



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, OPCIÓN
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA**

**Tesis para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**RECONFIGURACIÓN DINÁMICA DE ARREGLOS
FOTOVOLTAICOS: APLICACIÓN A UN VEHÍCULO
AÉREO NO TRIPULADO**

Presenta:

Ing. Moisés García Juárez*

Asesores:

Dr. José Fermi Guerrero Castellanos

Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro

Índice general

Agradecimientos	12
1. Contexto y motivaciones	14
1.1. Introducción	14
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivo general	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Generalidades de los sistemas de generación fotovoltaicos	19
1.3.1. Antecedentes de las celdas fotovoltaicas	19
1.3.2. Principio de funcionamiento de una celda fotovoltaica	19
1.3.3. Propiedades y modelado de una celda solar	20
1.3.4. Balance de los componentes del sistema fotovoltaico	23
1.4. Efectos de sombreado en las celdas fotovoltaicas	24
1.5. Nuevas técnicas del control de generadores fotovoltaicos	28
1.6. Aplicación de las nuevas técnicas del control de generadores fotovoltaicos	29
2. Arquitecturas y algoritmos de reconfiguración	32
2.1. Arquitecturas para reconfiguración	32
2.1.1. Cadenas reconfigurables	32
2.1.2. Arreglo reconfigurable serie paralelo	33
2.1.3. Arreglo ligado en cruz totalmente reconfigurable	34
2.1.4. Arquitectura híbrida	35
2.2. Algoritmos de reconfiguración	35
2.2.1. Algoritmo de reconfiguración programable	35
2.2.2. Evaluación de los algoritmos de reconfiguración	36
2.2.3. Algoritmos de reconfiguración almacenados	37
2.2.4. Algoritmo de reconfiguración distribuida	37
2.2.5. Algoritmos de optimización clásicos	37
2.2.6. Algoritmos inteligentes computacionales	38

3. Validación y simulación de un arreglo fotovoltaico ante cambios de irradiación y temperatura	39
3.1. Validación del modelo matemático y del bloque solar Cell de una celda solar	40
3.1.1. Curvas características de celdas FV sin ser iluminadas	41
3.1.2. Curvas características de celdas FV al ser iluminadas	43
3.2. Simulación de un panel fotovoltaico para suministrar energía a la aviónica de un VANT	47
3.2.1. Efecto de la variación de la irradiación en la potencia generada por el panel fotovoltaico	47
3.2.2. Efecto de la variación de la temperatura en la potencia generada por el panel fotovoltaico	49
4. Simulación de un arreglo FV reconfigurable para un sistema de tracción	52
4.1. Representación en espacio de estados del sistema de tracción	53
4.2. Diseño y simulación en MATLAB/SIMULINK del arreglo FV reconfigurable	56
4.3. Simulación del sistema de tracción alimentado por el arreglo FV reconfigurable	56
5. Implementación de un Arreglo fotovoltaico reconfigurable para un VANT	60
5.1. Diseño e implementación del arreglo fotovoltaico	61
5.2. Diseño e implementación de la matriz de interruptores	63
5.3. Simulación del arreglo FV reconfigurable	66
5.3.1. Curvas características del arreglo FV cuando opera en condiciones ideales	67
5.3.2. Curvas características cuando varía la irradiación en arreglo FV	67
5.4. Resultados experimentales del arreglo FV reconfigurable	69
5.4.1. El arreglo FV con radiación solar	69
5.4.1.1. El arreglo FV con el motor de un VANT como carga	69
5.4.1.2. El arreglo FV con un cargador de baterías como carga	71
5.4.2. El arreglo FV con radiación de una matriz de focos	72
5.4.3. Respuesta de la matriz de transistores MOSFET	74
A. Técnicas para el MPPT	79
A.1. Técnica basada en el incremento de la conductancia	79
A.2. Técnicas MPPT basada en <i>escalar la colina</i> / Perturbar y Observar (P & O)	82
B. Simulación de un panel fotovoltaico a partir de su modelo matemático	85
B.1. Variables y características del panel fotovoltaico	86
B.2. Bloques de cada ecuación del modelo matemático	86

C. Análisis de consumo de energía de un motor de CD	92
C.0.1. Señales de referencia sin pendiente de inclinación	92
C.0.2. Señales de referencia con pendiente de inclinación	95
C.0.3. Señales de referencia emulación del ciclo de manejo europeo EU 91/441	97
D. Construcción del arreglo FV reconfigurable	101
D.1. Construcción del arreglo FV	101
D.2. Conexión de la matriz de transistores con el arreglo FV	103
E. Constancias de artículos publicados	106
F. Estancia de investigación	116
G. Hojas de especificaciones de dispositivos electrónicos utilizados	119
Bibliografía	129

