



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**MODELADO TERMOELÉCTRICO Y CONTROL
DIFUSO INVERSO DE UN PANEL SOLAR**

TESIS

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA**

Presenta:

José Ernesto Vázquez Gutiérrez

Director de Tesis:

Dr. Roberto Tapia Sánchez



Morelia, Michoacán, Agosto 2019





MODELADO TERMOELÉCTRICO Y CONTROL DIFUSO INVERSO DE UN PANEL SOLAR

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de *José Ernesto Vázquez Gutiérrez*.

Dr. J. Aurelio Medina Rios
Presidente del Jurado

Dr. Roberto Tapia Sánchez
Director de Tesis

Dr. Juan Anzures Marín
Vocal

Dr. Antonio Ramos Paz
Vocal

M.C. Miguel Villagómez Galindo
Revisor Externo (UMSNH)

Dr. Roberto Tapia Sánchez
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas)*

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Agosto 2019

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia, que me ha apoyado en todo momento y que gracias a ellos he logrado cumplir mis metas y concluir esta tesis.

En especial dedico este trabajo a mi madre María Esther la cual fue mi primera maestra de vida y de la cual aprendí tantas cosas y con la cual estoy muy agradecido por darme todo lo que me dio y por inculcarme tantas buenas cosas, también se el gran esfuerzo y dedicación que puso en mí y que sé que todo lo que he logrado ha sido gracias a todos esos consejos que me dio.

A mis hermanos que han estado para apoyarme en momentos difíciles que he pasado, y me han dado fuerza para seguir adelante, a los cuales admiro y quiero mucho.

Agradecimientos

Es difícil de agradecer a tantas personas que han estado detrás de todos mis logros y las cuales han sido parte fundamental de todo lo conseguido en esta vida, y de las cuales estoy completamente agradecido.

A mis padres José y María Esther por haberme dado la vida, en especial a mi madre por todo su amor, cariño y comprensión durante los años que estuvo conmigo, gracias a eso he logrado estar donde estoy ahorita y ser lo que soy.

A cada uno de mis hermanos de los cuales he aprendido tantas cosas y que me han dado su apoyo incondicional para seguir adelante, de los cuales estoy muy orgulloso y quiero tanto.

A mis tíos Carlos Camacho y Rosalinda Gutiérrez los cuales me han dado su apoyo incondicional y me han motivado a seguir adelante en todo momento, a los cuales admiro y quiero mucho.

A mi prima Karla Karina la cual quiero demasiado y me ha dado una gran fuerza para seguir adelante y que me ha motivado mucho y que gracias a eso he logrado muchas cosas.

A mis compañeros de maestría Didier, Carlos y Víctor con los cuales conviví durante mis estudios de maestría y con los cuales pasamos buenas cosas.

A cada uno de mis amigos que han estado ahí para apoyarme y darme consejos, en verdad que estoy muy agradecido con ellos.

A mi asesor Roberto Tapia por su tiempo dedicado a esta tesis y sus grandes conocimientos, sin él no habría sido posible la realización de esta tesis.

A la División de Estudios del Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por haberme permitido realizar mis estudios de maestrías.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme brindado el apoyo para económico para realizar mis estudios de maestría.

Resumen

En esta tesis se desarrolla el modelado termoeléctrico de un panel solar, en el cual se detallan la parte térmica y eléctrica de la celda. Las condiciones físicas de la celda solar que componen al panel son utilizadas para formular su modelo, y después en conjunto formular el panel solar completo. El modelo de la celda es planteado por sus ecuaciones diferenciales, y simulado por medio de su representación en diagramas a bloques. Una vez planteado el modelo, se realizan pruebas de simulación en Matlab®, considerando una irradiación y temperatura constante, y posteriormente se realizan considerando una irradiación y temperatura variable. Los resultados de la simulación de la celda y panel solar son presentados y comparados con las gráficas proporcionadas por un fabricante de paneles solares. Adicionalmente se expone el efecto de sombra sobre la celda solar por medio de una simulación.

Una vez realizada la simulación y verificado el funcionamiento del modelo propuesto, se aplica el concepto de inversión de sistemas, para desarrollar un control IP difuso inverso aplicado al convertidor de corriente directa a corriente directa, para controlar el voltaje de salida, y así tener el modelo completo del panel solar y el convertidor. Para el controlador PI el error se multiplica y después se integra, y para la ley de control propuesta (IP) el error se integra, pero no se multiplica por la ganancia proporcional, permitiendo reducir el sobreimpulso en el comportamiento transitorio del sistema en comparación con el PI. Para desarrollar e implementar la ley de control propuesta, se utilizan las librerías de Matlab®. Los resultados de la simulación y control verifican el correcto funcionamiento del modelo completo del sistema.

Palabras Clave: Celda solar, Control IP, Modelo termoeléctrico, Simulación, Panel solar.

Abstract

In this thesis the thermoelectric modeling of a solar panel is developed, in which its thermal and electric physical structure is detailed. The physical conditions of the solar cells that make up the panel are used to formulate its model, and then together to formulate the entire panel. The differential equations of a solar cell are presented, and simulated through its representation in block diagrams. Once the model has been proposed, several simulation tests are carried out in Matlab®, in order to show their behavior. The system is simulated considering a constant irradiation and temperature, first, and after, an irradiation and variable temperature are considered. The results of the simulation of the cell and solar panel are presented and compared with the graphs provided by a solar panel manufacturer. Additionally, the shadow effect on a solar cell is exposed by means of a simulation.

Once the simulation and verification of the proposed model has been carried out, the concept of systems inversion is applied, in order to develop an inverse diffuse IP control. This control is applied to the direct current to direct current converter, in order to control the output voltage, and thus have the complete structure of the solar panel. For the proposed control law, the fact of applying the integral action first (I) and then the proportional one (P), allows to reduce the overshoot in the transitory behavior of the system, in comparison with a PI control (proportional action first and then the integral). To develop and implement the proposed control law, Matlab®, toolboxes are used. The simulation and control results verify the correct functioning of the complete structure of the solar panel system.

Keywords : Solar cell, Solar panel, IP Control, thermoelectric model, Simulation.

Contenido

Dedicatoria	III
Resumen	VII
Abstract	IX
Contenido	XI
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XV
Lista de Símbolos	XVII
Lista de Acrónimos	XIX
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	2
1.2. Antecedentes	3
1.3. Objetivos de la Tesis	8
1.3.1. Objetivo general	8
1.3.2. Objetivos particulares	8
1.4. Metodología	8
1.5. Justificación	9
1.6. Descripción de Capítulos	10
2. Modelado del panel solar	11
2.1. Introducción	11
2.2. Modelo del circuito equivalente	11
2.3. Modelo termoeléctrico	13
2.3.1. Modelo de irradiancia	13
2.3.2. Componente térmico	21
2.3.3. Componente eléctrico	32
2.3.4. Acoplamiento de componentes	33
2.4. Ecuaciones de la dinámica térmica	36
2.5. Modelo del panel solar	37
2.5.1. Conexión en serie	39
2.5.2. Conexión en serie-paralelo	40
2.6. Control difuso inverso	41
2.6.1. Lógica difusa	41
2.6.2. Redes neuronales	42

2.6.3. Modelo de referencia	45
2.7. Conclusiones del capítulo	46
3. Simulación del panel solar	47
3.1. Introducción	47
3.2. Simulación del panel solar con irradiación y temperatura constante	47
3.2.1. Simulación de la celda solar	47
3.2.2. Simulación del efecto de puntos calientes	52
3.2.3. Simulación del panel solar	55
3.3. Simulación del panel solar con irradiación y temperatura variable	57
3.3.1. Variación de la irradiación	57
3.3.2. Variación de la temperatura	60
3.4. Conclusiones	61
4. Control del panel solar	63
4.1. Control	63
4.2. Estructura del control	63
4.3. Convertidor de Potencia	65
4.4. Desarrollo del control IP difuso inverso	65
4.5. Simulación del controlador	70
4.6. Control del panel solar	73
4.7. Conclusiones	74
5. Conclusiones y trabajo futuro	77
5.1. Conclusiones Generales	77
5.2. Trabajos Futuros	78
A. Conjuntos Difusos	79
A.1. Funciones de Membresía	80
A.2. Operaciones Difusas	80
A.3. Fusificación	81
A.4. Reglas Difusas	81
A.5. Inferencia Difusa	83
A.6. La Defusificación	83
B. Control con redes neuronales	87
B.1. Modelo de la neurona artificial	88
B.2. Tipos de redes neuronales	89
B.3. Control neuronal con modelo de referencia	91
Referencias	93

Lista de Figuras

1.1. Promedio de energía solar en el mundo [CIEP, 2018]	6
1.2. Radiación solar en México [SOLARGIS]	7
1.3. Primer PSF instalado en México Aurora Solar I [SIC, 2016]	7
2.1. Modelo ideal de una celda solar	12
2.2. Esquema de una celda solar	13
2.3. Irradiación solar en un día	20
2.4. Modelo elemental	24
2.5. Intensidad de radiación en una desviación.	26
2.6. Radiación entre dos cuerpos	27
2.7. División de la celda.	28
2.8. Elementos contiguos.	29
2.9. Diagrama a bloques de dos elementos contiguos.	30
2.10. Elemento 1 de la celda solar.	30
2.11. Estructura térmica de la celda.	31
2.12. Estructura térmica e irradiación en la celda.	33
2.13. Flujo del elemento 1.	34
2.14. Panel con 60 celdas conectadas en serie.	39
2.15. Panel con 60 celdas conectadas en serie-paralelo.	40
2.16. Problema fundamental de inversión.	43
3.1. Esquema de simulación de la celda solar.	48
3.2. Resultados con diferentes temperaturas, a) Corriente y b) Potencia.	49
3.3. Resultados con diferentes irradiaciones, a) Corriente y b) Potencia.	50
3.4. Resultados con una parte no irradiada, a) Corriente y b) Potencia.	52
3.5. Conexión en paralelo de dos celdas solares.	53
3.6. Resultados de celdas conectadas en paralelo efecto sombra, a) voltaje del arreglo, b) corriente de salida celda, c) potencia total generada.	53
3.7. Simulación de irradiación en, a) celda 1, b) celda 2.	54
3.8. Resultados con variación constante de, a) Irradiación y b) Temperatura.	55
3.9. Gráficas del panel solar de a) I-V, b) P-V.	56
3.10. Modelo para la variación de la irradiación	58
3.11. Comportamiento de la irradiación variante	59

3.12. Resultados de la simulación de una celda solar, a) Voltaje y b) Corriente . . .	59
3.13. Variación de la temperatura ambiente durante el día.	60
3.14. Variables de voltaje, corriente y potencia de la celda simulada con temperatura real durante el día, a) Voltaje, b) Corriente y c) Potencia.	61
4.1. Diagramas a bloques del sistema de control.	64
4.2. Convertidor utilizado.	65
4.3. Diagrama a bloques del convertidor utilizado.	66
4.4. Diagrama a bloques del convertidor en espacio de estados.	67
4.5. Controlador en lazo abierto.	68
4.6. Estructura del control IP difuso.	69
4.7. Simulación del control inverso y la planta.	71
4.8. Resultados obtenidos de la simulación de la planta con el controlador inverso, a) Corriente de entrada y b) Voltaje de salida.	72
4.9. Diagrama a bloques del sistema con el control difuso.	72
4.10. Resultados obtenidos de la simulación con el control IP difuso a) Corriente de entrada y b) Voltaje de salida.	73
4.11. Resultados de la simulación del panel solar a) Corriente del panel, b) Voltaje de salida y c) Potencia el panel.	74
B.1. Modelo de una neurona.	89
B.2. Perceptrón multicapa.	90
B.3. Control con modelo de referencia.	91

Lista de Tablas

2.1. Valores de los parámetros constantes [Thoma y Mocellin, 2006]	18
2.2. Valores utilizados para el modelo de irradiación solar [Duffie y Beckman, 1991]	20
3.1. Valores numéricos para la simulación de la celda solar [Weiner, 1992] . . .	49
3.2. Tabla de parámetros modificados.	56

Lista de Símbolos

V	Voltaje.
I	Corriente
I_{ph}	Corriente fotoeléctrica de la celda
I_{sat}	Corriente de saturación inversa del diodo de la celda
a	Factor de idealidad del diodo
q	Carga del electrón
k	Constante de Boltzman
λ	Longitud de onda de la luz
F	Espectro de irradiancia
E	Densidad de Potencia
K	Kelvin
I_{sc}	Energía del sol por unidad de tiempo
I_s	Radiación solar disponible
I_D	Adición de la radiación solar
I_d	Radiación del cielo difuso
I_r	Radiación reflejada
θ	Ángulo de incidencia entre los rayos solares y una línea normal a la superficie
I_{DN}	Intensidad solar tomada en un día claro
A	Radiación solar aparente en el mar
B	Coefficiente de extinción atmosférica
β	Altitud solar
L	Parámetro de latitud local
δ	Orientación de la superficie
H	Ángulo de la hora
ϕ	Ángulo de inclinación de la superficie relacionada con la horizontal
γ	Ángulo azimutal de la superficie
I_{ds}	Radiación solar difusa de un cielo despejado
I_{dg}	Radiación difusa reflejada en el suelo
C	Factor de radiación difusa en un mes
F_{ss}	Factor de ángulo adimensional
ρ_g	Reflectancia del primer plano
F_{sg}	Factor de ángulo para la superficie al suelo

E	Flujo de energía térmica
S	Flujo entrópico
\vec{J}_a	Vector de flujo de calor por unidad de superficie
$gradT$	Vector gradiente de temperatura
λ	Conductividad térmica específica del material dado
c	Capacidad calorífica del material
ρ	Densidad
α	Coefficiente de convección
σ	Constante de Boltzman
i_{ph}	Corriente generada por la irradiancia
i_{cc}	Corriente-Shunt
v_{co}	Voltaje de circuito abierto
v_{cell}	Voltaje de la celda
T_T	Suma de todas las temperaturas
i_g	Corriente que se genera a partir de la temperatura
r	Coefficiente de temperatura
R_{sh}	Valor de la resistencia en serie
I_{cc}	Corriente de corto circuito
P_e	Potencia eléctrica
T_a	Temperatura ambiente
T_c	Temperatura de la celda de silicio
S	Entropía
T	Temperatura
T_s	Temperatura de la superficie del sólido
tilt	Ángulo de inclinación
Ep	Densidad de Potencia

Lista de Acrónimos

<i>Acrónimo</i>	<i>Significado</i>
CA	Corriente alterna
IRENA	Agencia Internacional de Energía Renovable
PSF	Parque Solar Fotovoltaico
MWp	Mega watts pico
MWh	Mega watts hora
MFV	Módulo fotovoltaico
IP	Integral Proporcional
PI	Proporcional Integral
LST	Hora Estándar Local
ET	Ecuación de Tiempo
LSM	Hora Estándar Local del Meridiano
LON	Longitud Local
FF	Feed Forward
FB	Feed Back
SF	Sistema Fotovoltaico

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, el sector energético de todos los países está en la búsqueda e implementación de sistemas de generación de energía eléctrica conocidas como limpias, es decir utilizando recursos renovables, esto con el fin de reducir la contaminación provocada al utilizar combustibles fósiles. Todo esto es debido al cambio climático que se está presentando en el planeta por los grandes niveles de contaminación que se incrementan cada vez más. Por lo anterior, muchos países están invirtiendo en la investigación y desarrollo de formas de generación de energía renovable, como lo son el uso de la energía eólica y solar, principalmente.

De las fuentes de energía renovables que existen, la energía solar puede ser considerada como la más importante, debido a su abundancia y gran disponibilidad [Sukhatme, 2008]. Una de las formas de aprovecharla es mediante la conversión de la radiación solar en energía eléctrica por medio del efecto fotoeléctrico, con ayuda de semiconductores, conocidos como dispositivos fotovoltaicos [Duffie y Beckman, 1991].

Una celda solar es un dispositivo que representa la unidad fundamental de un sistema fotovoltaico. Típicamente, genera un voltaje de entre 0.5 y 0.8 V dependiendo del semiconductor utilizado y la tecnología con la que fue fabricado [Salmi et al. 2012]. La generación de energía de una celda solar se ve afectada principalmente por la variación en la radiación solar incidente y en la temperatura de la celda [Tsai, Tu y Su, 2008]. Un panel solar es el conjunto de un determinado número de celdas solares (entre 36 y 72)

conectadas en serie-paralelo y montadas sobre una placa metálica encapsuladas por un aislante térmico. Así mismo, un arreglo fotovoltaico es el conjunto de cierto número de paneles solares conectados en serie-paralelo para la generación de una cantidad determinada de energía [Sukhatme, 2008].

Por otra parte, la integración de las energías renovables, como la energía eólica y solar en pequeña y grande escala, ha llevado a una variación en la producción de energía eléctrica [Osorio, 2019], por lo que las microrredes y las tecnologías de generación distribuida se proponen como unas de las soluciones más prometedoras a los actuales problemas de los sistemas eléctricos, y como una forma de avance de países en vías de desarrollo. En el contexto de la energía fotovoltaica, esto ha tenido un gran impacto, debido a que pueden ser visualizadas (en la mayoría de las ciudades grandes) una cantidad considerable de paneles solares en hogares y comercios.

Debido a lo anterior, el mercado fotovoltaico mundial ha tenido un fuerte crecimiento durante los últimos años, apoyado con las políticas de promoción implementadas por diversos países, que han impulsado la instalación de sistemas fotovoltaicos conectados a la red de distribución eléctrica. Esta integración permitirá la disminución en el consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica [Duran, 2016].

1.1. Planteamiento del Problema

Actualmente una de las fuentes de energía renovable o limpia que más se utiliza es la energía solar, con la cual se aprovecha la irradiación solar convirtiéndola en energía eléctrica, y su estudio ha sido ampliamente analizado durante varias décadas. Sin embargo, se puede plantear la siguiente pregunta, ¿es posible contar con un modelo que permita la incorporación de las características físicas con las cuales está construido y diseñado el panel solar, con el fin de poder realizar análisis más precisos en cuanto a la fabricación de estos, con lo cual es posible aumentar su eficiencia?. Esto no puede ser posible con modelos muy simplificados, ya que no permiten detectar problemas que existan entre cada una de sus celdas, es decir si alguna ha dejado de funcionar o simplemente no está generando la energía prevista como las demás celdas.

Por lo tanto, con el modelo propuesto en ésta tesis se detalla el modelado termo-eléctrico del panel, para poder detectar los posibles problemas que presenten cada una de las celdas que lo componen, y así monitorear que trabajen en óptimas condiciones. Además, el contar con un modelo con estas características permitiría realizar un análisis de la degradación del panel solar desde el punto de vista de las celdas individuales que lo componen [Djeziri et Al. 2018].

1.2. Antecedentes

Los primeros antecedentes históricos de la energía solar datan varios siglos antes de Cristo, cuando el ser humano comenzó a encender fuegos concentrando la luz solar. A partir de ahí, las primeras civilizaciones ya aprovechaban la luz y calor procedentes del sol de forma pasiva.

En 1821 el físico experimental francés Edmund Becquerel, descubrió el efecto fotovoltaico mientras efectuaba experimentos con una pila electrolítica de dos electrodos sumergidos en una sustancia electrolítica. Esta pila aumentó su generación de electricidad al ser expuesta a la luz [Elvis, 2005]. Este hecho fue uno de los más importantes en la historia de la energía solar. A partir de este descubrimiento, todo empezó a evolucionar y a perfeccionarse. Posteriormente, por el año de 1873, Willoughby Smith descubrió el efecto fotovoltaico en el selenio [Energía Solar, 2016].

En 1877, el profesor William Grylls Adams observó cómo se generaba una corriente eléctrica cuando el selenio estaba expuesto a la luz. Para ello, utilizó dos electrodos conectados a una placa de selenio y midió el paso de electricidad cuando la exponía a la luz solar [Energía Solar Fotovoltaica]. La primera celda solar la diseñó y construyó en 1883 Charles Fritts con una eficiencia del 1 %, la cual utilizaba como semiconductor el selenio con una capa delgada de oro [Historia de la energía solar, 2012].

En 1904 Albert Einstein publica su artículo acerca del efecto fotovoltaico (For his

services to theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of photoelectric effect), por este documento es galardonado en 1921 con el Premio Nobel [Elvis, 2005]. Fue en 1946 cuando se creó la primera patente de una celda fotovoltaica de silicio, el inventor estadounidense Russel Ohl la construyó y patentó, aunque el impulso real de esta tecnología vendría años más tarde. Por lo tanto, se puede decir que Ohl fue quien creó e inventó los paneles solares [Energía Solar, 2016].

Las celdas de silicio más modernas y similares a las actuales se desarrollaron en 1954 en los laboratorios Bell. Estos avances tecnológicos permitieron que aparecieran en el mercado las primeras celdas solares comerciales con el 6% de eficiencia en 1957. Las cuales comenzaron a utilizarse en satélites espaciales tanto en la Unión Soviética como en EE. UU [Fernández, 2010].

Al día de hoy, la energía procedente del sol es una de las grandes fuentes de energía renovable y limpia que podemos utilizar. La construcción de grandes plantas solares está a la orden del día. Las primeras plantas fotovoltaicas han ido evolucionando y cada vez tienen una mayor generación de energía. De hecho, muchas de ellas ya abastecen pueblos o ciudades [Historia de la energía solar, 2012]. Con la mejora de la eficiencia energética de los paneles solares y la disminución del costo hacen que sean más utilizados tanto en zonas rurales como urbanas y para actividades comerciales, así como también en viviendas particulares.

La energía solar será una de las principales fuentes renovables de este siglo debido a que no contamina y ha mejorado su rendimiento, por lo que es comercialmente posible utilizarla para generar energía eléctrica en cantidades industriales. Además, cada vez se encuentra más regulada y aprovechada para evitar la contaminación y también contribuir al ahorro energético.

Una celda solar está compuesta por un material semiconductor que absorbe la energía luminosa y la convierte en corriente eléctrica. En la celda solar, no se aplica ningún

potencial, sino que fluye una corriente a través de una carga resistiva. Entonces, el sistema desarrolla una energía eléctrica. El principio de funcionamiento que utiliza es la propiedad de la radiación y la de los semiconductores [Tapia et al. 2015]. Los paneles solares están contruidos de entre 3 y 7 decenas de celdas solares cuya fabricación es a base de silicio material semiconductor que permite la generación de energía eléctrica.

En los inicios de la producción de electricidad mediante energía solar, Estados Unidos lideró la producción mundial, pero en las dos últimas décadas del siglo XX su uso se hizo masivo y ha aumentado en forma creciente en otros países del mundo. Se han encontrado múltiples aplicaciones, como las telecomunicaciones y las naves espaciales que se alimentan con paneles solares, y se investiga aceleradamente su uso en medios de transporte terrestre y aéreo [Uso de la energía]. Se prevé que el crecimiento de la energía solar en los países será rápido y desplazará a los combustibles fósiles. Los costos de la generación de energía solar fotovoltaica vienen disminuyendo de forma acelerada. En varios países, el costo de esta energía ya es inferior a la producida con el uso del carbón y el gas. La energía solar ocupa el primer lugar entre las energías renovables y los países en desarrollo ya representan más de la mitad de la generación de energía solar a nivel mundial [Banco Mundial, 2017].

