



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**SIMULACIÓN EN PSPICE DE UN SISTEMA BASADO EN UN
MÓDULO FOTOVOLTAICO, BATERÍA Y BOMBA
CENTRÍFUGA DE CD**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

PRESENTA:

HUGO ALEJANDRO LOERA ZARAGOZA

ASESOR:

DR. NORBERTO GARCÍA BARRIGA



MORELIA, MICHOACÁN, DICIEMBRE DE 2008

Agradecimientos

- *A dios padre que nunca se ha olvidado de mí y por darme fuerzas para seguir adelante y hacer realidad mi más grande sueño.*
- *A mi incansable madre que siempre estuvo conmigo en las buenas y en las malas y por darme la mejor herencia que puede haber en el mundo ser profesionista.*
- *A mis padres Ana y Arturo por su inmenso amor y por haberme enseñado hacer de mí, una gente de bien.*
- *A toda mi familia sin excepción alguna por haber estado conmigo en las buenas y en las malas.*
- *A la Güera por creer en mí, por darle luz a mi vida y por estar conmigo en los momentos más difíciles.*
- *Al Dr. Norberto García Barriga por su incansable paciencia y por las cosas que he aprendido de él y que sin su ayuda no hubiera sido posible este trabajo.*
- *A todos mis amigos sin excepción alguna por todos los momentos inolvidables de escuela y de diversión.*
- *A mi amigo David Rodríguez Martínez por haberme dado la oportunidad de aprender cosas nuevas y por compartir sus conocimientos conmigo.*
- *Al Sr. Fernando Acevedo Rodríguez por su amistad y su confianza depositada en mi madre y en mí.*
- *A mi tío Javier García Quevedo por apoyarme a lo largo de mi carrera y al cual lo considero como un padre.*
- *A mi tío Noé Zaragoza Infante por su apoyo para continuar con mis tramites de titulación.*

Dedicatoria

- *A mi madre Rosa Maria Loera Zaragoza que siempre esta en mi mente y en mi corazón por haberme dado la vida y la oportunidad de ser alguien en la vida y por el inmenso amor que siento hacia ella.*

Resumen

En esta tesis se presenta la simulación de un módulo fotovoltaico, bomba de agua centrífuga y una batería de plomo-ácido utilizando el paquete de simulación PSpice. La parte central del trabajo consiste en la implementación de un modelo de un módulo fotovoltaico, el cual puede ser interconectado con otros módulos en arreglos serie y paralelo con la finalidad de obtener los niveles de corriente y voltaje requeridos. Como parte del modelado de la celda fotovoltaica se reporta su comportamiento en términos de su curva característica de voltaje-corriente. El modelo de un panel fotovoltaico se simula en conjunto con una batería de plomo-ácido y una bomba centrífuga de CD, en donde el modelo de la bomba centrífuga incorpora una máquina de corriente directa operada como motor en conexión serie. El modelo de la batería se realiza analizando sus dos principales modos de operación de carga y descarga. Los niveles de irradiación utilizados en este trabajo para simular la operación de los paneles fotovoltaicos representan los datos de una población en el estado de Michoacán.

Contenido

Agradecimientos	<i>ii</i>
Dedicatoria	<i>iii</i>
Resumen	<i>iv</i>
Lista de Figuras	<i>vii</i>
Lista de Tablas	<i>ix</i>
Lista de Símbolos y Abreviaciones	<i>x</i>
Publicaciones	<i>xiii</i>

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	6
1.3. Justificación	7
1.4. Metodología	7
1.5. Descripción por capítulos	7

Capítulo 2. Celda y Módulo Fotovoltaico

2.1. Introducción	9
2.2. Modelo del circuito equivalente ideal	10
2.2.1 Simulación de la celda fotovoltaica en PSpice	12
2.3. Modelo generalizado de la celda fotovoltaica	14
2.4. Conexión en serie de celdas fotovoltaicas	16
2.5. Conexión en paralelo de las celdas fotovoltaicas	18
2.6. Modelo simplificado de un módulo fotovoltaico	19
2.6.1 Módulo fotovoltaico conectado directamente a una carga resistiva	21
2.7. Conclusiones	22

Capítulo 3. Modelo de la Bomba Centrífuga de CD

3.1. Motor CD en conexión serie	23
---------------------------------	----

3.2. Modelo de la bomba centrífuga	25
3.3. Cálculo de parámetros	26
3.4. Simulación en PSpice de la bomba centrífuga de CD	27
3.5. Conclusiones	28

Capítulo 4. Batería de Plomo-Ácido

4.1. Sistema fotovoltaico aislado	29
4.2. Características de la batería de plomo-ácido	30
4.3. Modelo en PSpice de la batería de plomo-ácido	32
4.4. Conclusiones	36
4.2. Características de la batería de plomo-ácido	30
4.3. Modelo en PSpice de la batería de plomo-ácido	32
4.4. Conclusiones	37

Capítulo 5. Módulos Fotovoltaicos Conectados a una Batería y Carga

5.1. Datos de insolación de la ciudad de Morelia	38
5.2. Resultados de simulación en PSpice	40
5.3. Abastecimiento de una localidad en la ciudad de Morelia	47
5.4. Conclusiones	48

Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros

6.1. Conclusiones generales	49
6.2. Trabajos futuros	51

Apéndices

A. Algoritmos	52
B. Parámetros del sistema fotovoltaico	58

Referencias	59
--------------------	----

Lista de Figuras

2.1. Operación de una celda fotovoltaica	9
2.2. Subcircuito de la celda solar	11
2.3. Circuito para medir de la curva característica $V-I$ de la celda fotovoltaica	12
2.4. Curva característica $V-I$ de la celda fotovoltaica	13
2.5. Curva característica $V-I$ de la celda fotovoltaica con valores de irradiancia de 200, 400, 600, 800, y 1000 W/m ²	13
2.6. Modelo generalizado de la celda fotovoltaica	14
2.7. Modelo generalizado de la celda fotovoltaica en PSpice	15
2.8. Efecto de la resistencia serie en la curva $V-I$ de la celda fotovoltaica con valores de resistencia de 0.0001 Ω , 0.001 Ω , 0.01 Ω , 0.1 Ω , 1 Ω	15
2.9. Conexión en serie de dos celdas fotovoltaicas	16
2.10. Celdas fotovoltaicas conectadas en serie con diferentes valores de irradiancia, para la (a) curva característica y (b) voltaje generado	17
2.11. Potencia individual y potencia total en las celdas fotovoltaicas	18
2.12. Conexión de dos celdas en paralelo con diferente nivel de irradiancia	18
2.13. Modelo en PSpice del subcircuito del módulo fotovoltaico	20
2.14. Curva característica del módulo fotovoltaico	21
2.15. Potencia máxima del módulo fotovoltaico	21
2.16. Característica $V-I$ del módulo fotovoltaico y carga resistiva	22
3.1. El circuito equivalente de un motor DC serie con la carga de una bomba	23
3.2. Circuito esquemático de los diferentes parámetros de una conexión Motor-bomba de CD	25
3.3. Flujo producido por la bomba centrífuga	27
4.1. Sistema fotovoltaico aislado	30
4.2. Modelo de la batería	33
4.3. Circuito equivalente de la batería	34
4.4. Diagrama de la simulación de la batería	35
4.5. (a) Voltaje de la batería y (b) corriente senoidal	36
5.1. Horas solares pico del mes de Mayo	39

5.2. Flujo proporcionado por el sistema de bombeo fotovoltaico para un Periodo de 24 horas	40
5.3. Voltaje del arreglo fotovoltaico	41
5.4. Estado de carga de la batería	41
5.5. Modos de operación de la batería plomo-ácido	42
5.6. Flujo del sistema fotovoltaico	43
5.7. Voltaje de la batería, bomba y arreglo fotovoltaico	43
5.8. Cargabilidad de la batería	44
5.9. Corrientes en el a).- arreglo fotovoltaico, b).- batería y c).- bomba centrífuga	45
5.10. Potencia del a).- arreglo fotovoltaico, b).- batería y c).- bomba	46

Lista de Tablas

2.1. Corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto con diferentes valores de irradiancia	14
3.1. Datos de la curva característica de la bomba centrífuga	26
5.1. Niveles de irradiación de la ciudad de Morelia en kWh/m ² -día	39
5.2. Demanda diaria de una localidad en la ciudad de Morelia	47
5.3. Flujo de agua provisto por el sistema de bombeo	48

Lista de Símbolos y Abreviaturas

J	Densidad de corriente
J_{dark}	Densidad de corriente de oscuridad
J_{sc}	Densidad de corriente de cortocircuito
J_0	Densidad de corriente de saturación
V	Voltaje aplicado
V_T	Voltaje térmico
I	Corriente generada por la celda fotovoltaica
I_{sc}	Corriente de cortocircuito
I_0	Corriente de saturación
A	Área total de la celda fotovoltaica
G	Irradiancia
n	Factor de idealidad del diodo
$D1$	Diodo número uno
$D2$	Diodo número dos
I_L	Corriente fotogenerada
J_{02}	Densidad de corriente de saturación del diodo número dos
I_{02}	Corriente de saturación del diodo número dos
R_s	Resistencia en serie
R_{SH}	Resistencia en paralelo
FF_{0M}	Fill factor del módulo fotovoltaico
P_{maxM}	Potencia máxima del módulo fotovoltaico
V_{oc}	Voltaje de circuito abierto
v_{OC}	Valor normalizado del voltaje de circuito abierto
V_{ocM}	Voltaje de circuito abierto del módulo fotovoltaico
N_S	Número de celdas en serie del módulo fotovoltaico
J_{scM}	Densidad de corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico
I_{scM}	Corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico
R_{sM}	Resistencia serie del módulo fotovoltaico
R	Resistencia

Ω	Unidad de medida de la resistencia (Ohms)
A	Unidad de medida de la corriente (Amperes)
V	Unidad de medida del voltaje (Volts)
T_e	Par inducido
T_L	Par de carga
K_T	Constante del par del motor
ϕ	Flujo magnético
ω	Velocidad del motor
E_{cm}	Voltaje generado
K_f	Constante del motor
i_a	Corriente de armadura
i_f	Corriente de campo
V_a	Voltaje de armadura
V_f	Voltaje de campo
$V_{entrada}$	Voltaje de entrada
R_a	Resistencia de armadura
R_f	Resistencia de campo
L_a	Inductancia de armadura
L_f	Inductancia de campo
A, B	Constantes de una bomba determinada
J	Inercia
F	Fricción
H	Altura del bombeo de agua
Q	Flujo
a_1, b_1, c_1	Constantes de una bomba determinada
S	Velocidad angular
rpm	revoluciones por minuto
K_m	Constante del motor
P	potencia
i_{nom}	Corriente nominal
ω_{nom}	Velocidad del motor nominal

W	Unidad de medida de la potencia (Watts)
C_x	Energía total de la batería
x	Intervalo de tiempo de descarga
V_{bat}	Voltaje de la batería
Ah	Amper-hora
SOC	Proporción de la carga disponible de la batería
C	Capacidad de la batería
Q	Carga entregada por la batería
DOD	Profundidad de descarga
SOC_I	Estado inicial de carga de la batería
SOC_m	Estado máximo de carga de la batería
n_s	Número de celdas en serie de la batería
K	Eficiencia de carga/descarga de la batería
$D (h^{-1})$	Proporción de descarga de la batería
Wh	Watts-hora
V_{carga}	Voltaje de carga
R_{carga}	Resistencia de carga
$V_{descarga}$	Voltaje de descarga
$R_{descarga}$	Resistencia de descarga
I_{bat}	Corriente de la batería
I_S	Corriente senoidal

Publicaciones:

- Hugo Alejandro Loera Zaragoza y Norberto García Barriga “Simulación en PSpice de un Sistema Fotovoltaico, Batería y Bomba Centrífuga de CD” IEEE ROPEC 2008, Morelia, Michoacán, Diciembre 3-5, 2008.

Capítulo 1

Introducción

En este Capítulo se presentan los antecedentes de la celda y módulo fotovoltaico, así como también sus aplicaciones. Además, se describen los objetivos, justificación, metodología y descripción de los capítulos que contiene esta tesis.

1.1 Antecedentes

Las celdas fotovoltaicas transforman directamente una parte de la energía solar que reciben en energía eléctrica. El efecto fotovoltaico se produce cuando la radiación solar entra en contacto con un material semiconductor cristalino. La luz transporta energía en forma de fotones, los cuales al incidir sobre determinados materiales semiconductores produce un movimiento de electrones en su interior, apareciendo en sus extremos una diferencia de potencial, por lo que se convierte en una pila o generador eléctrico [Juster y Santano 1980].

Dado que cada elemento semiconductor puede generar una cantidad reducida de electricidad, las celdas fotovoltaicas en sus orígenes se destinaron a alimentar consumos pequeños con requerimientos particulares, como la exploración espacial. Con el avance tecnológico se ampliaron las posibilidades de aplicación a problemas diversos, en donde se les agrupa en arreglos serie-paralelo formando paneles solares que aumentan la potencia generada.

Los antecedentes del desarrollo de esta tecnología se remontan al año 1839 cuando Becquerel descubrió que si se ilumina uno de dos electrodos sumergidos en un electrolito, aparece entre ambos una diferencia de potencial, dando lugar al efecto fotovoltaico. En 1876, mientras Adams y Day se hallaban experimentando con la conductividad de unas varillas de selenio amorfo embebidas en hierro, descubrieron que se creaba una diferencia de potencial cuando sus aparatos eran iluminados. Por otra parte, en el año 1873 W. Smith observó una

variación de la capacidad de conducción del selenio por efecto de la luz. A partir de ese descubrimiento, denominado efecto fotoconductor, Siemens construyó un fotómetro, que contribuyó a la divulgación del nuevo fenómeno. En 1887, Hertz descubrió el efecto fotoeléctrico externo o fotoemisión mientras investigaba el uso la descarga eléctrica entre dos electrodos como fuente de ondas electromagnéticas, Hertz observó que la intensidad de la descarga aumentaba si radiaba el electrodo positivo con luz ultravioleta, lo que sugirió que las superficies iluminadas emitían más electrones. En 1888 Hallwachs analizó este efecto en profundidad y además descubrió que si radiaba un electrodo negativo no se observaba ninguna variación. Cabe señalar que en ese tiempo se utilizaban superficies metálicas pulidas de selenio policristalino de alto grado de pureza y doce años después Hallwachs observó el mismo fenómeno en un semiconductor compuesto por cobre y óxido cuproso [Juster y Santano 1980].

Los primeros fotoelementos de selenio se fabricaron en la década de los 40's, alcanzando un rendimiento del 1%. En el año 1948 se produjo un notable avance con el invento del transistor de germanio y posteriormente el de silicio, que resulta menos sensible a los cambios de temperatura. Finalmente en el año 1954 se inventó la celda fotovoltaica de silicio, en la que los electrones que se liberan en el interior de una unión semiconductor N-P iluminada dan lugar a una fuerza electromotriz. Los avances tecnológicos más recientes estuvieron orientados a reducir los costos de las celdas mediante el uso de distintos materiales como el silicio monocristalino, policristalino o amorfo, el arseniuro de galio y muchos otros [Juster y Santano 1980].

En la actualidad existen una gran variedad de aplicaciones de la energía solar fotovoltaica. Las aplicaciones aisladas a la red como electrificación rural de viviendas y pequeños núcleos de población aisladas son ejemplos claros de este tipo de soluciones basadas en sistemas fotovoltaicos. Este tipo de desarrollos se justifican ya que el costo de llevar la red, a veces por kilómetros, para suministrar muy poca potencia es muy elevado en comparación al costo de un pequeño o mediano sistema fotovoltaico. Las necesidades básicas a cubrir son: la iluminación, el bombeo de agua, el uso de electrodomésticos y otros aparatos. Por ejemplo, en Nicaragua se implementó un arreglo fotovoltaico de 2,400 W, emplazados en tres subarreglos, que pueden cargar hasta 24 baterías plomo-ácido a la vez. El sistema completo esta compuesto de tres subestaciones fotovoltaicas de 800 W cada una, paneles de 80 Watts de la marca Shell

y con su controlador individual Stecca PL2085, el cual es capaz de recargar 8 baterías simultáneamente [Foster et al. 2007].

Otra aplicación se encuentra en la electrificación de locales para servicios a la comunidad en países poco electrificados. En escuelas, centros de atención médica y hospitalaria, edificios religiosos y otras edificaciones de uso público la energía solar fotovoltaica puede proveer la iluminación, la conservación de alimentos y medicamentos, uso de aparatos eléctricos y sistemas informáticos. Las potencias instaladas son en general superior a los 2000 W. En [Rodríguez y Sánchez 2005] se presenta un proyecto fotovoltaico de electrificación en Tapachula, Chiapas. Este sistema consiste de 5 módulos monocristalinos SP75 marca Shell-Siemens de 75 Watts, 1 Controlador Morningstar de 30 A, 12/24 V, 6 baterías de uso solar marca Cale, 1 inversor-cargador marca Xantrex 1000 W.

El suministro eléctrico de alojamientos ganaderos e iluminación de naves agrícolas en lugares aislados se ha beneficiado de la aplicación de sistemas fotovoltaicos. Son sistemas pequeños o medianos destinados fundamentalmente a facilitar el trabajo y a ampliar la productividad aumentando las horas de luz. El bombeo de agua hasta tanques acumuladores situados encima de la edificación suele ser importante en el caso de los alojamientos ganaderos. También pueden suministrar electricidad a pequeñas herramientas. Para los criaderos de aves se demanda iluminación para aumentar la productividad, y en granjas de vacunos se pueden alimentar las máquinas ordeñadoras. Para no encarecer demasiado la inversión se complementan las instalaciones con grupos de generadores eléctricos que suministren potencias elevadas a consumos esporádicos, al mismo tiempo que pueden funcionar como sistema auxiliar en el caso de temporadas de fuerte demanda o de poca insolación [Ortega 2001].

En aplicaciones de iluminación pública los sistemas son autónomos integrados, en donde la misma base de la farola sirve de soporte a los paneles y la batería se aloja en un compartimiento detrás de los módulos o en la plataforma de la farola. El conjunto se completa incorporando la regulación de carga de batería y el control de encendido y apagado automático de la luminaria. Su diseño considera periodos nublados de al menos cinco días sin decaimiento de la iluminación [Ortega 2001].

Por su parte la necesidad de elevación de agua en lugares remotos, más o menos alejados de la red eléctrica, puede ser cubierta en la actualidad con el desarrollo de la tecnología comercializada dentro del campo de la energía solar fotovoltaica. Básicamente se trata de suministrar corriente eléctrica a los equipos motor-bomba normalmente comercializado. Entre las posibles aplicaciones se encuentran las siguientes: suministro de agua para ganado, suministro de agua para riego, alimentación eléctrica de sensores de riego, suministro de agua potable en viviendas o núcleos rurales, circulación de agua en sistemas de calefacción y fuentes decorativas. En [Foster y Gómez 2005] se presentan tres proyectos de bombeo fotovoltaico ubicados en el Estado de México. En el Sistema “*El laurel*”, “*Las margaritas*” y “*El amate*” se tienen 6 Módulos First Solar de 55 Watts cada uno, controlador de Bomba Grundfos CU200 SQFLEX y Bomba Grundfos [Foster y Gómez 2005].

Los sistemas fotovoltaicos se encuentran también en sistemas de protección catódica, en donde la corriente y el voltaje de corriente directa generada por los paneles se utilizan para oponerse a la producida por procesos de oxidación-reducción de metales evitando su corrosión electroquímica. Los gasoductos y oleoductos confían en estos sistemas para sus protecciones anticorrosión y para la alimentación eléctrica de las estaciones de control y de telemetría [Ortega 2001].