Índice de figuras

1.1. Vehículos no tripulados energizados por el sol. a)Submarino autónomo energizado por el sol, del acrónimo SAUV II (Solar Powered Autonomous Underwater Vehicle). b)Vehículo aéreo no tripulado energizado por el sol [1].	14
1.2. Proyección de la energía 2005-2035(EIA,2012) [2].	15
1.3. Modelado de la celda FV como circuito de un diodo [3].	20
1.4. Característica I-V de un módulo de silicio Si común de 36 celdas empleado para cargar una batería de 12V, u otras cargas con diferentes radiaciones [4].	22
1.5. Sistema con seguidor del punto de máxima potencia MPP [4].	24
1.6. a)Diodos de desviación conectados a través de cada celda y b) Diodos de desviación conectados a través de una cadena de celdas [1].	25
1.7. Características I-V para cadenas fotovoltaicas en condiciones de sombreado [1].	25
1.8. Características I-V bajo diferentes condiciones de sombreado [1].	26
1.9. Relocalización del MPP bajo condiciones de sombreado [1].	27
1.10. a)Aeronave energizada por energía solar b)Tren de energía de la aeronave[5].	30
1.11. Sistema eléctrico del aeroplano propuesto [1].	31
2.1. Arquitecturas para la reconfiguración de arreglos FV [6].	33
3.1. Sistema Sol 2A marca Newport, utilizado para caracterizar celdas solares.	40
3.2. Diagrama de bloques de un panel FV implementado en MATLAB/SIMULINK.	41
3.3. Circuito para caracterizar una celda solar de SimElectronics.	42
3.4. Curvas de potencia contra voltaje P-V de dos celdas solares del mismo tamaño, sin ser iluminadas.	43
3.5. Curvas de potencia contra corriente P-I de dos celdas solares del mismo tamaño, sin ser iluminadas.	43
3.6. Curvas de corriente contra voltaje I-V de dos celdas solares del mismo tamaño, sin ser iluminadas.	44

3.7. Curvas de corriente contra voltaje I-V de dos celdas solares del mismo tamaño, al ser iluminadas.	45
3.8. Comparación de las curvas de potencia contra voltaje P-V de dos celdas solares físicas con las curvas P-V de su modelo matemático y las del bloque SolarCell, considerando una irradiación de $1000W/m^2$ y una temperatura de operación de $25^{\circ}C$	46
3.9. Comparación de las curvas de potencia contra corriente P-I de dos celdas solares físicas con las curvas P-I de su modelo matemático y las del bloque SolarCell, considerando una irradiación de $1000W/m^2$ y una temperatura de operación de $25^{\circ}C$	46
3.10. Comparación de las curvas de corriente contra voltaje de dos celdas solares físicas con las curvas I-V de su modelo matemático y las del bloque SolarCell, considerando una irradiación de $1000W/m^2$ y una temperatura de operación de $25^{\circ}C$	47
3.11. Curvas características P-V de un arreglo FV ante variaciones en la irradiación, para suministrar energía a un VANT.	48
3.12. Curvas características P-I de un arreglo FV ante variaciones en la irradiación, para suministrar energía a un VANT.	48
3.13. Curvas características I-V de un arreglo FV ante variaciones en la irradiación, para suministrar energía a un VANT.	49
3.14. Curvas características P-V de un arreglo FV ante variaciones en la temperatura, para suministrar energía a un VANT.	50
3.15. Curvas características P-I de un arreglo FV ante variaciones en la temperatura, para suministrar energía a un VANT.	50
3.16. Curvas características I-V de un arreglo FV ante variaciones en la temperatura, para suministrar energía a un VANT.	51
4.1. Análisis del consumo de energía de un motor de CD	54
4.2. Circuito electromecánico de la armadura de un motor de CD [7].	55
4.3. Curvas características de arreglo FV reconfigurable para el sistema de tracción	57
4.4. Simulación en MATLAB del control de velocidad de un sistema de tracción alimentado por un arreglo FV reconfigurable.	58
4.5. Comparación de un arreglo FV estándar Vs. un arreglo FV reconfigurable .	59
5.1. Diagrama a bloques de la red eléctrica para suplir energía al sistema de tracción de un VANT.	61
5.2. Una de las dos alas del VANT donde será colocado el arreglo FV reconfigurable	62

5.3. Integración de uno de los módulos del arreglo FV que se estarán reconfigurando, cada módulo puede suplir un voltaje $V_{OC} = 4.8V$ y una corriente $I_{SC} = 900mA$ si se considera que el módulo tiene una irradiación de $1000W/m^2$ y opera a $25^{\circ}C$	63
5.4. Montaje de los submódulos en las alas del VANT	64
5.5. Vehículo aéreo no tripulado de ala fija	64
5.6. Matriz de transistores MOSFET conectados a los cuatro módulos FV para que sea cambiada la configuración de conexión entre cada uno de ellos [27].	65
5.7. Curvas características en simulación del arreglo FV reconfigurable en condiciones ideales	67
5.8. Curvas características en simulación del arreglo FV reconfigurable con variación de irradiación	68
5.9. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie, cuando como carga tiene conectado el motor de un VANT de la serie T-400 y recibe radiación solar.	70
5.10. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie-paralelo, cuando como carga tiene conectado el motor de un VANT de la serie T-400 y recibe radiación solar.	70
5.11. Curvas característica del arreglo FV en su configuración paralelo, cuando como carga tiene conectado el motor de un VANT de la serie T-400 y recibe radiación solar.	70
5.12. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie, cuando como carga tiene conectado un cargador de baterías LiPo.	71
5.13. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie-paralelo, cuando como carga tiene conectado un cargador de baterías y recibe radiación solar.	71
5.14. Curvas característica del arreglo FV en su configuración paralelo, cuando como carga tiene conectado un cargador de baterías y recibe radiación solar.	72
5.15. Banco de pruebas del arreglo FV cuando éste recibe la radiación de un arreglo de cinco focos.	73
5.16. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie, cuando como carga tiene conectada una resistencia de $2.2K\Omega$ a $1/2W$ y recibe radiación de 5 focos.	73
5.17. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie-paralelo, cuando como carga tiene conectada una resistencia de $2.2K\Omega$ a $1/2W$ y recibe radiación de 5 focos.	73
5.18. Curvas característica del arreglo FV en su configuración paralelo, cuando como carga tiene conectada una resistencia de $2.2K\Omega$ a $1/2W$ y recibe radiación de 5 focos.	74