La energía solar se convertirá en los próximos diez años en la fuente de electricidad más barata en muchas partes del mundo. El mercado mundial de energía fotovoltaica debería aumentar alrededor del 20 % en los próximos años [Energías renovables].

En la Figura 1.1 se observa que la zona que recibe mayor cantidad de energía solar es la que corresponde a bajas latitudes. Las zonas con temperaturas bajas, en especial las más cercanas a los polos, son la de menor radiación. También se puede observar que México tiene un buen promedio de energía solar al año, por lo que el aprovechamiento de esta energía es una de las más recomendables para el país, ya que su captación es posible durante prácticamente todo el año, teniendo que enero es el mes con menor captación de radiación solar y en mayo se tiene la mayor cantidad de radiación en el país, debido al buen clima que impera en gran parte de su geografía y a la alta intensidad de la radiación solar

que se puede obtener [Tinoco, 2019].

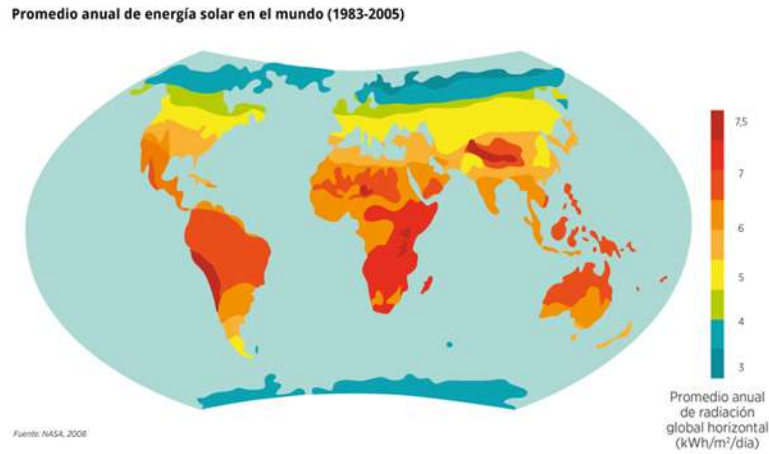


Figura 1.1: Promedio de energía solar en el mundo [CIEP, 2018]

La manera de medir el potencial de energía solar que un territorio tiene, es a través de la radiación solar. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables, por sus siglas en inglés (IRENA) (2015), México se encuentra entre 15° y 35° de latitud, región considerada la más favorecida en recursos solares, donde se recibe diariamente, en promedio, $5.5 \text{ KWh}/\text{m}^2$ (la unidad de medición de radiación solar). En la Figura 1.2 se observa que el noroeste del país es la zona con mayor potencial, donde la radiación excede los $8 \text{ KWh}/\text{m}^2$ en primavera y verano [CIEP, 2018].

Debido al potencial que tiene el país para la generación de la energía eléctrica a través de la irradiación solar, en México se instaló el primer parque solar fotovoltaico (PSF), con una inversión de 100 millones de dólares. Se trata de un PSF instalado en La Paz, Baja California Sur. El complejo se denominó Aurora Solar I el cual se muestra en la Figura 1.3, este abarca una superficie de 100 hectáreas y se instalaron 130,000 MFV dando una capacidad de 39 MWp [SIC, 2016].

Actualmente se tiene en México el PSF Tai Durango I con una capacidad de 16.8

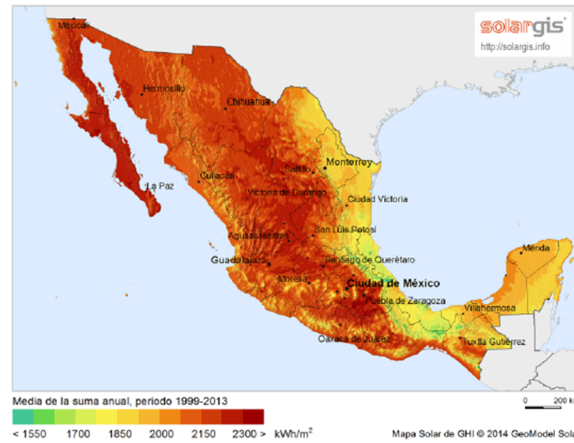


Figura 1.2: Radiación solar en México [SOLARGIS]

MWp, Jalisco I de 8 MW, Villanueva III de 275 MWp, Villanueva Solar de 265 MWp, Don José 275 MWp [ALSOMEX].



Figura 1.3: Primer PSF instalado en México Aurora Solar I [SIC, 2016]

Todo lo mencionado anteriormente, representa la importancia que tiene el desarrollo de la energía fotovoltaica, donde los modelos para su análisis y diseño son una parte fundamental en su estudio. De la misma manera, el modelo propuesto en la presente tesis, puede ser analizado desde el punto de vista de un PSF.

1.3. Objetivos de la Tesis

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo de un panel solar que considere el comportamiento termoeléctrico que tiene, así como aplicar el concepto de inversión de sistemas para realizar un control IP difuso inverso sobre el modelo de su actuador.

1.3.2. Objetivos particulares

- Obtención del modelo termoelectrico en ecuaciones diferenciales.
- Modelado de la irradiación y temperatura variable en el sistema.
- Desarrollo del control IP difuso inverso.

1.4. Metodología

La metodología que se sigue para la elaboración de la tesis es la siguiente:

Primeramente, se hace una revisión del estado del arte de los diferentes modelos que existen, para identificar las características que tienen y las condiciones sobre las cuales fueron planteados. Una vez realizada la revisión, se incorporan las características termoelectricas que presenta el panel solar para plantear el modelo en ecuaciones diferenciales. Para este punto, se hace necesario la revisión de conceptos de diferentes dominios de la física.

Se plantean las condiciones variables de la irradiación solar durante un día, considerando la posición geográfica del panel. Estas son aplicadas al modelo desarrollado.

Finalmente se realizan las simulaciones del modelo propuesto, así como la deducción de una ley de control, con el propósito de validarlo.

1.5. Justificación

La energía solar es una de las fuentes de energía renovables más importantes y más usada actualmente en el planeta debido a su gran abundancia y disponibilidad que se tiene de la misma [Sukhatme, 2008]. Por esta razón se han realizado considerables investigaciones sobre el modelado, funcionamiento y estructura de los paneles solares. En México, esta energía es una de las más recomendables, ya que su captación es posible durante prácticamente en todo el año, pero con mayor o menor cantidad dependiendo del mes, gracias al clima que impera en su territorio. Otro punto a favor que se tiene es que se pueden ubicar instalaciones solares comunitarias en puntos de muy alta radiación solar y con gran cantidad de horas de sol, permitiendo esto mayor generación de energía eléctrica [CIEP, 2018].

Lo mencionado anteriormente es bien conocido por la mayoría de las personas que se encuentran familiarizados con el tema sin embargo, se hace necesario poder explotar este potencial con el que cuenta el país. Para esto, debe ser prioritario la investigación en cuanto al diseño, desarrollo y análisis de los paneles solares.

Los modelos, en general, se encuentran representados por modelos simplificados, en los cuales la irradiación solar es convertida en corriente eléctrica considerando algunas condiciones físicas o constantes de conversión que presentan los paneles en su respuesta.

El hecho de tener un modelo más detallado del panel solar permitiría poder realizar otro tipo de estudios, tal como analizar el efecto de las uniones calientes que se presentan comúnmente en los parques solares, pero de manera individual en un panel solar. Además, el modelo puede servir para detectar posibles fallas en celdas individuales, y también ver el efecto de degradación del panel solar.

Aunado a lo anterior, también permitiría realizar un estudio de una configuración diferente en el tipo de conexiones de las celdas solares en el panel, así como en una posible re-configuración del panel solar.

1.6. Descripción de Capítulos

A continuación, se presenta la descripción del contenido de cada capítulo de ésta tesis.

En el primer capítulo se presenta la introducción del tema de tesis, el planteamiento del problema, los antecedentes, los objetivos de la tesis, la metodología a seguir en la elaboración de la misma y la justificación de esta.

En el Capítulo 2 se presenta el modelo termoeléctrico del panel solar, donde se detalla el modelo térmico y eléctrico del panel y se obtienen sus ecuaciones diferenciales. Lo anterior se realiza presentando el modelo de la celda solar en un principio, y posteriormente el modelo del panel solar, considerando dos tipos diferentes de conexión. Adicionalmente se presentan los conceptos básicos del tipo de control utilizado.

En el Capítulo 3 se muestran las simulaciones de la celda y panel solar. Para esto, se considera primeramente una irradiación y temperatura constantes, y posteriormente con irradiación y temperatura variable. Además de presentar el efecto de sombreado sobre un par de celdas.

En el Capítulo 4 se desarrolla una ley de control basada en la inversión de modelo utilizando lógica difusa y redes neuronales, con el objetivo de realizar el control sobre el convertidor de potencia que se encuentra conectado al panel solar. Los resultados se presentan por medio de varias simulaciones.

En el Capítulo 5 se describen las conclusiones generales derivadas del trabajo realizado y de los resultados obtenidos. También se sugieren los posibles trabajos a futuros sobre esta línea de investigación.

Capítulo 2

Modelado del panel solar

2.1. Introducción

En éste capítulo se presenta el desarrollo del modelo termoelectrico del panel solar, tomando en cuenta las tres principales partes que lo conforman que son: la irradiancia, la parte térmica y la parte eléctrica; con estos tres dominios se obtienen las ecuaciones diferenciales que describen el modelo de una celda solar. También se presenta el modelo del panel solar, así como dos tipos diferentes de configuraciones de conexión. Las ecuaciones diferenciales son planteadas en su forma de diagrama a bloques para representar el sistema, lo cual se facilita con el uso del programa Matlab Simulink®. Al final del capítulo se presentan los conceptos básicos para plantear el control propuesto.

2.2. Modelo del circuito equivalente

El circuito equivalente de una celda solar se muestra en la Figura 2.1, el cual está conformado por una fuente de corriente en paralelo con un diodo. Debido a esto la respuesta de una celda surge de la teoría básica de los semiconductores, por lo tanto, la ecuación básica que describe matemáticamente la característica corriente-voltaje (I-V) de la celda solar ideal es [Villalva, Gazoli y Filho, 2009]:

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{qV}{akT} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

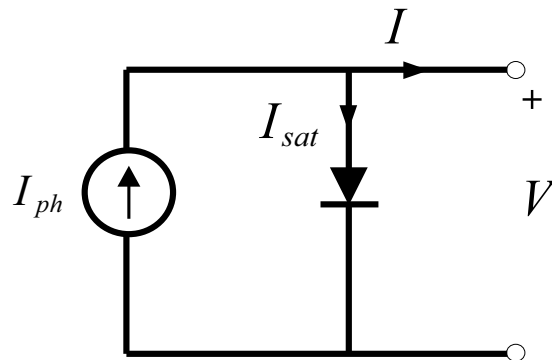


Figura 2.1: Modelo ideal de una celda solar

donde:

I_{ph} es la corriente fotoeléctrica generada por la celda (A)

I_{sat} es la corriente de saturación inversa del diodo de la celda (A)

T es la temperatura operativa de la celda (K)

a es el factor de idealidad del diodo

q es la carga del electrón ($1.6 * 10^{-19}C$)

k es la constante de Boltzman ($1.38 * 10^{-23}J/K$)

Para obtener las corrientes generadas por el modelo de la celda solar, se tiene que igualar I a cero en la Ecuación (2.1) y resolver para V , lo cual permite encontrar su valor, al despejar V de (2.1) se obtiene la Ecuación (2.2):

$$V = \frac{akT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (2.2)$$

El valor que resulte de V en la Ecuación (2.2) será el valor final de voltaje en la curva característica de corriente-voltaje. Para obtener la curva, se crea un vector desde cero hasta este valor, y se calculan los valores de corriente correspondientes a cada elemento del vector de voltaje usando la Ecuación (2.1).

2.3. Modelo termoeléctrico

La celda solar es visualizada como una interacción de tres partes principales, o tres dominios físicos diferentes: la irradiancia, la parte térmica y la parte eléctrica. Entonces para modelar la celda solar estas son las partes consideradas. La Figura 2.2 muestra un esquema de las interacciones de sus partes.

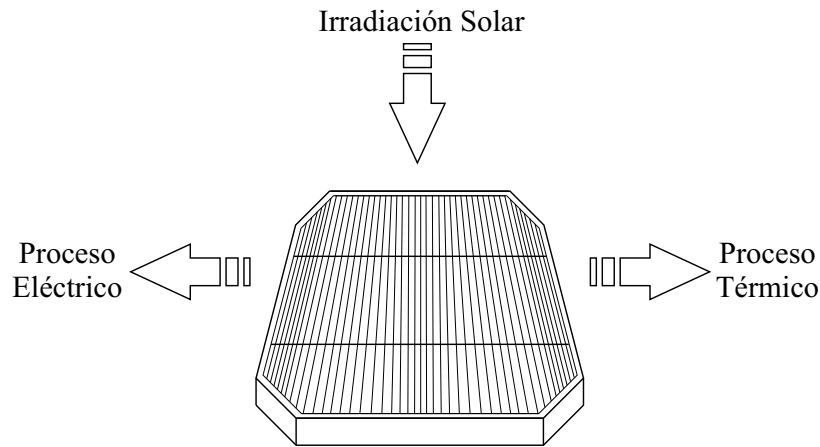


Figura 2.2: Esquema de una celda solar

2.3.1. Modelo de irradiancia

La irradiación solar es la magnitud que mide la energía por unidad de área de radiación solar incidente en una superficie colocada en un lugar y rango de tiempo bien especificados [Energía del sol].

La irradiación espectral en función de la longitud de onda del fotón, indicada por F , es la forma más común de caracterizar una fuente de luz. Dada la densidad de potencia a una longitud de onda particular.

Muchas fuentes de luz se modelan como emisores de cuerpo negro (Blackbodies). Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente en su superficie y emite radiación en función de su temperatura. El término Blackbodies deriva del hecho de que, si no emiten radiación en el rango visible, aparecen en negro debido a la absorción completa de todas las longitudes de onda. Las fuentes del cuerpo negro que son de interés emiten luz en la región

visible. La irradiación espectral de un cuerpo negro está dada por la ley de radiación de Planck (2.3).

$$F = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (2.3)$$

donde:

λ es la longitud de onda de la luz.

T es la temperatura de un cuerpo negro.

h, c, k son constantes.

F es el espectro de irradiancia.

La densidad de potencia total de un cuerpo negro se determina al integrar la irradiancia espectral en todas las longitudes de onda. La densidad de potencia está representada por la Ecuación (2.4).

$$Ep = kT^4 \quad (2.4)$$

donde:

k es la constante de Boltzman ($1.38 * 10^{-23} J/K$).

T es la temperatura del cuerpo.

Ep es la densidad de potencia.

La densidad de potencia en una área de superficie A , se obtiene como:

$$Ep = AkT^4 \quad (2.5)$$

Esta última formulación, se considera cuando se usa la radiación de un cuerpo negro. De lo contrario, la principal fuente de radiación en la tierra es el sol, entonces es importante modelar este elemento considerando la irradiación producida por sí misma.

Modelo del Sol

El sol se modela como una fuente de flujo, y su formulación considera condiciones como latitud, la hora, el mes, la posición angular del sol y el ángulo de incidencia.

La radiación extraterrestre se considera suponiendo que el sol es una esfera de materia gaseosa caliente intensa y que tiene una temperatura efectiva del cuerpo negro de aproximadamente 5762 K. También suministra energía irradiada al espacio por varias reacciones de fusión. Como la órbita de la tierra es ligeramente elíptica, la intensidad de la radiación extraterrestre varía de un máximo en enero (la tierra más cercana al sol) al mínimo en julio (la tierra más alejada del sol). La Ecuación (2.6) determina la radiación terrestre extra en una superficie plana normal en el día n del año:

$$I_o = I_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad (2.6)$$

donde:

I_{SC} es la energía del sol por unidad de tiempo y se considera como una constante $I_{SC} = 1353 \frac{W}{m^2}$

I_o es la radiación terrestre en una superficie plana.

n es un día del año.

En la radiación terrestre en una superficie no se consideran los efectos de la atmósfera, es decir, la reflexión del rayo solar disperso y absorbido por el polvo, las moléculas de gas, el ozono y el vapor de agua.

La radiación solar disponible (I_s) se puede considerar como la adición de la radiación solar (I_D) a la radiación del cielo difuso (I_d). Además, la radiación reflejada (I_r) tiene

una contribución en la radiación solar disponible, pero no se considera debido al hecho de que solo la energía incidente se tendrá en cuenta en el modelo.

$$I_s = I_D + I_d + I_r \quad (2.7)$$

La I_D es calculada en (2.8):

$$I_D = I_{DN} \cos(\theta) \quad (2.8)$$

donde:

θ es el ángulo de incidencia entre los rayos solares entrantes y una línea normal a la superficie.

I_{DN} es la intensidad solar tomada de un día claro.

El calculo de I_{DN} y θ se realiza por medio de las Ecuaciones (2.9) y (2.10)

$$I_{DN} = \frac{A}{\exp\left(\frac{B}{\sin(\beta)}\right)} \quad (2.9)$$

$$\cos(\theta) = a_1 - a_2 + a_3 + a_4 + a_5 \quad (2.10)$$

El término A es la radiación solar aparente en el mar, B es el coeficiente de extinción atmosférica y β es la altitud solar. A y B , son parámetros constantes tabulados mensualmente, son valores presentados por Thoma y Mocellin [Thoma y Mocellin, 2006]. La altitud solar está dada por:

$$\sin(\beta) = \cos(L) \cos(\delta) \cos(H) + \sin(L) \sin(\delta) \quad (2.11)$$

donde:

L es el parámetro de latitud local.

δ es la orientación de la superficie, que es la relación geométrica entre un plano de cualquier orientación arbitraria en relación con la tierra y la radiación del rayo entrante.

H es el ángulo de la hora, es decir, el desplazamiento angular del sol al Este o al Oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a 15° por hora. La orientación de la superficie está descrita por (2.12):

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.12)$$

Mientras que el ángulo de la hora se describe por (2.13):

$$H = 15^\circ \left(\frac{LST + ET + 4(LSM - LON)}{60} - 12 \right) \quad (2.13)$$

donde:

LST es la hora estándar local.

ET es la ecuación de tiempo (ver Tabla 2.1).

LSM es la hora estándar local del meridiano.

LON es la longitud local.

Todos estos parámetros se dan para una ubicación específica.

Para el ángulo de incidencia (2.10), los coeficientes están dados por:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \sin(\delta) \sin(L) \cos(\phi) & (2.14) \\
 a_2 &= \sin(\delta) \sin(L) \cos(\phi) \cos(\gamma) \\
 a_3 &= \cos(\delta) \cos(L) \cos(\phi) \cos(H) \\
 a_4 &= \cos(\delta) \sin(L) \sin(\phi) \cos(\gamma) \cos(H) \\
 a_5 &= \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\gamma) \sin(H)
 \end{aligned}$$

donde:

Los parámetros δ , L y H se han definido anteriormente, ϕ es el ángulo de inclinación de la superficie relacionada con la horizontal ($\phi = 90^\circ$ es vertical y $\phi = 0^\circ$ es horizontal) y γ es el ángulo azimutal de la superficie.

Tabla 2.1: Valores de los parámetros constantes [Thoma y Mocellin, 2006]

Mes	$A(W/m^2)$	B	C	$ET(\text{min})$
Enero	1230	0.141	0.058	-11.2
Febrero	1214	0.144	0.06	-13.9
Marzo	1185	0.156	0.071	-7.5
Abril	1135	0.18	0.097	1.1
Mayo	1103	0.196	0.121	3.3
Junio	1088	0.205	0.134	-1.4
Julio	1085	0.207	0.136	-6.2
Agosto	1107	0.201	0.122	-2.4
Septiembre	1151	0.177	0.092	7.5
Octubre	1192	0.16	0.073	15.4
Noviembre	1120	0.149	0.063	13.8
Diciembre	1233	0.142	0.057	1.6

Por otro lado, la porción difusa de la radiación solar disponible está dada por:

$$I_d = I_{ds} + I_{dg} \quad (2.15)$$

donde:

I_{ds} es la radiación solar difusa de un cielo despejado.

I_{dg} es la radiación difusa reflejada en el suelo.

Ambas expresiones pueden ser aproximadas por:

$$I_{ds} = CI_{DN}F_{SS} \quad (2.16)$$

$$I_{dg} = \rho_g(I_{DN}C + I_{DN} \sin(\beta))F_{sg} \quad (2.17)$$

Para la Ecuación (2.16), el coeficiente C es el factor de radiación difusa en un mes (Tabla 2.1) y F_{ss} es un factor de ángulo adimensional dado por la Ecuación (2.18). Por otra parte, en (2.17) ρ_g es la reflectancia del primer plan; el producto $I_{DN} \cdot C$ es la porción de la radiación del cielo difuso, $I_{DN} \sin(\beta)$ es la ganancia directa que cae en el suelo y F_{sg} determina el factor de ángulo para la superficie al suelo (2.19).

$$F_{ss} = \frac{1 + \cos(\phi)}{2} \quad (2.18)$$

$$F_{sg} = \frac{1 - \cos(\phi)}{2} \quad (2.19)$$

De las Ecuaciones (2.18) y (2.19), para una superficie horizontal $F_{ss} = 1$ y $F_{sg} = 0$, mientras que para una superficie vertical $F_{ss} = 0.5$ y $F_{sg} = 0.5$.

Las ecuaciones presentadas en esta sección se simulan en Matlab Simulink® , para verificar el comportamiento de la irradiación solar en un día (Figura 2.3). Se presentan detalles adicionales de esta simulación en el Capítulo 3.

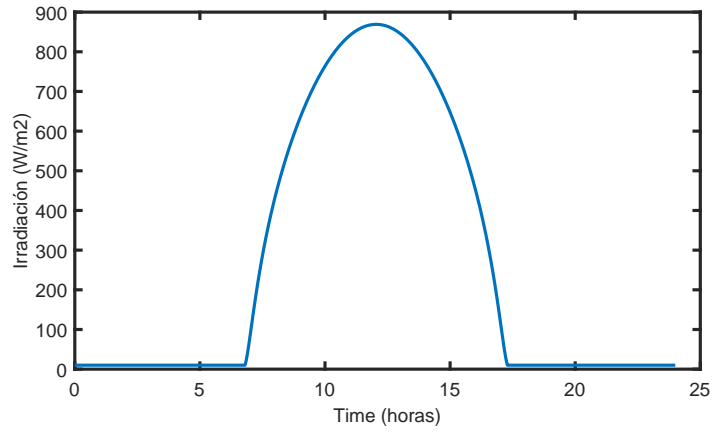


Figura 2.3: Irradiación solar en un día

Los parámetros utilizados para el modelo de la irradiación solar se dan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Valores utilizados para el modelo de irradiación solar [Duffie y Beckman, 1991]

Variable	Valor
tilt	90
abss	100
γ	0
OH	0
W	0
r_o	0.33
c_r	1
c_f	1
s_c	1353
<i>LSM</i>	100
<i>LON</i>	101
<i>L</i>	19
<i>ET</i>	1.2
B	0.18
A	0.01

2.3.2. Componente térmico

La temperatura se estima considerando el intercambio de energía térmica del módulo con el entorno que lo rodea a través de las principales vías de transferencia de calor. La conducción, la convección y la radiación son los tres modos o mecanismos de transferencia de calor de un cuerpo.