Por otra parte, las aplicaciones conectadas a la red eléctrica tendrán en el futuro un impacto muy importante. Muchos de ellos se integran en edificios como bibliotecas, centros de investigación, difusión cultural y edificios universitarios. La labor investigadora y el apoyo público a esta labor son de importancia capital. Se espera de los sistemas conectados a la red tengan mas desarrollo en la medida en que los costos se reduzcan y se incentive públicamente su implementación dados los beneficios medioambientales y sociopolíticos que pueden producir. Las instalaciones típicas conectadas a red son [Ortega 2001]:

a).- Viviendas y otras edificaciones conectadas a la red. Es un sistema que permite inyectar a la red eléctrica la energía producida en el campo fotovoltaico. El costo final para el usuario es el balance entre el valor de la energía consumida y el valor de la energía entregada. Las instalaciones incorporan controladores de entrada y salida de energía. Las características de la electricidad entregada deben coincidir y acoplarse con las de la red, por lo que deben de

disponer de inversores de corriente CD/CA con salida de onda senoidal de igual frecuencia que la de la red. Con la conexión a red se elimina la necesidad de la acumulación de energía en baterías.

b).- Centrales fotovoltaicas y fotovoltaicas mixtas. Existen numerosas centrales fotovoltaicas funcionando dentro de las compañías eléctricas. Algunas de las centrales son mixtas, así tenemos las centrales eólico/fotovoltaicas y las centrales que combinan la combustión del gas natural con la producción fotovoltaica. Estas centrales aportan energía y datos de comportamiento a escala real que contribuirán al desarrollo de dichos proyectos [Ortega 2001].

Por otra parte, el modelado digital de sistemas fotovoltaicos ha sido enriquecido con los trabajos de diferentes investigadores, lo cual ha servido para realizar el diseño de las aplicaciones basadas en sistemas fotovoltaicos. En [Phani y Veerachary 2005] se modela un módulo fotovoltaico que está formado por celdas conectadas en serie y paralelo, en donde se muestra el comportamiento del módulo fotovoltaico cuando varían los factores medioambientales la insolación y la temperatura. Como parte del modelado se presenta un seguidor azimutal para el movimiento de la trayectoria solar. En [Dondi et al. 2008] se presenta el modelo de un módulo fotovoltaico para observar su modo de operación con diferentes valores de irradiación y se muestra el comportamiento del módulo en términos de sus curvas voltaje-corriente y voltaje-potencia. En [Ka y Syed 2007] se presenta el modelado en PSpice de un sistema fotovoltaico autónomo. El sistema consta de un arreglo de módulos fotovoltaicos, batería y carga, así como también se presenta el concepto de las horas solares pico. En [Aziz et al. 2006] se muestra la simulación de un panel fotovoltaico comercial tomando las características eléctricas proporcionadas por el fabricante. Se simulan las características voltaje-corriente con diferentes niveles de irradiancia y diferentes niveles de temperatura. En [Gow y Manning 1999] se presenta el modelo matemático para la celda fotovoltaica, basado en el circuito equivalente de la celda fotovoltaica. Las celdas son interconectadas entre sí para formar arreglos en serie y paralelo, en donde el circuito modelado en PSpice recibe como parámetros de entrada valores de irradiancia y temperatura para observar su comportamiento. Por otra parte en la contribución presentada en [Martínez 2007] se desarrolla un sistema híbrido integrado por generación eólica y fotovoltaica. Se utiliza un

enfoque de representación en espacio de estado y el modelo de la batería que se incluye se reduce a una fuente de voltaje constante.

En esta tesis se presenta la simulación de un sistema fotovoltaico usando el paquete PSpice. El sistema fotovoltaico incluye un arreglo de paneles fotovoltaicos, una batería y una bomba centrífuga. El modelo de la bomba de agua se basa en un motor de CD con conexión serie. El modelo de la batería es del tipo plomo-ácido e incorpora los modos de operación de carga y descarga. El sistema de bombeo se dimensiona para alimentar una población ubicada en la ciudad de Morelia.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de tesis es desarrollar, por medio de la simulación, un sistema que utilice la energía solar para solucionar un problema práctico que consiste en bombear agua de un pozo ubicado en una localidad que no cuente con el suministro de energía de la Comisión Federal de Electricidad. El sistema propuesto consiste de un módulo fotovoltaico, un banco de baterías y una bomba centrífuga de CD.

Los objetivos particulares de esta tesis son:

- Analizar el comportamiento del módulo fotovoltaico por medio de simulación en el paquete PSpice.
- Simular un sistema fotovoltaico con arreglos de módulos solares interconectadas en serie y paralelo para obtener los voltajes y corrientes requeridos.
- Analizar el comportamiento del módulo fotovoltaico al aplicarle una carga que consta de una bomba centrífuga de CD.
- Simular la operación conjunta del módulo fotovoltaico conectado a una batería para alimentar la bomba centrífuga.
- Adaptar el sistema fotovoltaico para suministrar energía eléctrica a una población de la ciudad de Morelia.

1.3 Justificación

Los sistemas fotovoltaicos han observado un sostenido crecimiento durante los últimos años gracias a que la industria que provee estos sistemas ha madurado, mediante la mejora del desempeño de los componentes y a la disminución del costo de producción. Por su parte, las medidas tomadas por diferentes gobiernos y agencias relacionadas con la energía han favorecido el subsidio de instalaciones solares y la imposición de regulaciones a las compañías productoras de energía para generar energía proveniente de fuentes renovables de energía.

En nuestro país existen intentos muy precarios a nivel gubernamental para explotar el uso de energías renovables tales como eólica, solar y maremotriz. Sin embargo, es de primordial importancia para un país como México explotar al máximo los grandes recursos que se tienen provenientes de fuentes de energía alternativa. La energía solar es un ejemplo claro del potencial con el que se cuenta en este país y que requiere del desarrollo de proyectos que impacten directamente a la calidad de vida de la gente.

1.4 Metodología

En esta tesis se elige el programa de simulación PSpice para modelar las celdas fotovoltaicas y paneles solares debido a que es un simulador ampliamente utilizado en el área de circuitos eléctricos y electrónicos. Además, la estructura de programación de este simulador facilita el desarrollo modular de los programas y ayuda en las etapas de diseño, dimensionamiento y análisis del sistema fotovoltaico. El modelo de la batería se realiza analizando sus dos principales modos de operación carga y descarga. La bomba centrífuga de CD se describe matemáticamente mediante el modelo de la máquina de CD en conexión serie, la cual se incorpora directamente en los programas de PSpice que simulan las celdas fotovoltaicas. Los niveles de irradiación solar y las series de tiempo necesarias para describir el comportamiento real de los paneles solares localizados en lugares específicos se obtienen a través de bases de datos del recurso solar disponibles para el público en general.

1.5 Descripción de los capítulos

A continuación se presenta la descripción de los capítulos de esta tesis.

En el Capítulo 1 se presentan los antecedentes más relevantes en el área de las celdas fotovoltaicas. Además, se presenta la justificación, metodología y los objetivos a alcanzar en esta tesis.

En el Capítulo 2 se presenta el modelo básico de la celda fotovoltaica, modelo generalizado de la celda fotovoltaica, conexión en serie y en paralelo de celdas fotovoltaicas y el modelo simplificado de un módulo fotovoltaico.

En el Capítulo 3 se presenta el modelo de la bomba centrífuga de CD, en el cual se detalla la conexión de la máquina de CD.

El modelo de la batería plomo-ácido y su simulación se presenta en el Capítulo 4.

En el Capítulo 5 se reporta la simulación del sistema módulo fotovoltaico-bomba centrífuga y batería. Además, se incorpora el nivel de radiación diario de la ciudad de Morelia.

En el Capítulo 6 se muestran las conclusiones generales de esta tesis y las sugerencias para trabajos futuros.

Capítulo 2

Celda y Módulo Fotovoltaico

En este Capítulo se presentan los fundamentos de la celda y módulo fotovoltaico, así como también la descripción de su modelo equivalente ideal y generalizado de la celda fotovoltaica. Además, se realizan arreglos de celdas en serie y paralelo para cumplir con los requerimientos de cada aplicación. Por último, se presenta el modelo simplificado de un módulo fotovoltaico que permite realizar simulaciones eficientes. La simulación de la celda fotovoltaica y paneles solares se realiza en el programa de simulación PSpice.

2.1 Introducción

El primer módulo fotovoltaico fue construido en los Laboratorios Bell en 1954. Este primer prototipo fue descrito como una batería solar pero un costo de fabricación demasiado alto para justificar su utilización a gran escala. En la década de los 60's, la industria espacial comenzó por primera vez a hacer uso de esta tecnología para proveer la energía eléctrica a bordo de las naves espaciales. A través de los programas espaciales esta tecnología avanzó, alcanzó un alto grado de confiabilidad y se redujo su costo. Durante la crisis de energía en la década de los 70's, la tecnología fotovoltaica empezó a ganar reconocimiento como una fuente de energía para aplicaciones no relacionadas con el espacio. El diagrama de la Figura 2.1 ilustra la operación de una celda fotovoltaica, llamada también celda solar.



Figura 2.1 Operación de una celda fotovoltaica

Las celdas solares están hechas de materiales semiconductores, tales como el silicio, que se usan en la industria microelectrónica. Para las celdas solares se utiliza una rejilla delgada de material semiconductor tratado especialmente para formar un campo eléctrico. Cuando la energía luminosa incide en la celda solar, los electrones son desplazados de los átomos del material semiconductor. Si se colocan conductores eléctricos tanto del lado positivo como del negativo de la rejilla, los electrones pueden formar una corriente eléctrica. La electricidad puede entonces ser utilizada para suministrar potencia a una carga, por ejemplo, para encender una lámpara o energizar un aparato electrodoméstico.

Un arreglo de varias celdas solares conectadas eléctricamente unas con otras y montadas en una estructura de apoyo se llama módulo fotovoltaico. Los módulos están diseñados para proveer un cierto nivel de voltaje y corriente, en donde la corriente producida depende directamente de cuánta luz llega hasta el módulo. Varios módulos pueden ser conectados unos con otros para formar un arreglo. En general, cuánto más grande es el área de un módulo o arreglo, más electricidad será producida. Estos arreglos pueden ser conectados tanto en serie como en paralelo para producir cualquier cantidad de voltaje o corriente que se requiera [ANES 2008].

2.2 Modelo del circuito equivalente ideal

La curva característica de voltaje-corriente total de una celda solar se obtiene aplicando el principio de superposición a los componentes característicos de la celda cuando es iluminada y cuando se encuentra no iluminada, es decir [Castañer y Silvestre 2002],

$$J = J_{SC} - J_{dark} \quad (2.1)$$

o bien

$$J = J_{SC} - J_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.2)$$

en donde

J Densidad de corriente

- J_{SC} Densidad de corriente de corto-circuito A/cm²
- J_0 Densidad de corriente de saturación
- V Voltaje aplicado
- V_T Potencial térmico

El valor de la corriente generada por la celda fotovoltaica esta dada por la siguiente ecuación:

$$I = I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

en donde I_{SC} e I_0 se relacionan con sus respectivas densidades de corriente J_{SC} y J_0 como sigue,

$$I_{SC} = AJ_{SC} \quad (2.4)$$

$$I_0 = AJ_0 \quad (2.5)$$

en donde A es el área total de la celda fotovoltaica. Este modelo es el más simple y más utilizado para describir una celda solar, la cual se puede implementar en PSpice con una fuente de corriente de valor I_{SC} y un diodo.

El modelo en PSpice de un subcircuito de una celda solar se muestra en la Figura 2.2, el cual es la representación de la Ecuación (2.3). En el caso del sistema fotovoltaico, la celda solar recibe un determinado valor de irradiancia y la corriente de corto circuito es proporcional a la irradiancia. Para implementar en PSpice el valor de la corriente de corto circuito, se simula por medio de una fuente de corriente controlada por voltaje, esto es,

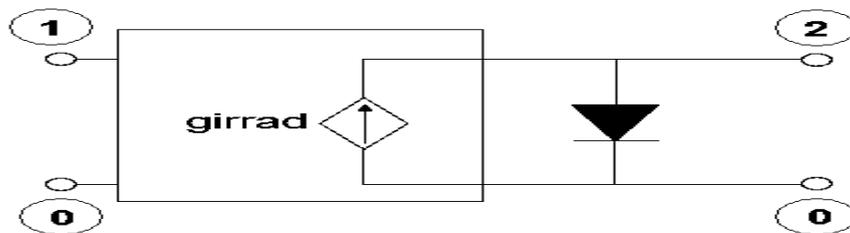


Figura 2.2 Subcircuito de la celda solar

$$g_{irrad} = \frac{J_{sc} A}{1000} G \quad (2.6)$$

en donde G es el valor de la irradiancia en W/m^2 . La expresión (2.6) considera que el valor de J_{sc} este dado a condiciones estándar que corresponden a una luz solar incidente con una intensidad de $1000 W/m^2$, una temperatura de la celda de $25\text{ }^\circ C$ y una distribución espectral correspondiente a la radiación solar cuando atraviesa una masa de aire 1.5 [Castañer y Silvestre 2002].

2.2.1 Simulación de la celda fotovoltaica en PSpice

La Figura 2.3 muestra la implementación en PSpice de la celda solar. Como se puede observar se tiene un nodo de referencia (0), un nodo de entrada (2) que proporciona el valor de la irradiación y un nodo de salida (1) que conecta la celda con la carga. Con el objeto de obtener la curva característica de la celda fotovoltaica, se utiliza como carga una fuente de CD. Al variar la fuente de CD, V_{bias} se mide la corriente que provee la celda y se grafica respecto a dicha fuente de voltaje. La curva característica de la celda fotovoltaica se muestra en la Figura 2.4, en la cual se observa que se tiene una corriente de corto circuito de 4.342 A y un voltaje de circuito abierto de 0.567 V de acuerdo con los parámetros especificados ($J_{sc} = 0.0343\text{ A/cm}^2$, $J_0 = 1 \times 10^{-11}\text{ A/cm}^2$).

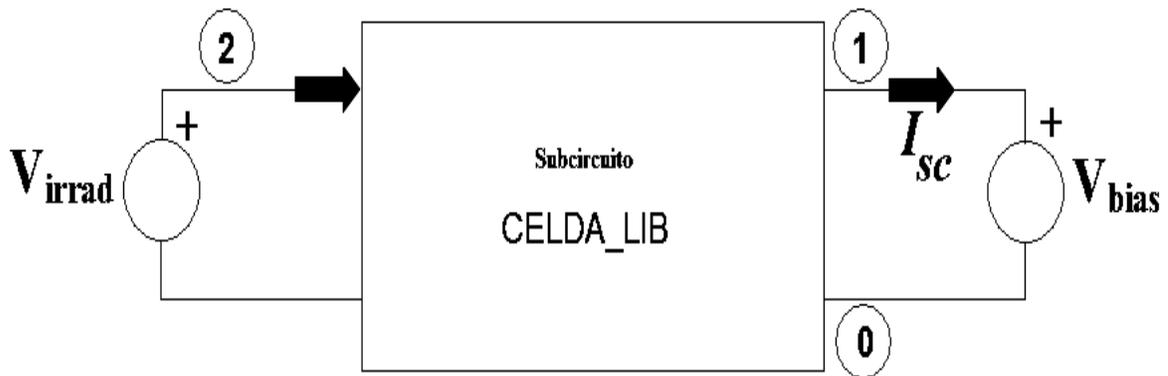


Figura 2.3 Circuito para medir la curva característica $V-I$ de la celda fotovoltaica

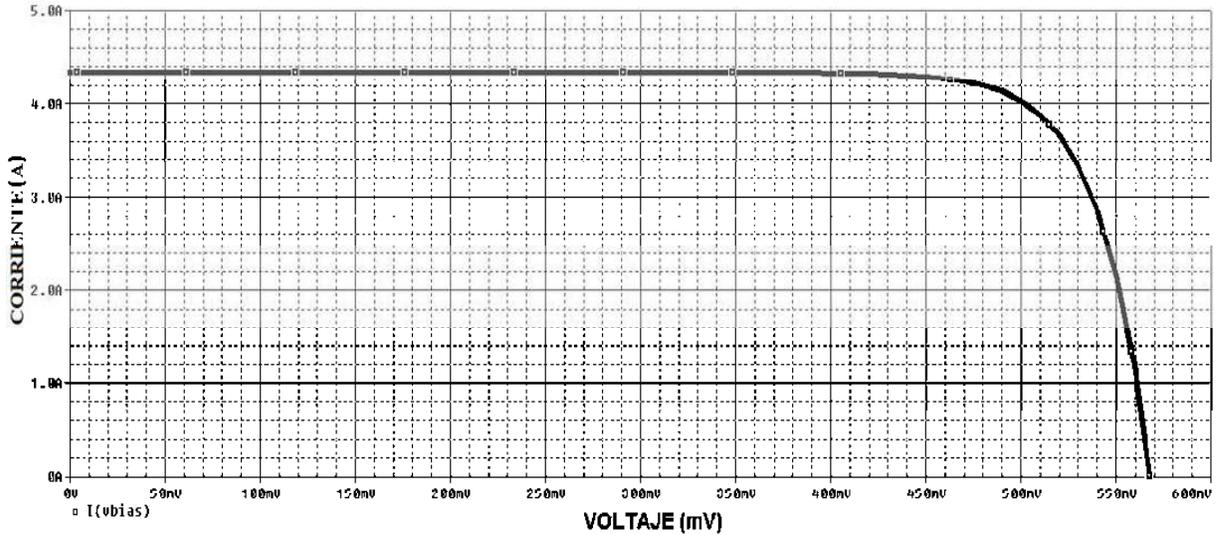


Figura 2.4 Curva característica $V-I$ de la celda fotovoltaica

En la Figura 2.5 se observa el efecto en la curva característica de la celda cuando se varía el nivel de irradiancia. Se observa que el valor de la corriente de corto circuito de la celda fotovoltaica se reduce en proporción con los valores de irradiancia. El voltaje de circuito abierto a diferencia de la corriente de corto circuito se mantiene con menor variación. Otro parámetro que afecta el funcionamiento de la celda fotovoltaica es la temperatura ya que el voltaje se ve afectado al aumentar la temperatura. Sin embargo, este parámetro no es considerado en esta tesis.

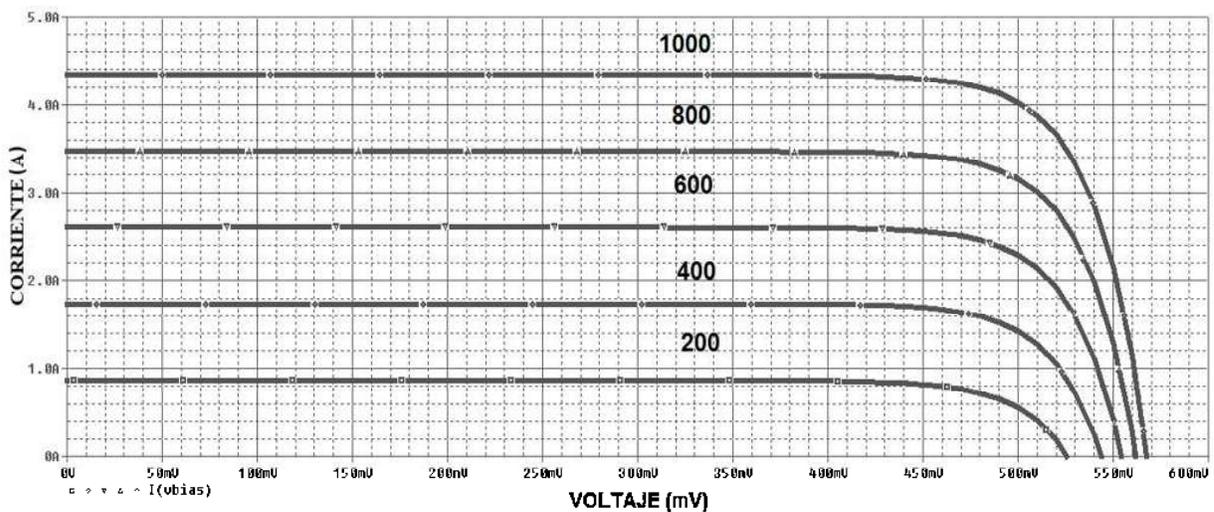


Figura 2.5 Curva característica $V-I$ de la celda fotovoltaica con valores de irradiancia de 200, 400, 600, 800 y 1000 W/m^2

En la Tabla 2.1 se resumen los valores de corrientes de corto circuito y voltajes de circuito abierto con diferentes valores de irradiancia.

Tabla 2.1 Corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto con diferentes valores de irradiancia

Irradiancia $G(\text{W}/\text{m}^2)$	Corriente de corto circuito $I_{sc}(\text{A})$	Voltaje de circuito abierto $V_{oc}(\text{V})$
1000	4.34	0.567
800	3.47	0.561
600	2.60	0.554
400	1.73	0.543
200	0.86	0.525

2.3 Modelo generalizado de la celda fotovoltaica

El modelo presentado en la sección anterior para la celda solar considera que es un dispositivo ideal. Sin embargo, la celda debe integrar una resistencia interna, la cual puede estar compuesta por una resistencia serie y paralelo. Para el análisis de una celda que tiene pérdidas de potencia se utiliza el circuito equivalente que se muestra en la Figura 2.6.

