueba
if simple== 1
    G=1000;
%G = 1000*ones(1,length(V)); % STC
elseif simple==2
g=[200; 400; 600; 800; 1000]; % Radiación Variable
G = g.*ones(1,length(V)); % Activar modelo simple
else
G=Gt; % Activar para modelo pvt
end
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%G=GCR1'; % Radiacion Real
Opcion 4
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if simple== 1
tc = 25; % STC
Tc= (tc+273.15); % Activar modelo simple
elseif simple==2
%tc=25;
TC=[25; 35; 50; 60; 75]; % Temperatura Variable
tc = TC.*ones(1,length(V));
Tc= (tc+273.15); % Activar modelo simple
else
%tc=25; % Activar modelo simple
%Tc= (tc+273.15); % Activar modelo simple
end

Vocref=Voc;
Iscref=Isc;
ILref=Isc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Primer Parametro %

IL= (G./Gref).*(ILref + usc.*(Tc-Tcref));

% Segundo Parametro %

aref= ((2.* Vmp)- Voc)./(((Isc)/(Isc-Imp))+log(1-
((Imp)/(Isc))));

Io= (ILref).*(exp(-Vocref./aref)).*( (Tcref./Tc).^3).*
(exp((Ns.*eg./q.*aref).*( (1./Tcref)-
(1./Tc))));% (exp((Ns.*eg./q.*aref).*( (1)-
(Tcref./Tc)))); % (exp((Ns.*eg./q.*aref).*( (1./Tcref)-

```

```

(1./Tc))))); %(exp((Ns.*eg./q.*aref).*((1)-
(Tcref./Tc))))); % (1-((Tcref)./(Tc)))%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Io= (ILref).*(exp(-Vocref./aref)).*
((Tcref./Tc).^3).*(exp((Ns.*eg./q.*aref).*((1)-
(Tcref./Tc))))); %(exp((Ns.*eg./q.*aref).*((1./Tcref)-
(1./Tc))))); %(exp((Ns.*eg./q.*aref).*((1)-
(Tcref./Tc))))); % (1-((Tcref)./(Tc)))%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Io= (ILref).*(exp(-Vocref./aref)).*
((Tc./Tcref).^3).*(exp((Ns.*eg./q.*aref).*((1./Tc)-
(1./Tcref))))); %(exp((Ns.*eg./q.*aref).*((1)-
(Tcref./Tc))))); %(exp((Ns.*eg./q.*aref).*((1./Tcref)-
(1./Tc))))); %(exp((Ns.*eg./q.*aref).*((1)-
(Tcref./Tc))))); % (1-((Tcref)./(Tc)))%

% Tercer Parametro %

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%a= ((Tc)./(Tcref)).*aref;%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a= ((Tcref)./(Tc)).*aref;

% Cuarto Parametro %

%Rs= (((aref.*log(1-((Imp)./(Isc))))+(Voc)-
(Vmp))./(Imp));
Rs= (((2.* Vmp)- Voc)./(((Isc)/(Isc-Imp))+log(1-
((Imp)/(Isc))))).*((log(1-((Imp)./(Isc))))+(Voc)-
(Vmp))./(Imp));

% Calculo de Rp (Dependencia de Tc)

%Rp= abs((((Vmp)+(Imp.*Rs))./((Isc)-
(Isc.*(exp(((Vmp)+(Rs.*Imp)-
(Voc))./(a)))))+(Isc.*(exp((-Voc)./(a)))))-
((Pmp)./(Vmp)))));
%Rp=300;

% Corriente generada

```

```

%I = IL - Io.*(exp((V + I*Rs)/(a))-1);

I= 5;
Ip=[];
for i=1:10

    %Ic =(IL - (Io.*(exp((V + I.*Rs)./(a))-1)))/(-
Io.*(exp((V +
    %I.*Rs)./(a))).*(Rs./a)); rev

    %Ic = IL - ((1.4*Io.*(exp((V + I.*0.7*Rs)./(a))-
1)));

    Ic = IL - ((Io.*(exp((V + I.*Rs)./(a))-1)));

    %Ic = IL - ((Io.*(exp(((I.*RL) + (I.*Rs))./(a))-
1)));

    epv = abs(Ic-I);
    Ip=[epv Ip];
    I = Ic;
end

I1= I;
%V=I1.*RL;
P= I1.*V;

Ncel=(P) ./ (G.*Ac);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Graficos ideales

figure
plot(ti, Gt)
title('Radiación Solar Ideal estimada (W/m^2)'),
xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Radiación
(W/m^2)');
axis([5 19 0 1000])
grid
figure

```

```

plot(ti, Ta)
title('Temperatura Ambiente Ideal estimada (K)'),
xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Temperatura (K)');
axis([5 19 285 310])
grid
figure
plot(ti, Tcel)
title('Temperatura Celda estimada (K)'), xlabel('
Tiempo (Horas)'), ylabel(' Temperatura (K)');
axis([5 19 285 330])
grid
figure
plot(ti, Vv)
title('Velocidad de Viento estimada (m/s)'), xlabel('
Tiempo (Horas)'), ylabel(' Velocidad (m/s)');
axis([5 19 0 4])
grid
figure
plot(ti, NCEL)
title('Eficiencia estimada de celda (%)'), xlabel('
Tiempo (Horas)'), ylabel(' Eficiencia (%)');
axis([5 19 0 0.3])
grid
figure
plot(ti, Power)
title('Potencia estimada de celda (W)'), xlabel('
Tiempo (Horas)'), ylabel(' Potencia (W)');
axis([5 19 0 190])
grid