5.19. Comparación de las curvas característica del arreglo FV configurado en serie-paralelo de forma manual con las curvas del arreglo cuando se configura en serie paralelo mediante la matriz de transistores implementada . . .	75
5.20. Tiempo de reconfiguración ascendente del arreglo FV con la matriz de transistores MOSFET	75
5.21. Tiempo de reconfiguración descendente del arreglo FV con la matriz de transistores MOSFET	76
A.1. Diagrama de flujo del algoritmo incremento de la conductancia [1].	80
A.2. Trayectoria del punto de operación del MPPT basado en el incremento de la conductancia [1].	81
A.3. Normalización IV, PV y características $ dP/dV $ del generador fotovoltaico [1].	82
A.4. Curva de potencia característica del generador FV [8].	83
A.5. Divergencia del escalamiento de colina/P&O del MPP [8].	84
A.6. Algoritmo perturbar y observar [9].	84
B.1. Diagrama de bloques de un panel FV en simulación en MATLAB/SIMULINK.	85
B.2. Cuadro de dialogo, donde se introducen las características del panel fotovoltaico que va a ser simulado.	87
B.3. Diagrama de bloques interno del bloque panel solar de la figura B.1.	88
B.4. Diagrama de bloques en SIMULINK de la conversión de grados Celsius a Kelvin	89
B.5. Diagrama de bloques en SIMULINK de la ecuación de fotocorriente	89
B.6. Diagrama de bloques en SIMULINK de la ecuación de corriente de saturación de reversa i_{rs}	90
B.7. Diagrama de bloques en SIMULINK para calcular la ganancia $NsAKT$	90
B.8. Diagrama de bloques en SIMULINK de la corriente de saturación I_s	91
B.9. Diagrama de bloques en SIMULINK de la corriente de salida del módulo fotovoltaico I_{pv}	91
C.1. Implementación del banco de pruebas para analizar el consumo de energía del motor de CD del “Modular Servo System”.	93
C.2. Implementación del banco de pruebas para analizar el consumo de energía del motor de CD del “Modular Servo System”.	93
C.3. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia está formada por tres diferentes valores escalonados, a) Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.	94

C.4. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD al tener una señal de referencia con tres velocidades de referencia diferentes escalonados.	94
C.5. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia es una señal cuadrada periódica a una frecuencia de 0.1Hz. a)Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.	95
C.6. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD al tener una señal de referencia cuadrada periódica a una frecuencia de 0.1Hz.	96
C.7. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia es una rampa de subida y una rampa de bajada en 5s. a)Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.	96
C.8. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD, cuando se tiene por señal de referencia una rampa de subida y una rampa de bajada en 5s	97
C.9. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia es la primera parte del ciclo de manejo EU 91/441, que va de 0s a 600s. a)Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.	98
C.10. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD, cuando la señal de referencia es la primera parte del ciclo de manejo EU 91/441, que va de 0s a 600s.	98
C.11. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia es la segunda parte del ciclo de manejo EU 91/441, que va de 600s a 1200. a)Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.	99
C.12. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD, cuando la señal de referencia es la segunda parte del ciclo de manejo EU 91/441, que va de 600s 1200s.	99
D.1. Proceso de construcción de los submódulos que formarán parte del arreglo FV.	102
D.2. Montaje de los submódulos en las alas del VANT	102
D.3. Alas del VANT terminadas	103
D.4. Vehículo aéreo no tripulado de ala fija	103
D.5. Segundo arreglo FV construido	103
D.6. Modo de conexión de los GETDRIVERS que habilitarán los interruptores S1 a S3.	104
D.7. Modo de conexión de los GETDRIVERS que habilitarán los interruptores S4 a S6.	105

D.8. Modo de conexión de los GETDRIVERS que habilitarán los interruptores S7 a S9.	105
---	-----

Índice de tablas

2.1. Categorías de los algoritmos de reconfiguración [6].	36
3.1. Tabla de las características de dos muestras de celdas solares, sin ser iluminadas.	42
3.2. Tabla de las características de dos celdas solares muestra, al ser iluminadas.	44
4.1. Características del motor de CD “ <i>Bühler</i> 1.13.044.235” que forma parte del sistema de tracción “Modular Servo System”.	53
4.2. Descripción de los parámetros que se muestran en el circuito electromecánico que representa a un motor de DC.	55
5.1. Combinaciones de transistores para la reconfiguración del arreglo FV.	66
A.1. Resumen del algoritmo escalamiento de colina y P&O.	83

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecerle a Dios que me ha permitido concluir esta tesis, estoy plenamente convencido que sin su ayuda no la habría concluido. Gracias por que ha estado con mi familia y conmigo en estos tiempos difíciles por los que pasamos en estos últimos dos años. “Sin duda este trabajo de tesis es resultado de la grande ayuda, fortaleza y compañía de Dios”.