En el circuito de la Figura 2.6 se ilustra la resistencia en serie R_S , la resistencia en paralelo R_{SH} de la celda, un generador de corriente y un diodo en paralelo. La R_S representa la resistencia interna de cada celda, mientras que la R_{SH} representa las imperfecciones de los materiales y las pérdidas asociadas con la unión p-n del material semiconductor de la celda fotovoltaica.

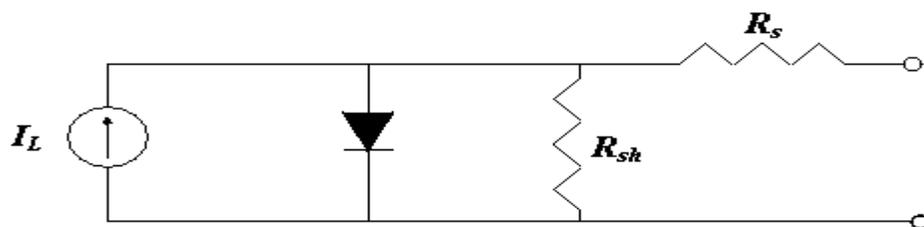


Figura 2.6 Modelo generalizado de la celda fotovoltaica

En la Figura 2.7 el diodo $D1$ está asociado al segundo término de la Ecuación (2.7), mientras que el tercer término representa al diodo $D2$.

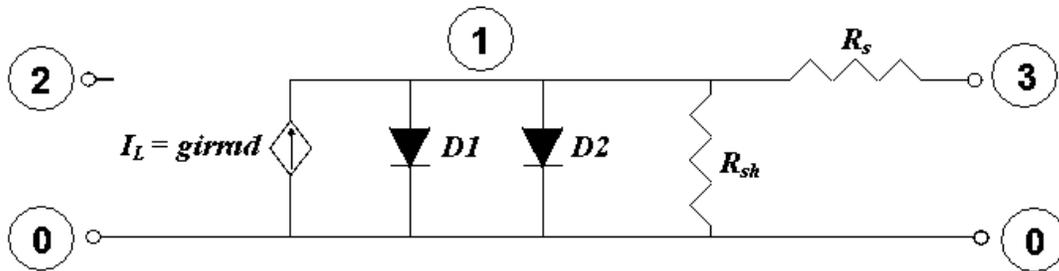


Figura 2.7 Modelo generalizado de la celda fotovoltaica en PSpice

En la práctica pocos dispositivos exhiben una característica $I-V$ ideal debido a que existen pérdidas en la celda fotovoltaica que reducen su eficiencia. Para modelar esta característica se agrega un segundo diodo $D2$, el cual tiene una densidad de corriente J_{02} diferente a la densidad de corriente de la celda fotovoltaica ideal (ver Figura 2.7). Para describir la relación y el comportamiento de la corriente y el voltaje se tiene la siguiente Ecuación [Castañer y Silvestre 2002]:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

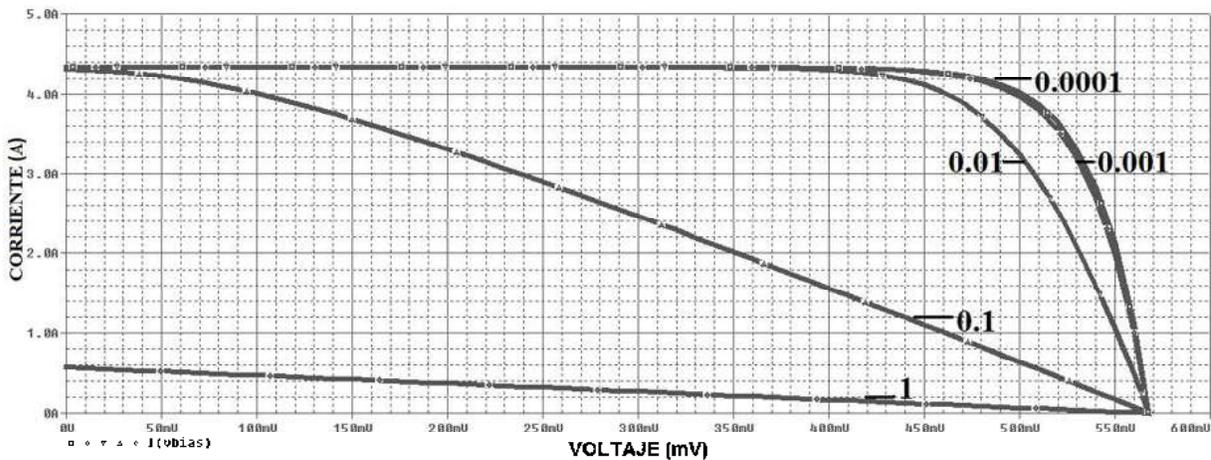


Figura 2.8 Efecto de la resistencia serie en la curva $V-I$ de la celda fotovoltaica con valores de resistencia de 0.0001Ω , 0.001Ω , 0.01Ω , 0.1Ω , 1Ω

En la Figura 2.8 se puede observar el efecto en la celda fotovoltaica al variar la resistencia serie con valores de 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 y 1 ohm. Se observa que la corriente de corto circuito se ve afectada por el incremento de la resistencia serie, mientras que el voltaje de circuito abierto se mantiene constante.

2.4 Conexión en serie de celdas fotovoltaicas

El circuito mostrado en la Figura 2.9 corresponde a la conexión en series de dos celdas fotovoltaicas. Como puede observarse en la Figura 2.9 las dos celdas fotovoltaicas están conectadas en serie para incrementar el voltaje, en donde ambas celdas tienen el mismo valor de corriente de corto circuito, irradiación y resistencia serie y paralelo. Se espera entonces que la característica de $I(V)$ tenga el mismo valor de corriente de corto circuito en cualquiera de las dos celdas solares y que el voltaje total sea dos veces la caída de voltaje en una sola celda fotovoltaica. La salida del arreglo esta entre los nodos 3 y 0 (ver Figura 2.9).

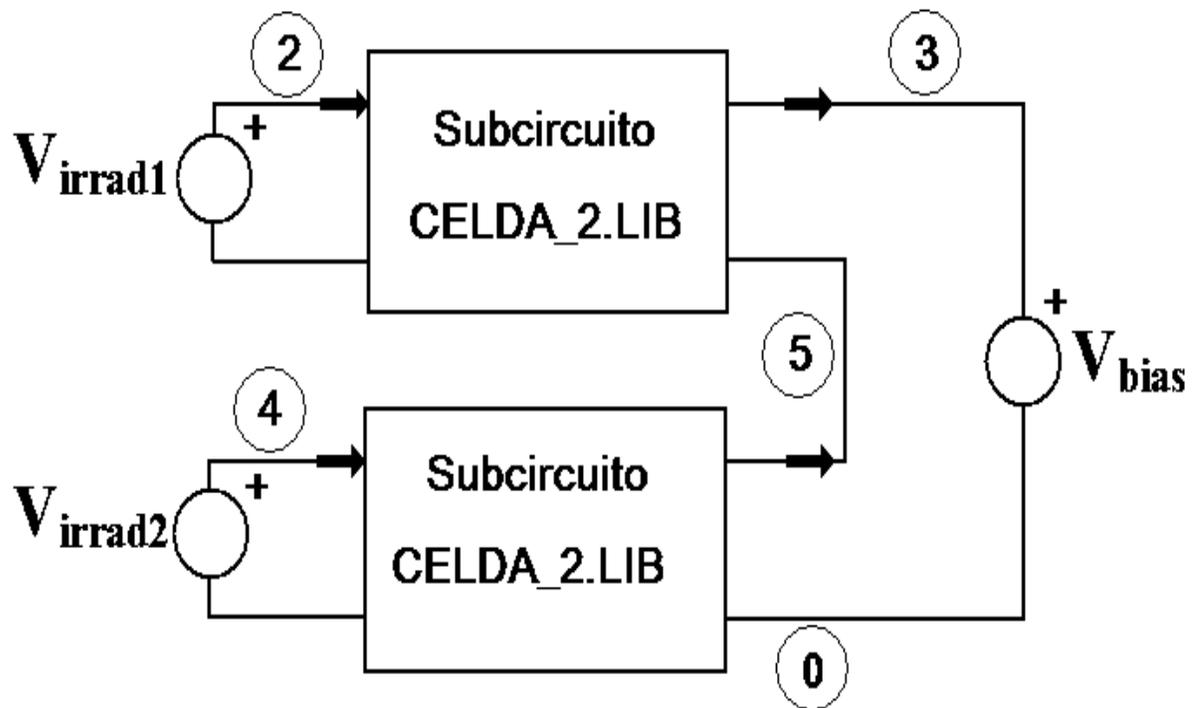
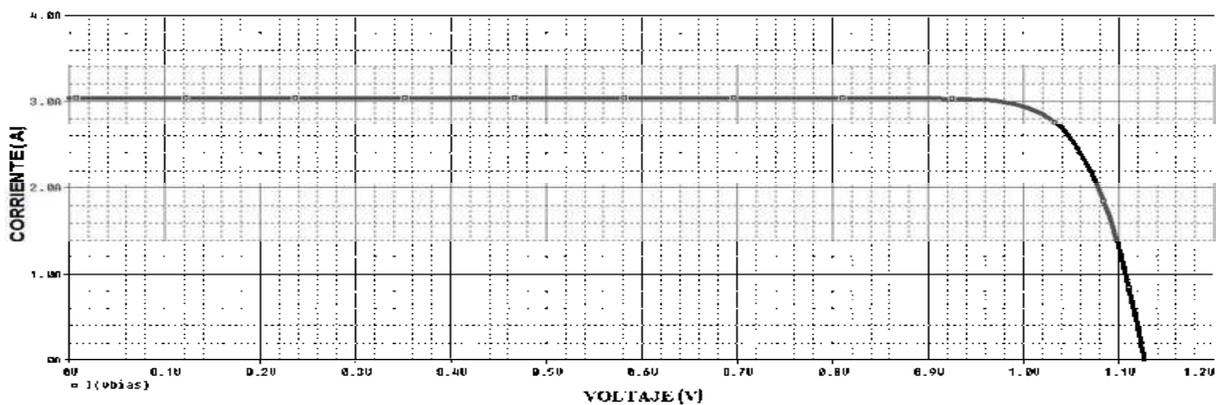


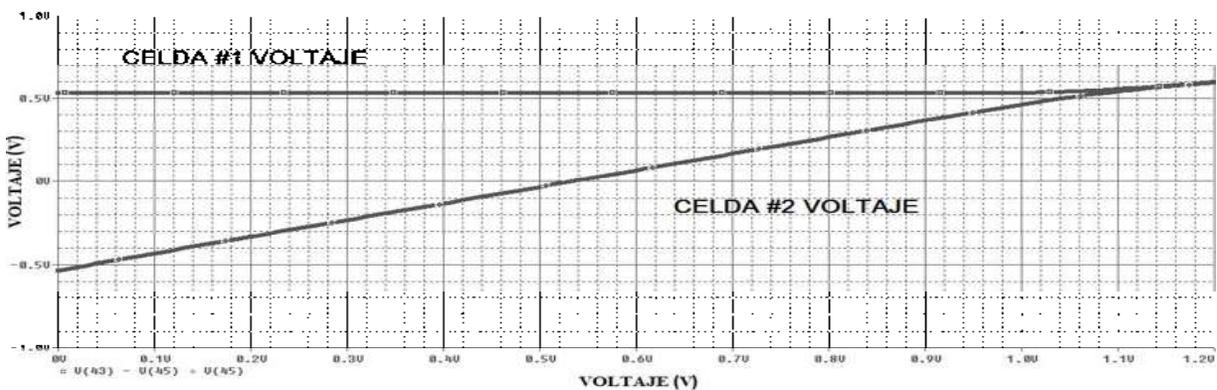
Figura 2.9 Conexión en serie de dos celdas fotovoltaicas

Sin embargo, en muchas ocasiones las celdas solares conectadas en serie no reciben el mismo nivel de irradiancia. Esta situación es común debido a la presencia de suciedad o sombras en una de las celdas solares. Las celdas mostradas en la Figura 2.9 se simulan considerando que se tiene un nivel de irradiancia de $(700 \text{ W/m}^2 \text{ y } 1000 \text{ W/m}^2)$.

Haciendo un acercamiento en la Figura 2.10 (a) se aprecia que en la conexión serie se genera una corriente de corto circuito igual a la corriente de corto circuito generada por la celda solar menos iluminada. Se puede observar haciendo un acercamiento en la gráfica de la Figura 2.10 (b) que la caída de voltaje en la celda número uno es 533mV , mientras que la caída en la celda número dos es -533mV para una corriente de cortocircuito de 3.03 A . En la Figura 2.11 se muestra la contribución individual en potencia de las dos celdas y la potencia total. Se puede observar que para un valor de voltaje de $0\text{-}0.5 \text{ V}$ la celda número 2 absorbe potencia en lugar de generar potencia eléctrica.



(a)



(b)

Figura 2.10 Celdas fotovoltaicas conectadas en serie con diferentes valores de irradiancia, para la (a) curva característica y (b) voltaje generado

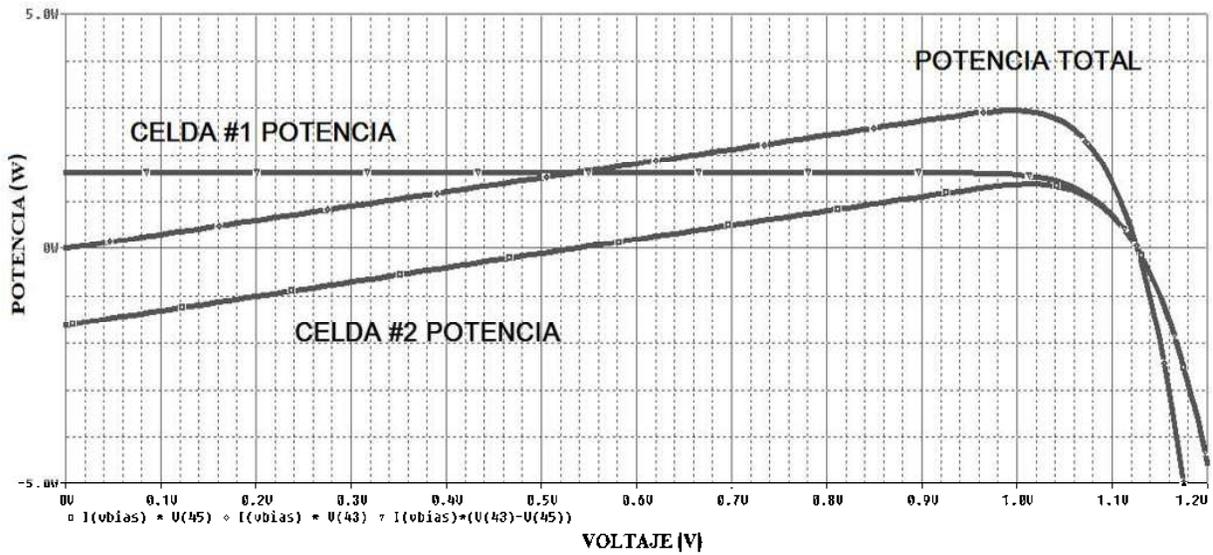


Figura 2.11 Potencia individual y potencia total en las celdas fotovoltaicas

2.5 Conexión en paralelo de las celdas fotovoltaicas

Para incrementar la corriente en arreglos de celdas solares se realizan conexiones en paralelo. La Figura 2.12 muestra la característica $I(V)$ de las dos celdas solares que reciben diferente nivel de irradiancia (1000 W/m^2 y 700 W/m^2). Como puede observarse, la corriente de corto circuito total es la suma de la corriente de corto circuito de ambas celdas.

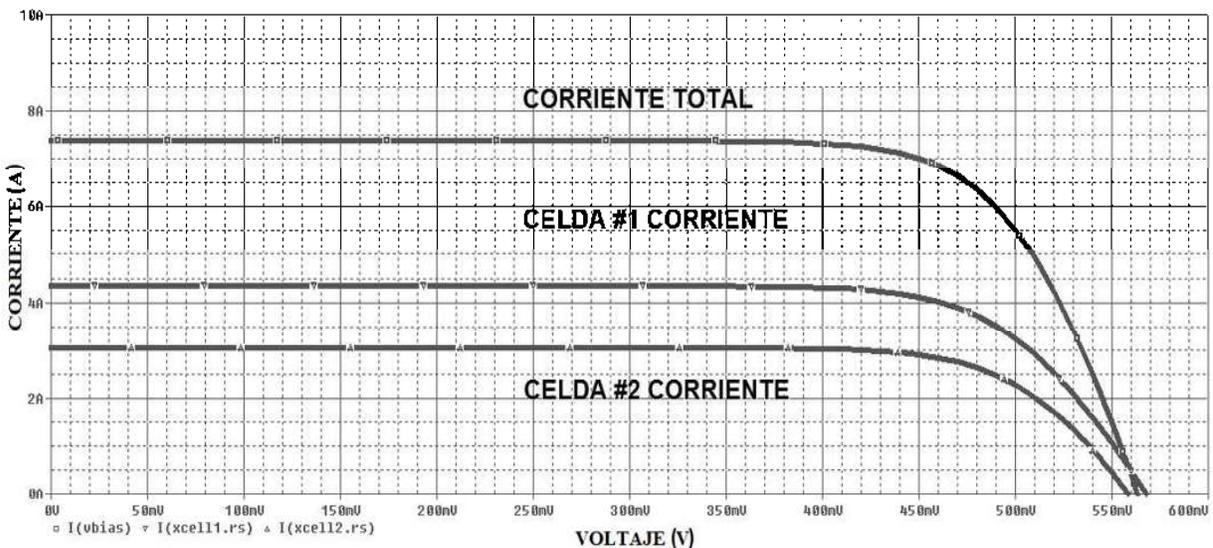


Figura 2.12 Conexión de dos celdas en paralelo con diferente nivel de irradiancia

2.6 Modelo simplificado de un módulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico esta formado por un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas en serie y paralelo. En las aplicaciones terrestres los módulos fotovoltaicos están compuestos de varias celdas solares conectadas en serie. Tradicionalmente, los módulos se construyen con 33 o 36 celdas en serie de silicio mono o policristalino. Sin embargo, para propósitos de simulación se implementa un modelo simplificado del módulo fotovoltaico que permite definir el número de celdas en serie y paralelo. Este enfoque modular reduce el código del programa y lo hace más eficiente.

Para un arreglo de $N_s \times N_p$ celdas solares, en donde N_s es el número de celdas en serie y N_p es el número de celdas en paralelo se tiene

$$I_M = N_p I \quad (2.8)$$

$$I_{scM} = N_p I_{sc} \quad (2.9)$$

$$V_M = N_s V \quad (2.10)$$

$$V_{ocM} = N_s V_{oc} \quad (2.11)$$

en donde el subíndice M indica la variable asociada al módulo fotovoltaico I_{sc} , V_{oc} , V , y I .

Respecto a la resistencia del módulo se tiene,

$$R_{sM} = \frac{V_{ocM}}{I_{scM}} - \frac{P_{\max M}}{FF_{0M} I_{scM}^2} \quad (2.12)$$

en donde FF_{0M} es un factor que define la relación entre la máxima potencia P_{\max} y el producto $I_{sc}V_{oc}$. Este factor se puede calcular con,

$$FF_{0M} = \frac{voc - \ln(voc + 0.72)}{1 + voc} \quad (2.13)$$

en donde el valor normalizado v_{oc} , puede calcularse de los datos de una sola celda solar o de los datos del módulo:

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{nV_T} = \frac{V_{ocM}}{N_s nV_T} \quad (2.14)$$

La corriente de un módulo se define con,

$$I = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s}{nV_T}} - 1 \right) \quad (2.15)$$

en donde,

$$I_0 = \frac{I_{scM}}{N_p \left(e^{\frac{V_{ocM}}{nV_T N_s}} - 1 \right)} \quad (2.16)$$

La Figura 2.13 muestra el circuito implementado en PSpice para el módulo fotovoltaico. La Ecuación 2.12, 2.15 y 2.16 descritas previamente están relacionadas con los componentes R_{sM} , I_{sc} y DI y que se observan en la Figura 2.13.