Los efectos térmicos son el resultado de la disipación de la energía eléctrica; de hecho, esta energía eléctrica se transforma en calor en la celda de silicio (la potencia eléctrica Pe es convertida en calor en las uniones). Bajo la hipótesis de que la celda de silicio mantiene una temperatura uniforme en su estructura, es posible tomar en cuenta únicamente la temperatura ambiente Ta , y la temperatura de la celda de silicio Tc , para desarrollar el modelo presentado en esta tesis.

2.3.2.1. Bases

Cuando se habla de un proceso térmico, se hace necesario definir las variables físicas que intervienen en él. Las dos variables que se consideran para la parte térmica son, el flujo de entropía (S) y la temperatura (T). En el caso de procesos sin fenómenos de “fricción” (reversibles), es decir, en los cuales el flujo de entropía de entrada y salida son iguales, la elección de las dos variables térmicas es muy significativa. Sin embargo, esta elección ya no se hace en el caso de procesos con fenómenos de fricción.

En un proceso irreversible, la irreversibilidad es localizada en las fricciones (pérdidas eléctricas, mecánicas, hidráulicas, conducción de calor entre dos temperaturas diferentes, difusión). Las fricciones pueden ser modeladas considerando una conservación de la potencia, en el sentido de que la energía disipada reaparece bajo la forma de flujo de calor. Enfocándose en el caso de la unión entre la parte eléctrica y térmica de un proceso, en ésta unión la relación se puede considerar de la siguiente manera: del lado de la parte eléctrica se tiene un comportamiento como el de una resistencia eléctrica (disipación de la energía); y para la parte térmica, como el de una fuente de flujo entrópico. Es importante mencionar

que esta fuente de flujo entrópico debe mantenerse así (como flujo de salida), debido a que el flujo entrópico no puede ser una entrada e imponerse a una resistencia eléctrica (en este caso), debido a que esto podría implicar obtener temperaturas negativas o a no cumplir con el segundo principio de la termodinámica.

La Ecuación (2.20) indica el balance de energía que debe mantenerse en la unión.

$$E = TS = P_e = v \cdot i \quad (2.20)$$

Donde E es el flujo de energía térmica (potencia térmica). Así, el hecho de que el flujo entrópico sea una salida, indica que su obtención se realiza simplemente dividiendo la potencia eléctrica entre a temperatura (Ecuación 2.21).

$$S = \frac{P_e}{T} \quad (2.21)$$

Como se mencionó anteriormente, el intercambio de energía térmica, o calor entre dos cuerpos de temperatura diferente puede efectuarse por medio de tres vías: la conducción, la convección y la radiación, los cuales siguen el segundo principio de la termodinámica, que indica: que la transferencia de energía calorífica siempre se realiza naturalmente de las zonas más calientes hacia las zonas de menor temperatura.

Conducción

La conducción térmica caracteriza esencialmente la transferencia de calor al interior de un cuerpo sólido o entre dos cuerpos sólidos contiguos. El análisis de la conducción térmica se basa en la Ley de Fourier Ecuación (2.22) que relaciona el flujo de calor, el gradiente de temperatura, y la conservación de la cantidad de calor Ecuación (2.23).

$$\vec{j}_a = -\lambda \cdot \vec{grad}T \quad (2.22)$$

$$div\vec{j}_a + \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{E} \quad (2.23)$$

donde:

\vec{j}_a es el vector de flujo de calor por unidad de superficie (W/m^2)

$\vec{grad}T$ es el vector gradiente de temperatura ($K \cdot m^{-1}$)

λ es la conductividad térmica específica del material dado ($W/K \cdot m$)

c es la capacidad calorífica del material ($K \cdot Kg^{-1}$)

ρ la densidad ($Kg \cdot m^{-3}$)

\dot{E} el flujo de energía térmica (W_m^{-3})

La combinación de las Ecuaciones (2.22) y (2.23) conduce a la ecuación de la propagación de la temperatura (2.24).

$$div \cdot (\lambda \cdot \vec{grad}T) = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.24)$$

Suponiendo que ρ , c y λ son independientes de la temperatura, se reescribe en la Ecuación (2.25).

$$\lambda \cdot \Delta T = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.25)$$

Donde el operador Δ es utilizado para el Laplaciano. Si se considera la propagación (unidireccionalmente siguiendo el eje x) del calor en un sistema, la Ecuación (2.25) se escribe como.

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.26)$$

La Figura 2.4 muestra la descomposición del sistema en e volúmenes elementales en la dirección de propagación. Figura que permite una aproximación de la solución de esta ecuación diferencial parcial.

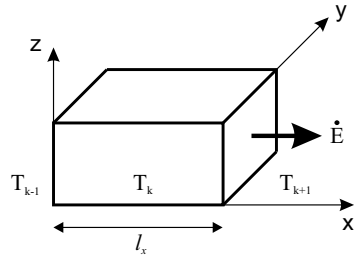


Figura 2.4: Modelo elemental

La primera derivada de una función f en un punto x puede ser aproximada por $g(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$, con h suficientemente pequeña. La aproximación de la primera derivada de g es entonces equivalente a una aproximación de la segunda derivada de f . Así, se toma $h = l_x$ como el grosor a lo largo del eje x del volumen elemental, x la coordenada de un punto del volumen elemental, y al observar $T(x) = T_k$, $T(x+h) = T_{k+1}$, $T(x-h) = T_{k-1}$, se tiene (2.27).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \approx \frac{T_{k+1}(t) - 2 \cdot T_k(t) + T_{k-1}(t)}{l_x^2} \quad (2.27)$$

Gracias a esta aproximación, la Ecuación (2.26) se convierte en (2.28).

$$\frac{dT_k(t)}{dt} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot l_x^2} \cdot (T_{k+1}(t) - 2 \cdot T_k(t) + T_{k-1}(t)) \quad (2.28)$$

Notando a A como la siguiente sección x del volumen elemental, las siguientes ecuaciones representan el modelo matemático de un volumen elemental, y corresponden al volumen elemental de la Figura 2.4.

$$E_1 = \frac{1}{R_x} (T_{k-1} - T_k) \quad (2.29)$$

$$E_2 = \frac{1}{R_x} (T_k - T_{k+1}) \quad (2.30)$$

$$\frac{d}{dt} T_k = \frac{1}{C} (E_1 - E_2) \quad (2.31)$$

Donde $R_x = \frac{l_x}{\lambda \cdot A}$ y $C = \rho \cdot c \cdot l_x \cdot A$, C representa el volumen del elemento.

Al combinar las ecuaciones anteriores, se obtiene la Ecuación (2.28).

Para obtener un modelado completo de la barra, todo lo que queda es agregar cierto número de estos modelos elementales.

Convección

La convección caracteriza la propagación del calor en un fluido, un gas o un líquido, donde las moléculas se encuentran en movimiento. Este fenómeno es fundamental para el estudio de los intercambios de calor en un fluido, pero también entre fluidos y sólidos. El flujo de calor intercambiado entre un sólido y el ambiente (aire) a través de una superficie elemental entorno a un punto de la superficie de este sólido, se expresa por (2.32).

$$E = \alpha A(T_a - T_s) \quad (2.32)$$

Donde A es la superficie de intercambio (m^2), T_a es la temperatura ambiente (K), T_s es la temperatura de la superficie del solido (K), y α es el coeficiente de convección ($W/m^2 \cdot K$).

Radiación

La radiación se caracteriza por el intercambio directo de calor entre dos cuerpos de temperaturas diferentes separadas por un espacio transparente a esta radiación. La radiación térmica es un fenómeno electromagnético.

El flujo de energía de radiación de una superficie A de un cuerpo negro a una temperatura uniforme viene dado por la ley de Stefan Boltzman.

$$E = A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.33)$$

Donde σ es la constante de Boltzman ($5.73 \cdot 10^{-8} W/m^2$).

La energía emitida por la radiación de una superficie no es idéntica en todas las direcciones. Para un elemento de superficie ds , la intensidad de la radiación en una desviación \vec{u} se muestra en la Figura 2.5.

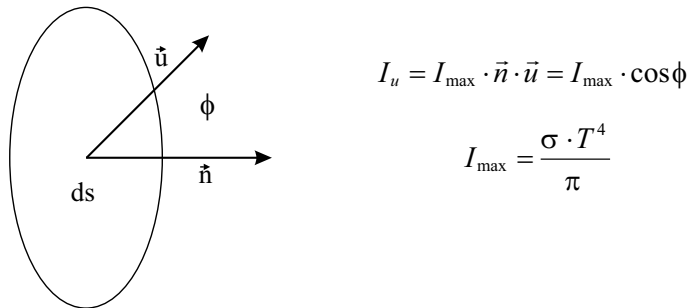


Figura 2.5: Intensidad de radiación en una desviación.

Considere entonces dos superficies elementales de cuerpo negro a temperaturas T_1 y T_2 y áreas dA_1 y dA_2 , respectivamente. Las diversas notaciones utilizadas más adelante se presentan en la Figura 2.6.

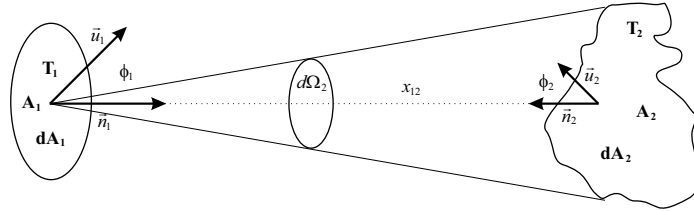


Figura 2.6: Radiación entre dos cuerpos

La potencia emitida por dA_1 y que llega a dA_2 se expresa mediante (2.34).

$$E = \frac{\sigma \cdot T_1^4}{\pi} \cdot d\Omega_2 \cdot dA_1 \cdot \vec{n}_1 \cdot \vec{u}_1 \quad (2.34)$$

$d\Omega_2$ representa el ángulo sólido según el cual se ve la superficie dA_2 desde dA_1 .

Tomando en cuenta que $X_{12} = \|A_1 \cdot \vec{A}_2\|$, el valor del ángulo sólido $d\Omega_2$ viene dado por la Ecuación (2.35).

$$d\Omega_2 = \iint \frac{\vec{u}_1}{x_{12}^2} \cdot d\vec{s}_2 \quad (2.35)$$

En este caso, las superficies son elementales, y son consideradas planares. La Ecuación (2.35) se convierte en.

$$d\Omega_2 = \frac{dA_2 \cdot \cos(\phi_2)}{x_{12}^2} \quad (2.36)$$

Y la Ecuación (2.33) se puede escribir entonces como.

$$E_2 = \frac{\sigma \cdot T_1^4}{\pi \cdot x_{12}^2} \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\phi_1) \cdot dA_1 \cdot dA_2 \quad (2.37)$$

La integración de (2.37) sobre toda la superficie del cuerpo negro entonces da el valor de la potencia por radiación recibida por dA_1 del mismo.

Explicando todo lo anterior se utiliza la Ecuación (2.33), considerando primero el caso de la radiación de una superficie A a una temperatura T sin que ésta reciba energía de la radiación del exterior. Si, por ejemplo, se tomará en cuenta que esta superficie recibe energía de la radiación exterior, solamente ésta energía debe ser restada en la Ecuación (2.33). Finalmente se utiliza la Ecuación (2.37), si se considera la energía es emitida hacia un segundo cuerpo.

2.3.2.2. Modelo térmico 3D de la celda solar

Para formular el modelo en tres dimensiones o estructural de la celda solar, se parte de la suposición de que la celda de silicio puede ser dividida en 8 partes o secciones idénticas. La división de la celda es mostrada en la Figura 2.7.

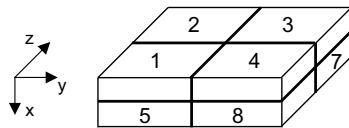


Figura 2.7: División de la celda.

Como se puede observar, se está considerando que la celda de silicio puede ser cortada por la mitad en su grosor (alto), y en sus dimensiones de largo y ancho también.

El hecho de tener 8 divisiones de la celda de silicio, permite aplicar el concepto de conducción térmica explicado anteriormente, para poder formular el modelo de cada una de

las divisiones, las cuales estarán ligadas una con otra, realizando la transferencia de calor y el flujo de entropía entre ellas.

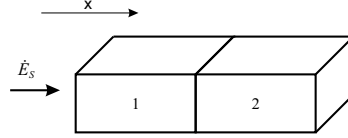


Figura 2.8: Elementos contiguos.

Considerando solamente dos elementos contiguos, antes de plantear el modelo 3D de la celda solar, se tiene el siguiente desarrollo. Partiendo de la estructura mostrada en la Figura 2.8, se puede observar que la propagación está dada unidireccionalmente siguiendo solamente el eje x . De esta manera, se tiene en cuenta dos volúmenes, por lo tanto, se tienen definidos a C_1 y C_2 como el volumen del elemento 1 y 2, respectivamente. Así, de acuerdo a la Ecuación (2.31), se tendría lo siguiente:

$$C_1 \frac{d}{dt} T_1 = E_s - E_{x1} - E_{x12} \quad (2.38)$$

$$C_2 \frac{d}{dt} T_2 = E_{x12} - E_{x2} \quad (2.39)$$

Como puede observarse en las Ecuaciones (2.38) y (2.39), se tiene la relación E_{x12} que es compartida entre los dos elementos, E_s corresponde al flujo de energía de entrada. La transferencia de calor es realizada del elemento 1 a elemento 2. Es importante mencionar que los flujos de energía propios de cada elemento (E_{x1} y E_{x2}), así como el flujo compartido (E_{x12}) se encuentran dados de la misma manera que la Ecuación (2.29) o la Ecuación (2.30).

De esta manera, la representación en diagrama a bloques de (2.38) y (2.39) es mostrada en la Figura 2.9.

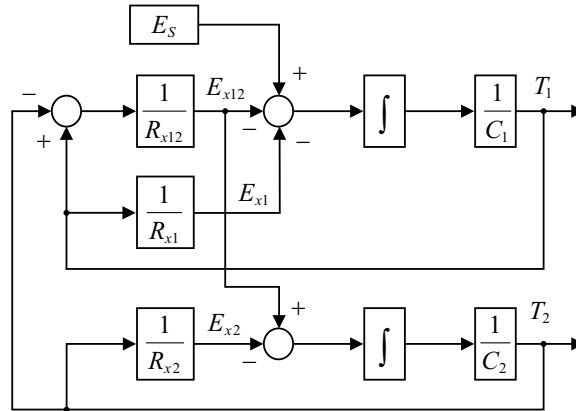


Figura 2.9: Diagrama a bloques de dos elementos contiguos.

Para plantear el modelo en tres dimensiones se procede de la misma manera solamente que ahora se tiene que tomar en cuenta que se tendrán tres ejes (x, y, z) en lugar de un sólo eje (x). Considerando lo anterior, para el elemento 1 de la celda solar (Figura 2.7), y de acuerdo a los ejes coordenados mostrados, se obtiene:

$$C_1 \frac{d}{dt} T_1 = E_s - E_{x1} - E_{y1} - E_{z1} - E_{x15} - E_{y14} + E_{z12} \quad (2.40)$$

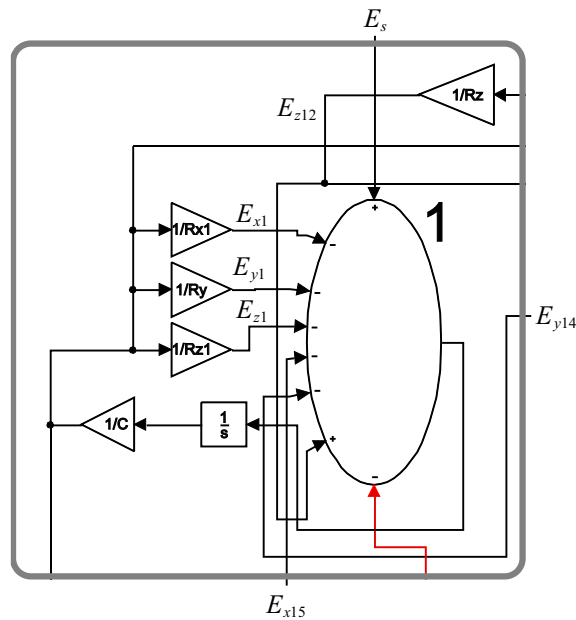


Figura 2.10: Elemento 1 de la celda solar.

Se puede observar que ahora se toman en cuenta los flujos que corresponden a cada uno de los tres ejes coordenados, además de tener como entrada el flujo E_s , el cual corresponde al flujo que será generado por medio de la etapa que corresponde a la irradiación solar.

El diagrama a bloques que corresponde al elemento 1 de la celda solar, es mostrado en la Figura 2.10.

La conexión del elemento 1 es con los elementos 2, 5 y 4, en los ejes z , x , y , respectivamente; y está reflejada en los términos R_{x15} , R_{y14} y R_{z12} .

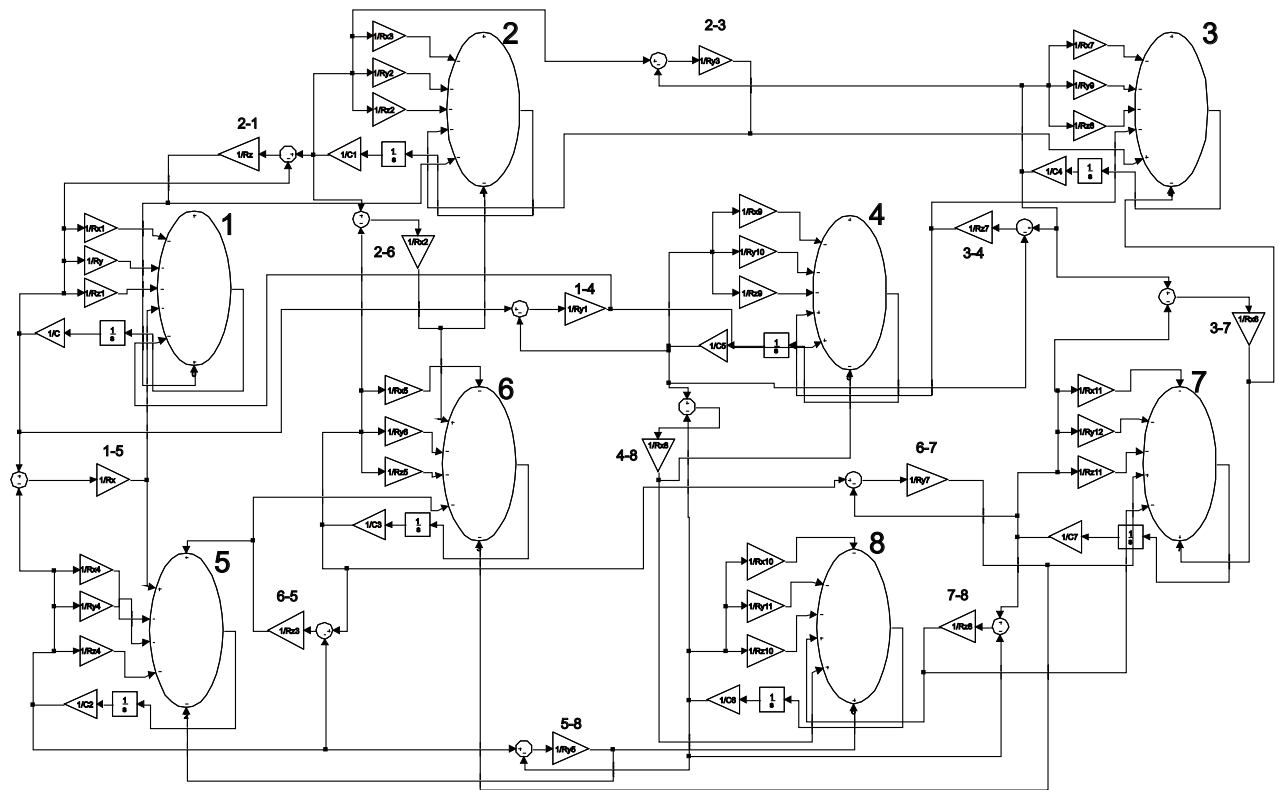


Figura 2.11: Estructura térmica de la celda.

Una vez formulado el elemento 1, se procede de la misma manera para los 7 elementos restantes de la celda solar.

Así, la estructura térmica-física de la celda solar es mostrada en su forma de

diagrama de bloques en la Figura 2.11.

2.3.3. Componente eléctrico

La parte eléctrica que corresponde a la celda solar ha sido descrita y utilizada en un considerable número de artículos y publicaciones. Por ejemplo, la Ecuación (2.1) corresponde a la respuesta de la corriente que entrega la celda, y que está desarrollada de acuerdo al modelo mostrado en la Figura 2.1

Así, a este modelo puede agregársele una resistencia en serie a la salida R_{sh} , la cual tiene un impacto directo en la respuesta característica de la celda solar. De esta manera, la Ecuación (2.1) se convierte en:

$$i_{pv} = i_{ph} - i_D - i_{R_{sh}} \quad (2.41)$$

$$\Delta i = i_{cc} \left(\left(\Delta i_{sc} \frac{G}{1000} (T - 298) \right) + \left(\frac{G}{1000} - 1 \right) \right) \quad (2.42)$$

$$i_{ph} = i_{cc} + \Delta i$$

$$i_D = i_{cc} B_1 \exp \left(\frac{v_{cell} - \Delta v_{cell}}{B_2 v_{co}} - 1 \right) \quad (2.43)$$

$$\Delta v = v_{co} \Delta v_{co} (T - 298)$$

Donde i_{ph} es la corriente generada por la irradiancia, i_{cc} es la corriente-shunt, v_{co} es el voltaje de circuito abierto, v_{cell} es el voltaje de la celda. Las constantes B_1 y B_2 son definidas por la Ecuación (2.44)

$$B_1 = \left(1 - \frac{i_{mp}}{i_{cc}} \right) \exp \left(\frac{-v_{mp}}{B_2 v_{co}} \right) \quad (2.44)$$

$$B_2 = \frac{\frac{v_{mp}}{v_{co}} - 1}{\ln \left(1 - \frac{i_{mp}}{i_{cc}} \right)}$$

Se puede observar claramente en la Ecuación (2.41), las tres corrientes que están presentes en el circuito, a fin de obtener la corriente de salida de la celda.

La interacción entre la parte eléctrica con la estructura térmica de la celda solar se realiza mediante el acoplamiento de los dos sistemas físicos. Para esto son utilizadas las

Ecuaciones (2.20) y (2.21) que indican la conservación de la energía para el acoplamiento de estos dos dominios. El acoplamiento entre etapas es presentado en la siguiente subsección.

2.3.4. Acoplamiento de componentes

Las componentes o partes de irradiación térmica y eléctrica, deben ser unidas para poder formular el modelo completo de la celda solar. En este mismo orden, el acoplamiento se explica a continuación.