Quiero dedicar esta tesis a mi familia: A mi mamá Francisca Juárez Romero, quien ha estado conmigo apoyándome de forma incansable, sin importar las circunstancias en las que se ha encontrado. A mi hermana Elsa Noemi García Juárez, que también me apoyó para concluir este trabajo, de forma verbal y material. A mi papá J. Máximo García Rojas, que me ha dado sabios consejos en las decisiones importantes de mi vida.

Le agradezco mucho a mis tíos: Pablo Juarez Romero, por que ha sido un grande apoyo para mi y para mi familia, también le agradezco por sus sabios consejos. Dr. David Juárez Romero, gracias por sus consejos y ánimo que me dio para poder concluir esta tesis.

Gracias a mis amigos Daniel Rosas y Samuel Rosas por todo el apoyo brindado a mi y ami familia, son una grande bendición.

Agradezco mucho a mi asesor: Dr. José Fermi Guerrero Castellanos, por toda la paciencia y apoyo que me brindo en estos dos años y medio en los que dirigió esta tesis, gracias por todo su esfuerzo que puso para que pudiera terminar esta tesis, gracias por permitirme formar parte de su equipo. También agradezco a mi asesor: Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro por todo su apoyo brindado, gracias por las grandes aportaciones que me dio para desarrollar y terminar esta tesis. Agradezco al Dr. Mario Moreno Moreno por haberme permitido realizar mi estancia en el INAOE, donde pude caracterizar celdas solares que formarían parte de mi proyecto, gracias por las explicaciones que me dio de tópicos importantes en el desarrollo de esta tesis.

Gracias a mis sinodales: Dr.Gerardo Mino, Dra. Liliana Cortez y Dr. Víctor Rodolfo González por enriquecer esta tesis con sus comentarios, gracias también por la paciencia que me tuvieron.

Gracias a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por que me abrió las puertas para estudiar una maestría en sus instalaciones, gracias por los apoyos económicos que me proporcionó para que pudiera participar en algunos congresos.

Gracias a la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE) por haberme tenido en

sus instalaciones estudiando estos dos últimos años, gracias a todas las personas que forman parte del grupo de trabajo de esta facultad. Gracias por el apoyo que me brindó la Maestría en Ingeniería en Electrónica, gracias por las aportaciones con las que me apoyó para que participara en diferentes congresos, gracias por que me abrió las puertas de sus diferentes laboratorios para que pudiera desarrollar esta tesis. También agradezco al proyecto PRODEP que me apoyó con los recursos para desarrollar y concluir esta tesis.

Finalmente quiero reconocer y agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), gracias por permitirme entrar y permanecer en su grupo de beneficiarios. Gracias por que me aportó los recursos económicos para mi manutención en estos dos años que duraron mis estudios de maestría. Gracias a todas las personas que forman parte del CONACYT por que de alguna forma ponen su mejor esfuerzo para que los jóvenes mexicanos investigadores tengamos la oportunidad de superarnos y de que podamos permanecer desarrollando nuestras investigaciones sin que nos preocupemos por nuestro sustento. Espero que nunca cambien la perspectiva que tienen de los jóvenes investigadores y que sigan luchando para que como mexicanos podamos superarnos aún más.

Capítulo 1

Contexto y motivaciones

1.1. Introducción

Hoy en día los vehículos no tripulados (figura 1.1) son la herramienta del hombre, en muchas áreas como por ejemplo la naval y espacial, éstos se encargan de hacer tareas muy peligrosas o tareas donde el hombre se ve limitado por su capacidad física, por ejemplo un hombre no puede tomar muestras atmosféricas a diferentes alturas en cambio un vehículo aéreo no tripulado puede ser utilizado para tomar muestras atmosféricas, o también este vehículo aéreo puede ser enviado a captar imágenes en tiempo real de una zona peligrosa. Una de las mayores desventajas de los vehículos autónomos es que su autonomía se ve limitada por la energía, por eso en los últimos años se ha estado investigado el uso de las energías renovables para aumentar la autonomía de estos vehículos y en especial la energía solar es una de las mayormente utilizadas por la abundancia de la radiación solar y la portabilidad de los generadores solares [1].