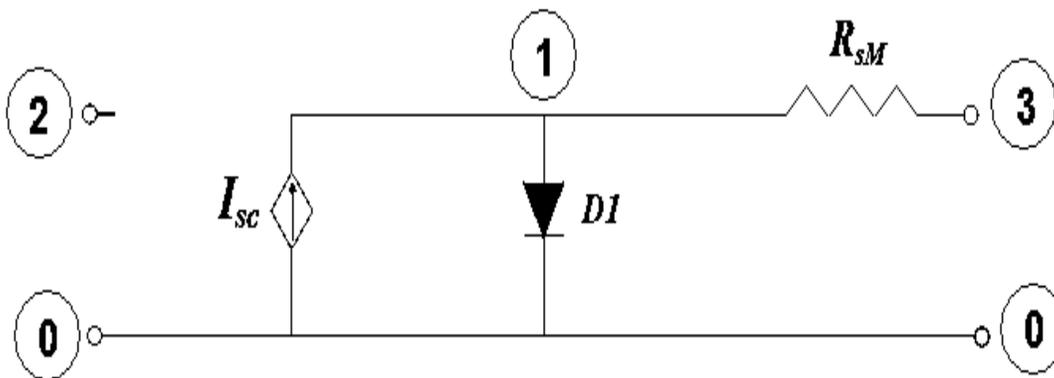


Figura 2.13 Modelo en PSpice del subcircuito del módulo fotovoltaico

En la Figura 2.14 y 2.15 se muestran los resultados de simulación de un módulo fotovoltaico de 85 W, $N_s = 36$, $N_p=1$, $I_{scM} = 5$ A y $V_{ocM} = 22.3$ V. El modelo descrito en esta sección puede reproducirse en las condiciones normales de operación AM1.5G, en donde las características $V-I$ del módulo fotovoltaico se obtienen de los valores de los parámetros disponibles para un módulo fotovoltaico comercial como son corriente de corto circuito, voltaje de circuito abierto, potencia máxima y el número de celdas conectadas.

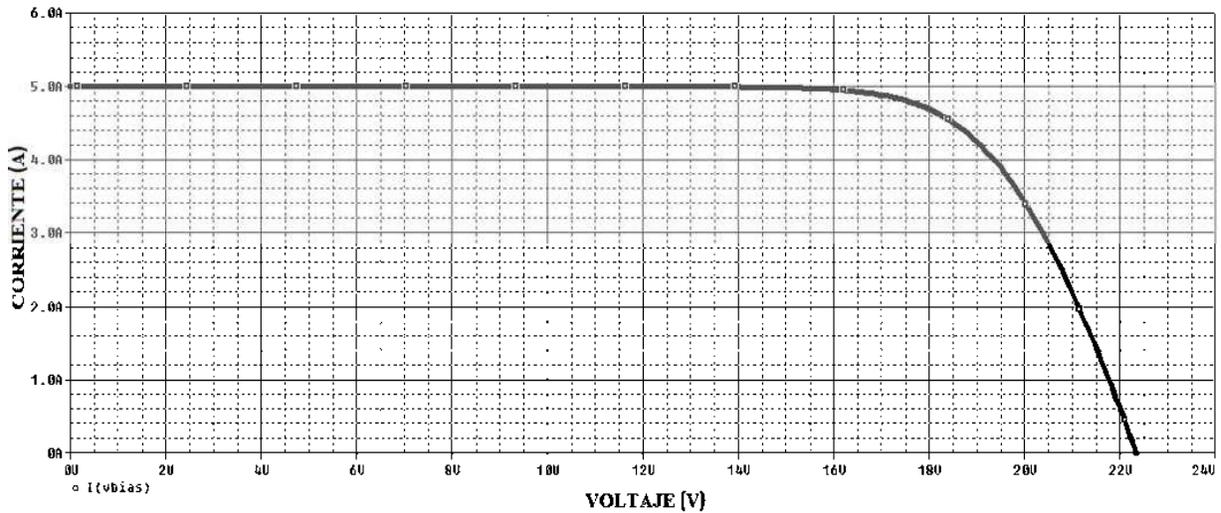


Figura 2.14 Curva característica del módulo fotovoltaico

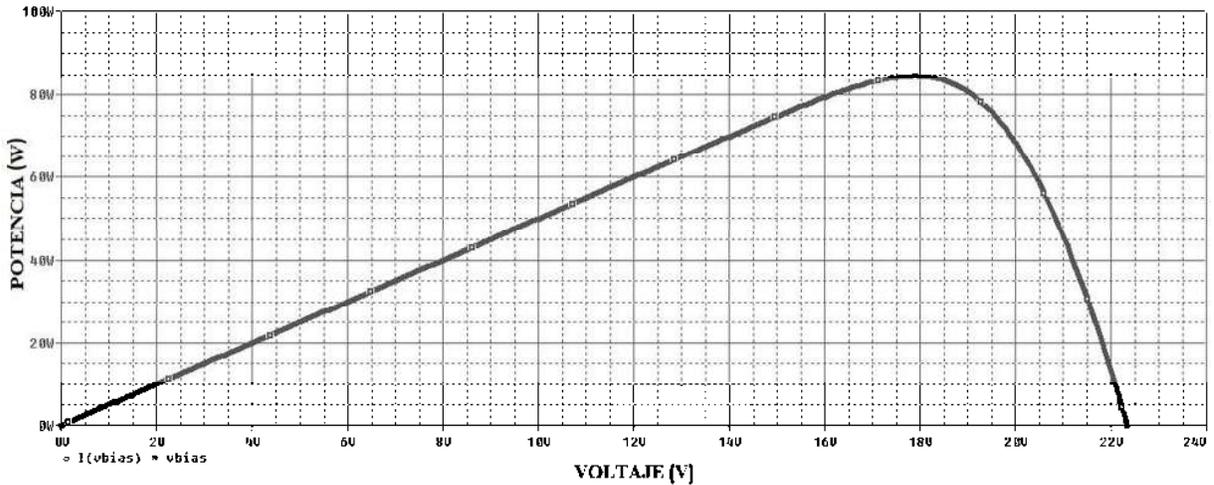


Figura 2.15 Potencia máxima del módulo fotovoltaico

2.6.1 Módulo fotovoltaico conectado directamente a una carga resistiva

La Figura 2.16 muestra las curvas de operación de un módulo fotovoltaico y una carga puramente resistiva. Para conocer las coordenadas del punto de operación se determina la intersección entre la curva de la carga y la del módulo fotovoltaico. La curva característica V - I del módulo fotovoltaico tiene una corriente de corto circuito de 5 A y un voltaje de circuito abierto de 22.3 V. El valor de la resistencia es de 3Ω y su curva característica se representa con una línea recta de pendiente igual a $1/R$.

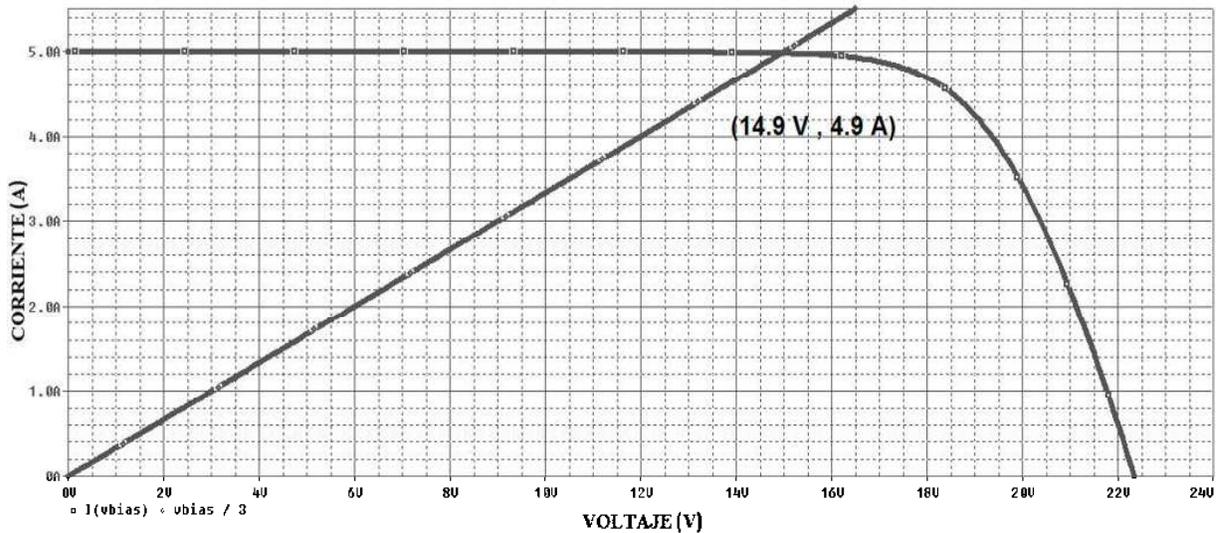


Figura 2.16 Característica V - I del módulo fotovoltaico y carga resistiva

Como puede observarse en la Figura 2.16, para un valor de irradiación determinado existe un punto de intersección entre las curvas de operación del módulo y la carga. Este punto de intersección está definido por una corriente que fluye en la carga de 4.9 A y un voltaje de 14.9 V.

2.7 Conclusiones

En este Capítulo se presentó la implementación del modelo equivalente ideal de la celda fotovoltaica. Además, se mostró la operación de los arreglos en serie y paralelo de estas celdas y el efecto en su desempeño al operar con diferentes niveles de irradiación. Se utilizó un modelo simplificado para un módulo fotovoltaico, el cual ofrece ventajas desde el punto de vista de reducción de código para simularse más eficientemente. Se mostró la operación conjunta del módulo fotovoltaico y una carga representada por una resistencia.

Capítulo 3

Bomba centrífuga de CD

En este Capítulo se presenta el modelo de la bomba centrífuga de CD implementado en este trabajo, el cual se basa en el motor CD en conexión serie. Se presentan las ecuaciones que describen al motor de CD y por otra parte se presenta el procedimiento para calcular los parámetros de la bomba centrífuga.

3.1 Motor CD en conexión serie

Un motor CD serie es un motor cuyo devanado de campo se conecta en serie con el devanado del rotor. En un motor CD serie, la corriente de campo y la corriente de línea son iguales. El comportamiento básico de un motor CD serie se debe al hecho de que el flujo es directamente proporcional a la corriente de armadura, al menos hasta llegar a la saturación. Cuando se incrementa la carga del motor, también aumenta su flujo y como consecuencia ocasiona una disminución en su velocidad [Chapman 2005]. La Figura 3.1 describe el circuito equivalente del motor serie.

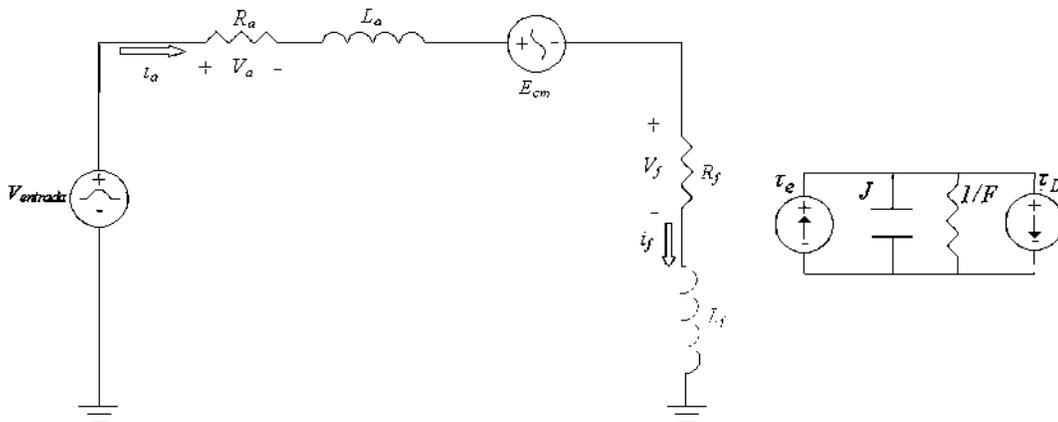


Figura 3.1 El circuito equivalente de un motor DC serie con la carga de una bomba

El par inducido en esta máquina está dado por la siguiente Ecuación,

$$T_e = K_T \phi i_a \quad (3.1)$$

o bien

$$T_e = K_m i_a^2 \quad (3.2)$$

en donde

K_T Constante del par del motor

K_m Constante del motor

i_a Corriente de armadura

ϕ Flujo

El flujo en esta máquina es directamente proporcional a la corriente del inducido. Por lo tanto, el flujo en la máquina está dado por,

$$\phi = K_f i_a \quad (3.3)$$

El voltaje generado en la máquina está dado por,

$$E_{cm} = K_m \phi \omega \quad (3.4)$$

o bien

$$E_{cm} = K_m i_a \omega \quad (3.5)$$

en donde

K_f Constante del motor

ω Velocidad del motor

La parte mecánica de la máquina se define por medio de la siguiente Ecuación dinámica,

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + F\omega + T_L \quad (3.6)$$

en donde

J Inercia

F Fricción

T_L Par de carga

T_e Par de carga

Para la parte eléctrica, aplicando la ley de voltajes de Kirchoff a la Figura 3.1 se tiene,

$$V_{entrada} = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_{cm} + i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (3.7)$$

con $i_f = i_a$ y $\frac{di_f}{dt} = \frac{di_a}{dt}$

3.2 Modelo de la bomba centrífuga

Las bombas disponibles en el mercado han sido desarrolladas pensando en que hay una fuente de potencia constante. Sin embargo, la potencia que producen los módulos fotovoltaicos es directamente proporcional al nivel de radiación solar. Es decir, a medida que el sol cambia su posición durante el día y al variar la disponibilidad de potencia también cambia la disponibilidad de potencia para la bomba. Por esta razón se han creado algunas bombas especiales para la electricidad fotovoltaica como lo son las bombas centrífugas de CD [Foster et al. 1999]. El par de carga de una bomba centrífuga se puede modelar como [Castañer 2002],

$$T_L = A + B\omega^2 \quad (3.8)$$

en donde A y B son constantes que dependen de cada bomba en particular. Como resultado de este par de carga se alcanza un equilibrio para un valor de la velocidad angular. Por otra parte, la bomba centrífuga tiene una curva característica que relaciona la altura del bombeo H , la velocidad y el flujo resultante Q . Estas curvas se pueden aproximar con un polinomio de segundo grado como sigue,

$$H = a_1 S^2 + b_1 S Q + c_1 Q^2 \quad (3.9)$$

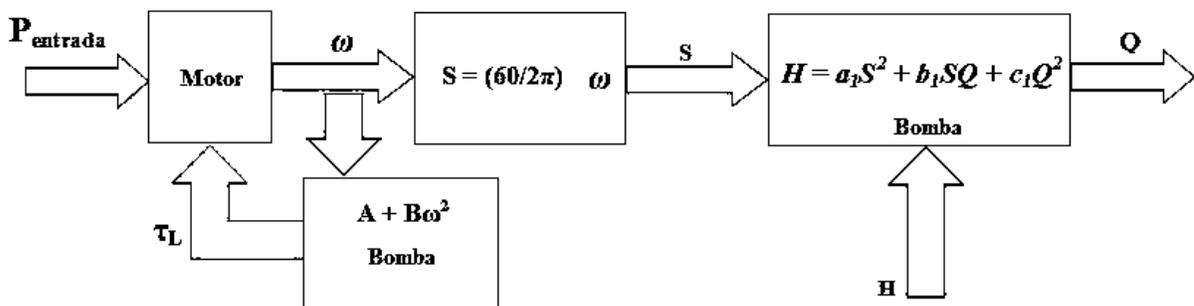


Figura 3.2 Circuito esquemático de los diferentes parámetros de una conexión motor-bomba de CD.

en donde S es la velocidad angular en rpm y a_1 , b_1 , y c_1 son constantes para una bomba determinada. El esquema de la Figura 3.2 muestra la forma en que se relacionan los diferentes parámetros de un motor-bomba de CD.

3.3 Cálculo de parámetros

La Tabla 3.1 resume los datos que describen la curva característica para una bomba centrífuga de CD sumergible con $V = 200$ V, $P_{entrada} = 340$ W y $I = 1.7$ A.

Tabla 3.1 Datos de la curva característica de la bomba centrífuga

Altura H (metros)	Flujo Q (l/S)	P_{in} Potencia (W)
13.4	1	480
11.5	1.5	340
5	2.3	300

Para ajustar los puntos de la curva característica de la Tabla 3.1 a un polinomio como el descrito en la Ecuación (3.9) se plantean las siguientes tres ecuaciones considerando una velocidad de 3000 rpm,

$$13.4 = 9000000a_1 + 3000b_1 + 1c_1 \quad (3.10)$$

$$11.5 = 9000000a_1 + 4500b_1 + 2.25c_1 \quad (3.11)$$

$$5 = 9000000a_1 + 6900b_1 + 5.29c_1 \quad (3.12)$$

En forma matricial

$$\begin{bmatrix} 9 \times 10^6 & 3000 & 1 \\ 9 \times 10^6 & 4500 & 2.25 \\ 9 \times 10^6 & 6900 & 5.29 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.4 \\ 11.5 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Resolviendo simultáneamente las tres ecuaciones se obtiene,

$$a_1 = 1.35 \times 10^{-6}$$

$$b_1 = 0.0015$$

$$c_1 = -3.32$$

Para calcular las constantes A y B relacionadas a la expresión del par de carga T_L de la bomba centrífuga se procede de la siguiente manera. Se supone que $H = 11.5$ m, $S = 3000$ rpm, $P_{entrada} = 340$ W, $\omega = 314$ rad/seg, $V = 200$ V y $R_a + R_f = 0.3$.

En estado estable, el cálculo de K_m se obtiene de sustituir (3.5) en (3.7),

$$K_m = \frac{V_{entrada} - i_{nom}(R_a + R_f)}{i_{nom}\omega_{nom}} \quad (3.14)$$

Recordando que en estado estable se cumple de (3.2)

$$T_e = T_L = A = K_m i^2 \quad (3.15)$$

o en términos de la potencia demandada

$$A = K_m \left(\frac{P}{V_{entrada}} \right)^2 \quad (3.16)$$

Para determinar B se sustituye (3.6) en (3.8) y se obtiene,

$$B = \frac{K_m i_{nom}^2 - F\omega_{nom} - A}{\omega_{nom}^2} \quad (3.17)$$

3.4 Simulación en PSpice de la bomba centrífuga de CD

En la Figura 3.3 se presenta la respuesta de la bomba centrífuga al energizarse con un voltaje de entrada de 200 volts. Los datos utilizados en la simulación de la bomba son: $R_a = 0.15 \Omega$, $R_f = 0.15 \Omega$, $A = 0.0925$ y $B = 7.26 \times 10^{-6}$. Se observa que el flujo comienza a aparecer hasta aproximadamente 7.5 segundos y después crece hasta 1.5 litros/segundo.

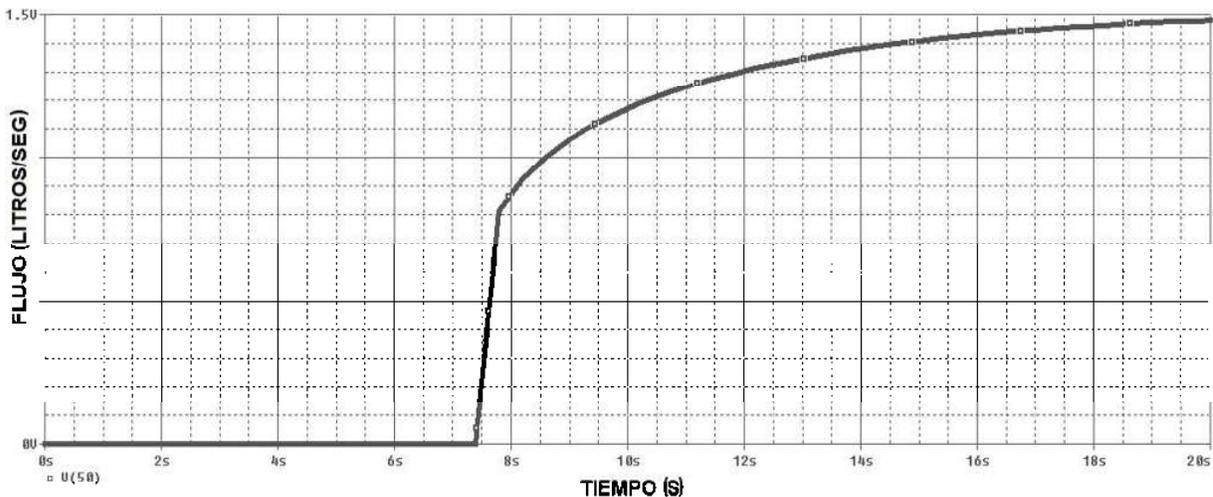


Figura 3.3 Flujo producido por la bomba centrífuga

3.5 Conclusiones

En este Capítulo se implementó el modelo de la bomba centrífuga y se calcularon los parámetros para realizar la simulación en PSpice. Se calcularon las constantes del polinomio que determinan el comportamiento del caudal de agua que proporciona la bomba. Se observó la respuesta del sistema motor-bomba cuando se le aplica un voltaje de 200 V. Se observó una respuesta en el flujo a partir 7.5 segundos y después de ese tiempo comienza la bomba a proporcionar una cantidad de flujo 1.5 litros/segundo.