Irradiación - Térmico

Para el acoplamiento del modelo de la irradiación, con la estructura térmica de la celda, basta solamente con considerar al modelo de la irradiación como una fuente de flujo de energía térmica (Es). Esta fuente de energía térmica llega directamente en cada uno de los elementos de la celda solar que se encuentran en la parte superior (divisiones 1, 2, 3 y 4), tal como se muestra en el diagrama a bloques de la Figura 2.12 y este flujo de energía fluye hacia las divisiones inferiores de la celda (divisiones 5, 6, 7 y 8). La fuente de energía térmica es la descrita en la Sección 2.3.1.

Así, la Figura 2.12 muestra la celda que contiene la parte de irradiación y térmica.

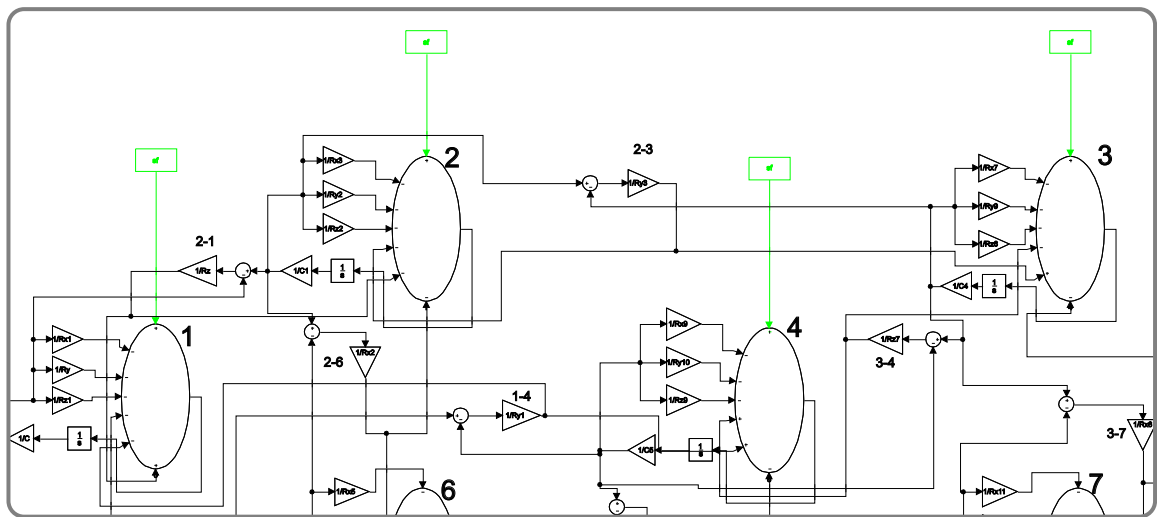


Figura 2.12: Estructura térmica e irradiación en la celda.

Térmico - Temperatura (ambiente, celda) - Flujo térmico

Los 8 elementos que componen la celda, se encuentran dentro del dominio térmico, y cada uno de ellos genera una temperatura, la cual está dada por la integración de las Ecuaciones (2.38) o (2.39), por ejemplo, entonces las 8 temperaturas que corresponden a cada uno de los elementos deben de ser sumadas, para obtener de esta manera el intercambio de temperatura que se está realizando en la celda. También se tiene la influencia de la temperatura ambiente T_a y de la temperatura que tiene la celda T_c .

Todas las temperaturas son sumadas y estas deben de tener una influencia en la corriente generada, así como también el voltaje generado, debe de tener un efecto en la temperatura.

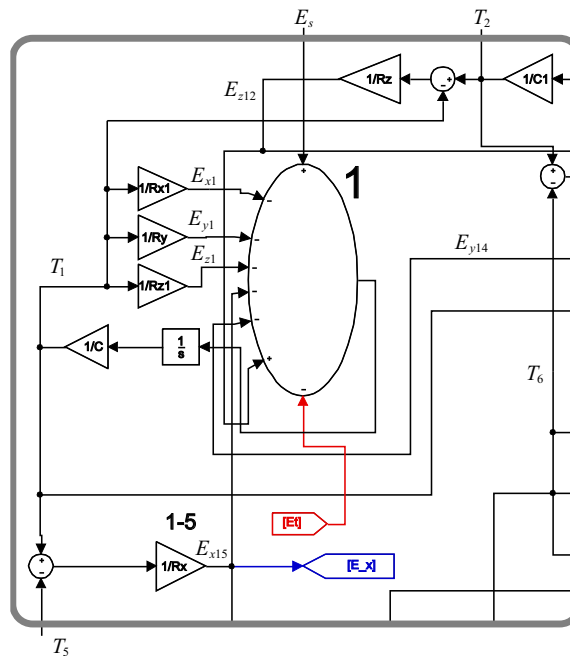


Figura 2.13: Flujo del elemento 1.

Por otra parte, además la temperatura generada por la estructura de la celda, ésta también genera un flujo térmico, el cual debe de tener un impacto en la corriente y/o voltaje eléctrico generado por la celda. Así, el flujo térmico generado entre los elementos superiores

de la celda (1, 2, 3, 4) y los elementos inferiores (5, 6, 7, 8) tiene un impacto en la corriente generada por la celda. La elección de estos flujos solamente está basada en el hecho de que la incidencia de la irradiación sobre la celda solar se realiza de la parte superior a la inferior, siguiendo solamente el eje x , denotado anteriormente.

De esta manera, por ejemplo, para el elemento 1, se observa de la Figura 2.13, que el flujo es tomado solamente para el eje x , y la conversión de la parte eléctrica hacia la térmica.

La relación o acoplamiento entre el flujo térmico y la parte eléctrica es mencionada a continuación.

Térmico - Eléctrico

Dos partes componen este acoplamiento: la relación temperatura - eléctrico y la de flujo térmico - eléctrico. Para la primera de ellas, se tiene:

$$T_T = r \cdot i_g \quad (2.45)$$

$$v_{cell} = r \cdot E_T \quad (2.46)$$

Donde T_T es igual a la suma de todas las temperaturas (estructura, ambiente, celda).

E_T es el flujo de energía térmico total, distribuido en la estructura de la celda.

i_g es la corriente que se genera a partir de la temperatura.

v_{cell} es el voltaje de la celda fotovoltaica.

Además, el término r corresponde al coeficiente de temperatura, el cual es igual a $0.017A/K$ para la celda de silicio.

La resistencia en serie R_{sh} y el diodo también son influenciados por la temperatura. La relación entre la parte térmica y eléctrica para este elemento es la siguiente:

$$v_{cell} = (R_{sh} \cdot T_T) \cdot i_{Rsh} \quad (2.47)$$

$$E_T = \left(\frac{(v_{cell})^2}{R_{sh}} \right) \cdot T_T \quad (2.48)$$

Donde R_{sh} es el valor de la resistencia en serie del circuito eléctrico.

Para el diodo, el acoplamiento entre los dos dominios físicos se determinan mediante las relaciones siguientes:

$$del_v = v_{oc} \cdot si_v t \cdot T_T \quad (2.49)$$

$$i_D = \left(I_{cc} \cdot k_1 \cdot \exp \left(\frac{v_{cell} - del_v}{k_2 \cdot v_{oc}} - 1 \right) \right) \quad (2.50)$$

$$E_T = (i_D \cdot v_{cell}) \cdot T_T \quad (2.51)$$

2.4. Ecuaciones de la dinámica térmica

El modelo de la celda solar es basado en un sistema de ecuaciones diferenciales, se plantea a partir de la Ecuación (2.40). Esta ecuación corresponde a un elemento o sección de la estructura de la celda, por tal motivo, la ecuación debe de ser replicada ocho veces para representar a cada elemento. Las ecuaciones de (2.52) a (2.59) muestran las ocho ecuaciones diferenciales que corresponden al modelo térmico de la celda solar.

Donde E_s corresponde al flujo de energía proveniente del sol, ésta puede ser considerada como constante o variable (descrita en la sección 2.3.1)

$$C_1 \frac{d}{dt} T_1 = E_s - E_{x1} - E_{y1} - E_{z1} - E_{x15} - E_{y14} + E_{z12} \quad (2.52)$$

$$C_2 \frac{d}{dt} T_2 = E_s - E_{x2} - E_{y2} - E_{z2} - E_{z21} - E_{y23} - E_{x26} \quad (2.53)$$

$$C_3 \frac{d}{dt} T_3 = E_s - E_{x3} - E_{y3} - E_{z3} + E_{y32} - E_{z34} - E_{x37} \quad (2.54)$$

$$C_4 \frac{d}{dt} T_4 = E_s - E_{x4} - E_{y4} - E_{z4} + E_{z43} + E_{z41} - E_{x48} \quad (2.55)$$

$$C_5 \frac{d}{dt} T_5 = -E_{x5} - E_{y5} - E_{z5} + E_{x51} - E_{y58} + E_{z56} \quad (2.56)$$

$$C_6 \frac{d}{dt} T_6 = -E_{x6} - E_{y6} - E_{z6} - E_{z65} + E_{x62} - E_{y67} \quad (2.57)$$

$$C_7 \frac{d}{dt} T_7 = -E_{x7} - E_{y7} - E_{z7} + E_{y76} + E_{x73} - E_{z78} \quad (2.58)$$

$$C_8 \frac{d}{dt} T_8 = -E_{x8} - E_{y8} - E_{z8} + E_{z87} + E_{y85} + E_{x84} \quad (2.59)$$

Donde: $E_w v$ con $w = x, y, z$ y $v = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ corresponden a $E = 1/R_w T_v$, con $R_w = l_w/\lambda \cdot A$; $E_{wij} = E_{wji}$; $C_v = \rho \cdot c l_v \cdot A$

La interconexión con la parte eléctrica se realiza utilizando las expresiones de (2.45) a (2.51), las cuales complementan el modelo completo de la celda solar presentado en la Sección 2.5 .

2.5. Modelo del panel solar

Los paneles solares están conformados por celdas solares. La cantidad o número de celdas presentes en un panel, dependen de la potencia que generará el panel, así como de las características de fabricación que estos tengan.

Los paneles solares comerciales pueden estar conformados por 32, 60 o 72 celdas. La conexión interna de las celdas puede realizarse de diferentes maneras. Si se hace una analogía con la conexión de varios paneles solares dentro de un arreglo fotovoltaico, estos pueden ser conectados en: serie, paralelo, serie-paralelo, cruzado total, matriz de panel, o matriz de enlace tipo puente [Damiano et. al 2014]. Así, la conexión de las celdas dentro de un panel solar puede ser realizada de la misma manera que un arreglo fotovoltaico.

En la mayoría de los paneles solares comerciales, las celdas que lo componen están conectas en serie. Esta configuración permite que la corriente que proporciona el panel sea la misma que circula por todas las celdas solares. Sin embargo, cuando alguna de estas celdas se encuentra dañada o parcial o totalmente sombreada, no genera la corriente eléctrica y no permite que la corriente del resto de las celdas fluya por ella, por lo que se comportará como un circuito abierto y una sección del panel entero dejara de funcionar.

Para evitar la situación anterior, se añaden diodos bypass (derivación) al panel solar, los cuales permiten el paso de la corriente a través de ellos cuando alguna celda o conjunto de celdas están sombreadas. La activación de los diodos bypass en un panel, provoca escalones en la curva corriente-voltaje del mismo, y por consecuencia, que la potencia entregada sea menor. Por ejemplo, si un panel tiene 3 diodos bypass conectados por cada serie de 20 celdas, cuando un diodo se active, la potencia total entregada por el panel se reducirá en 1/3 del total que entrega cuando se presenté una sombra.

Cuando una celda o grupo de celdas se sombrea, pasan de producir energía a consumirla, lo que puede provocar sobrecalentamiento y hasta la destrucción de la celda (lo que se le conoce como Punto Caliente).

Una vez explicado lo anterior, en las siguientes subsecciones se presentan dos tipos de conexión de la celda, para formular el panel solar. Los esquemas mostrados fueron realizados en Matlab Simulink®, y su simulación es presentada en el Capítulo 3.

2.5.1. Conexión en serie

Considerando un panel solar constituido por 60 celdas, el arreglo común para este tipo de paneles es de 10x6 celdas. La Figura 2.14 muestra el panel en su conexión serie.

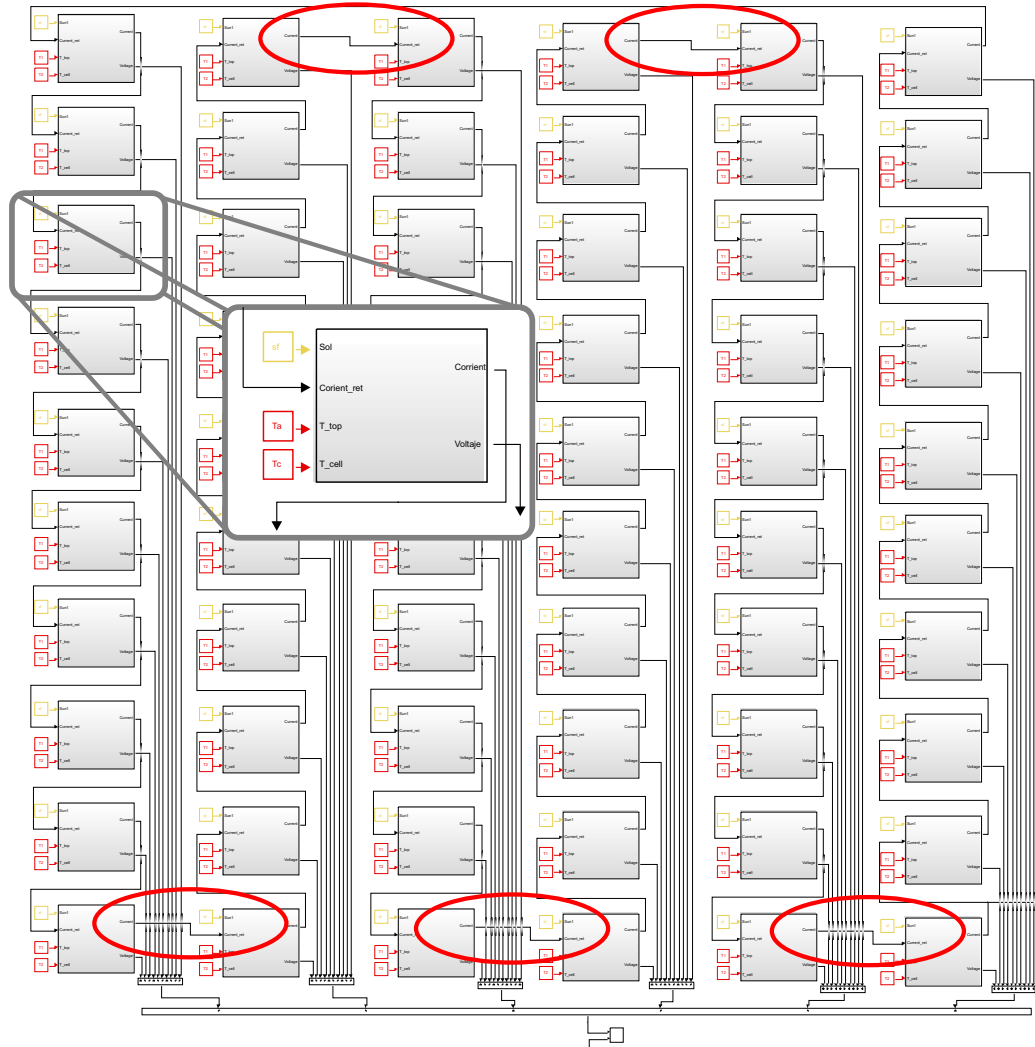


Figura 2.14: Panel con 60 celdas conectadas en serie.

Como puede observarse, cada una de las celdas se encuentra representada por cada bloque, donde las entradas a cada uno de ellos son: la irradiación (distribuida la misma para los cuatro elementos superiores de la celda), la temperatura ambiente, la temperatura de la celda, y la corriente proveniente de la celda anterior. Para las salidas, se tiene únicamente

a la corriente que será enviada a la siguiente celda, y el voltaje generado por la celda. El voltaje generado por cada celda es sumado primeramente por filas, y al final por columnas, para obtener el voltaje total generado por todas las celdas.

En la Figura 2.14 se resalta en círculos la conexión entre cada una de las columnas del panel.

2.5.2. Conexión en serie-paralelo

Tomando en cuenta la misma cantidad de celdas para el panel (60), así como la misma distribución (10x6), la conexión entre las celdas puede ser realizada en serie-paralelo (Figura 2.15).

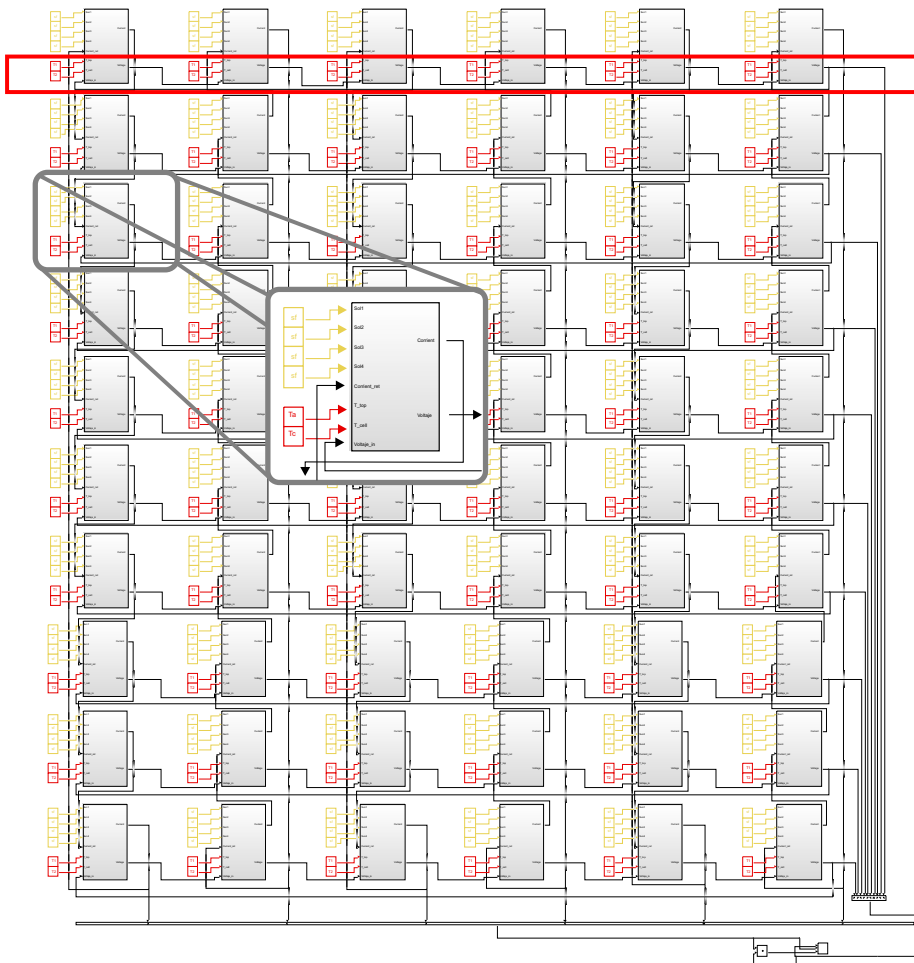


Figura 2.15: Panel con 60 celdas conectadas en serie-paralelo.

La conexión realizada de las celdas se realiza considerando que todas las celdas en la columna se encuentran conectadas en serie, y que cada columna de celdas se encuentra conectadas en paralelo. Así, la corriente total que proporcione el panel, será mayor, sin embargo, el voltaje en terminales del panel se reducirá.

La celda, y los dos tipos de conexión de los paneles son simulados en Matlab®, y las respuestas de estos, son mostradas en el siguiente capítulo.

2.6. Control difuso inverso

Para el desarrollo del control difuso inverso, se tienen que manejar tres conceptos básicos: Lógica difusa, redes neuronales, y modelo de referencia. Cada una de ellas de desarrolla en las siguientes subsecciones.

2.6.1. Lógica difusa

La lógica borrosa o lógica difusa (*fuzzy logic*) es una rama de la inteligencia artificial que se funda en el concepto de que todo es cuestión de grado, permitiendo describir y controlar a un sistema por medio de reglas de sentido común. La lógica difusa se fundamenta en los denominados conjuntos difusos (*fuzzy sets*), los cuales fueron introducidos por primera vez en 1965 [Zadeh, 1965].

Las reglas involucradas en un sistema difuso, pueden ser definidas con sistemas adaptivos, que aprenden al “observar” como operan las personas los dispositivos reales, o estas reglas pueden también ser formuladas por un experto humano. En general la lógica difusa se aplica tanto a sistemas de control como para modelar cualquier sistema continuo de ingeniería, física, biología o economía. De tal manera que el concepto está asociado con la forma en que las personas perciben el medio, por ejemplo, las ideas relacionadas con la altura de una persona, velocidad de un objeto, la temperatura ambiente, se formulan de

manera ambigua y depende de quién percibe el efecto físico, y por lo tanto, de eso dependerá su interpretación acerca de tal fenómeno. Algo puede moverse rápido o lento, son afirmaciones que dependen del observador y pueden variar de un observador a otro.

Los conjuntos difusos describen justamente estas ambigüedades y con ellos se intentan modelarlas. Desde que Lotfi A. Zadeh desarrolló el concepto de lógica difusa, se ha investigado sobre el tema, siendo Japón el principal centro de desarrollo, y la han aplicado a diversos sistemas, principalmente electrodomésticos, sistemas más recientes están vinculados con la industria, la medicina y la actividad espacial [Zadeh y Kacprzyk, 1992].

La incorporación de la lógica difusa a los sistemas de control da lugar a lo que se le conoce sistemas de control difuso. Se trata de determinar de manera lógica que se debe hacer para lograr los objetivos de control de la mejor manera posible a partir de una base de conocimientos proporcionada por un operador humano “experto”. Sin esta base no es posible desarrollar un controlador que opere de forma correcta. Las bases para desarrollar un control con lógica difusa se muestran en Apéndice A.

2.6.2. Redes neuronales

Las redes neuronales son utilizadas principalmente dentro del área de inteligencia artificial. Las redes están inspiradas en el funcionamiento de una neurona en el cerebro humanos. Dicha neurona se conecta o comunica con otras neuronas con el objetivo de transmitirse señales de información entre ellas. La información de entrada atraviesa la red neuronal (donde se somete a diversas operaciones) produciendo valores de salida. Las bases de las redes neuronales se muestran en el Apéndice B

Este concepto es aplicado para desarrollar el control inverso del sistema. En el Apéndice B se hace mención del control con redes neuronales utilizado en la presente tesis. Para desarrollar la red neuronal, se hace necesario el uso del concepto de inversión del sistema.

El concepto de inversión

El concepto de inversión surge cuando se quiere que la salida de una planta siga a una señal de referencia que se impone al sistema. Según la Figura 2.16 si se requiere que la salida $y(t)$ siga a una señal de referencia arbitraria y acotada $r(t)$, siendo $g(o)$ estable. La ley de control debe ser de la forma dada en la Ecuación (2.60).

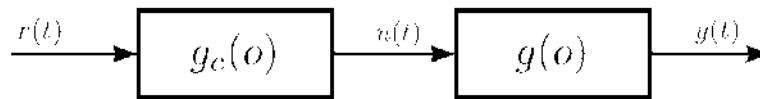


Figura 2.16: Problema fundamental de inversión.

$$g_c(o) = g^{-1}(o) \quad (2.60)$$

Según la Ecuación (2.60), el controlador $g_c(o)$ debe realizar la operación inversa de la planta o proceso $g(o)$, y esta ecuación sintetiza la idea básica de inversión. Sin embargo, existen razones que hacen físicamente irrealizable este inverso ideal y, por lo tanto, el controlador implementa un inverso aproximado del proceso.