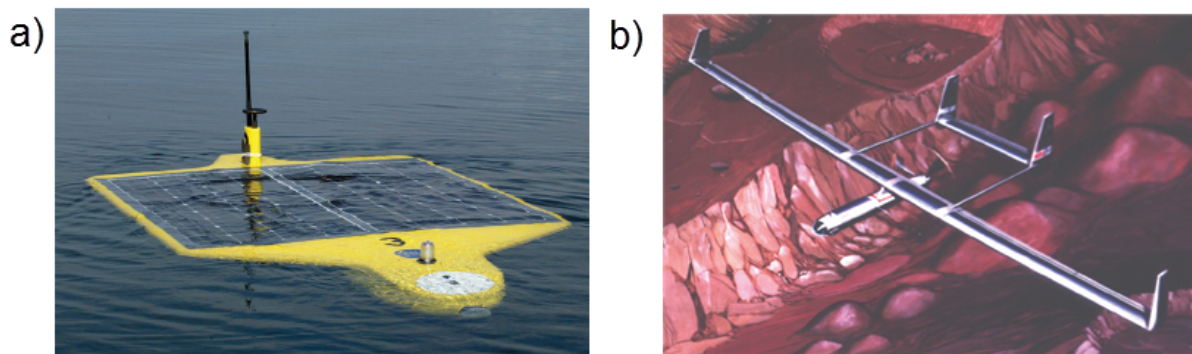


Figura 1.1. Vehículos no tripulados energizados por el sol. a)Submarino autónomo energizado por el sol, del acrónimo SAUV II (Solar Powered Autonomous Underwater Vehicle). b)Vehículo aéreo no tripulado energizado por el sol [1].

Alrededor del mundo 1600 millones de personas no tienen servicio eléctrico, por que están alejados de las líneas de transmisión eléctricas. Las líneas de transmisión eléctricas son demasiado caras para la mayoría de las zonas rurales, en el caso que sean extendidas tienen bajas ganancias monetarias, debido a que en las zonas rurales existe un alto subsidio por parte del gobierno. Las personas que viven en las zonas rurales para sus necesidades básicas como comer y calefacción, dependen de la madera, biomasa o estiércol, estos materiales principalmente son recolectados y cuidados por mujeres y niñas. En algunos lugares son ocupados los generadores diesel que en realidad no son muy caros, pero el mantenimiento de los generadores incrementa su costo según el tamaño de éstos [10].

Según lo reportado en [2], en la figura 1.2 se muestra la proyección de la generación de energía desde el 2005 hasta el 2035. Para el 2035 las energías renovables se posicionarán como la segunda fuente de energía, por encima del gas, energía nuclear, líquida, sólo debajo del carbón.

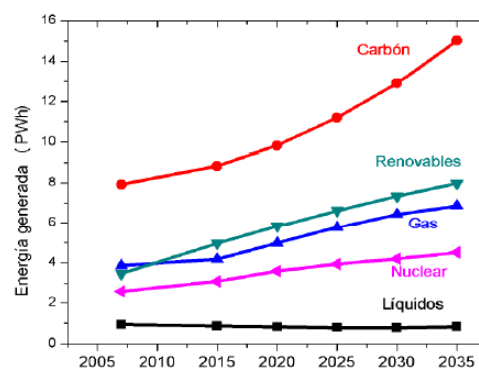


Figura 1.2. Proyección de la energía 2005-2035(EIA,2012) [2].

Actualmente, existen parques eólicos y solares, que están cotizados en millones de dólares y están bajo el monopolio de empresas multimillonarias. Del costo total de un aerogenerador la mayor parte viene de su base [4]. Sólo en zonas específicas existe una mayor cantidad de radiación solar, el costo por distribuir la energía eléctrica (del parque solar) a cada ser humano se incrementa por el costo del cableado o en su caso por las baterías. Los sistemas de generación de energía pueden ser desde un rango pequeño ($< 100\text{kWh/día}$, $\sim 15\text{Wp}$) hasta uno grande (decenas de MWh/día , centenas de kWp) [10].

En el 2011, el territorio mexicano recibió una radiación solar promedio de $5,000\text{Wh/m}^2$ al día en comparativa con los países de Norteamérica y el Norte de Europa cuya radiación solar promedio apenas superó los $2,500\text{Wh/m}^2$ al día [11]. Las energías más rentables en la república Mexicana son la hidráulica y la eólica, pero la solar tiene mucho más potencial, por ejemplo con el 1% de la radiación solar que recibe el estado de Sonora se podría

abastecer la demanda eléctrica de todo el país que asciende a 234,219 GWh al año, de acuerdo con las cifras del estudio del Sector Eléctrico 2013-2027, realizado por la SENER (Secretaría de energía) [11].

Para poder mejorar el desempeño de los generadores fotovoltaicos en [6] se aborda una idea novedosa, que es el de cambiar la configuración de conexión entre cada uno de los módulos fotovoltaicos que conforman un arreglo fotovoltaico (FV) completo, es decir los módulos del arreglo pueden estar conectados en serie, serie-paralelo o paralelo. En algunos casos el arreglo FV se re-configura para disminuir el efecto que tiene el sombreado parcial sobre éste, este efecto provoca que la corriente producida por todo el arreglo FV sea igual a la corriente que produce la celda FV que recibe menos radiación, lo cual no es nada conveniente debido a que la corriente producida por una celda depende en gran manera de la cantidad de radiación que esté absorbiendo dicha celda FV. También en [6] se reporta que un arreglo FV puede ser re-configurado para atender la demanda variable de corriente y de voltaje que requiere una carga, en algunas veces la carga va a requerir que el voltaje y la corriente aumenten o disminuyan según lo requiera la carga, como por ejemplo en su arranque un motor de CD consume una mayor corriente para poder vencer su inercia, mientras que el voltaje no debe ser muy grande; una vez vencida la inercia el motor puede comenzar a requerir un poco de más voltaje para aumentar su velocidad pero puede seguir requiriendo un poco de corriente para vencer la inercia restante y en su etapa final, una vez que el motor ha vencido su inercia en totalidad el motor puede incrementar su velocidad consumiendo mayor voltaje mientras que la corriente es muy pequeña. Un arreglo FV re-configurable que tiene conectado un motor de CD como carga, primeramente se configura en paralelo para dar su mayor corriente y vencer la inercia del motor, después el arreglo FV se configura en serie-paralelo para comenzar a aumentar la velocidad del motor sin que la corriente disminuya tanto, finalmente el arreglo se configura en serie para dar un mayor voltaje y así aumentar la velocidad del motor.