Capítulo 4

Batería de Plomo-Ácido

En este Capítulo se presenta el modelo de la batería plomo-ácido que se utiliza en el sistema fotovoltaico para proporcionar potencia a la carga. Cuando no exista la irradiancia solar se utiliza la energía almacenada en la batería para suministrar potencia a la bomba centrífuga de CD.

Cuando se usa la energía procedente de la radiación solar para aplicaciones eléctricas, se hace necesario el almacenamiento de energía. El objetivo es disminuir en lo posible la dependencia del carácter cíclico y de los factores climáticos que hacen que la radiación solar no este presente siempre. Los ciclos día-noche, los periodos con días nublados, los meses de poca insolación y la necesidad de suministrar consumos puntuales de elevada potencia y corta duración, suelen obligar a prever sistemas de acumulación de energía. En el caso de la energía fotovoltaica se usan, en general, acumuladores electroquímicos.

4.1 Sistema fotovoltaico aislado

El esquema típico de un sistema de fotovoltaico aislado se muestra en Figura 4.1. Una batería es necesaria para extender el suministro de potencia a la carga cuando no hay ninguna potencia generada por los módulos fotovoltaicos por ausencia de irradiación o cuando la potencia generada es más pequeña que la requerida. La batería también almacena la energía cuando la demanda de la carga es más pequeña que la potencia generada por los módulos fotovoltaicos.

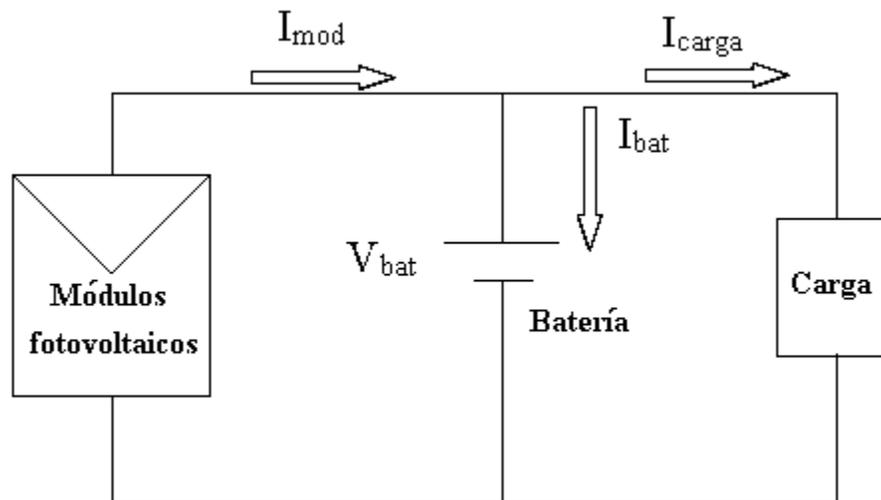


Figura 4.1 Sistema fotovoltaico aislado

Una batería es un elemento de almacenamiento de energía y puede interpretarse como una carga capacitiva conectada a la salida del generador fotovoltaico. Como puede verse en la Figura 4.1, el voltaje V_{bat} establece el voltaje del arreglo. Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff (LCK), la corriente que fluye a través de los tres elementos está relacionada por,

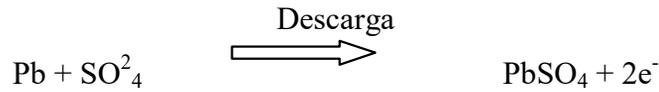
$$I_{mod} = I_{bat} + I_{carga} \quad (4.1)$$

en donde I_{mod} es la corriente de salida del sistema fotovoltaico, I_{bat} es la corriente que fluye a través de la batería e I_{carga} es la corriente demandada por la carga. Como puede verse en la Figura 4.1, I_{bat} tiene indicado el sentido en el cual se carga la batería, considerando que cuando la señal de I_{bat} es negativa la batería se descarga. El valor de I_{bat} está determinado en cada momento t por el nivel de irradiación en el sistema fotovoltaico y por el valor instantáneo de la corriente demandada por la carga.

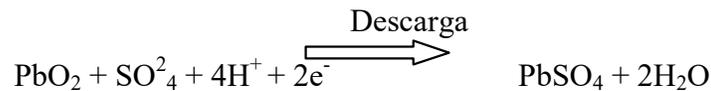
4.2 Características de la batería de plomo-ácido

Desde el punto de vista químico en la batería se produce una reacción oxido-reducción. La placa positiva de una batería es de plomo (Pb) con cierta cantidad de antimonio (Sb), mientras que la placa negativa es una amalgama de dióxido de plomo (PbO_2). Las reacciones químicas en ambos electrodos durante la descarga son [Ortega 2001]:

Electrodo positivo:



Electrodo negativo:



Como se observa, durante la descarga se consume ácido por lo que disminuye la densidad de la solución de modo proporcional. Durante la carga las reacciones se desarrollan en sentido inverso. El sulfato de plomo se forma sobre la superficie de los electrodos obstruyendo e impidiendo el acceso de otros aniones sulfato. Por ese motivo durante la descarga va disminuyendo la tensión en la batería, su capacidad y la intensidad de corriente máxima que es capaz de suministrar.

Los parámetros que definen una batería son (a).- la capacidad nominal C_x para una proporción de descarga de x horas, (b).- la relación de carga/descarga y (c).- el estado de carga *SOC* [Castañer 2002].

(a) Capacidad nominal

La capacidad nominal se define como la carga total que puede almacenarse. Este parámetro lo proporcionan los fabricantes mediante la medición de la carga entregada por la batería respecto a una relación de descarga y temperatura. Los intervalos de tiempo proporcionados por los fabricantes son 5, 10 y 100 horas.

La energía total que puede proveer la batería se define por,

$$C_x(\text{Wh}) = C_x(\text{Ah})V_{bat}(\text{V}) \quad (4.2)$$

en donde x es el intervalo de tiempo de descarga y V_{bat} es el voltaje de la batería.

(b) Relaciones de carga/descarga

Las proporciones de carga y descarga se definen como la relación entre la capacidad nominal de la batería y la carga/descarga de corriente. En el caso de una descarga la proporción de la descarga es el periodo de tiempo requerido por la batería para descargar a una corriente constante. La proporción de la descarga coincide con el subíndice de la capacidad.

La capacidad de la batería es una función de las proporciones de la carga y de la descarga. La capacidad de la batería aumenta para proporciones de descarga más prolongadas debido a la penetración más profunda del electrolito en el material del electrodo de la batería.

(c) El estado de carga de la batería

El estado de carga (*SOC*) es un parámetro importante en la mayoría de los modelos de baterías y se define como la carga eléctrica almacenada por la batería en un tiempo determinado. El valor de *SOC* es la proporción de la carga disponible en un tiempo dado dividido por la capacidad máxima,

$$SOC = \left(1 - \frac{Q}{C}\right) \quad (4.3)$$

$$0 \leq SOC \leq 1 \quad (4.4)$$

en donde *C* es la capacidad de la batería y *Q* es la carga entregada por la batería en el momento requerido. Un parámetro complementario al *SOC* es la profundidad de descarga *DOD*,

$$DOD = 1 - SOC \quad (4.5)$$

4.3 Modelo en PSpice de la batería de plomo-ácido

El modelo de la batería de plomo-acido en PSpice se implementa utilizando una estimación dinámica del *SOC*. El modelo tiene los parámetros de entrada siguientes:

- El estado inicial de carga: (SOC_I (%)): indica la carga disponible.
- El estado máximo de carga: (SOC_m): indica la capacidad máxima de la batería.
- n_S : El número de celdas en serie de 2 V.
- Dos constantes empíricas adicionales que dependen de las características de la batería son:

- K : eficiencia de carga/descarga de la batería;
- $D (h^{-1})$: Proporción de descarga de la batería.

El modelo eléctrico de la batería está compuesto de una fuente de voltaje V_1 con una resistencia en serie R_1 como se muestra en la Figura 4.2. Los valores de V_1 y R_1 dependen del modo de funcionamiento de la batería en un momento determinado. Aunque pueden tenerse en cuenta todos los modos de funcionamiento, en este trabajo se restringen a los modos de funcionamiento carga y descarga.

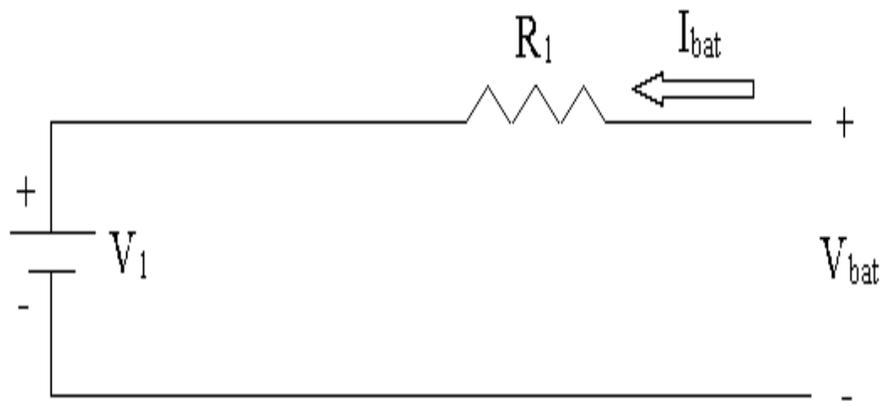


Figura 4.2 Modelo de la batería

El modelo de la batería se implementa en PSpice con el circuito equivalente mostrado en la Figura 4.3, en dónde las fuentes controladas por voltaje " V_{carga} " y " $V_{descarga}$ " describen los voltajes para la carga y descarga, respectivamente. La implementación en PSpice de la conmutación del modo de carga de la batería a descargar o viceversa se logra usando dos interruptores para el control de la corriente, " S_{carga} " y " $S_{descarga}$ " mostrada en Figura 4.2 [Castañer y Silvestre 2002]. Como puede observarse, éstos interruptores conectan los nodos de salida de la batería a las fuentes de voltaje y resistencias internas que dependen del modo del funcionamiento que se identifica con el signo de la corriente I_{bat} . El signo positivo corresponde al modo de carga y el signo negativo para el modo de descarga. El signo de la corriente se determina por medio de la fuente " $V_{corriente}$ " (ver Figura 4.3).

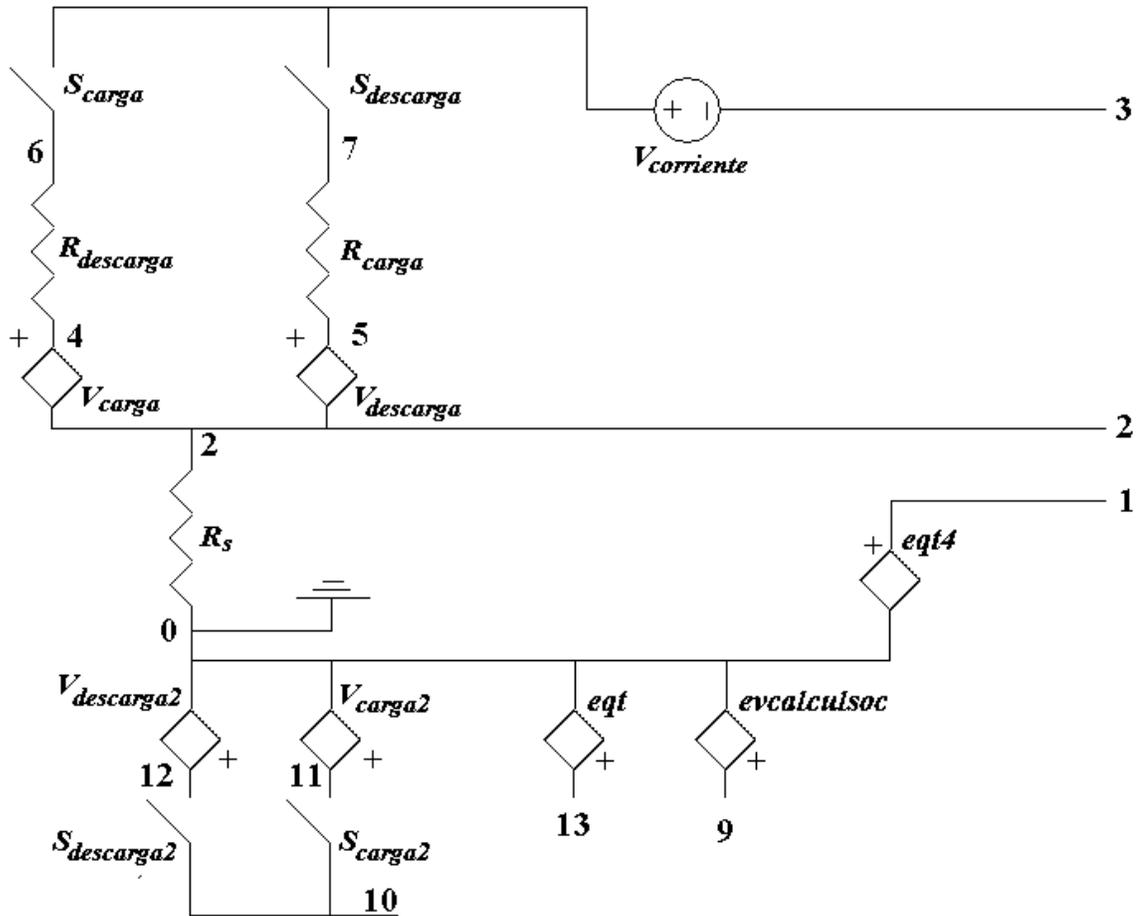


Figura 4.3 Circuito equivalente de la batería

La implementación del modelo consiste básicamente en asignar las siguientes expresiones para el modo de carga y descarga. Para el modo carga se tiene,

$$V_{carga} = (2 + 0.148\beta)n_s \quad (4.6)$$

$$R_{carga} = \frac{0.758 + \frac{0.1309}{(1.06 - \beta)}}{SOC_m} n_s \quad (4.7)$$

para el modo descarga se tiene,

$$V_{descarga} = (1.926 + 0.124\beta)n_s \quad (4.8)$$

$$R_{descarga} = \frac{0.19 + \frac{0.1037}{(\beta - 0.14)}}{SOC_m} n_s \quad (4.9)$$

con

$$\beta = \frac{SOC}{SOC_m} \quad (4.10)$$

Una parte importante del modelo de PSpice se relaciona a la estimación del valor instantáneo del *SOC*. La estimación se realiza por medio de la ecuación siguiente:

$$SOC_n(t) = SOC_1 + \frac{1}{SOC_m} \int \left(\frac{KV_1 I_{bat}}{3600} \right) - \frac{DSOC_n(t - \tau) SOC_m}{3600} dt \quad (4.11)$$

La fuente de voltaje controlada eqt4 en la Figura 4.3 determina el límite de los valores de salida *SOC* del modelo de la batería obtenidos con la Ecuación (4.11).

Para analizar la evolución del voltaje y del estado de carga de la batería, se simula la batería conectada a una fuente de corriente sinusoidal de 10 A de amplitud y una frecuencia de 1 kHz, como se muestra en la Figura 4.4.

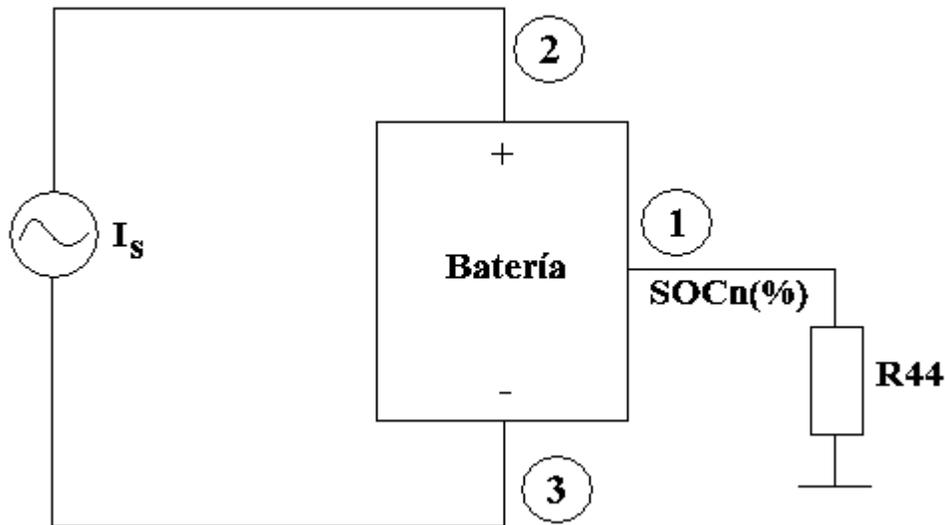
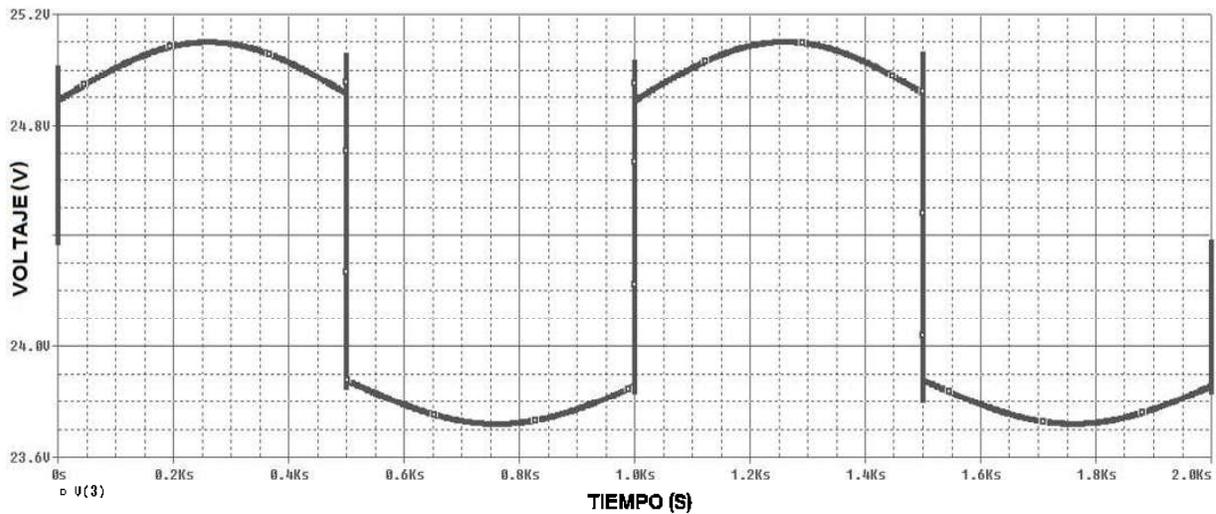


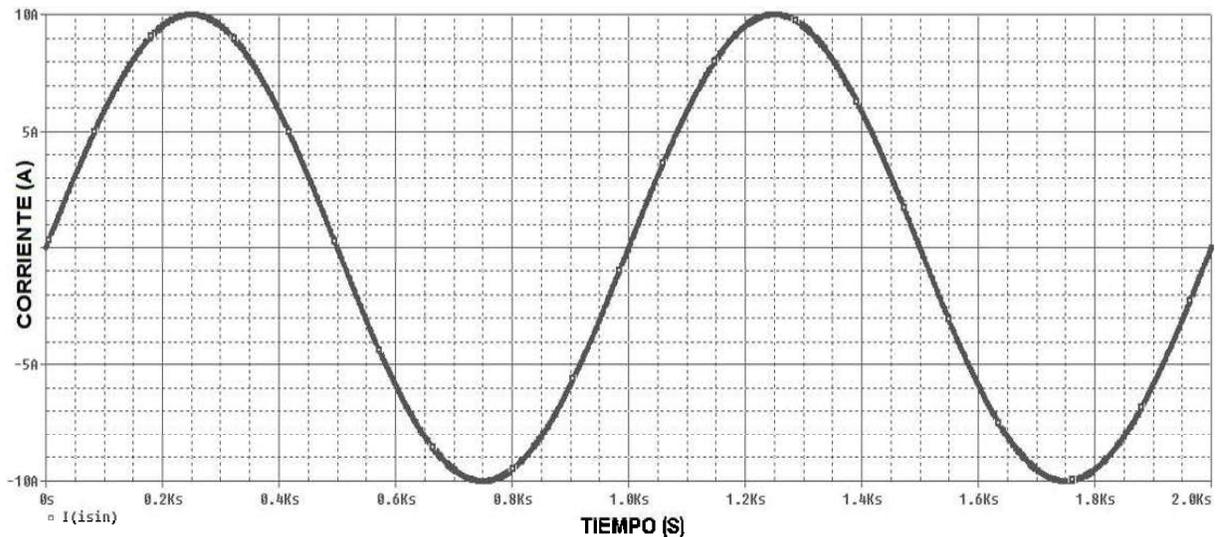
Figura 4.4 Diagrama de la simulación de la batería

Se consideran 12 celdas de 2 V, $SOC=1200$ Wh máximo, la eficiencia de la batería de carga/descarga $k=0.8$, $D=0.001h^{-1}$ y un valor inicial del estado normalizado de carga $SOCI=50\%$.