Los factores que hacen que este tipo de control se pueda o no se pueda implementar físicamente son los siguientes:

Estabilidad. Se necesita que $g^{-1}(o)$ sea estable para que se tenga la señal de control $u(t)$ acotada.

Causalidad. Para que el controlador sea físicamente realizable debe de ser causal. Por ejemplo, las plantas que tienen retardo de transporte el inverso es físicamente irrealizable.

Actuación limitada. Imposible obtener un inverso perfecto debido a que es difícil la variación de la señal $u(t)$ en los actuadores reales.

Incertidumbre. Debido a los errores de modelado de la planta, el inverso ideal de un modelo no implica un inverso perfecto de la planta real.

Inversión de sistemas de fase mínima

Si se tiene una planta de fase mínima, una forma de obtener un inverso aproximado consiste en agregar un filtro $F(s)$ con la función de transferencia dada en la Ecuación (2.61), a la inversa teórica de la planta.

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda \cdot s + 1)^n} \quad (2.61)$$

Donde; λ y n se eligen de forma que $Gc(s)$ resulte en una función de transferencia propia.

Inversión de sistemas de fase no mínima

Para los sistemas de fase no mínima se complica la inversión de la dinámica, ya que los ceros de fase no mínima del sistema original pasan a ser polos inestables en el sistema inverso.

En el sistema de la Ecuación (2.62), $B_m(z)$ es el polinomio del numerador que contiene a los ceros de la fase mínima y $B_n(z)$ el polinomio que contiene a los ceros de fase no mínima.

$$G(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{B_m(z) \cdot B_n(z)}{A(z)} \quad (2.62)$$

Para obtener el inverso aproximado se engloban dos grupos:

Inversión exacta: usa de forma directa el inverso exacto, aunque sea inestable.

Inversión aproximada: usa una aproximación estable del inverso exacto inestable.

El inverso exacto causal del sistema 2.62 es el dado por la Ecuación (2.63).

$$G^{-1}(z) = \frac{A(z)}{z^q \cdot B_m(z) \cdot B_n(z)} \quad (2.63)$$

Debido a que el número de raíces del polinomio $A(z)$ no siempre es igual al número de raíces del producto del polinomio $B_m(z)$ por el polinomio $B_n(z)$, se requieren q unidades de retardo para asegurar una implementación causal de $G^{-1}(z)$. Usando (2.63) como el inverso exacto, producirá que la salida $Y(z)$ sea igual a la referencia deseada $R(z)$ con un retardo de q muestras; es decir,

$$Y(z) = \frac{1}{z^q} \cdot R(z) = \frac{1}{z^q} \cdot \frac{N(z)}{D(z)} \quad (2.64)$$

2.6.3. Modelo de referencia

En ocasiones no se quiere que el sistema siga exactamente la señal de entrada, sino obtener una repuesta de la mejor manera posible de la planta. Para esto se añade un modelo de referencia, de tal manera que la señal de salida de la planta debe asemejarse a la señal de salida de dicho modelo de referencia. La idea de este tipo de control fue de Whitaker [Osburn, Whitaker y Kezer, 1961].

2.7. Conclusiones del capítulo

En este capítulo fue presentado el modelo termoeléctrico de la celda solar. El modelo fue plateado en tres partes diferentes, pero que al final se conjuntan y unen para obtener el modelo completo. se presentaron las bases matemáticas que conforman cada una de las etapas, así como la obtención del modelo del panel solar, que está compuesto por la conexión de varias celdas solares. Se expusieron dos tipos diferentes de conexión entre celdas.

También se presentaron los fundamentos teóricos para el planteamiento del control, el cual se presenta en el Capítulo 4.

Capítulo 3

Simulación del panel solar

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan las simulaciones de la celda y del panel solar. También se muestran los resultados considerando una irradiación y temperatura constante en un principio, para después mostrar los resultados cuando la irradiación y temperatura varían durante un día. Adicionalmente se presenta una sección donde se muestra el efecto de sombreado sobre dos celdas solares. Los modelos son implementados en la plataforma de Matlab Simulink ®.

3.2. Simulación del panel solar con irradiación y temperatura constante

3.2.1. Simulación de la celda solar

Las curvas características de los paneles solares están bien definidas, siendo las curvas de corriente - voltaje y la de potencia - voltaje las que son reportadas en las hojas de datos de los fabricantes.

De esta manera, se presentan las respuestas a la simulación del modelo de la celda solar, considerando una irradiación y temperatura constante.

El esquema completo de la simulación de la celda solar implementado en Matlab Simulink ®, es mostrado en la Figura 3.1.

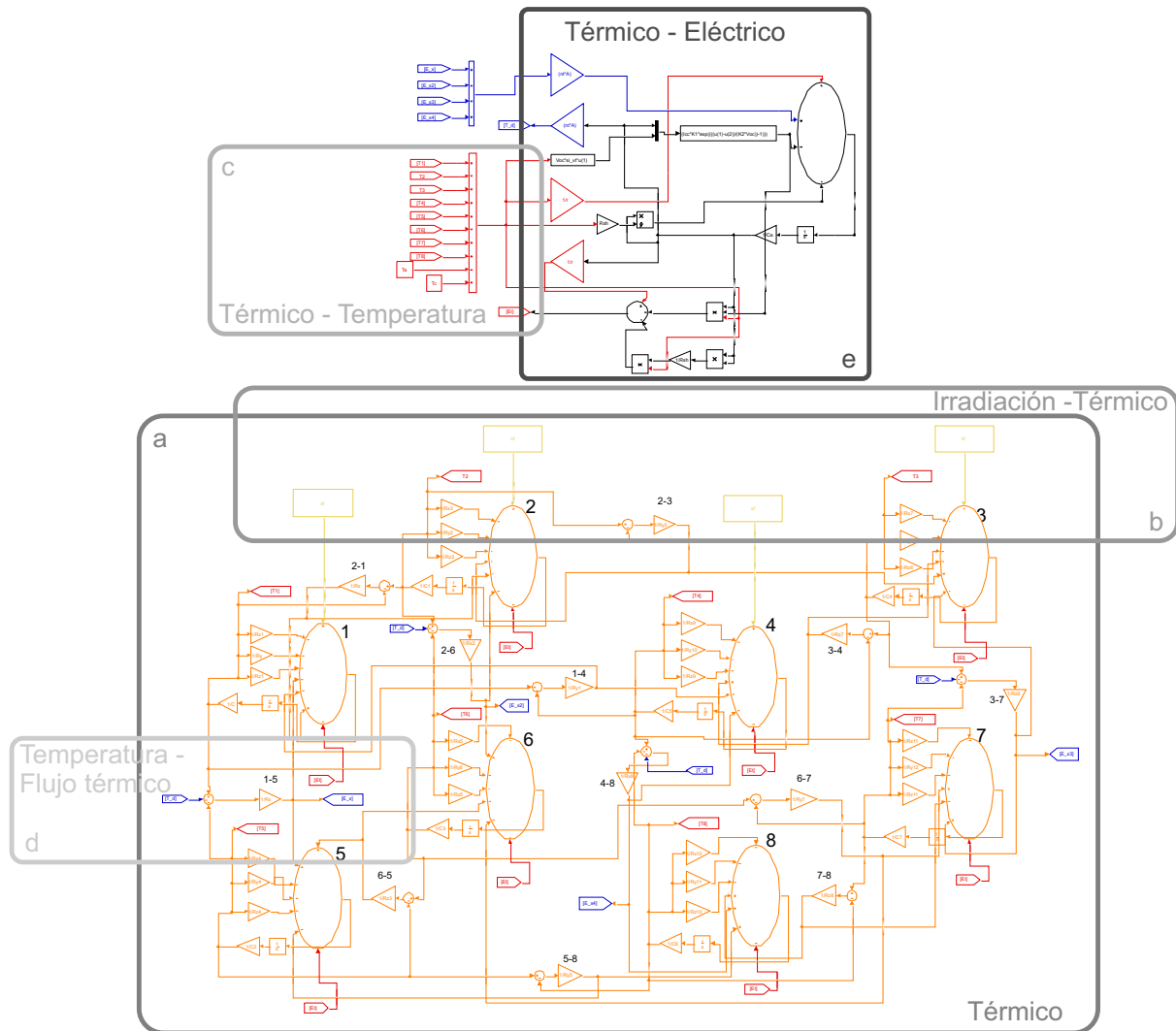


Figura 3.1: Esquema de simulación de la celda solar.

En la Figura 3.1 se destacan en un recuadro las partes principales de las cuales está compuesta la celda solar, y que ya fueron descritas en el Capítulo 2. Los valores numéricos para llevar a cabo la simulación son mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Valores numéricos para la simulación de la celda solar [Weiner, 1992]

$I_{cc} = 3.56A$	$A = 0.01m^2$	$A = 148W/mK$	$\rho = 0.117kg$
$R_{sh} = 6.707\Omega$	$c = 712j/kg$	$v_{oc} = 0.6v$	$C1 = 129.6 \exp^{-9}$
$C2 = 59.5 \exp^{-3}$	$l_x = 10cm$	$l_y = 10cm$	$Cp0 = 712.0$
$M0 = 0.014625$	$Lx0 = 0.00502361528$	$A0 = 0.005$	$Rxix = 0.005023615286$
$Rx_A = 0.01$	$Rx_{tc} = 148.0$	$Ry1ly = 0.1$	$Ry1_A = 0.005$
$si_vt = -0.00157$	$K2 = 0.0595$	$Ca = 0.1$	$Cp7 = 712.0$
$r = 588.235294$	$nt = 0.17$	$T_a = 290$	$T_b = -290$
$sf = 1000$			

Con los parámetros utilizados, la curva característica de corriente - voltaje (I-V), se muestra en la Figura 3.2, donde se puede observar que la corriente de corto circuito de la celda es de $I_{cc} = 3.45A$, así como el voltaje de circuito abierto $V_{oc} = 0.6V$. La curva muestra la respuesta tradicional y esperada de una celda solar. Es importante mencionar que para esta respuesta se consideró una irradiación constante de $1000W/m^2$ y la temperatura ambiente y de la celda, ambas, tomando diferentes valores.

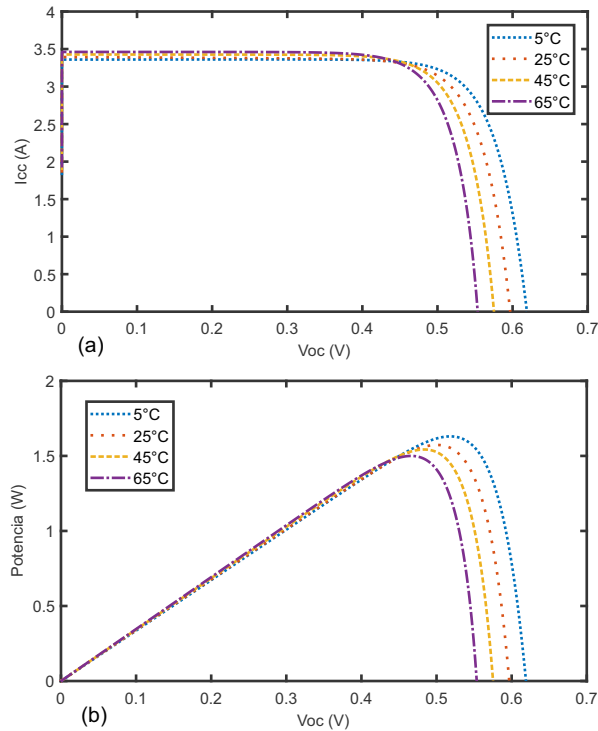


Figura 3.2: Resultados con diferentes temperaturas, a) Corriente y b) Potencia.

Normalmente, se presenta la curva de potencia, con el propósito de identificar cuánta potencia se encuentra proporcionando la celda. De esta manera, la Figura 3.2 muestra la curva potencia - voltaje (P-V) obtenida en la simulación de la celda solar.

Como puede apreciarse, la potencia máxima proporcionada por la celda es de alrededor de $1.7W$ Figura 3.3, en su punto máximo.

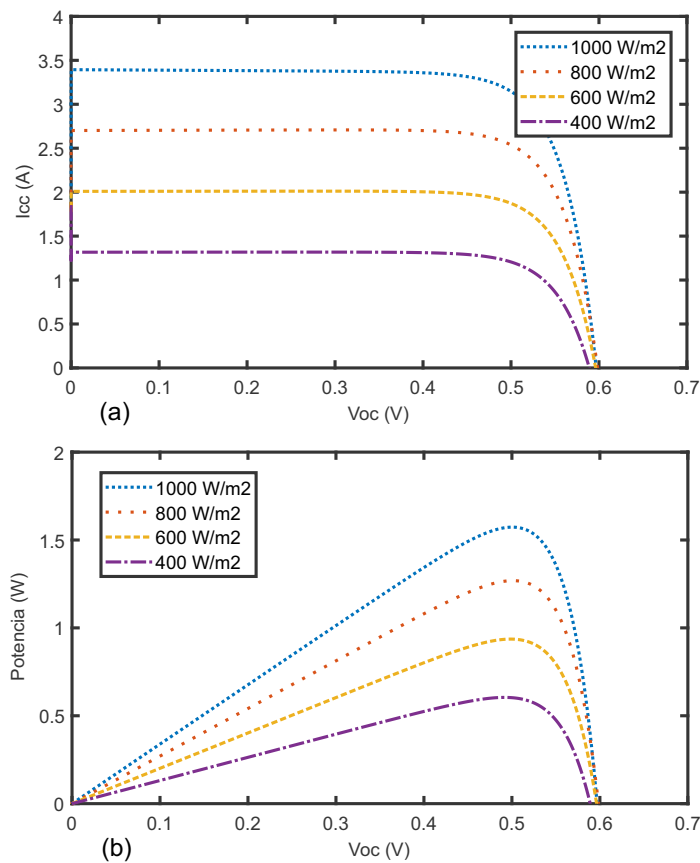


Figura 3.3: Resultados con diferentes irradiancias, a) Corriente y b) Potencia.

La variación de la irradiación constante puede realizarse para comprobar el comportamiento que tiene la corriente y voltaje a diferentes valores de irradiación en su superficie, manteniendo el valor de la temperatura constante ($25^{\circ}C$). Lo anterior se realiza considerando cuatro valores de irradiación diferentes, los resultados se muestran en la Figura 3.3.

La variación de la irradiación (Figura 3.3a) influye directamente en la corriente generada por la celda, a menor irradiación, la corriente disminuye considerablemente. En cuanto al voltaje, éste se mantiene con una variación menor al 1 %, conforme la corriente disminuye. Como consecuencia de lo anterior, es evidente que la potencia generada por la celda disminuirá en la misma relación en que disminuye la corriente (Figura 3.3b).

Cuando se varía la temperatura y se mantiene la irradiación constante ($1000W/m^2$), la corriente aumenta y el voltaje disminuye conforme la temperatura aumenta (Figura 3.3a). Y de la misma forma, la potencia generada por la celda disminuye conforme la temperatura aumenta, lo cual se puede observar en la Figura 3.2b.

Finalmente, el modelo de la celda solar permite simular una irradiación no uniforme en la superficie de la celda. Lo anterior, es debido a que para el modelo se consideraron 4 divisiones o elementos en la parte superior de la celda, lo que permite simular una irradiación diferente en cada elemento. Para mostrar los resultados, se considera que el elemento 4 de la parte superior de la celda no es irradiado, es decir que se tienen $0W/m^2$. Los resultados se muestran en la Figura 3.4.

Como puede observarse, al tener solamente $\frac{3}{4}$ de la superficie total de la celda irradiados, la corriente disminuye considerablemente (Figura 3.4a), así como consecuencia se tiene una disminución de la potencia (Figura 3.4b).

La importancia del tener un modelo termoeléctrico como el presente, permite observar algunas otras variables dentro del modelo, que no son comúnmente utilizadas por la mayoría de las personas familiarizadas con las celdas solar. Sin embargo, pudieran ser de gran importancia para personas que se dedican al diseño o también para poder observar el desgaste o degradación que se pudiera tener en la celda.

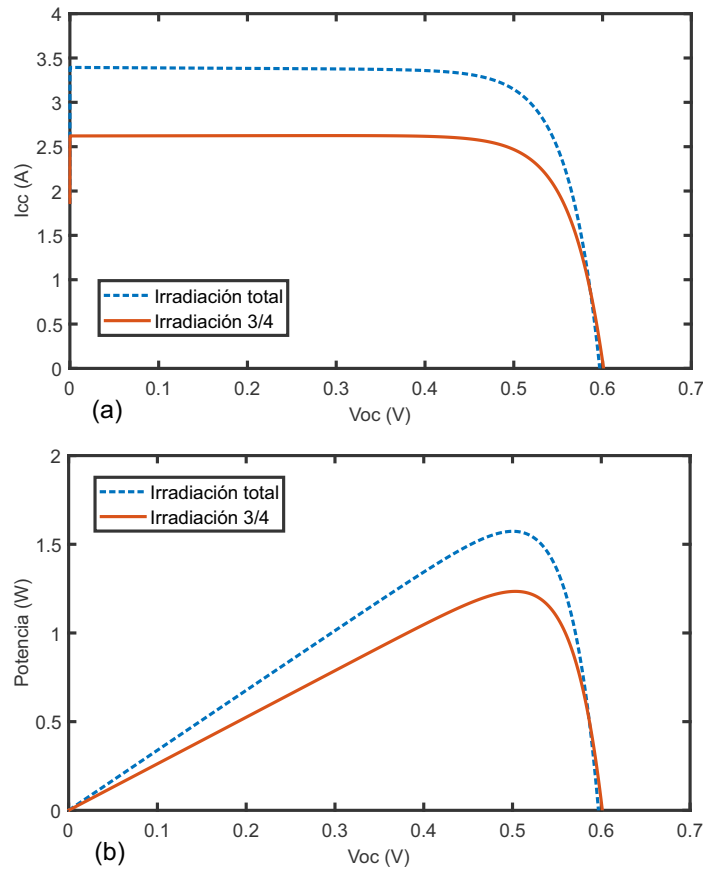


Figura 3.4: Resultados con una parte no irradiada, a) Corriente y b) Potencia.

3.2.2. Simulación del efecto de puntos calientes

El efecto de las uniones o puntos calientes que se hace presente por el sombreado parcial o total de celdas en los paneles solares fue descrito en la Sección 2.6. Para mostrar este efecto, se realiza una simulación en la cual se considera únicamente la conexión de 2 celdas solares, según se muestra en el esquema de simulación de la Figura 3.5.

En la Figura 3.5 se muestra la conexión en paralelo de dos celdas solares. Las dos celdas se encuentran conectadas exteriormente a una fuente de voltaje de 0.55 V, y la corriente que genera cada una de las celdas es de 3.4 A. Se realiza la simulación considerando que una de las celdas en el instante de tiempo igual a 0.06 segundos es cubierta completamente, de tal manera que la irradiación que recibe es de 0 W/m^2 . La otra celda es

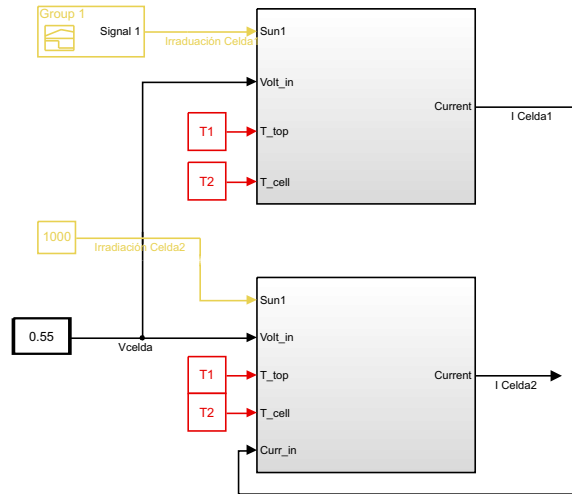


Figura 3.5: Conexión en paralelo de dos celdas solares.

irradiada durante toda la simulación con 1000 W/m^2 . La Figura 3.6 muestra los resultados de la simulación.

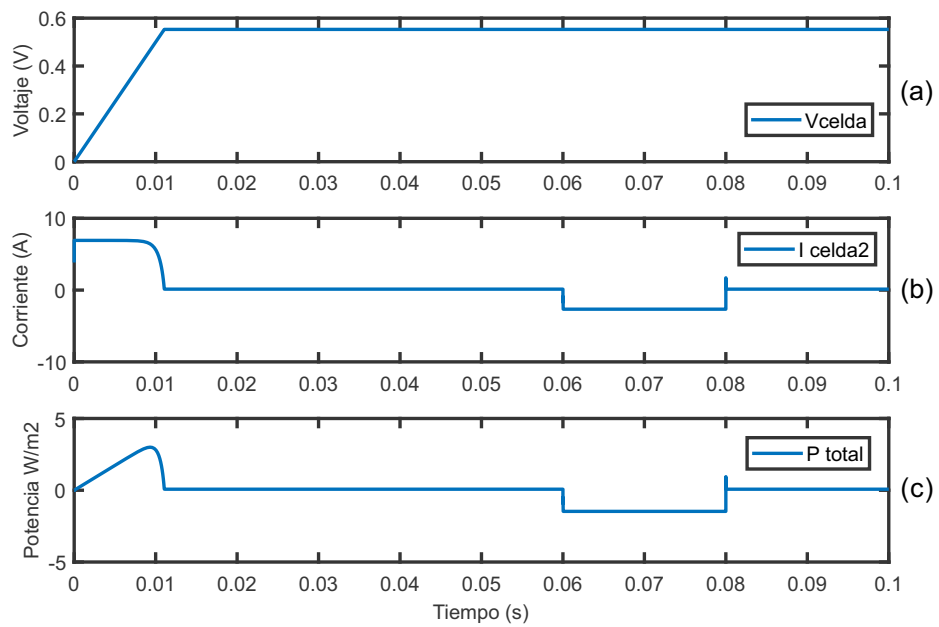


Figura 3.6: Resultados de celdas conectadas en paralelo efecto sombra, a) voltaje del arreglo, b) corriente de salida celda, c) potencia total generada.

El voltaje de las dos celdas (V_{celda}), se mantiene en 0.55 V durante toda la simulación (ver Figura 3.6a) debido a que es una fuente de entrada. Por otra parte, la corriente de la celda 2 al inicio de la simulación tiene un valor de 6.9 A, el cual se mantiene constante algunos instantes, para después comenzar a decaer a 0.1 A alrededor de los 0.01 segundos, con la forma exponencial característica de la corriente. Al instante de 0.06 segundos, la irradiación en la celda 1 es eliminada (ver Figura 3.7a), provocando que la corriente en la celda 2 tenga un valor de -2.7A (Figura 3.6b). Esto significa que la celda paso de generar corriente a consumirla y provocar el calentamiento y posible destrucción de la celda, este tipo de efecto se presenta cuando se tiene un sombreado de la celda lo que hace que el sentido de la corriente cambie, por esa razón se tiene una corriente negativa. Al multiplicar la corriente por el voltaje de la celda se obtiene la potencia P_{total} , la cual presenta la curva característica al inicio de la simulación, y en el momento de eliminar la irradiación de la celda 1, esta se vuelve negativa debido al cambio de signo en la corriente (Figura 3.6c).