Por lo anterior, esta tesis está enfocada en la construcción de un panel fotovoltaico re-configurable para suministrar corriente y voltaje de acuerdo a como lo demande el BUS de CD de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT).

El orden de este documento se describe a continuación: En la parte de fundamentos teóricos de esta tesis se encuentran los capítulos uno y dos, se plantean los objetivos de esta tesis, se abordan algunas generalidades de los sistemas de generación fotovoltaicos, también se muestra el grave efecto que tiene el sombreado en las celdas fotovoltaicas, es dada una introducción a las nuevas técnicas del control de generadores fotovoltaicos, se presenta un ejemplos de la aplicación del control de generadores fotovoltaicos y finalmente se detallan los algoritmos y las arquitecturas de re-configuración de los arreglos

fotovoltaicos. El desarrollo y los resultados de esta tesis se encuentran en los capítulos tres, cuatro y cinco. En el capítulo tres y cuatro son simulados arreglos FV con diferentes especificaciones a las del arreglo que se utilizará en el VANT, pero los resultados obtenidos servirán para el diseño del arreglo que se propone en el capítulo cinco. A continuación se especifican los detalles del enfoque de los capítulos tres, cuatro y cinco.

- *Capítulo 3:* Validación de la simulación en MATLAB/SIMULINK de un arreglo FV, utilizando los resultados obtenidos de la caracterización de una celda FV en la simulador solar “Sol 2A Newport” del Instituto Nacional Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE). También se presentan los resultados de la simulación de un arreglo FV para suministrar 5V a 600mA a la aviónica de un VANT, son evaluados los cambios de irradiación y los cambios de temperatura de operación del arreglo FV.
- *Capítulo 4:* Simulación de un arreglo FV reconfigurable para poder suplir corriente y voltaje de acuerdo a como lo requiera un motor de CD que forma parte de un sistema “Modular Servo System”. El arreglo debe de reconfigurarse de la siguiente manera, en el arranque del motor: para suplir un voltaje mínimo de 3V con la corriente máxima que puede dar el arreglo, que son 25A. Para empezar a incrementar la velocidad del motor y vencer la inercia restante del motor, el arreglo suplirá 6V con una corriente de 12A. Finalmente para incrementar en su totalidad la velocidad del motor, el arreglo FV suplirá: su voltaje máximo que son 12V con su corriente mínima, que es 6A.
- *Capítulo 5:* Implementación y simulación de un arreglo FV reconfigurable para suplir energía a un VANT de ala fija de tipo planeador; para no afectar la aerodinámica del VANT el área del arreglo FV es restringida de acuerdo a las especificaciones del fabricante del VANT. Utilizando los datos obtenidos de la caracterización de una celda solar en el INAOE, en el diseño del arreglo FV se propone que éste tenga tres niveles distintos de corriente y voltaje. En el primero: un voltaje de 4.8V con una corriente de 3.632A. En el segundo: un voltaje de 9.6V con una corriente de 1.816A. En el tercero: un voltaje de 19.2V con una corriente de 908mA. Cada uno de los casos de reconfiguración del arreglo FV son simulados, es evaluado el caso cuando todo el arreglo FV tiene una irradiación uniforme y cuando la irradiación varía en la mitad del arreglo. Se muestra el proceso de construcción del arreglo FV según en diseño propuesto, también es detallado el diseño y la construcción de la matriz de reconfiguración del arreglo. El arreglo FV reconfigurable implementado es evaluado con diferentes cargas, expuesto a la radiación solar y también a la radiación de una matriz de focos.

El orden de los apéndices de esta tesis se detallan a continuación. En el apéndice A

de esta tesis primero se muestran las dos principales técnicas de seguimiento de máxima potencia (MPPT, del acrónimo en inglés: Maximum Power Point Tracking) de un arreglo FV que han sido propuestas, aunque en el arreglo FV propuesto para el VANT no se utilizan, si se quisiera aumentar la eficiencia de éste deberían de utilizarse dispositivos que extraigan la máxima potencia de todo el arreglo FV. En el apéndice B se detalla la simulación de un panel fotovoltaico a partir del modelo matemático de una celda fotovoltaica. En el apéndice C se muestra el análisis del consumo de energía del motor de CD para el que se diseña y simula un arreglo FV reconfigurable en el capítulo cuatro. En el apéndice D se muestra el proceso de la construcción del arreglo FV que se montó sobre las alas del VANT, también se muestra la conexión de la matriz de transistores con el arreglo FV. En el apéndice E se muestran las constancias de los artículos presentados en el desarrollo de esta tesis. En el apéndice F se muestran las constancias de la estancia de investigación realizada en el INAOE. En apéndice G se muestran las hojas de especificaciones de los dispositivos electrónicos utilizados en el arreglo FV reconfigurable implementado.