En la Figura 4.5 se observa los dos modos de operación de carga y descarga de la batería. Se puede apreciar que se carga hasta un valor de 25 V y en un tiempo de 0.5 kilosegundos comienza el modo de descarga con un valor de aproximadamente 23.5 V.



(a)



(b)

Figura 4.5 (a) Voltaje de la batería y (b) corriente senoidal

4.4 Conclusiones

En este Capítulo se analizaron las características eléctricas de la batería plomo-ácido, así como también sus modos de operación carga y descarga. El nivel de carga y descarga de la batería se determina por medio del indicador *SOC*. La batería será incluida en el sistema fotovoltaico para almacenar y proporcionar energía a una carga cuando los módulos fotovoltaicos no generen energía por ausencia de la irradiancia solar. Las baterías de plomo-ácido debido a su ciclo profundo de descarga, es hoy en día, de las que mayor utilidad tienen en sistemas fotovoltaicos aislados.

Capítulo 5

Módulos Fotovoltaicos Conectados a una Batería y Carga

En este Capítulo se analiza el comportamiento del sistema de bombeo fotovoltaico. La simulación del sistema se presenta bajo condiciones de insolación específicas de un lugar y se incorpora la batería al modelo del sistema. Los niveles de irradiación corresponden a la ciudad de Morelia a lo largo del año.

5.1 Datos de insolación de la ciudad de Morelia

México cuenta con un excelente recurso solar en casi todo su territorio. En la mayor parte del país, los días son largos y despejados durante el verano. En el campo hay una relación favorable para el uso de la energía solar ya que los días de mayor necesidad de agua son aquellos en que el sol es más intenso.

La radiación solar que recibe una superficie en la tierra se conoce como irradiancia, y se mide en unidades de Watts por metro cuadrado (W/m^2). La irradiancia puede ser directa si proviene directamente del disco solar, o difusa si ha sufrido cambios de trayectoria debido a reflexión y refracción en la atmósfera terrestre. En un día despejado, la irradiancia alcanza un máximo de 1000 a 1200 W/m^2 al mediodía. La mayor parte de la radiación disponible es radiación directa. Esto significa que la superficie captadora, en este caso el arreglo fotovoltaico, recibe más irradiancia cuando se orienta directamente hacia el sol.

La cantidad de energía solar recibida durante un intervalo de tiempo se conoce como insolación y se mide en unidades de Watts-hora por metro cuadrado (Wh/m^2). La insolación comúnmente se expresa términos de horas solares pico. Una hora solar pico es equivalente a la energía recibida durante una hora con una irradiancia promedio de 1000 W/m^2 .

La insolación es un parámetro clave en el diseño de sistemas solares. Los factores principales que afectan la insolación sobre una superficie captadora son: Las condiciones climáticas y el ángulo de la superficie captadora con respecto a la posición del sol. En lugares donde los días nublados son relativamente más frecuentes, la insolación promedio es menor. Cuando la latitud del lugar sobrepasa los 15 grados, los días de invierno son apreciablemente más cortos que los días de verano. Esto resulta en una mayor insolación promedio en el verano. Por ejemplo, en las regiones lluviosas del sur de México, la insolación horizontal alcanza 4 kWh/m² por día en el invierno, 5.2 kWh/m² por día en el verano y 4.5 kWh/m² por día como promedio anual. En las regiones áridas del norte de México, la insolación horizontal alcanza 5 kWh/m² por día en el invierno, 7.5 kWh/m² por día en el verano y 6.5 kWh/m² por día como promedio anual. En la Tabla 5.1 se muestran los niveles de irradiación de la ciudad de Morelia, Michoacán [Foster et al. 1999]. Por ejemplo, el mes de Mayo tiene una insolación de 5.9 kWh/m² por día, o bien utilizando el concepto de horas solares pico, se cuenta con un intervalo de 5.9 horas con un nivel de irradiancia de 1000 W/m². En la Figura 5.1 se muestran las horas solares pico del mes de Mayo, lo cual indica que el arreglo fotovoltaico proporciona energía durante 5.9 horas a la batería y a la bomba. Por lo tanto, en el intervalo cuando el arreglo no proporcione energía la batería podría operar la bomba o energizar otra carga.

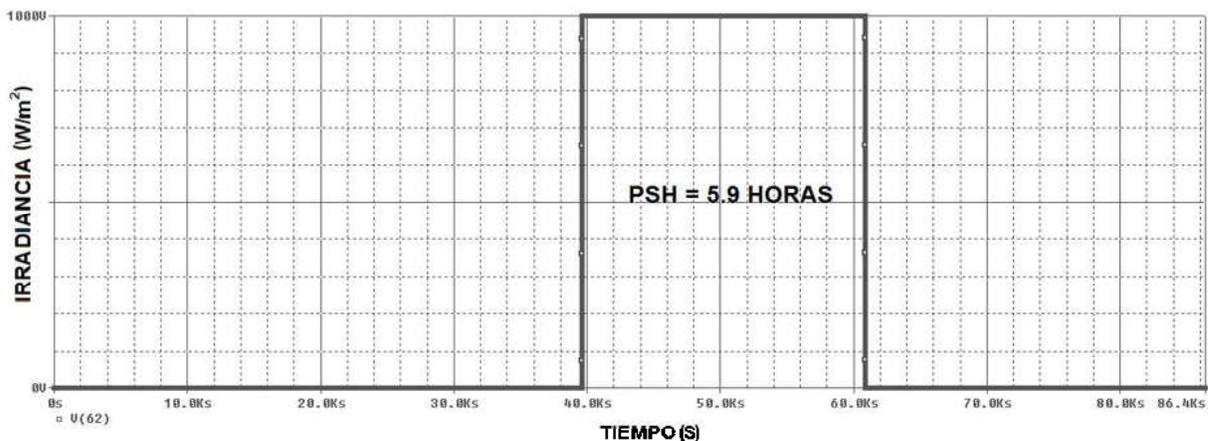


Figura 5.1 Horas solares pico del mes de Mayo

Tabla 5.1 Niveles de irradiación de la ciudad de Morelia en kWh/m²-día [Foster et al. 1999].

CIUDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MORELIA	4.2	4.9	5.5	5.8	5.9	5.2	5.0	5.1	4.9	4.6	4.3	3.7

5.2 Resultados de simulación en PSpice

El sistema fotovoltaico simulado en esta sección está formado por un arreglo de 11 módulos conectados en serie con una capacidad de 0.9295 kW. La batería de plomo-ácido está compuesta de 96 celdas en serie de 2 V y, por lo tanto, un voltaje de 192 V. La carga del sistema se trata de una bomba centrífuga de CD que opera con un voltaje de 200 V, demanda una corriente de 1.7 A y una potencia de 340 W. En el Apéndice B se resumen los datos de los componentes que integran el sistema fotovoltaico que se simula en PSpice.

La Figura 5.2 muestra el flujo de agua proporcionado por el sistema de bombeo fotovoltaico durante un periodo de 24 horas (86400 segundos), para el nivel de insolación del mes de Mayo. Se puede apreciar que en el intervalo de las 11:00 (39600 segundos) a las 17:00 horas (61200 segundos) se incrementa el flujo del agua proporcionado por la bomba. Este comportamiento está asociado a la contribución en la generación de energía por parte del arreglo de módulos fotovoltaicos.

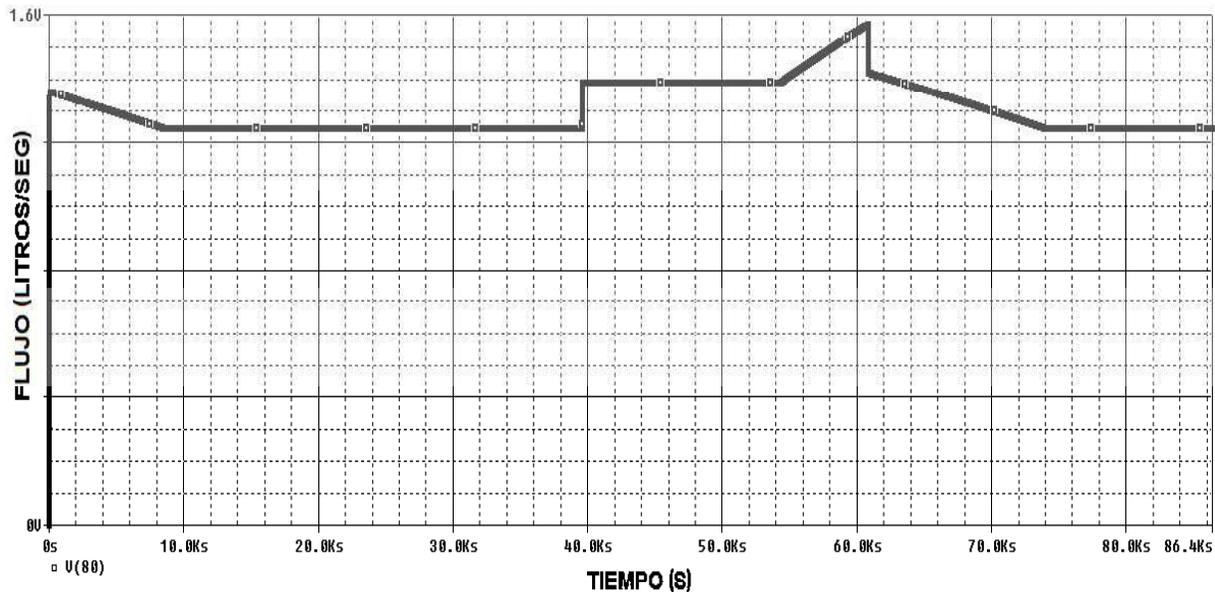


Figura 5.2 Flujo proporcionado por el sistema de bombeo fotovoltaico en un periodo de 24 horas

En la Figura 5.3 se muestran el voltaje en la batería, bomba y arreglo fotovoltaico, el cual es idéntico ya que los tres elementos están conectados en paralelo. El voltaje en los tres elementos es de 192 V. Además, en la Figura 5.4 se muestra el estado de carga de la batería.

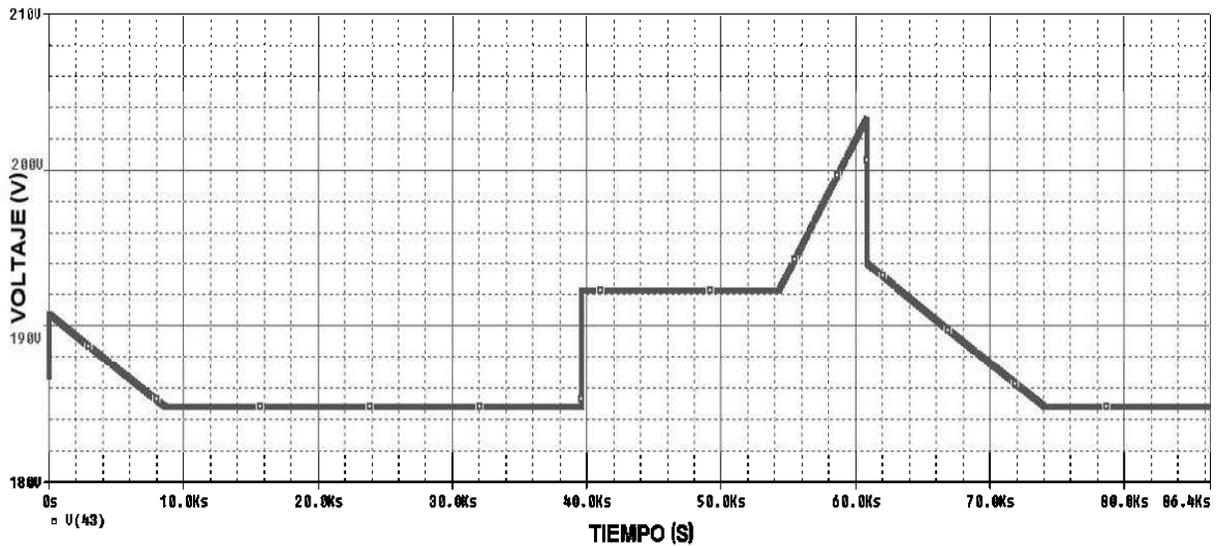


Figura 5.3 Voltaje del arreglo fotovoltaico

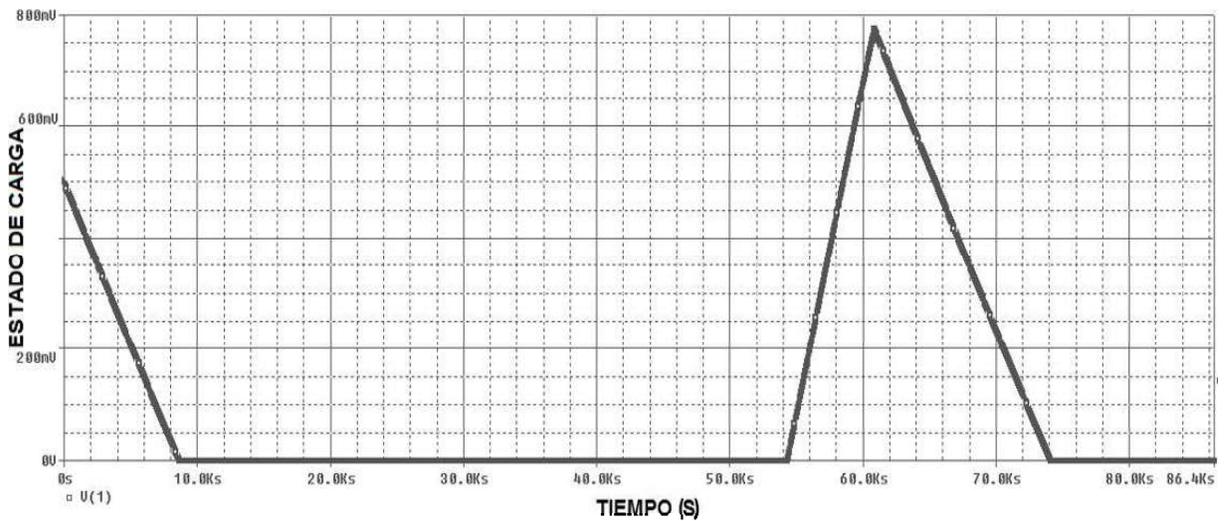


Figura 5.4 Estado de carga de la batería

En esta prueba del sistema fotovoltaico la batería mantiene conectada permanentemente en el sistema módulo fotovoltaico – bomba de agua. Sin embargo, en la Figura 5.3 se puede apreciar que en el intervalo de tiempo de las 0 a las 11:00 horas (39600 segundos) la batería suministra por si misma toda la energía demandada por la bomba pero, contradictoriamente, su voltaje nunca cae por debajo de 184 volts. Además, en la Figura 5.4 se aprecia que para el mismo intervalo de tiempo el estado de carga de la batería indica que se ha descargado completamente.

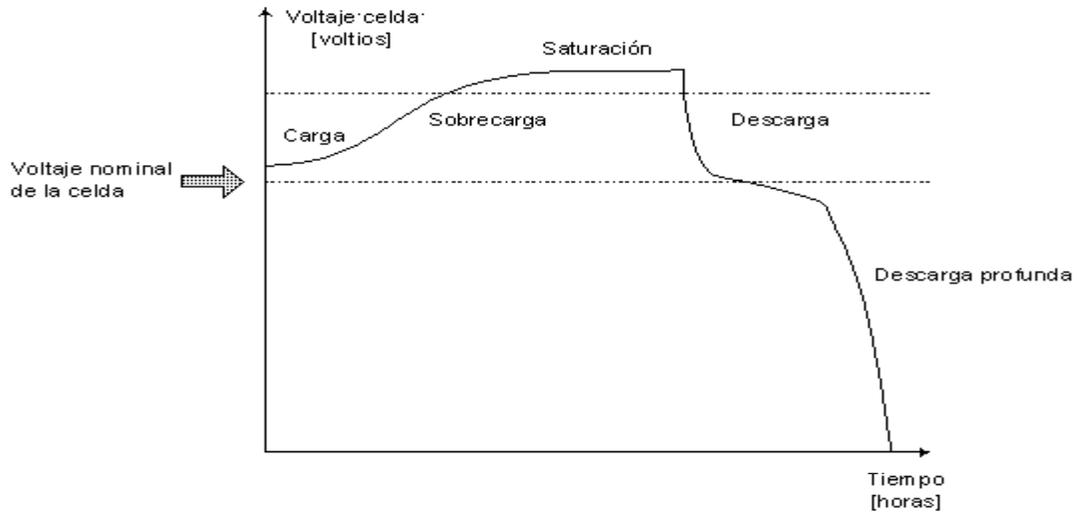


Figura 5.5 Modos de operación de la batería plomo-ácido [Fernández et al. 2005]

Es decir, aparentemente la batería se descarga pero es capaz de mantener un voltaje remanente de 184 volts. Estos resultados son erróneos debido a que si bien la batería se le está permitiendo que se descargue completamente el modelo de dicha batería no incluye su característica de operación para la operación en la región de descarga profunda (ver Figura 5.5).

Es por ello que los resultados mostrados en la Figuras 5.3 y 5.4 parecen contradictorios. En este caso, se recomienda utilizar la batería pero sin permitir que opere en el modo de descarga profunda.

La Figura 5.6 muestra el flujo proporcionado por la bomba centrífuga en un periodo de 24 horas (86400 segundos) en donde la batería se conecta exclusivamente cuando los paneles solares generan energía. De esta manera, la batería se carga a su máximo nivel y puede usarse para energizar alguna carga adicional o la misma bomba pero sin permitir la descarga profunda de la batería. En la Figura 5.6 se puede observar que los módulos proporcionan energía a la batería y bomba, de las 11:00 de la mañana (39600 segundos) hasta las 17:00 horas (61200 segundos). Como se puede observar la bomba no está en operación antes de las 11:00 (39600 segundos) de la mañana y después de las 17:00 horas (61200 segundos).