El perfil de la irradiación en ambas celdas, para esta simulación es mostrado en la Figura 3.7a y 3.7b para la irradiación sobre la celda 1 y celda 2, respectivamente.

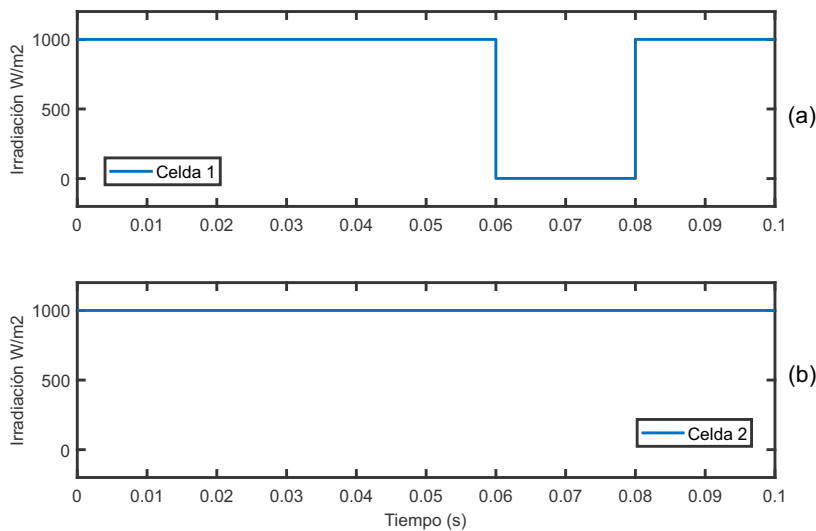


Figura 3.7: Simulación de irradiación en, a) celda 1, b) celda 2.

3.2.3. Simulación del panel solar

Para la simulación del panel solar, se toman en cuenta los parámetros indicados en la Tabla 3.1. Solamente se modifican algunos de los parámetros indicados en esa tabla, con el propósito de obtener los resultados próximos a los que se tiene en un panel solar comercial CS6k-280P de CanadianSolar. Los parámetros que fueron modificados son los mostrados en la Tabla 3.2.

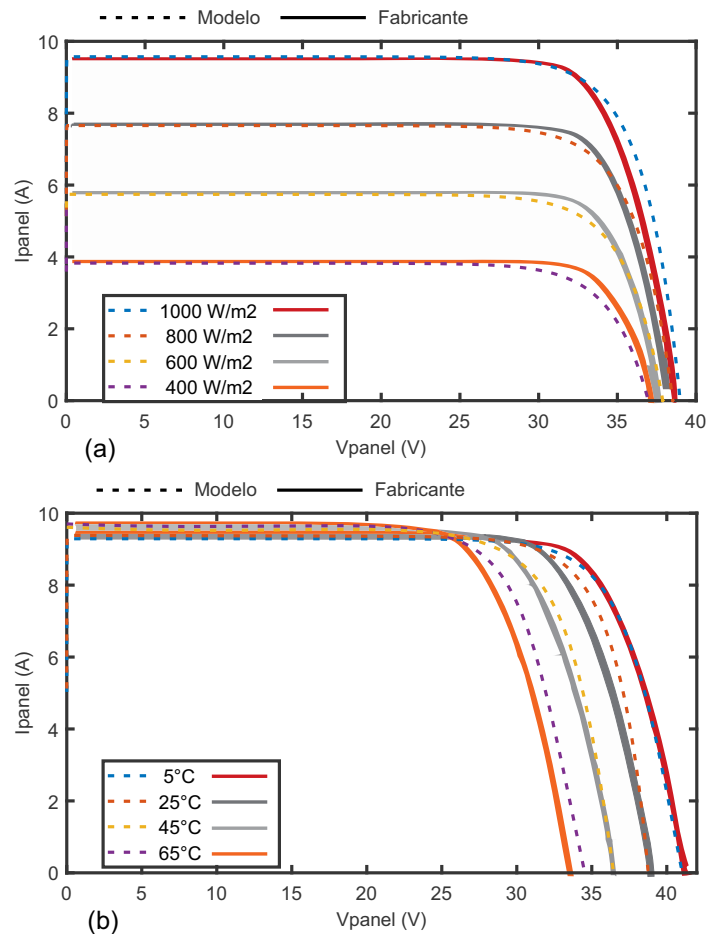


Figura 3.8: Resultados con variación constante de, a) Irradiación y b) Temperatura.

El diagrama de Simulink para realizar la simulación es el mostrado en la Figura 3.1, y los resultados de una variación constante de la irradiación y de la temperatura se representan en las Figuras 3.8a y 3.8b, respectivamente.

En esta misma figura con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con los

Tabla 3.2: Tabla de parámetros modificados.

Parámetro	Valor
nt	0.47
I_{cc}	9.52
r	212.7
V_{oc}	0.65

mostrados en la hoja de datos del fabricante se unen ambas gráficas y se muestra que son muy similares, teniendo una diferencia muy pequeña entre ambas gráficas. Por lo tanto, se puede decir que el modelo del panel solar presenta resultados satisfactorios.

El mismo comportamiento que se tiene para la celda solar se ve reflejado en los resultados de la simulación del panel solar, tanto para una variación constante de la irradiación, como de la temperatura.

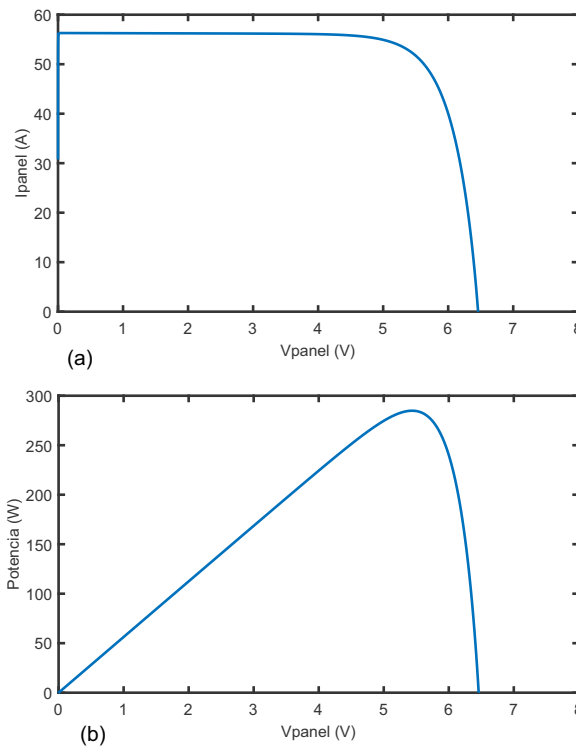


Figura 3.9: Gráficas del panel solar de a) I-V, b) P-V.

Como fue mencionado en el capítulo anterior, la conexión de las celdas en panel solar puede realizarse de diferentes formas. En la Figura 3.9 se muestran las gráficas de la curva I-V (Figura 3.9a) y de la P-V (Figura 3.9b) para el panel solar de la Figura 2.15, el cual corresponde a la conexión de 10 celdas en serie y el paralelo de 6 arreglos de este tipo, para tener un total de 60 celdas en el panel.

Los resultados de simulación, reflejan corriente mayor para este arreglo, lo cual es debido a que se tienen en paralelo 6 arreglos (9.45 A por arreglo). Por otra parte, el voltaje de circuito abierto disminuye a un valor 6.4 V (0.64 V por celda conectada en serie).

3.3. Simulación del panel solar con irradiación y temperatura variable

La variación de la irradiación, así como la de la temperatura en una celda o panel solar tiene repercusión en su respuesta de voltaje y/o corriente. Lo anterior ya fue mostrado en la Sección 3.2, considerando una variación constante de la irradiación y temperatura para obtener las curvas características de respuesta del panel.

En esta sección se presentan los resultados de la simulación del modelo cuando se varían la irradiación (como la descrita en la Sección 2.3.1), y la temperatura que hay durante un día.

3.3.1. Variación de la irradiación

El modelo que considera la variación de la irradiación se desarrolló en Simulink, y representa la irradiación que se tiene durante las 24 horas del día. El modelo se formula con todas las expresiones presentadas en la Sección 2.3.1. Así, la Figura 3.10 muestra el diagrama implementado.

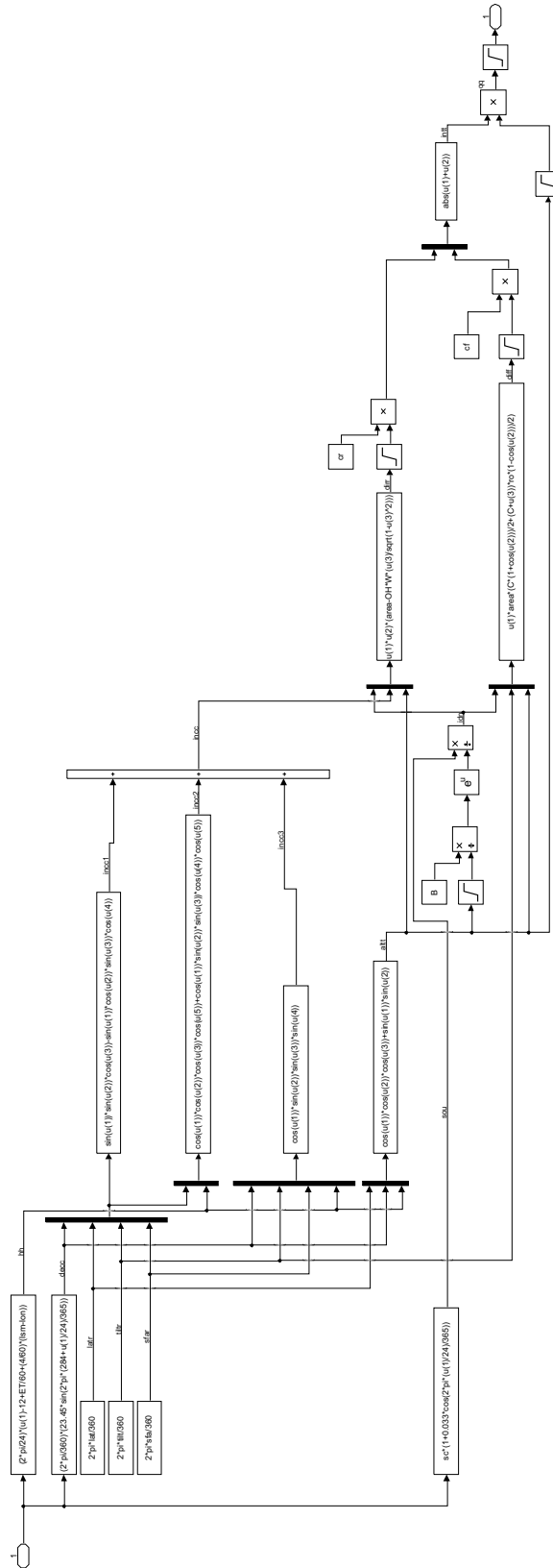


Figura 3.10: Modelo para la variación de la irradiación

El modelo es implementado como un bloque en la simulación, y éste reemplaza a la entrada constante que se tenía definida en la estructura de cada celda. La gráfica de la irradiación es mostrada en la Figura 3.11, que muestra la cantidad de radiación solar por cada hora del día.

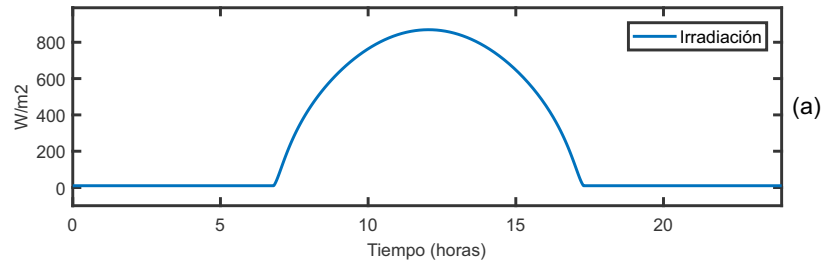


Figura 3.11: Comportamiento de la irradiación variante

En la Figura 3.12 se muestran los resultados de la simulación de la estructura de la celda solar reemplazando la entrada constante por el modelo de la variación de la irradiación Figura 3.11, en la cual se puede observar el comportamiento del voltaje y de la corriente de la celda en el transcurso de las 24 horas del día.

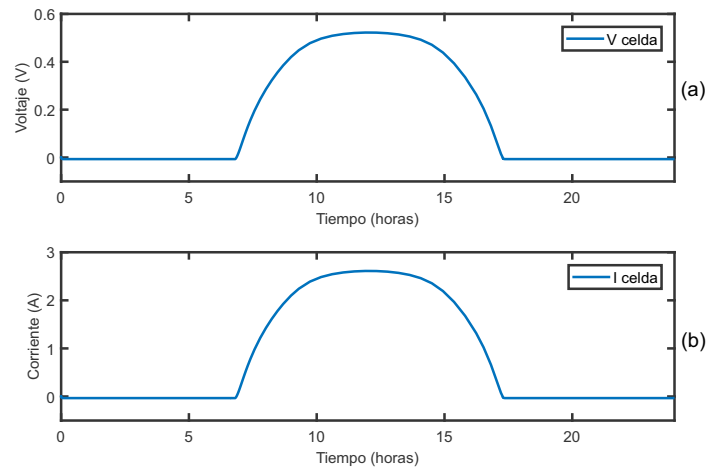


Figura 3.12: Resultados de la simulación de una celda solar, a) Voltaje y b) Corriente

3.3.2. Variación de la temperatura

Para la variación de la temperatura durante las 24 horas del día, se considera la temperatura ambiente registrada cada hora. Estos valores son utilizados en un bloque 1-D Lookup Table, el cual permite generar una gráfica de una dimensión en relación a los 24 datos registrados de temperatura en un día. La Figura 3.13 muestra la variación de la temperatura ambiente durante el día.

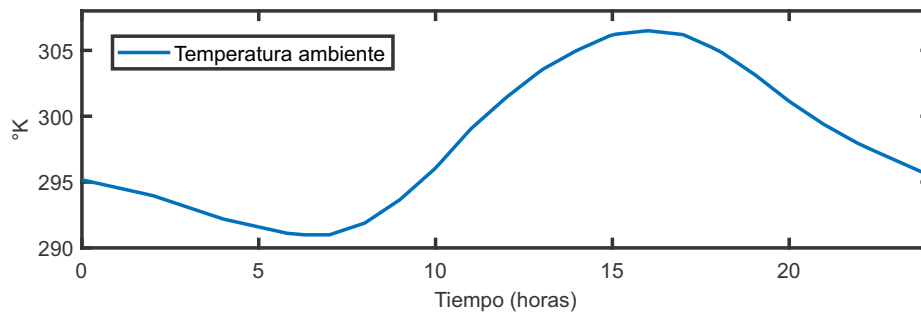


Figura 3.13: Variación de la temperatura ambiente durante el día.

En la Figura 3.14 se observan las variables de voltaje, corriente y potencia de la celda solar cuando es simulada con un perfil de temperatura real durante un día. El valor del voltaje (Figura 3.14a), de la corriente (Figura 3.14b) y de la potencia (Figura 3.14c) de la celda varía en relación al cambio de entrada en la temperatura ambiente y de la celda. Para esta simulación se consideró que la temperatura de la celda es mayor que la temperatura ambiente, pero que varía en la misma proporción.

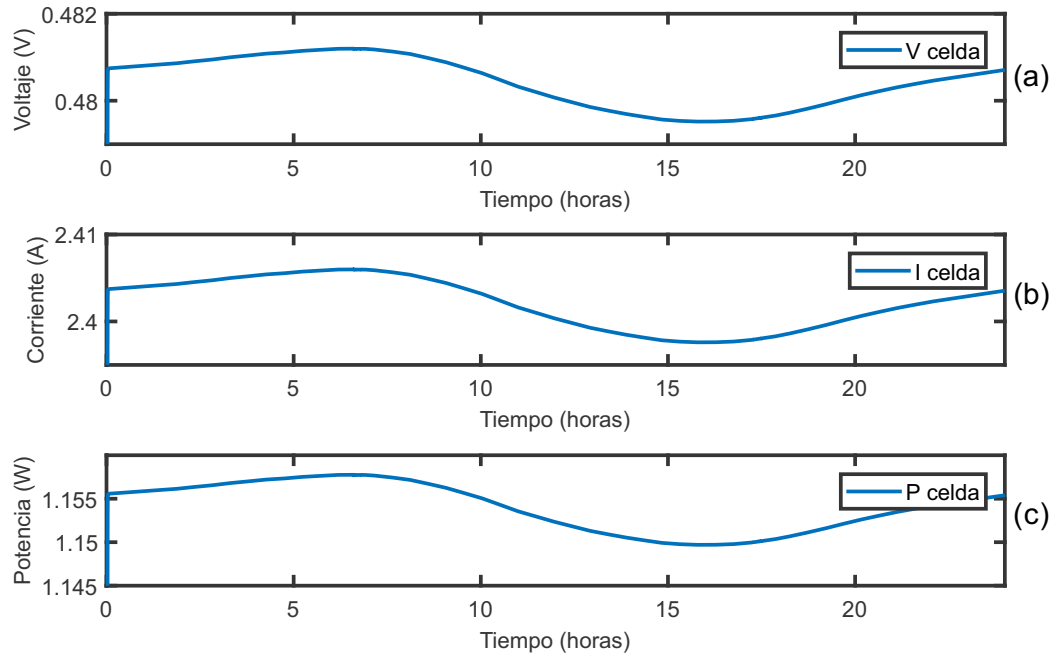


Figura 3.14: Variables de voltaje, corriente y potencia de la celda simulada con temperatura real durante el día, a) Voltaje, b) Corriente y c) Potencia.

3.4. Conclusiones

En este capítulo fueron presentadas las simulaciones del panel solar bajo diferentes condiciones de operación. Se realizó la simulación de la celda solar para verificar el funcionamiento esperado que tiene en cuanto a sus respuestas de I-V y de potencia. Estas mismas gráficas fueron obtenidas para el panel solar completo conectado en serie y también en serie-paralelo.

Los resultados de las gráficas del panel en conexión serie fueron comparadas con las gráficas proporcionadas por el fabricante, observando que tienen un error menor al 1%.

Se describió el escenario de una celda sombreada con el uso de solamente dos celdas conectadas en serie.

Se verificó el efecto de los puntos calientes entre celdas observando que la celda al tener este efecto empieza a consumir corriente lo que provoca que pudiera calentarse y dañarse.

Se reportaron las simulaciones realizadas considerando una irradiancia y temperatura variables para la celda solar.

Capítulo 4

Control del panel solar

4.1. Control

En este capítulo se presenta el control IP difuso inverso, desarrollado para el convertidor de corriente directa a corriente directa, el cual tienen como objetivo mantener el voltaje de salida en dicho convertidor, en relación a las variaciones o fluctuaciones que se presenten en la corriente de entrada. Dicha corriente corresponde a la corriente generada por el panel solar. Se describe el proceso de obtención del control, de su simulación y verificación del buen funcionamiento del control propuesto.

4.2. Estructura del control

El diagrama a bloques del sistema de control a desarrollar en esta tesis es el mostrado en la Figura 4.1. Consta de un controlador inverso de pre-alimentación *Feed Forward*(FF), que actuará como un inverso aproximado de la planta y un controlador difuso de realimentación *Feed Back*(FB), que complementará al controlador de pre-alimentación para cancelar ciertos efectos que no se tomen en cuenta en el diseño del controlador inverso.

De los bloques mostrados en la Figura 4.1 se puede mencionar que el que corresponde al denominado “Control Inverso”, contiene el controlador deducido por medio de una red neuronal. El correspondiente el modelo de referencia, es el modelo propuesto, de acuerdo a las características de la planta, para realizar un seguimiento de la referencia, y

el bloque correspondiente “Controlador Difuso” es utilizado para compensar los errores o perturbaciones que se tengan en la planta. Para obtener la estructura de control, se tienen que seguir una serie de pasos, los cuales se mencionan a continuación:

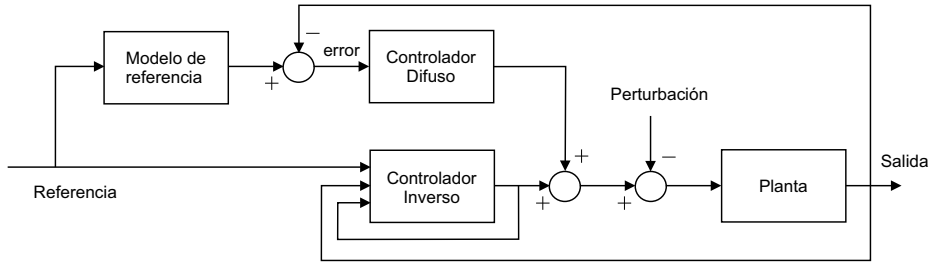


Figura 4.1: Diagramas a bloques del sistema de control.

1.- Identificar la planta del sistema. Esto se realiza con datos reales del sistema, o pueden ser utilizados valores sintéticos para su identificación.

2.- Definir el modelo de referencia que será utilizado en el control y en conjunto con el modelo inverso desarrollar un control aproximado para el seguimiento de trayectorias.

3.- Desarrollar la red o redes neuronales que representen al sistema, e implementarlas para observar su respuesta.

4.- La compensación de perturbaciones se realiza por medio de control difuso, el cual se desarrolla en esta etapa. Para hacerlo más robusto, es posible agregar una acción de control proporcional-integral [Betancor, 2015] o alguna otra, como la acción IP tratada en esta Tesis.

Estos pasos son utilizados para desarrollar la ley de control del inversor de corriente directa a corriente directa.

4.3. Convertidor de Potencia

El convertidor es una de las partes fundamentales con el cual se realiza el control de la potencia que está entregando el panel solar. El convertidor utilizado en esta tesis, se muestra en la Figura 4.2.

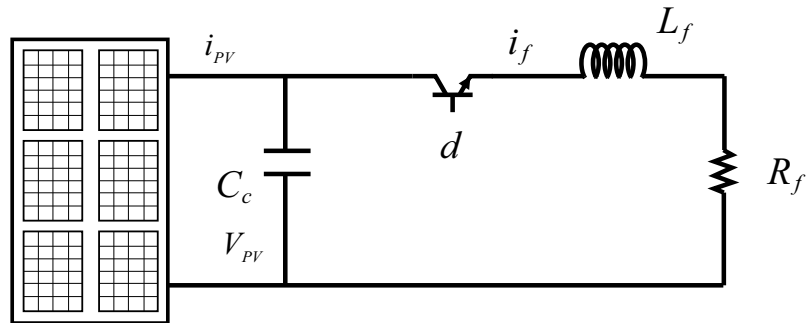


Figura 4.2: Convertidor utilizado.

Como puede observarse, el convertidor está conformado por una fuente de corriente como entrada i_{pv} , la cual está conectada en paralelo con una resistencia y capacitor C_c , con el fin de poder tener un voltaje de salida (V_{PV}), el cual será regulado por medio del dispositivo de conmutación para poder aumentar o disminuir el voltaje de salida del convertidor. El modelo del convertidor es planteado desde el punto de vista de su representación en diagramas a bloques. Así, la Figura 4.3 muestra su representación.