1.2. Objetivos

El trabajo de tesis se conforma de los siguientes objetivos:

1.2.1. Objetivo general

- Desarrollar una estrategia de control para la reconfiguración dinámica de un arreglo de celdas fotovoltaicas para satisfacer la demanda variable de potencia eléctrica de un vehículo aéreo no tripulado.

1.2.2. Objetivos específicos

- Simular en MATLAB/SIMULINK el modelo de una celda fotovoltaica y el de un arreglo fotovoltaico para evaluar los efectos de cambios en la irradiación.
- Diseñar un arreglo de celdas fotovoltaicas para suministrar potencia eléctrica a un vehículo aéreo no tripulado de ala fija.
- Caracterizar el arreglo fotovoltaico propuesto utilizando un analizador fotovoltaico VA1011 marca LANGLOIS y un simulador solar SOL 2A marca Newport.
- Proponer la arquitectura y el algoritmo de reconfiguración de un arreglo fotovoltaico para suministrar energía a un vehículo aéreo no tripulado, atendiendo la dinámica de su sistema de tracción.
- Simular el arreglo fotovoltaico propuesto.

- Implementar la arquitectura y el algoritmo de reconfiguración.
- Evaluar el desempeño de la arquitectura y el algoritmo en diferentes escenarios.

1.3. Generalidades de los sistemas de generación fotovoltaicos

1.3.1. Antecedentes de las celdas fotovoltaicas

Los efectos fotovoltaicos fueron descubiertos por Becquerel en 1839 pero no se desarrollaron como una fuente de energía hasta 1954 por Chapin, Fuller y Person usaron el dopado del semiconductor silicio. La energía fotovoltaica ha sido una de las tecnologías de generación de energía de crecimiento más rápido: la producción anual de celdas ha crecido diez veces de 50MW en 1990 a más de 500MW en el 2003, con un continuo crecimiento [4].

1.3.2. Principio de funcionamiento de una celda fotovoltaica

La generación de energía fotovoltaica es causada por la radiación electromagnética separando los portadores de carga positiva y carga negativa en el material absorbente. Si hay un campo eléctrico, las cargas pueden producir una corriente que puede ser usada en un circuito externo. Tal campo existe permanentemente en uniones o sin homogeneidad en celdas fotovoltaicas (FV) como campos electrostáticos integrados y proporcionan la fuerza electromotriz (EMF) para la producción de energía útil. La generación de energía es obtenida del emparejamiento de las celdas a la radiación, con longitud de onda del infrarrojo ($\sim 10\mu m$) a la ultravioleta ($\sim 0.3\mu m$), sin embargo, a menos que sea lo contrario, se considera el emparejamiento de la celda a la onda corta de radiación solar ($\sim 0.5\mu m$). El campo de incidencia de las celdas de semiconductor/semiconductor y metal semiconductor produce una diferencia de potencial de 0.5V y una densidad de corriente de unos $400A/m^2$ de radiación solar con cielo despejado $1.0kW/m^2$. Las celdas fotovoltaicas comerciales, dependen de su precio, tienen una eficiencia de 10 a 22% con sol ordinario, sin embargo, los experimentos y arreglos de laboratorio alcanzan mayor eficiencia. Las celdas usualmente son conectadas en serie y fijadas en módulos contra agua, la mayoría de los módulos producen 15V. Para un módulo fijo en una posición óptima, la producción de energía diaria depende del clima, pero se espera que sea aproximadamente de $0.5 - 1.0kWh/(m^2 dia^{-1})$. La salida puede ser aumentada usando dispositivos de seguimiento y concentradores solares [4].

Es importante resaltar que los dispositivos fotovoltaicos son fuentes de corriente controladas por el flujo de la radiación. La utilización de energía eficiente no depende únicamente de la generación eficiente en la célula, sino también en la coincidencia de carga dinámica en el circuito externo. Al respecto, los dispositivos fotovoltaicos son similares a otras fuentes de energías renovables, aunque los métodos exactos pueden variar (por ejemplo, el uso del convertidor DC-DC como interface del seguimiento del punto de máxima potencia) [4].

1.3.3. Propiedades y modelado de una celda solar

Una celda solar básicamente es la unión p-n fabricada en una oblea delgada de semiconductor. La radiación electromagnética de la energía solar puede ser directamente convertida a electricidad a través de efecto fotovoltaico. Al exponerse a la energía solar, los fotones con energía más grande que la energía de la banda de agotamiento del semiconductor crean pares de electrón-hueco proporcionales a la irradiación incidente[3].

El circuito equivalente de una celda fotovoltaica se muestra en la figura 1.3.

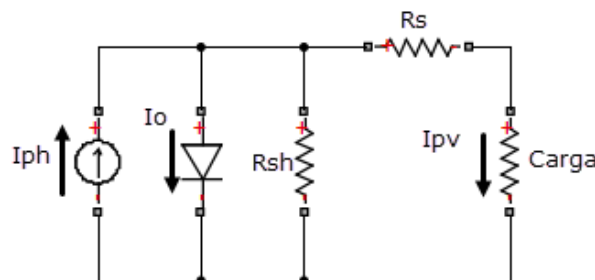


Figura 1.3. Modelado de la celda FV como circuito de un diodo [3].