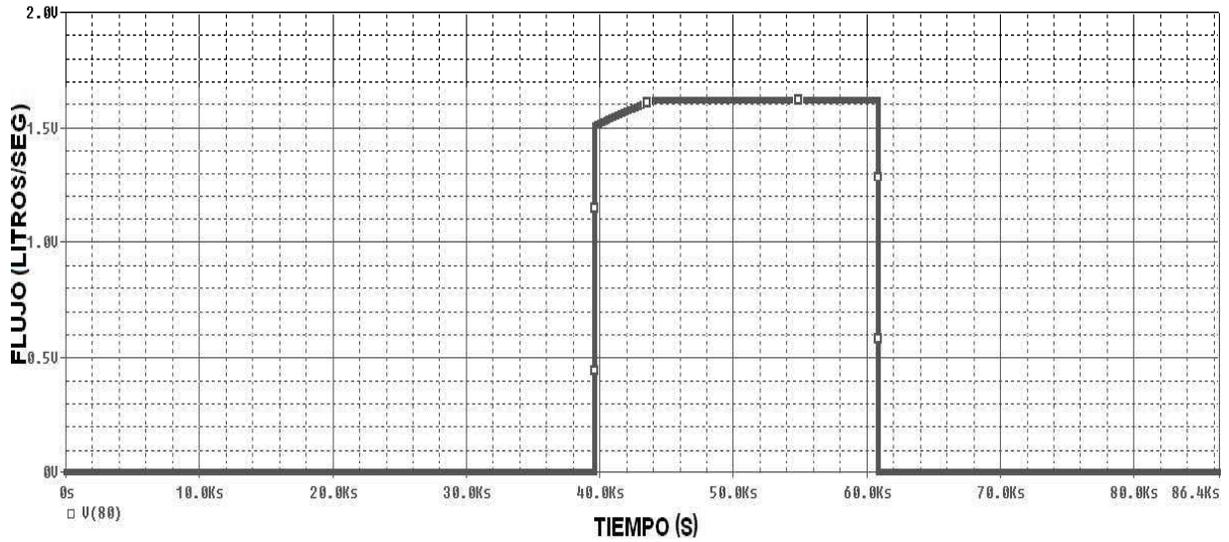


Figura 5.6 Flujo del sistema fotovoltaico

La Figura 5.7 muestra el voltaje del sistema fotovoltaico, en donde se puede observar que el voltaje es cero antes de las 11:00 de la mañana (39600 segundos) y después de las 17:00 horas (61200 segundos) debido a que la batería se desconecta del sistema para evitar su descarga profunda.

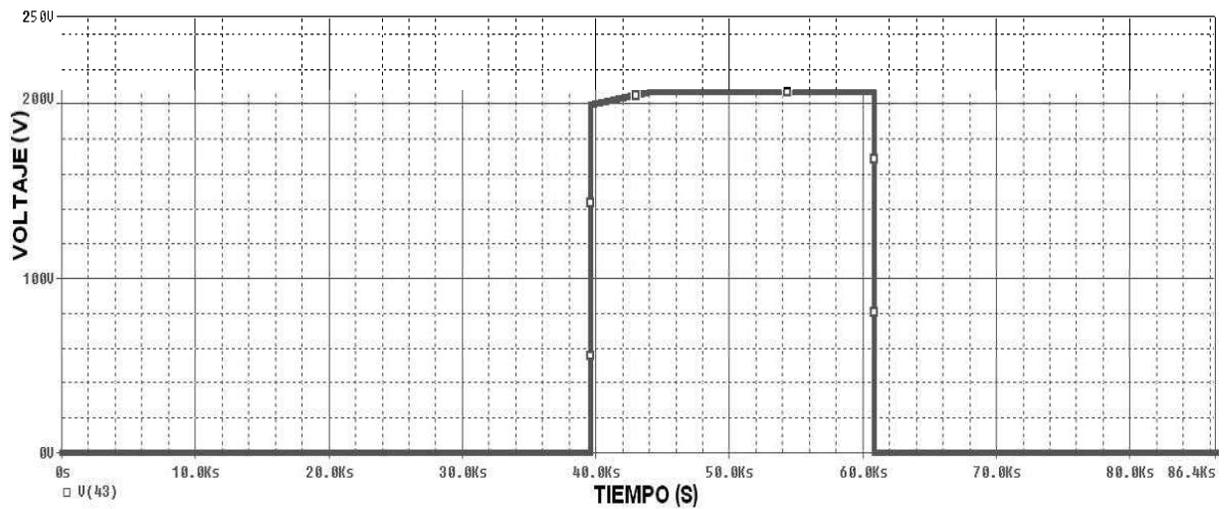


Figura 5.7 Voltaje de la batería, bomba y arreglo fotovoltaico

La Figura 5.8 muestra la cargabilidad de la batería, la cual es conectada al sistema fotovoltaico por medio de un interruptor que se encuentra normalmente abierto antes de las

11:00 de la mañana (39600 segundos) y después de las 17:00 horas (61200 segundos). Como se puede observar la batería se desconecta a las 17:00 horas (61200 segundos) y permanece cargada. La energía almacenada en la batería se puede usar para bombear agua o para energizar otras cargas. Las baterías para sistemas fotovoltaicos generalmente son de ciclo profundo, lo cual significa que pueden proveer una cantidad significativa de la energía cargada antes de que requieran recargarse. Las baterías de automóviles están construidas especialmente para soportar descargas breves pero superficiales durante el momento de arranque. En cambio, las baterías fotovoltaicas están construidas especialmente para proveer durante muchas horas corrientes eléctricas moderadas. Es decir, mientras una batería de automóvil puede abastecer sin ningún problema 100 amperios durante 2 segundos, una batería fotovoltaica de ciclo profundo puede abastecer 2 amperios durante 100 horas [BUN-CA 2002].

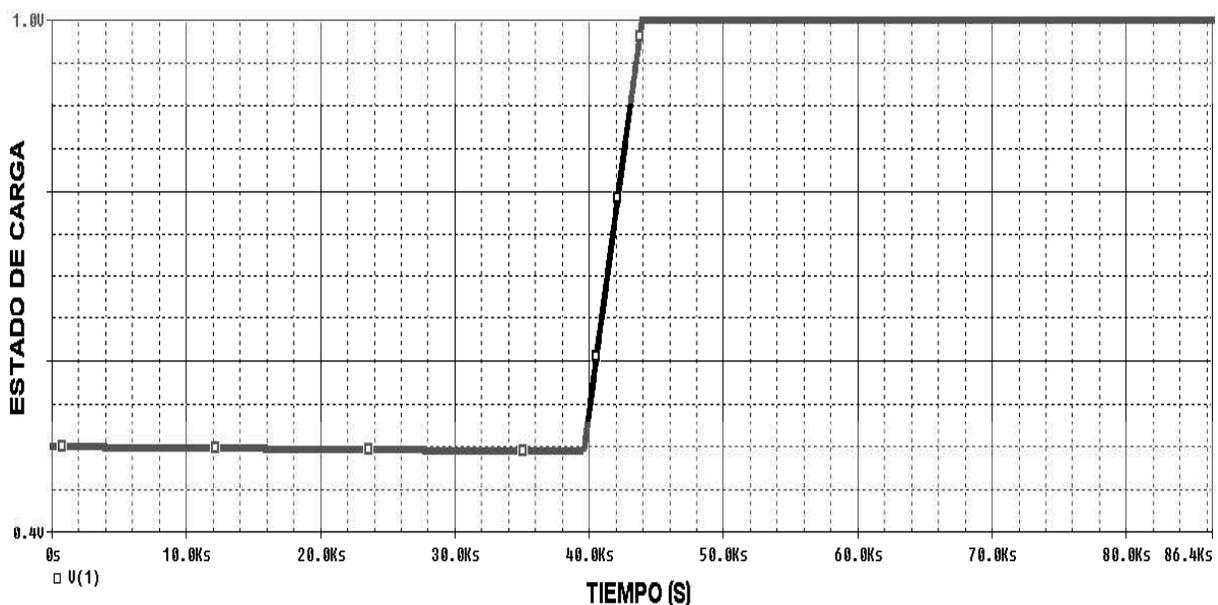
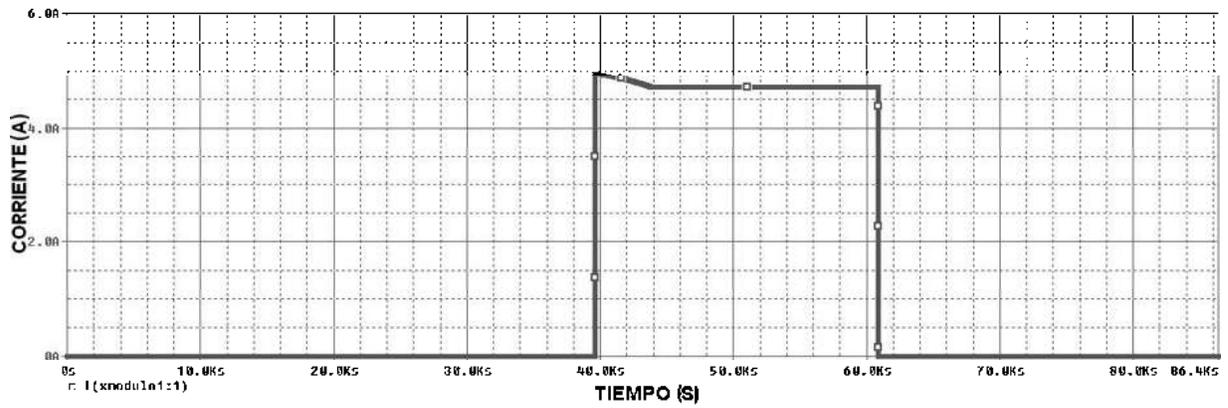
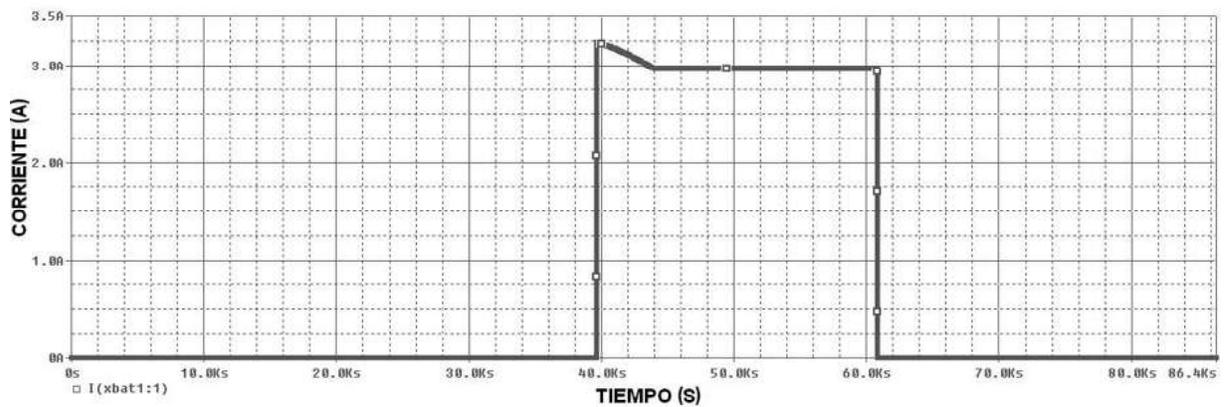


Figura 5.8 Cargabilidad de la batería

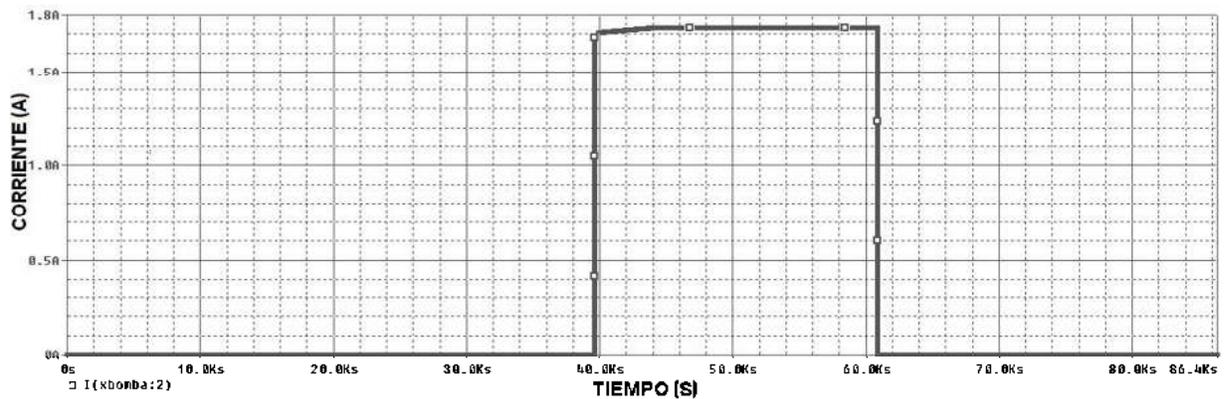
La Figura 5.9 muestra las corrientes en el módulo fotovoltaico, batería y bomba de agua, las cuales toman valores constantes en el intervalo de las 12:00 de la mañana (43360 segundos) hasta las 17:00 horas (61200 segundos) de 4.6982, 2.9661 y 1.7318 A, respectivamente. Como se puede observar, la corriente del arreglo es igual a la suma de la corriente de la batería y la carga.



(a)



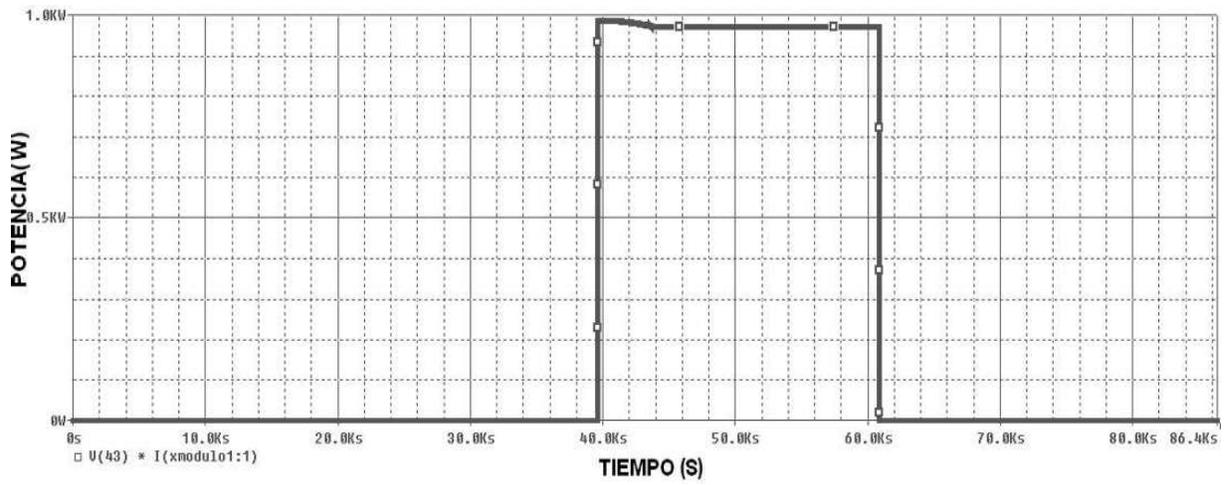
(b)



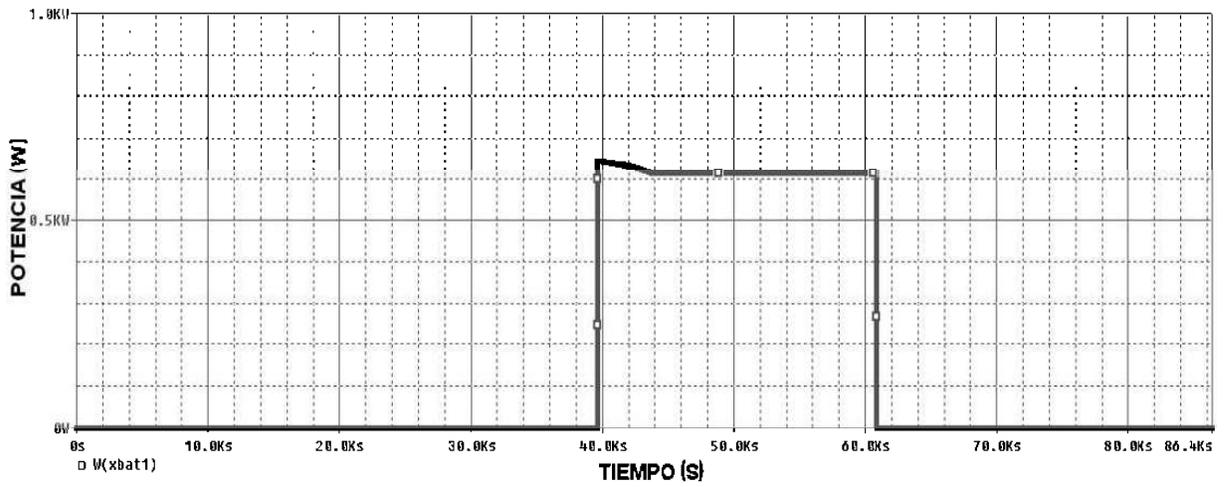
(c)

Figura 5.9 Corrientes en el a).- arreglo fotovoltaico, b).- batería y c).- bomba centrífuga

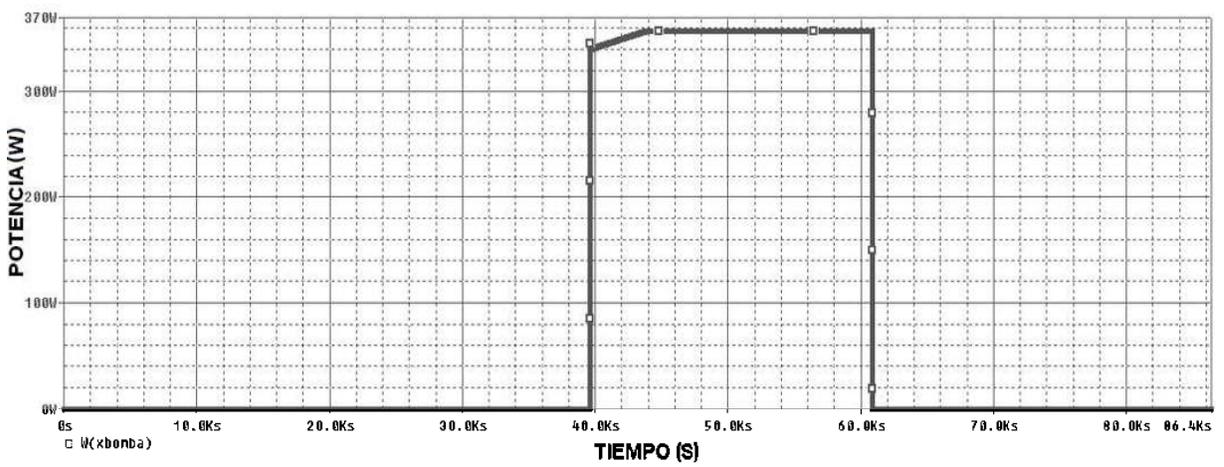
La Figura 5.10 muestra la potencia eléctrica del arreglo fotovoltaico (970.1783 W), batería (612.49965 W) y bomba (357.6167 W), en donde las potencias de los tres elementos se mantienen en un valor constante de las 11:00 de la mañana (39600 segundos) hasta las 17:00 horas (61200 segundos).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.10 Potencia del a).- arreglo fotovoltaico, b).- batería y c).- bomba

5.3 Abastecimiento de una localidad en la ciudad de Morelia

En la Tabla 5.2 se indica la demanda diaria de agua para cada uno de los meses del año en una población aproximada de 833 personas de la ciudad de Morelia. Dicha demanda es la que debe de proveer el sistema fotovoltaico integrado por la bomba de agua, paneles solares y batería. Además, en la Tabla 5.2 se indica el nivel de insolación para la ciudad de Morelia para cada uno de los meses del año. Con este nivel de insolación y la demanda diaria se calcula un flujo requerido por la población en litros por hora y litros/seg. Por su parte, la Tabla 5.3 resume el flujo de agua que se obtiene con el sistema fotovoltaico simulado en este trabajo.

Tabla 5.2 Demanda diaria de una localidad en la Ciudad de Morelia

Mes	Demanda Diaria (Litros/Día)	Insolación (H-Pico/Día)	Flujo Requerido Litros/Hr	Flujo Requerido Litros/Seg
Enero	16,000	4.2	3,809	1.0580
Febrero	16,000	4.9	3,265	0.9070
Marzo	20,000	5.5	3,636	1.0101
Abril	20,000	5.8	3,448	0.9578
Mayo	20,000	5.9	3,389	0.9413
Junio	25,000	5.2	4,807	1.3354
Julio	25,000	5.0	5000	1.3888
Agosto	25,000	5.1	4,901	1.3616
Septiembre	25,000	4.9	5,102	1.4172
Octubre	20,000	4.6	4,347	1.2077
Noviembre	20,000	4.3	4,651	1.2919
Diciembre	16,000	3.7	4,324	1.2012

De la Tabla 5.2 y 5.3 se observa que la demanda diaria de la población se cubre con el sistema de bombeo propuesto. Los resultados obtenidos con el sistema de bombeo de agua permiten concluir que el sistema puede abastecer un requerimiento mayor de bombeo de agua en el futuro. Por otra parte, la energía adicional que proporciona el sistema fotovoltaico se puede utilizarse en iluminación, refrigeración o para energizar aparatos electrodomésticos.