Se observa en el diagrama a bloques que el modelado del dispositivo de conmutación se está realizando con un sistema promedio, debido que la señal de conmutación del dispositivo (d), corresponde al ciclo de trabajo, y ésta es constante.

4.4. Desarrollo del control IP difuso inverso

Para el desarrollo del control propuesto, se siguen los pasos descritos en la Sección 4.3, aplicados al modelo de la Figura 4.3.

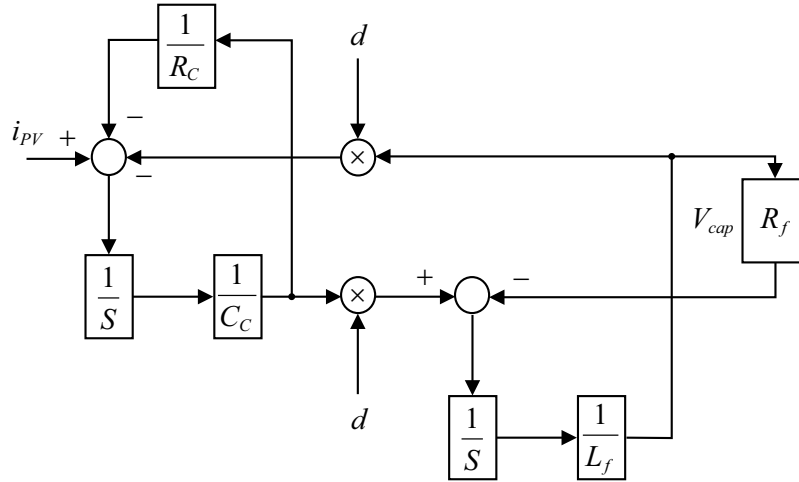


Figura 4.3: Diagrama a bloques del convertidor utilizado.

1er paso: La identificación de la planta es realizada utilizando el toolbox de Matlab®, system identification. Para realizar esto se simula el modelo del convertidor del diagrama a bloques de la Figura 4.4, el cual se encuentra en espacio de estados, a este se le pone una señal de entrada de tipo escalón en un rango de 0 a 1 variando su valor, con esto se obtienen los datos de salida de la planta, los cuales se introducen junto a los datos de entrada al toolbox de Matlab®, mencionado, de estos datos se utiliza el 80 % para la identificación y el 20 % para la validación de la planta. Para obtener la función de transferencia de la planta se especifica en el toolbox que se quiere en dominio discreto. También se especifica que se quiere una función con dos polos y un cero y así obtener la estimación de la función de transferencia con un porcentaje de error menor. La función de transferencia obtenida es la siguiente:

$$F(z) = \frac{870.2z^{-1}}{1 - 1.826z^{-1} + 0.8344z^{-2}} \quad (4.1)$$

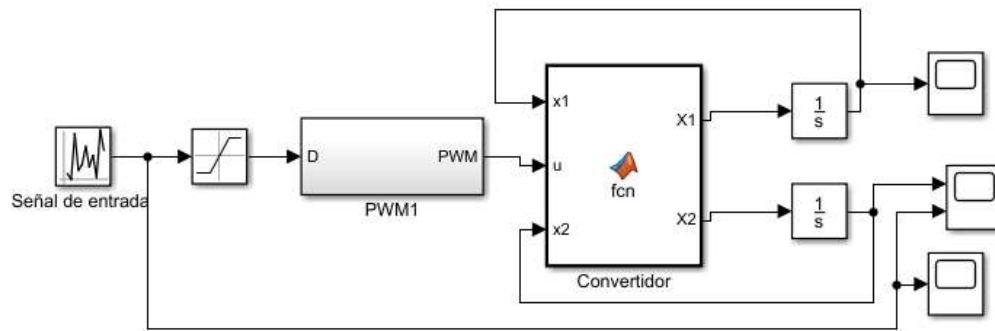


Figura 4.4: Diagrama a bloques del convertidor en espacio de estados.

El resultado de la estimación de la planta tiene una validación de 94.53 %, lo que quiere decir que es una buena aproximación con un error del 5.47 %.

2do paso: En el modelo de referencia deben quedar especificadas las características que se quieren obtener del sistema final controlado, tanto en el régimen transitorio como en el régimen permanente. Para establecer este modelo de referencia, se debe tener un buen conocimiento de la dinámica de la planta y de ciertas características operativas, como pueden ser los límites máximos, tanto de entrada como de salida, o la velocidad de respuesta. Esta información se puede conseguir a partir de las características técnicas de que se dispongan y de las pruebas empíricas realizadas en el proceso de identificación. El modelo de referencia es elegido de acuerdo al tipo de señal que se tendrá a la entrada. Si es una señal que tiene cambios tipo escalón, con una función de transferencia de primer orden bastará. Si por el contrario se tiene una señal de tipo rampa a la entrada, se hace necesario la utilización de un modelo de referencia de segundo orden. Como la planta tiene una entrada tipo escalón se eligió un sistema de referencia de primer orden. Los parámetros del modelo de referencia se eligen de acuerdo a las condiciones a las cuales se quiere que opere la planta, y estos pueden ser obtenidos por medio de una simulación, o pueden ser especificados por el diseñador. En este trabajo se opta por la segunda opción. El modelo de referencia especificado es mostrado en la función de transferencia (4.2).

$$g(o) = \frac{0.8z^{-1}}{1 - 0.2z^{-1}} \quad (4.2)$$

3er paso: Desarrollo del control inverso. Para esta parte, y como lo indica la Figura 4.3, se hace necesario invertir el numerador y denominador de la planta identificada, para que, en conjunto con el modelo de referencia, se tenga ya un controlador en lazo abierto del sistema (Figura 4.5).

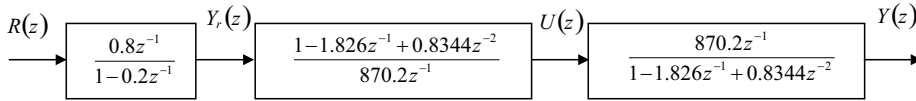


Figura 4.5: Controlador en lazo abierto.

La red neuronal que se realizó es una red en la que se emplea el método de aprendizaje offline, ya que se calculan los pesos para realizar la prueba de su funcionamiento y estos pesos una vez probados y verificando su funcionamiento permanecen fijos para la red. Caso contrario si fuera una red con el método de aprendizaje online, esta aprendería durante su funcionamiento y cambiarían el valor de sus pesos.

La red neuronal utilizada consta de una única neurona con dos entradas y una salida. La entrada $R(k)$ tiene un peso de 0.4, la entrada $y(k)$ un peso de -0.3 y la salida $u(k)$ tiene una función de activación lineal, los tipos de de redes neuronales se especifican en el Apéndice B.

Para obtener la red neuronal que corresponde al bloque de controlador inverso, es necesario hacer que $y(k)$ sea igual a $y_r(k)$; esto en ecuaciones de diferencias. Realizando la igualación se obtiene la Ecuación (4.3)

$$u(k) = -\frac{1.626}{870.2}y(k) + \frac{0.8344}{870.2}y(k-1) + \frac{0.8}{870.2}R(k) \quad (4.3)$$

Así, la señal de control puede generarse a partir de una red neuronal considerando la siguiente función de activación lineal.

$$u(k) = -w_1y(k) + w_2y(k - 1) + w_3R(k) \quad (4.4)$$

4to paso: Se desarrolla el controlador difuso, el cual permite que la respuesta de salida del sistema sea la deseada ante perturbaciones que se presenten en el sistema. Para desarrollar esta parte, se hace uso del toolbox de Fuzzy logic design de Matlab®.

Se utiliza un control tipo IP difuso es utilizado para eliminar el error en régimen permanente que pueda presentar el control inverso; en caso en que exista un error entre la salida del modelo de referencia y la salida de la planta. Para la implementación del control IP difuso se utiliza la estructura mostrada en la Figura 4.6.

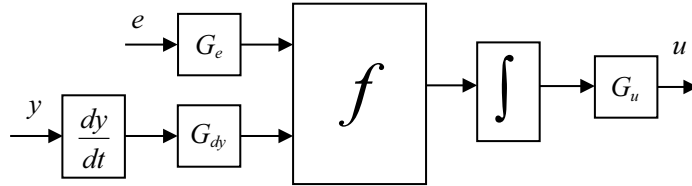


Figura 4.6: Estructura del control IP difuso.

Las entradas al sistema de lógica difusa son el error e y la derivada de la salida dy , teniendo como salida la señal u_{ip} . La lógica difusa está definida por:

- Los conjuntos difusos de las entradas y salida
- Las reglas de relación de los conjuntos difusos
- Los métodos utilizados para cada regla (and, or, then)
- El método utilizado para la defusificación

Primeramente, se define el universo de discurso para la salida en el intervalo $[-1, 1]$. Las variables lingüísticas seleccionadas son: NG (negativo grande), NP (negativo pequeño), C (cero), PP (positivo pequeño), y PG (positivo grande). Para todos los conjuntos, se utilizan conjuntos tipo triangulares. Las reglas son formadas de acuerdo a la elección que se desea. Como el error es la diferencia entre la salida del modelo de referencia y la salida de la planta, para valores positivos cuando la salida de la planta tiene un valor inferior a la salida deseada del modelo de referencia el error es positivo y es negativo en caso opuesto.

Con las 5 variables lingüísticas seleccionadas y las funciones de pertenencia que se plantean son las mostradas a continuación:

$$\begin{aligned}
 &\text{if}(e \text{ is ENG}) \text{ then}(pw \text{ is PNG}) \\
 &\text{if}(e \text{ is ENP}) \text{ then}(pw \text{ is PNP}) \\
 &\quad \text{if}(e \text{ is EC}) \text{ then}(pw \text{ is PC}) \\
 &\text{if}(e \text{ is EPP}) \text{ then}(pw \text{ is PPP}) \\
 &\text{if}(e \text{ is EPG}) \text{ then}(pw \text{ is PPG})
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Las ganancias G_e , G_{dy} y G_u , son ajustadas con el método de prueba y error, en función de la respuesta obtenida. Los valores numéricos de estas son: $G_e = 1.2$, $G_{dy} = -0.0005$ y $G_u = 2$.

4.5. Simulación del controlador

Como se mostró en la Figura 4.1, el control completo del sistema requiere de dos etapas bien definidas para su correcto funcionamiento: la referente al control inverso y la del control IP difuso.

Para mostrar la importancia de estas dos etapas se presenta primeramente la simulación del bloque del control inverso (red neuronal). La Figura 4.7 muestra el diagrama de simulación del control inverso y la planta.

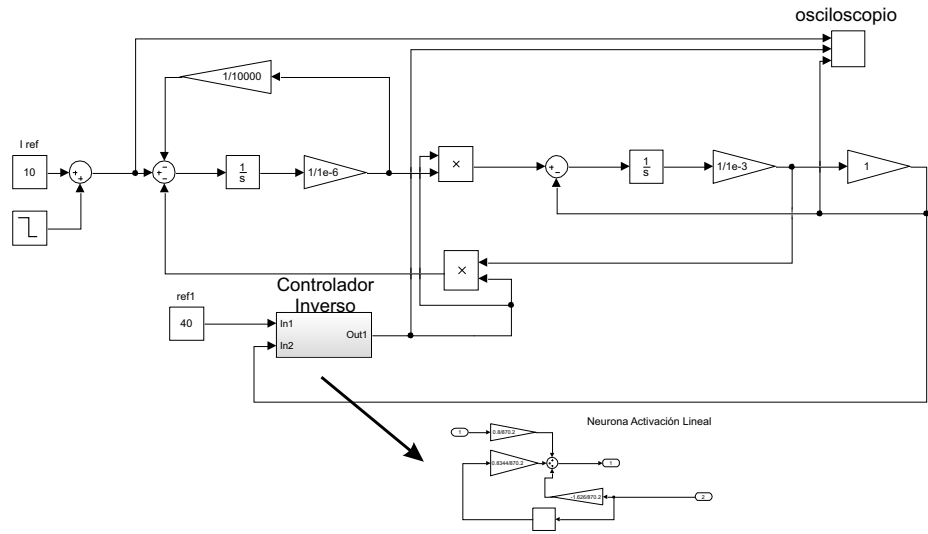


Figura 4.7: Simulación del control inverso y la planta.

Las ganancias w_1 , w_2 , w_3 permiten tener una estructura de control parecida a la de un controlador proporcional, esto es debido a que se está considerando una función lineal a la salida de la neurona.

Para realizar la simulación, se introduce una referencia del voltaje que se requiere a la salida del convertidor, y se hace un cambio en esta entrada, con el propósito de observar el comportamiento del sistema. La Figura 4.8 muestra los resultados obtenidos.

Como puede observarse, la variación de la corriente de entrada en un 50% tiene una repercusión sobre el voltaje de salida que se encuentra regulando. La referencia de voltaje fijo en 40v. El error que se presenta al momento de realizar el cambio de referencia en la entrada es compensado por el controlador IP difuso. Esto es mostrado en el diagrama de simulación de la Figura 4.9, donde se identifica claramente el control IP difuso y el modelo de referencia también. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 4.10.

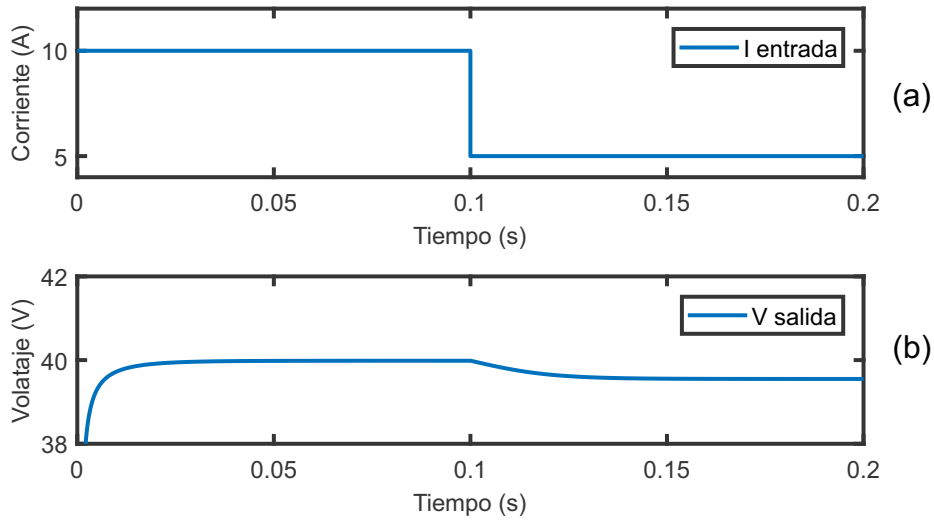


Figura 4.8: Resultados obtenidos de la simulación de la planta con el controlador inverso, a) Corriente de entrada y b) Voltaje de salida.

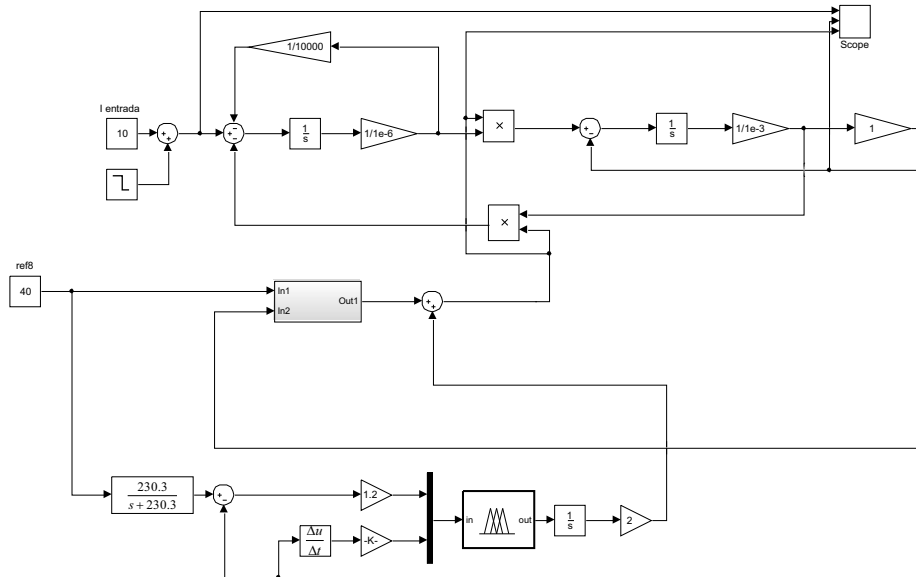


Figura 4.9: Diagrama a bloques del sistema con el control difuso.

En la Figura 4.10b es evidente que el tiempo de asentamiento al inicio de la simulación es muy considerable, con respecto a que se había presentado al utilizar únicamente el control inverso. Esto es debido a la acción de control IP, la cual introduce siempre un retraso de fase al inicio de la simulación. Las ventajas que presenta es que reduce el sobre-

impulso cuando su respuesta es sobreamortiguada. Dejando de lado un poco el transitorio al inicio de la simulación, es evidente que el error que se presentaba cuando se disminuye la referencia de entrada, prácticamente se elimina.

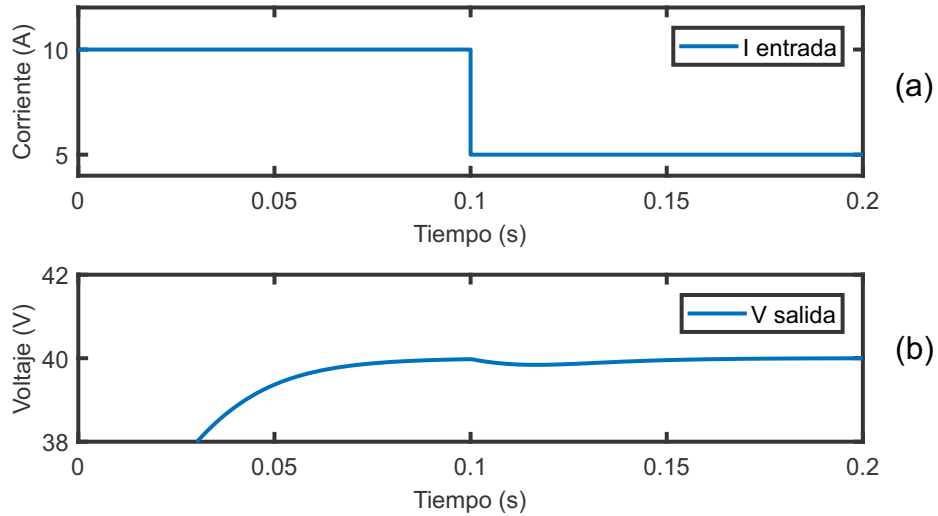


Figura 4.10: Resultados obtenidos de la simulación con el control IP difuso a) Corriente de entrada y b) Voltaje de salida.

4.6. Control del panel solar

Para realizar la simulación del panel solar conectado al inversor y el control IP difuso inverso, las Figuras 2.14 y la Figura 4.9 se conjuntan para formular el sistema de control del panel solar.

Para la simulación del panel solar, se toman en cuenta las condiciones ideales de este, es decir que la irradiancia y también la temperatura ambiente de la celda son consideradas constantes. La Figura 4.11 muestra los resultados de la simulación.

En la Figura 4.11a se observa la corriente de salida del panel solar, en donde en el instante igual a 5 segundos la irradiancia de algunas de las celdas se quita, haciendo que la corriente que genera el panel baje bruscamente. El impacto de la disminución de la corriente generada por el panel, no tiene una repercusión considerable en el voltaje de salida

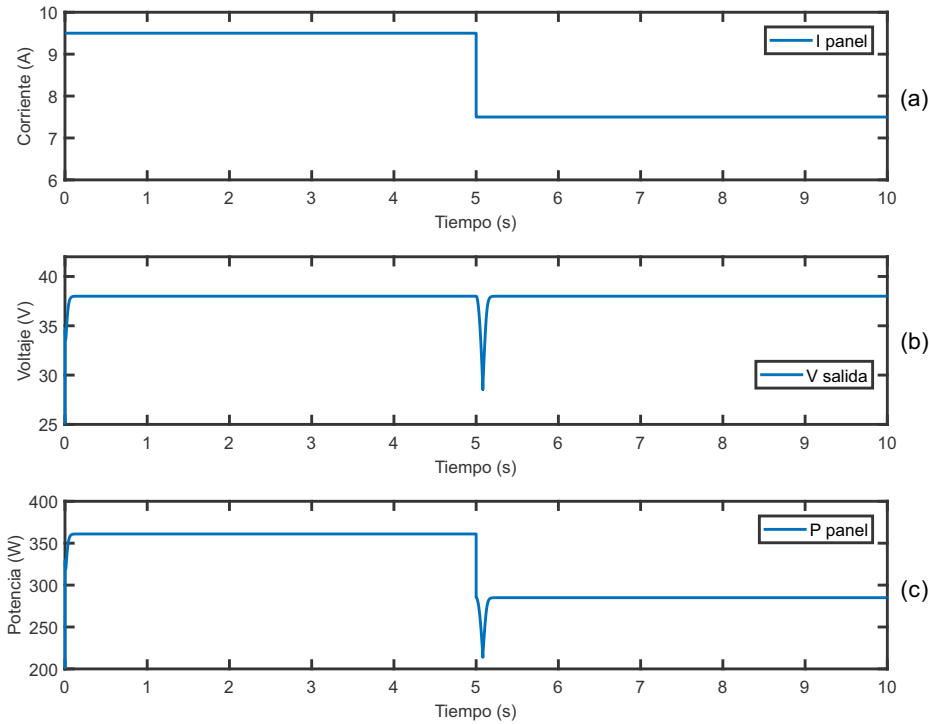


Figura 4.11: Resultados de la simulación del panel solar a) Corriente del panel, b) Voltaje de salida y c) Potencia el panel.

(Figura 4.11b), debido al control implementado en el convertidor. La potencia generada por el panel, se ve disminuida, en medida a como la irradiación disminuye en la incidencia sobre algunas de las celdas (Figura 4.11c). Se puede apreciar como la potencia máxima del panel es de cerca de 360W.

4.7. Conclusiones

En este capítulo se mostró el desarrollo del controlador IP difuso, aplicado a un convertidor de corriente directa a corriente directa. Las bases teóricas que sustentan la inversión de los sistemas fueron expuestas. Se verificó mediante simulaciones, la ley de control. Primeramente, se verificó el comportamiento del control inverso, el cual involucra las redes neuronales, observándose en su respuesta que presenta un error en estado estable

cuando la referencia presenta cambios en magnitud. El control IP difuso permitió eliminar el error en estado estable del controlador inverso. Así, la conjunción de ambos controles permite tener un control más robusto ante algunas condiciones de cambios.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones Generales

En la presente tesis se desarrolló un modelo termoeléctrico de una celda solar considerando sus partes térmicas y eléctricas. Adicionalmente, el modelo de la irradiación fue presentado también, con el propósito de tomar en cuenta las condiciones de la región en la cual se está utilizando para tener conocimiento de la irradiación presente en esa zona.

El modelo termoeléctrico de la celda ha sido utilizado para conformar el panel solar. Se han propuesto dos tipos diferentes de conexiones de celdas en un panel.