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Graficos simulación

figure
plot(ti, qupv)
title('Calor residual estimado de celda (W/m^2)'),
xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Calor (W/m^2)');

```

```
axis([5 19 0 700])  
grid
```

```
figure  
plot(ti, qupvt, 'g')  
title('Calor residual estimado de PV-T (W/m^2)'),  
xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Calor (W/m^2)');  
axis([5 19 0 700])  
grid
```

```
figure  
plot(ti, Tc, 'g')  
title('Temperatura Celda estimada-PVT (K)'), xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Temperatura (K)');  
axis([5 19 285 330])  
grid
```

```
figure  
plot(ti, ncel, 'g')  
title('Eficiencia estimada de celda-PVT (%)'), xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Eficiencia (%)');  
axis([5 19 0 0.3])  
grid
```

```
figure  
plot(ti, Ncel, 'r')  
title('Eficiencia estimada de celda estatica (%)'),  
xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Eficiencia (%)');  
axis([5 19 0 0.3])  
grid
```

```
figure  
plot(ti, Powers, 'g')  
title('Potencia estimada de celda (W)'), xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Potencia (W)');  
axis([5 19 0 190])  
grid
```

```
figure  
plot(ti, qupv), hold on, plot(ti, qupvt, 'g')
```

```

title('Comparación de calor residual estimado de celda
y PV-T (W/m^2)'), xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel('
Calor (W/m^2)');
axis([5 19 0 700])
grid
legend('qupv','qupvt')

```

```

figure
plot(ti, Tc,'g'), hold on, plot(ti, Tcel,'b')
title('Comparación de Temperatura Celda estimada (K)'),
xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Temperatura (K)');
axis([5 19 285 330])
grid
legend('Tc-PVT','Tcel')

```

```

figure
plot(ti, ncel,'g'), hold on, plot(ti, NCEL,'r')
title('Comparación de eficiencia estimada de celda
(%)'), xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Eficiencia
(% )');
axis([5 19 0 0.3])
grid
legend('ncel-PVT','NCEL')

```

```

figure
plot(ti, ncel,'g'), hold on, plot(ti, NCEL,'r'), hold
on, plot(ti, Ncel)
title('Comparación de eficiencia estimada de celda
(%)'), xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Eficiencia
(% )');
axis([5 19 0 0.3])
grid
legend('ncel-PVT','NCEL', 'Ncel-Estatica')

```

```

figure
plot(ti, Power), hold on, plot(ti, Powers,'g')
title('Comparación de Potencia estimada de celda (W)'),
xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Potencia (W)');
axis([5 19 0 190])
grid
legend('Power','Power-PVT')

```

```

figure
plot(ti, T2, 'g')
title('Temperatura Salida Fluido estimada (C)'),
xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Temperatura (C)');
axis([5 19 2 30])
grid
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Graficos PV

    if simple==1

figure
plot(V,I1) % 130W
title('Curva V-I de celda'), xlabel(' Voltaje (V)'),
ylabel(' Corriente (A)');
axis([0 21 0 10])
grid
figure
plot(V,P) % 130W
title('Curva V-P de celda'), xlabel(' Voltaje (V)'),
ylabel(' Potencia (W)');
axis([0 21 0 10])
grid
figure
plot(V,Ncel)

    elseif simple==2

figure
plot(V,I1(1,:), 'm') % 130W
hold on
plot(V,I1(2,:), 'g') % 130W
plot(V,I1(3,:), 'b') % 130W
plot(V,I1(4,:), 'c') % 130W
plot(V,I1(5,:), 'r') % 130W
title('Curva V-I de celda'), xlabel(' Voltaje (V)'),
ylabel(' Corriente (A)');
axis([0 21 0 10])
grid

```

```

figure
plot(V,P(1,:), 'm') % 130W
hold on
plot(V,P(2,:), 'g') % 130W
plot(V,P(3,:), 'b') % 130W
plot(V,P(4,:), 'c') % 130W
plot(V,P(5,:), 'r') % 130W
title('Curva V-P de celda'), xlabel(' Voltaje (V)'),
ylabel(' Potencia (W)');
axis([0 21 0 190])
grid

```

```

figure
plot(V,Ncel(1,:), 'm') % 130W
hold on
plot(V,Ncel(2,:), 'g') % 130W
plot(V,Ncel(3,:), 'b') % 130W
plot(V,Ncel(4,:), 'c') % 130W
plot(V,Ncel(5,:), 'r') % 130W
title('Curva V-n de celda'), xlabel(' Voltaje (V)'),
ylabel(' Eficiencia (%)');
axis([0 21 0 0.3])
grid

```

else

```

figure
plot(V,I1) % 130W
title('Curva V-I de celda'), xlabel(' Voltaje (V)'),
ylabel(' Corriente (A)');
axis([0 21 0 10])
grid
figure
plot(V,P) % 130W
title('Curva V-P de celda'), xlabel(' Voltaje (V)'),
ylabel(' Potencia (W)');
axis([0 21 0 190])
grid

```

```

figure
plot(V,Ncel)
title('Curva V-n de celda'), xlabel(' Voltaje (V)'),
ylabel(' Eficiencia (%)');
axis([0 21 0 0.3])
grid

% figure
% plot(ti, ncel), hold on, plot(ti, NCEL), hold on,
plot(ti, Ncel)
% axis([0 19 0 0.3])
figure
plot(ti, Power), hold on, plot(ti, Powers,'g'), hold
on, plot(ti, P)
title('Comparación de Potencia estimada de celda (W)'),
xlabel(' Tiempo (Horas)'), ylabel(' Potencia (W)');
axis([5 19 0 190])
grid
legend('Power','Powers', 'P')

end

```