Tabla 5.3 Flujo de agua provisto por el sistema de bombeo

Mes	Insolación (H-Pico/Día)	Flujo Litros/Hr	Flujo (Litros/Seg)
Enero	4.2	5,823	1.6177
Febrero	4.9	5,823	1.6177
Marzo	5.5	5,823	1.6177
Abril	5.8	5,823	1.6177
Mayo	5.9	5,823	1.6177
Junio	5.2	5,823	1.6177
Julio	5.0	5,823	1.6177
Agosto	5.1	5,823	1.6177
Septiembre	4.9	5,823	1.6177
Octubre	4.6	5,823	1.6177
Noviembre	4.3	5,823	1.6177
Diciembre	3.7	5,823	1.6177

5.4 Conclusiones

En este Capítulo se presentó la simulación del sistema fotovoltaico integrado por los módulos fotovoltaicos, batería y bomba centrífuga de CD. La simulación se llevó a cabo para analizar la cantidad de flujo que proporciona el sistema de bombeo fotovoltaico en un determinado tiempo. Los datos de irradiación pertenecen a la ciudad de Morelia a lo largo de cada uno de los meses del año. Se observó que el sistema proporciona suficiente flujo de agua en todos los meses del año.

Se controló la entrada en operación de la batería con la finalidad de evitar su funcionamiento en el modo de descarga profunda, cuya característica no está incorporada en el modelo.

La cantidad de flujo de agua proporcionado por el sistema fotovoltaico permite abastecer a una población aproximada de 833 personas cuya demanda máxima mensual es de 25,000 litros/día. La energía adicional provista por el sistema fotovoltaico se puede utilizar para energizar otras cargas ó cubrir necesidades básicas como refrigeración.

Capítulo 6

Conclusiones

En este Capítulo se describen las conclusiones generales de este trabajo y los posibles trabajos futuros

6.1 Conclusiones generales

Como parte central de esta tesis se aborda el estudio de la generación de energía fotovoltaica, tomando como base un arreglo fotovoltaico, bomba de agua y batería. Bajo este contexto, se presentan los casos de estudio del comportamiento del sistema en todos los meses del año, de tal forma que el sistema se simula con diferentes niveles de irradiación que pertenecen a la ciudad de Morelia.

Se analizó el comportamiento de la curva característica voltaje-corriente del modelo ideal de la celda fotovoltaica, en donde se observó por simulación que la corriente de corto circuito es proporcional a la irradiancia. Con la finalidad de obtener mayor capacidad de voltaje y corriente se realizaron arreglos serie y paralelo de celdas fotovoltaicas. En el arreglo serie se observó que el voltaje total de circuito abierto total es la suma de las caídas de cada celda. Además, se simuló el comportamiento del arreglo en serie cuando una de las celdas es menos iluminada, en donde la celda menos iluminada se comporta como una carga. Es decir bajo esta condición la celda menos iluminada no esta generando potencia si no que la esta consumiendo y como consecuencia las celdas disminuyen su eficiencia. En el arreglo serie se observó que la corriente de cortocircuito total es la suma de las corrientes en cada celda, cuando son iluminadas con diferente nivel de irradiancia. Cuando son iluminadas con el mismo nivel de irradiancia las celdas generan el mismo valor de corriente individualmente. Por otra parte, se analizó el modelo generalizado de la celda fotovoltaica para observar el efecto en su curva característica que tienen parámetros como la resistencia paralelo y

resistencia serie. Se observó que la corriente de cortocircuito disminuye, al aumentar el valor de la resistencia serie. Por lo tanto se concluye que este factor se debe de tomar en cuenta a la hora del diseño y que se debe de utilizar, un valor muy pequeño de resistencia serie. Se presentó el modelo simplificado de un módulo fotovoltaico que consta de 36 celdas en serie y 1 en paralelo. Se simuló el modelo simplificado del módulo con las características eléctricas proporcionadas por el fabricante, obteniéndose buenos resultados en su curva característica. Este enfoque modular reduce el código del programa y lo hace más eficiente.

Se implementó el modelo de la bomba centrífuga de CD, el cual se basa en el motor CD serie. Los parámetros de la bomba se calculan de los datos proporcionados por el fabricante, los cuales son la altura del bombeo, potencia y el flujo que proporciona la bomba. La bomba recibe un voltaje de entrada de 200 V, corriente de 1.7 A y una potencia de 340 W. La bomba presenta una respuesta adecuada y proporciona un flujo de 1.5 litros/seg. Los resultados de la bomba mostrados en la simulación coinciden con los datos proporcionados por el fabricante.

Además, se incluyó el modelo de la batería plomo-ácido, funcionando exclusivamente en los modos de carga y descarga. La batería será incluida en el sistema de fotovoltaico para almacenar y proporcionar energía a una carga cuando los módulos fotovoltaicos no generen energía por ausencia de la irradiancia solar.

Se realizó un arreglo fotovoltaico para proporcionar los valores requeridos de voltajes, corrientes y potencias demandados por la bomba de agua. El arreglo consta de 11 módulos conectados en serie y 1 conectado en paralelo para proporcionar un voltaje de 200 V, una corriente de 1.7 y potencia de 340 W requeridos por la bomba.

Se controló la entrada en operación de la batería con la finalidad de evitar su funcionamiento en el modo de descarga profunda, cuya característica no esta incorporada en el modelo. Se presentó la simulación del sistema fotovoltaico, con los diferentes niveles de irradiación de la ciudad de Morelia. Se observó que el sistema proporciona suficiente flujo de agua en todos los meses del año. Para conocer la eficiencia del sistema fotovoltaico, se tomo una demanda de agua de una población cercana a la ciudad de Morelia de aproximadamente 833 personas, cuya demanda máxima mensual es de 25,000 litros/día. El sistema fotovoltaico cubrió la demanda de agua requerida y se observó que el sistema fotovoltaico provee energía adicional que puede cubrir alguna otra necesidad que se requiera.

6.2 Trabajos futuros

- Realizar una simulación de un sistema fotovoltaico basado en un módulo fotovoltaico y bomba de corriente alterna mediante la incorporación de un inversor de CD\CA.
- Regulador de carga para suministrar la tensión y la intensidad de corriente que debe de llegar a la batería según el estado de carga a que esta se encuentre.
- Implementar un convertidor CD-CD para alimentar una carga.
- Agregar el efecto de la temperatura en el modelo de la celda y módulo fotovoltaico.

Apéndice A

Algoritmos

En este apéndice se muestran los algoritmos de las simulaciones realizadas en este trabajo de tesis.

A.1 Algoritmos para la simulación del módulo fotovoltaico

```
*modulo_1.lib

.subckt modulo_1 400 403 402 params:ta=1, tr=1, iscm=1, pmaxm=1,
+ vocm=1,
+ ns=1, np=1, nd=1
girradm 400 401 value={{(iscm/1000*v(402))}}
d1 401 400 diode
.model diode d(is={{iscm/(np*(exp(vocm/(nd*ns*(8.66e-
+ 5*(tr+273))))))}}, n={{nd*ns}})
.func uvet() {8.66e-5*(tr+273)}
.func vocnorm() {vocm/(nd*ns*uvet)}
.func ff0m() {(vocnorm-log(vocnorm+0.72))/(1+vocnorm)}
.func rsm() {vocm/(iscm)- pmaxm/(ff0m*iscm**2)}
rs 401 403 {rsm()}
.ends modulo_1

*modulo_1.cir

.include modulo_1.lib
xmodulo 0 43 42 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, +vocm=22.3
+ ns=36, np=1, nd=1
vbias 43 0 dc 0
virrad 42 0 dc 1000
.dc vbias 0 23 0.1
.probe
.end
```

A.1.1 Algoritmos para la simulación de la bomba centrífuga

```
*motor-bomba centrifuga
.include bomba.lib
xbomba 0 44 50 bomba params:RA=0.15, LA=0.58, KM=0.37, A=0.0925, +B=7.26e-6
+ F=0.00083, RF=0.15, LF=0.58, J=0.0608, A1=1.35e-6, B1=0.0015, C1=-3.32,
H=11.5
vin 44 0 0 pulse (0, 200, 0, 10m, 10m, 50, 100)

.tran 0.01u 20 1e-6
.probe
.end

*bomba.lib

.subckt pump 500 501 570 PARAMS:RA = 1, LA = 1, KM = 1, A = 1, B = 1
+ F = 1, J = 1, RF = 1, LF = 1, A1 = 1, B1 = 1, C1 = 1, H = 1

ra 501 502 {RA}
la 502 503 {LA}
econ 503 504 value = {{KM}*v(508)*v(507)}
rf 504 505 {RF}
lf 505 506 {LF}
vs 506 0 dc 0
gte 0 507 value = {{KM}*v(508)*v(508)}
gtl 507 0 value = {A + B*v(507)*v(507)}
rdamping 507 0 {1/{F}}
cj 507 0 {J}
d2 0 507 diode
.model diode d
gif 0 508 value = {(v(504)-v(505))/{RF}}
rif 508 0 1

.IC v(507) = 0

***revoluciones rpm=omega*(60/2/pi)
***velocidad angular
erpm 540 0 value = {v(507)*60/6.28}
eflow 550 0 value = {{{-B1}*v(540)-sqrt(((B1)^2)*(v(540)^2)-4*{C1}*
+ (A1*(v(540)^2)-{H})))}/(2*{C1})}
eraiz 560 0 value = {((B1)^2)*(v(540)^2)-4*{C1}*(A1*(v(540)^2)-{H})}
eflow2 570 0 value = {if(v(560)>0, v(550),0)}
.ends pump
```

A.1.2 Algoritmos para la simulación de la batería

```
*batería

.inc bat.cir
.temp=27
xbat1 3 2 1 bat params: ns=12, SOCm=1200, k=0.8, D=1e-3, SOC1=0.5
isin 2 3 sin (0 20 0.001 0 0 0); fuente de corriente senoidal
r44 1 0 1000000

.tran 1s 2000s
.plot dc v(3)
.probe
.end

*Modelo de la batería plomo-acido*

*Bat.cir

.subckt bat 3 2 1 PARAMS: ns=1, SOCm=1, k=1, D=1, SOC1=1
evch 4 2 value={{2+(0.148*v(1))}*ns}
evdch 5 2 value={{1.926+(0.124*v(1))}*ns}
rs 2 0 0.000001
rch 4 6 {rchar}
.func rchar() {{(0.758+(0.1309/(1.06-SOC1)))*ns/SOCm}
rdch 5 7 {rdischar}
.func rdischar() {{(0.19+(0.1037/(SOC1-0.14)))*ns/SOCm}
vcurrent 3 8 dc 0
Wch 6 8 vcurrent sw1mod
.model sw1mod iswitch (ioff=-10e-3, ion=10e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)
Wdch 7 8 vcurrent sw2mod
.model sw2mod iswitch (ioff=10e-3, ion=-10e-3, Roff=1.0e+8, Ron=0.01)

*SOCn evolution
eqt 13 0 value={SOC1+(sdt(v(9))/SOCm)}
eqt4 1 0 value={limit (v(13),0,1)}
```

```

evcalculsoc 9 0 value={ $(k*v(10)*i(vcurrent)/3600)-(D*SOCm*v(13)/3600)}$ }
evch2 11 0 value={ $(2+(0.148*v(1)))*ns$ }
evdch2 12 0 value={ $(1.926+(0.124*v(1)))*ns$ }
Wdch2 12 10 vcurrent sw2mod
Wch2 11 10 vcurrent sw1mod
.ends bat

```

A.1.3 Algoritmos para la simulación del sistema fotovoltaico

*horas solares pico 1

```

.include modulo_1.lib
.inc bat.cir
.include pump.lib

```

```

xmodulo1 45 43 42 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo2 47 45 44 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo3 49 47 46 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo4 51 49 48 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo5 53 51 50 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo6 55 53 52 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo7 57 55 54 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo8 59 57 56 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo9 61 59 58 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo10 63 61 60 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo11 30 63 62 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1

virrad1 42 45 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad2 44 47 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)

```

```
virrad3 46 49 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad4 48 51 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad5 50 53 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad6 52 55 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad7 54 57 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad8 56 59 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad9 58 61 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad10 60 63 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad11 62 30 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
```

```
.temp=27
```

```
xbat1 43 30 1 bat params: ns=96, SOCm=1200, k=0.8, D=1e-3, SOC1=0.5
```

```
r44 1 0 1000000
```

```
xpump 30 43 80 pump params: RA=0.15, LA=0.58, KM=0.37, A=0.0925, B=7.26e-6
+ F=0.00083, RF=0.15, LF=0.58, J=0.0608, A1=1.35e-6, B1=0.0015, C1=-3.32, H=11.5
```

```
.tran 1 86400
```

```
.probe
```

```
.end
```

```
*horas solares pico 2
```

```
.include modulo_1.lib
```

```
.inc bat.cir
```

```
.include bomba.lib
```

```
.inc interruptor.lib
```

```
xmodulo1 45 43 42 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
xmodulo2 47 45 44 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
xmodulo3 49 47 46 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
xmodulo4 51 49 48 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
xmodulo5 53 51 50 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
xmodulo6 55 53 52 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
xmodulo7 57 55 54 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
xmodulo8 59 57 56 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
xmodulo9 61 59 58 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
xmodulo10 63 61 60 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
xmodulo11 30 63 62 modulo_1 params:ta=25, tr=25, iscm=5, pmaxm=85, vocm=22.3,
+ ns=36, np=1, nd=1
```

```
virrad1 42 45 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad2 44 47 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad3 46 49 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad4 48 51 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad5 50 53 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad6 52 55 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad7 54 57 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad8 56 59 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad9 58 61 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad10 60 63 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
virrad11 62 30 pulse (0 1000 39600 0 0 21240 86400)
```

```
.temp=27
xbat1 7 30 1 bat params: ns=96, SOCm=1200, k=0.8, D=1e-3, SOC1=0.5
r44 1 0 1000000
```

```
VCONT 20 0 PULSE(0 5 39600 0 0 21240 86400)
RCONT 20 0 1MEG
XSW 7 43 20 0 SWITCH
```

```
xbomba 30 43 80 bomba params: RA=0.15, LA=0.58, KM=0.37, A=0.0925, B=7.26e-6
+ F=0.00083, RF=0.15, LF=0.58, J=0.0608, A1=1.35e-6, B1=0.0015, C1=-3.32, H=11.5
```

```
.tran 1 86400
.probe
.end
```

```
*INTERRUPTOR.LIB
```

```
.SUBCKT SWITCH 101 103 150 100
SW 101 103 150 100 AC_SWITCH
.MODEL AC_SWITCH VSWITCH (RON=0.01)
.ENDS
```

Apéndice B

Parámetros del Sistema Fotovoltaico

C.1 Parámetros del módulo fotovoltaico

Potencia máxima, $P_{max} = 84.5 \text{ W}_p$

Corriente máxima, $I_{max} = 4.69 \text{ A}$

Voltaje máximo, $V_{max} = 18 \text{ V}$

Corriente de cortocircuito, $I_{sc} = 5 \text{ A}$

Voltaje de circuito abierto, $V_{oc} = 22.3 \text{ V}$

C.1.1 Parámetros del arreglo fotovoltaico

Potencia máxima del arreglo, $P_{max, arreglo} = 0.9295 \text{ kW}$

Corriente máxima del arreglo, $I_{max, arreglo} = 4.6946 \text{ A}$

Voltaje máximo del arreglo, $V_{max, arreglo} = 198 \text{ V}$

Corriente de cortocircuito del arreglo, $I_{sc, arreglo} = 5 \text{ A}$

Voltaje de circuito abierto del arreglo, $V_{oc, arreglo} = 245 \text{ V}$

Numero de módulos en serie, $N_s = 11$

Numero de módulos en paralelo, $N_p = 1$

C.1.2 Parámetros de la batería plomo-ácido

Voltaje de la Batería, $V_{bat} = 192 \text{ V}$

Numero de celdas en serie de la Batería, $N_s = 96$

C.1.3 Parámetros de la bomba centrífuga

Voltaje de entrada de la bomba, $V_{BOMBA} = 200 \text{ V}$

Potencia de la bomba, $P_{BOMBA} = 340 \text{ W}$

Corriente de la bomba, $I_{BOMBA} = 1.7 \text{ A}$

Referencias

[ANES 2008]

Asociación Nacional de Energía Solar. ANES. 20 de Junio 2008.

www.anes.org/tutorial/cell.html.

[Aziz et al. 2006]

A. Aziz, K. Kassmi, F. Olivie y A. Martinez, “ Symbolization of the electric diagram Of the marketed solar panels in the Orcad-PSpice environment”, *The Moroccan Statistical Physical Society*, Vol. 7, No. 1, Págs. 38-41. Enero 2006.

[BUN-CA 2002]

Biomass Users Network Centroamérica. *Manuales sobre energía renovable: solar fotovoltaica*. San José, Costa Rica 2002.

[Castañer y Silvestre 2002]

Luis Castañer y Santiago Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice*, Chichester, Inglaterra, John Wiley & Sons, 2002.

[Chapman 2005]

Stephen J. Chapman, *Maquinas Eléctricas*, México, D.F: McGraw Hill, 2005.

[Dondi et al. 2008]

Denis Dondi, Alessandro Bertacchini, Davide Brunelli, Luca Larcher y Luca Benini, “Modelling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Vol. 55, No. 7, Julio 2008, Págs. 2759-2766.

[Foster et al. 1999]

Robert Foster, Arturo Romero y Aarón Sánchez "Bombeo de agua con sistemas fotovoltaicos", *ANES*, Vol. 1, Octubre 1999.

[Foster et al. 2007]

Robert Foster, Martín Gómez, Luis Estrada, Herminia Martínez, Elieneth Lara, Débora Ley "Energías Renovables en Nicaragua: Proyecto de Electrificación Rural en Zonas Aisladas", XXXI Semana Nacional de Energía Solar-*ANES*, Zacatecas, México, Octubre 2007, Págs. 1-6.

[Fernández et al. 2005]

Herman Fernández, Abelardo Martínez Iturbe, Víctor Manuel Guzmán Argüís y María Isabel Giménez R., *Modelaje y Simulación de una Batería de Plomo Ácido Mediante Fuentes Dependientes de Voltaje – Corriente y Bloques de Funciones Aritméticas*, Vol. 9, No. 33, Marzo 2005.

[Foster y Gómez 2005]

Robert Foster, Martín Gómez "Prueba de Campo en el Estado de Morelos de Módulos Fotovoltaicos de CdTe (Telurio de Cadmio)", *29th Semana Nacional de Energía Solar*, *ANES*, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, Octubre 2005, Págs. 1-5.

[Gow y Manning 1999]

J. A. Gow y C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies", *IEEE Proc.-Electr. Power Appl*, Vol. 146, No. 2, Marzo 1999.

[Juster y Santano 1980]

F. Juster, Daniel Santano y León, *Las células solares*, España: Thomson-Paraninfo, 1980.

[Ka y Syed 2007]

Fong Ka Mun y Thahirah Syed Jalal, "Simulation of Standalone Photovoltaics Using PSpice", *The 5th Student Conference on Research and Development*, Malaysia, Diciembre 2007, Págs. 1-5.

[Martínez 2007]

Jorge Martínez Guillen, Representación en Espacio de Estado de Sistemas de Generación Distribuida Basados en Sistemas Híbridos Eólicos-Fotovoltaicos de Pequeña Escala, Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Morelia, Michoacán, 2007.

[Ortega 2001]

Mario Ortega Rodríguez, "Energías Renovables", España: Paraninfo, 2001.

[Phani y Veerachary 2005]

K. S. Phani y Mummadi Veerachary, "Maximum Power Point Tracking: A PSpice Circuit Simulator Approach", *IEEE PEDS*, Págs. 1072-1077, 2005.

[Rodríguez y Sánchez 2005]

Alejandro Rodríguez Camacho, Aarón Sánchez Juárez "Sistema de Energía Alternativo para la Telesecundaria 1008", Tapachula, Chiapas, México, Diciembre 2005.