El modelo de la celda y panel fue simulado con el propósito de verificar su funcionamiento. En específico, dentro de todas las simulaciones presentadas, se resalta la del escenario de una celda sombreada con una simulación para mostrar el efecto de los puntos calientes que comúnmente están presentes en los parques solares.

Se desarrolló una ley de control basada en lógica difusa, redes neuronales, y el concepto de inversión de sistemas, con el propósito de aplicarla al convertidor de corriente directa.

Por medio de simulaciones, la ley de control fue validada, para finalmente mostrar los resultados de la conexión del panel al convertidor y en conjunto con la ley de control propuesta.

La principal contribución de esta tesis es el modelo termoelectrico realizado de la celda solar, y con este modelo formar un panel solar.

5.2. Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se tiene visualizado realizar los siguientes:

- Realizar una validación del modelo propuesto con datos reales de una celda solar y panel.
- Generar un sistema que permita realizar la reconfiguración de conexión de las celdas en el panel.
- Implementar el sistema que permita reconfigurar la conexión de las celdas.
- Realizar un diagnóstico de fallas en el modelo propuesto.
- Realizar un control tolerante a fallas.
- Realizar una simulación en tiempo real de una celda solar
- Incorporar el modelo a una microred o red eléctrica para analizar su comportamiento en el sistema completo considerando diferentes cargas.

Apéndice A

Conjuntos Difusos

Los conjuntos boléanos clásicos tienen limitaciones, definen un universo de discurso, donde las fronteras de sus conjuntos están bien definidas, es decir, un elemento puede o no pertenecer a cierto conjunto, es verdadero o falso, en otras palabras no se definen situaciones intermedias. Los conjuntos difusos son una extensión de los clásicos, donde se añade una función de pertenencia denominada $\mu A(x)$ que indica el grado que ésta pertenece al conjunto definido (un número real entre 0 y 1). Así se introduce el concepto de conjunto o subconjunto difuso y se lo asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística, donde ésta, es el nombre del conjunto o subconjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía " $\mu A(x)$ ", la cual indica el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu A(x) \leq 1$), si esta función toma el valor 0 significa que tal valor de x no está incluido en A y si toma el valor 1 el correspondiente valor de x está absolutamente incluido en A .

Teorema: Sea X una colección de objetos, expresados en forma genérica por x . Entonces, un conjunto difuso A en X , se define como un conjunto de pares ordenados $A = (x, \mu A(x)) / x \in X$ Donde $\mu A(x)$ es una función de pertenencia cuya etiqueta es A y su dominio es x [Zadeh y Kacprzyk, 1992].

A.1. Funciones de Membresía

Las funciones de membresía representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta. Existe una gran variedad de formas para las funciones de membresía, las más comunes son del tipo trapezoidal, triangular, singleton, S .

A.2. Operaciones Difusas

A los subconjuntos se les puede aplicar determinados operadores o bien se puede realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto se obtendrá otro conjunto, lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos.

Las operaciones lógicas se utilizan en controladores y modelos difusos, son necesarias en la evaluación del antecedente de reglas (y otras etapas).

Se definen a continuación 3 operaciones básicas a realizar sobre conjuntos. Estas operaciones son complemento, unión e intersección. Sean las etiquetas A y B las que identifican a dos conjuntos difusos asociados a una variable lingüística x , las operaciones se definen como:

- Complemento:

$$\mu A(x) = 1 - (x)\mu A$$

- Unión. Operador lógico OR de Zadeh:

$$\mu A \cup B(x) = \max[\mu A(x), \mu B(x)]$$

- Intersección. Operador lógico AND de Zadeh

$$\mu A \cap B(x) \min = [\mu A(x), \mu B(x)]$$

Hay muchas definiciones para las operaciones lógicas, algunas otras definiciones que normalmente también se utilizan son:

- Operador lógico AND del producto

$$\mu A \cap B(x) = \mu A(x) \times \mu B(x)$$

- Operador lógico OR de Lukasiewicz

$$\mu A \cup B(x) = \max[\mu A(x) + \mu B(x), 1]$$

A.3. Fusificación

El control difuso siempre involucra el proceso de fusificación. Este proceso se realiza en todo instante de tiempo, es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa. Es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece. Esto implica una transformación de dominio, las entradas precisas (datos adquiridos numéricos) son transformadas a entradas difusas. Por ejemplo, una medición precisa de temperatura como 5°C se transformaría en el valor difuso frío. Al terminar el proceso de fusificación cada variable de entrada tiene un grado de pertenencia entre 0 y 1 para el valor numérico preciso de la variable de entrada correspondiente.

A.4. Reglas Difusas

Los controladores difusos usan reglas. Estas combinan uno o más conjuntos difusos de entrada llamados antecedentes o premisas y le asocian un conjunto difuso de salida llamado consecuente. Las reglas difusas son afirmaciones del tipo “si-entonces”. Los conjuntos difusos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas difusas “and”, “or”, etc.

Las reglas difusas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento de manera completa normalmente se precisan varias reglas, que se agrupan formando lo que se conoce como base de reglas, es decir, la edición de esta base determina cual será el comportamiento del controlador difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del operario y la correspondiente estrategia de control.

La base de reglas suele representarse por tablas. Esta es clara en el caso de 2 variables de entrada y una de salida. En la medida que la cantidad de variables lingüísticas

crece, también lo hará la tabla, y más difícil se hará su edición.

Junto a cada regla puede estar asociado un valor entre cero y uno que le da el peso a tal regla, esto puede ser importante cuando una regla tiene menor fuerza que otras de la base de reglas. Principalmente se emplean dos grandes grupos de tipos de reglas: las reglas difusas de Mamdani y las reglas difusas de Takagi-Sugeno (TS, para abreviar).

Reglas Difusas de Mamdani

IF (x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C) *THEN* (u_1 is D , u_2 is E)

Donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de entrada (por ejemplo, error, derivada del error y derivada segunda del error), A , B y C son funciones de membresía de entrada (p.ej., alto, medio, bajo), u_1 y u_2 son las acciones de control (por ejemplo, apretura de válvulas) en sentido genérico son todavía variables lingüísticas (todavía no toman valores numéricos), D y E son las funciones de membresía de la salida, en general se emplean singleton por su facilidad computacional, y AND es un operador lógico difuso (podría ser cualquier otro). La primera parte de la sentencia “*IF* (x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C)” es el antecedente y la restante es el consecuente.

Ventajas:

- Es intuitivo.
- Tiene una amplia aceptación.
- Está bien adaptado a la incorporación de conocimiento y experiencia.

Reglas Difusas de Takagi-Sugeno

IF (x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C) *THEN* $u_1 = f(x_1, x_2, x_3)$, $u_2 = g(x_1, x_2, x_3)$

En principio es posible emplear $f(x)$ y $g(x)$ como funciones no lineales, pero la elección de tal función puede ser muy compleja, por lo tanto en general se emplean funciones lineales.

Ventajas:

- Es computacionalmente eficiente.
- Trabaja bien con técnicas lineales (por ejemplo como lo disponible para controladores PID).
- Trabaja bien con técnicas de optimización y control adaptable.
- Tiene garantizada una superficie de control continua.
- Está bien adaptado al análisis matemático.

A.5. Inferencia Difusa

Las reglas difusas representan el conocimiento y la estrategia de control, pero cuando se asigna información específica a las variables de entrada en el antecedente, la inferencia difusa es necesaria para calcular el resultado de las variables de salida del consecuente, este resultado es en términos difusos, es decir que se obtiene un conjunto difuso de salida de cada regla, que posteriormente junto con las demás salidas de reglas se obtendrá la salida del sistema.

Existe una gran cantidad de métodos de inferencia difusa, pero hay cuatro que generan mejores resultados en el campo del control, estos son inferencia de Mamdani por mínimos (Mamdani minimum inference), la inferencia del producto de Larsen (Larsen product inference), la inferencia del producto drástico (Drastic product inference) y la inferencia del producto limitado (Bounded product inference).

Cuando se evalúan las reglas se obtienen tantos conjuntos difusos como reglas existan, para defusificar es necesario agrupar estos conjuntos, a esta etapa se le llama agregado y existen varios criterios para realizar este paso. Un criterio muy empleado es el de agrupar los conjuntos inferidos mediante la operación max.

A.6. La Defusificación

La defusificación (defuzzyfication) es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión

a partir de la información de la entrada, pero es en términos difusos. Esta conclusión o salida difusa es obtenida por la etapa de inferencia difusa, que a su vez genera un conjunto difuso, pero el dato de salida del sistema debe ser un número real y debe ser representativo de todo el conjunto obtenido en la etapa de agregado. Es por eso que existen diferentes métodos de defusificación y cada uno desarrolla resultados distintos, el más común y ampliamente usado es el centroide. Con el método de defusificación del centroide se transforma la salida difusa en un número real el cual es la coordenada Y_d del centro de gravedad de tal conjunto difuso de salida.

$$Y_d = \frac{\int y * \mu_y(Y) dy}{\int \mu_y(Y) dy} \quad (\text{A.1})$$

De A.1 se tiene que μ_y es la función de pertenencia del conjunto de salida Y , cuya variable de salida es y .

Este método en realidad trae una carga computacional importante, por lo que se emplean en general otros esquemas con menor carga.

Uno de los defusificadores más usados es el centro de área (COA, center of area) también llamado de altura. El centro de gravedad es aproximado por el centro de gravedad de un arreglo de “masas puntuales”, las cuales son el centro de gravedad de cada conjunto de salida correspondiente a cada regla, con “masa” igual al grado de pertenencia en ese punto de su centro de gravedad. Si se le llama δl al centro de gravedad del conjunto difuso de salida B_l de la l -ésima regla, el centro de gravedad queda determinado por:

$$Y_d = \frac{\sum_{l=1}^R \delta \mu_{Bl}(\delta l)}{\sum_{l=1}^R \mu_{Bl}(\delta l)} \quad (\text{A.2})$$

Donde R es el número de reglas y $\mu_{Bl}(\delta l)$ es la ponderación del máximo a la acción de control correspondiente.

El concepto del centro de gravedad es en muchos casos el punto de partida para la obtención de distintos métodos de defusificación. Tanto la fuzzificación como la defusificación son el nexo del sistema difuso con el mundo real. Se debe recordar que la operación de defusificación se realiza con el conjunto obtenido de la etapa de agregado.

Apéndice B

Control con redes neuronales

Ya que el control inverso implementado fue mediante redes neuronales, en esta sección se hará una breve descripción de lo que son.

Una red neuronal es un sistema nuevo para el tratamiento de la información, cuya unidad básica de procesamiento está inspirada en la célula fundamental del sistema nervioso humano, la neurona.

Las Redes Neuronales son un campo muy importante dentro de la Inteligencia Artificial. Se inspiran en el comportamiento del cerero humano, y trata de crear modelos artificiales que solucionen problemas difíciles de resolver mediante técnicas algorítmicas convencionales.

El problema del control con redes neuronales se puede enfocar de dos formas:

Método de diseño directo: esto es cuando el controlador es una red neuronal que debe ser entrenada. Esta solución es ventajosa cuando la plataforma disponible en tiempo real impide soluciones complicadas.

Método de diseño indirecto: en este caso el diseño está basado en un modelo de

red neuronal del sistema a ser controlado, por lo tanto el controlador no es una red neuronal.

El entrenamiento de la red neuronal se puede ver como un problema de optimización no lineal, en el que se intenta encontrar una representación óptima de la red para minimizar una función objetivo.

Para esta tesis se eligió el método de diseño directo, por lo que el controlador desarrollado es una red neuronal, optando por una solución simple y realizando el entrenamiento de la red offline.

B.1. Modelo de la neurona artificial

Se denomina neurona a un dispositivo simple de cálculo que a partir de un vector de entrada proporciona una única respuesta o salida. los elementos que constituyen a una neurona i son los siguientes:

- Entradas $x_j(t)$: que pueden ser de un sensor o de otra neurona.
- Pesos sinápticos w_{ij} : representan la intensidad de interacción entre cada neurona presináptica j y la postsináptica i .
- Regla de propagación: proporciona el valor del potencial postsináptico, $h_i(t)$, de la neurona i en función de sus pesos y entradas. La función más habitual es de tipo lineal, que se basa en la suma ponderada de las entradas con los pesos sinápticos, como se muestra en B.1.

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} \cdot x_j(t) \tag{B.1}$$

- Función de activación: proporciona el estado de activación actual, $a_i(t)$, en función del estado de activación anterior y de su potencial postsináptico actual.

- Función de salida: proporciona la salida actual, $y_i(t)$, en función de su estado de activación. Frecuentemente la función de salida es la identidad, $y_i(t) = a_i(t)$.

Con frecuencia se añade al conjunto de pesos de la neurona un parámetro adicional b_i , que se puede denominar polarización (bias) o umbral (threshold), y que se resta del potencial postsináptico. Por lo tanto, el modelo de neurona estándar (figura B.1) queda definido en la ecuación B.2.

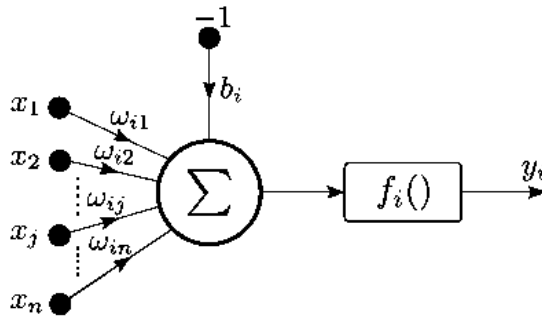


Figura B.1: Modelo de una neurona.

$$y_i(t) = f_i \left(\sum_j w_{ij} \cdot x_j(t) - b_i \right) \quad (\text{B.2})$$

B.2. Tipos de redes neuronales

Dependiendo del modelo de neurona concreto que se utilice, de la arquitectura de conexión y del algoritmo de aprendizaje, surgirán distintos tipos de redes neuronales que a continuación de describirán [Brío y Sanz-Molina] [Viñuela y León, 2004].

Red neuronal lineal adaptativa

La red neuronal lineal adaptativa *ADaptive LInear NEuron* (ADALINE) es un modelo unidireccional, compuesta por una capa sensorial o, de entrada, con n neuronas, y otra capa de salida, con m neuronas. La salida se puede expresar como en B.3.

$$y_i(t) = f \left(\sum_j^n w_{ij} \cdot x_j(t) - b_i \right), 1 \leq i \leq m \quad (\text{B.3})$$

Las neuronas de entrada no realizan ningún cómputo y la función de activación de las neuronas de la capa de salida es de respuesta lineal, es decir, la función de activación es la identidad: $y_i(t) = h_i(t)$.

Perceptrón multicapa

Un perceptrón multicapa *Multi-Layer Perceptron* (MLP) se obtiene al añadir capas intermedias Figura B.2. La estructura más común es la que tiene una capa oculta, con funciones de activación de tipo sigmoideo y neuronas de salida lineales, constituyendo un aproximador universal de funciones.

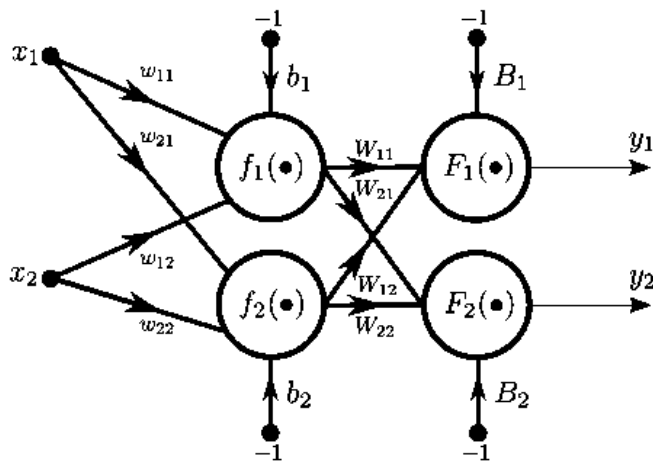


Figura B.2: Perceptrón multicapa.

Redes de neuronas recurrentes

Las redes de neuronas recurrentes se caracterizan porque pueden aparecer en la red conexiones de una neurona a ella misma, conexiones entre neuronas de una misma capa o conexiones de las neuronas de una capa a la capa anterior.

B.3. Control neuronal con modelo de referencia

En este tipo, el funcionamiento deseado del sistema en lazo cerrado se especifica a través de un modelo de referencia. El controlador intenta hacer que la salida de la planta $y_p(t)$, coincida con la salida del modelo de referencia $y_m(t)$. El error se utiliza como señal de entrenamiento de la red que actúa como controlador.

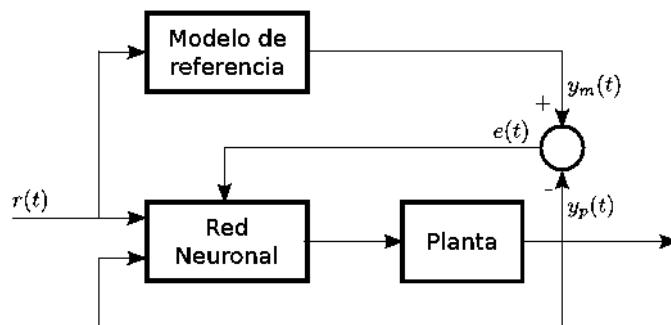


Figura B.3: Control con modelo de referencia.

Referencias

- [ALSOMEX] «ALSOMEX,» [En línea]. Available: <https://www.asolmex.org/es/>.
- [Banco Mundial, 2017] Energía Solar “Desafío y oportunidades.” [En línea]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/11/29/solar>
- [Betancor, 2015] Carlos Betancor Martin “Aportaciones al control inverso con modelo de referencia basado en lógica borrosa, redes neuronales y algoritmos genéticos.” Tesis Doctoral, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2015
- [Brío y Sanz-Molina] B. M. del Brío and A. Sanz-Molina, Redes Neuronales y Sistemas Borrosos. Editorial Ra-Ma, 2001.
- [CIEP, 2018] “Energía Solar en México: Potencial y aprovechamiento.” [En línea].
- [Djeziri et al. 2018] Hybrid method for remaining useful life prediction in wind turbine systems MA Djeziri, S Benmoussa, R Sanchez Renewable Energy 116, 173-187
- [Duffie y Beckman, 1991] J. Duffie and W. Beckman ”Solar Engineering of Thermal Processes”, 3rd ed. John Wiley and Sons, 1991,747.
- [Duran, 2016] Duran J.C Evaluación de la calidad de la energía en dos casos de estudio: distorsión armónica inyectada por un sistema fotovoltaico y emitida por las cargas. Avances en energía renovable y medio ambiente, Vol.20, (1):páginas 13.01-13-03, 2016
- [Elvis, 2005] Isidro Elvis Pereda Soto “Celdas Fotovoltaicas en Generación Distribuida” Santiago de Chile, 2005.

- [Energía del sol] Energía Solar [En línea]. Available:
<https://solar-energia.net/definiciones/irradiacion-solar.html>
- [Energía Solar, 2016] Historia de la Energía Solar. 2016 [En línea]. Available:
<https://www.laenergiasolar.org/historia-de-la-energia-solar/La-primera-celula-solar>.
- [Energía Solar Fotovoltaica] Mauricio Pereira Energía Solar Fotovoltaica « Sistemas Solares Fotovoltaicos para la producción de Electricidad ».
- [Energías renovables] Energías renovables [En línea]. Available:
<https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>
- [Fernández, 2010] Manuel Fernández Barrera “Energía solar: electricidad fotovoltaica ”. 2010. Editorial Liber Factory. 9-11.
- [Historia de la energía solar, 2012] Historia de la energía solar fotovoltaica. « Orígenes e historia de la energía solar fotovoltaica »». 2012.[En línea]. Available: <http://www.renovablesverdes.com/origenes-e-historia-de-la-energia-solar-fotovoltaica/>.
- [Hussein, 1995] Hussein K.H. “Maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions.” International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Vol.1, (1):páginas 1-6, 1995.
- [Keyhani, 2011] Keyhani A. Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems. 2011.
- [Lázaro, 2015] Isidro Ignacio Lázaro C. “Ingeniería de Sistemas de Control Continuo” 2da ed. 2015, 300-302
- [Ma et al. 2014] T. Ma, H. Yang y L. Lu, «Development of a Model to Simulate the Performance Characteristics of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules/Strings/Arrays,» Solar Energy, vol. 100, no 6, pp. 31-41, 2014.

- [Osburn, Whitaker y Kezer, 1961] P. Osburn, H Whitaker, and A. Kezer, "New developments in the design of adaptive control system", in IAS 29th Annual Meeting, no. 61-39, January 1961.
- [Osorio, 2019] Osorio G.J. "Demand side Management of Smart Distribution Grids Incorporating Renewable Energy Sources." *Energies*, journal, Vol.12, (1), página 143, 2019
- [Radhia y Mouna, 2013] Radhia G., Mouna B.H. "Optimizing PI Controller of the Single-Phase Inverter Based on FOA." *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, Vol.1, (1):páginas 1-6, 2013.
- [Salmi et al. 2012] T. Salmi M. Bouzguenda, A. Gastli, and A. Masmoudi, "MATLAB Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell", *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.2, No.2,2012.
- [SIC, 2016] "Sistema de Inteligencia Comercial"2016 [En línea]. Available: <https://www.legiscomex.com/Documentos/parques-solares-mexico-virginia-perez-actualizacion>.
- [Sukhatme, 2008] S.P. Sukhatme and J.K. Nayak "Solar Energy Principles of Thermal Collection and Storage", 3rd ed. Delhi, India: McGraw Hill, 2008, 71-108
- [Tapia et al. 2015] R. Tapia, A. Medina-Rios y N. Villa-Villaseñor "Solar cell model: a bond graph approach" *Transactions of the Society for Modeling and Simulation International* 2015, Vol. 91(4) 349-359.
- [Tinoco, 2019] Luis Felipe Tinoco Tinoco "Análisis de configuración de parques fotovoltaicos debido a sombreados parciales."
- [Thoma y Mocellin, 2006] Thoma J and Mocellin G. "Simulation with entropy in engineering thermodynamics." Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [Tsai, Tu y Su, 2008] H.L. Tsai, C.S. Tu, and Y.J. Su, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab Simulinkin Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2008.

- [Uso de la energía] “Uso de la energía solar en el mundo.” [En línea]. Available:
<https://www.aprendeconenergia.cl/uso-de-la-energia-solar-en-el-mundo/>
- [Villalva, Gazoli y Filho, 2009] M.G.Villalva, J.R.Gazoli and E.R.Filho, «Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays.» IEEE Transactions on Power Electronics, vol.24, n°5, pp. 1198-1208, Mayo 2009.
- [Viñuela y León, 2004] P. I. Viñuela y I. M. G. León, Redes Neuronales Artificiales. Un Enfoque Práctico. Pearson, P. H. (Ed.), 2004.
- [Weiner, 1992] Markus Weiner “Modelling and Smulation of a Solar Energy System.” 1992
- [Zadeh, 1965] L. A. Zadeh “Fuzzy sets.” Information and Control, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
- [Zadeh y Kacprzyk, 1992] Zadeh, L. y Kacprzyk, J. (1992). *Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty*. New York 1992.