La nomenclatura utilizada en el modelo matemático del panel solar es la siguiente:

V_{pv} es el voltaje de salida del módulo FV dada en Volts (V).

V_{oc} es el voltaje (V) en circuito abierto del módulo FV.

I_{pv} es la corriente de salida del módulo FV, dada en Amperes(A).

T_r Temperatura de referencia $25^{\circ}C$.

T_{rk} es la temperatura de referencia en grados kelvin, que es igual a $298^{\circ}K$.

T_{op} es la temperatura de operación del módulo FV en grados Celsius.

T_{ak} es la temperatura de operación del módulo, dada en grados Kelvin (K).

I_{ph} Es la corriente generada por la luz en un módulo FV, dada en Amperes (A).

I_o Es la corriente de saturación del módulo FV, dada en Amperes (A).

$A=B$ es el factor de idealidad, que es igual a 1.6.

k es la constante de Boltzman, igual a $1.3805 \times 10^{-23} J/K$.

q es la carga del electrón, es igual $1.6 \times 10^{-19} C$.

R_s es la resistencia en serie del módulo FV.

I_{SCr} es la corriente en corto circuito de referencia del módulo FV a $25^\circ C$ y $1000 W/m^2$.

K_i es el coeficiente de temperatura de la corriente I_{scr} , el valor de $K_i = 0.0017 A/^\circ C$.

λ es la iluminación del módulo FV (W/m^2).

E_{go} es el coeficiente de la banda prohibida del silicio, es igual a $1.1 eV$.

N_s es el número de celdas conectadas en serie.

N_p es el número de celdas conectadas en paralelo.

La fuente de corriente I_{ph} representa la fotocorriente de la celda. R_{sh} y R_s son las resistencias en serie y derivación intrínseca de la celda, respectivamente. Usualmente el valor de R_{sh} es muy grande y R_s es muy pequeña, por lo tanto esto podría ser despreciado para simplificar el análisis.

Las celdas FV son agrupadas y forman los módulos FV que son interconectados en configuración paralelo-serie para formar los generadores FV.

El panel fotovoltaico se puede modelar matemáticamente como en las siguientes ecuaciones

Módulo de foto-corriente:

$$I_{ph} = [I_{SCr} + K_i(T_{ak} - 298)] * \lambda / 1000 \quad (1.1)$$

Módulo de saturación de corriente de reversa I_{rs} :

$$I_{rs} = \frac{I_{SCr}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s k A T_{ak}}\right) - 1} \quad (1.2)$$

La corriente de saturación del módulo varía con respecto a la temperatura de la celda, que está dado por.

$$I_o = I_{rs} \left[\frac{T_{ak}}{T_{rk}} \right]^3 \exp \left[\frac{q E_{g0}}{B k} \left(\frac{1}{T_{rk}} - \frac{1}{T_{ak}} \right) \right] \quad (1.3)$$

La corriente de salida del módulo FV es

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_o \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV} R_s)}{N_s A k T_{ak}} \right) - 1 \right] \quad (1.4)$$

En la figura 1.4, para una iluminación dada, la curva va de $V=0$ (corto circuito, con corriente I_{SC}) a $V = V_{OC}$ (voltaje de circuito abierto, con $I=0$).

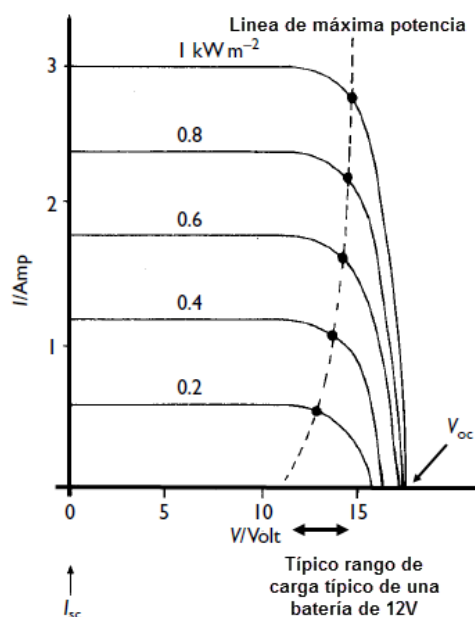


Figura 1.4. Característica I-V de un módulo de silicio Si común de 36 celdas empleado para cargar una batería de 12V, u otras cargas con diferentes radiaciones [4].

El voltaje de circuito abierto V_{OC} aumenta ligeramente con la radiación, a diferencia de la corriente en corto circuito I_{SC} . La energía máxima es transmitida a una carga externa R_L , cuando R_L iguala la resistencia interna de la fuente R_{int} . Sin embargo, R_{int} está regulada por el flujo de fotones absorbidos, un buen equilibrio de potencia en las celdas solares requiere que R_L cambie en relación a la radiación solar.

Los requisitos restantes para la buena producción de energía son evidentes desde el circuito equivalente [4]:

1. I_{ph} debería ser el máximo: Por ejemplo, tener el mínimo de fotones perdidos, absorción cerca de la capa de agotamiento, una baja reflexión de la superficie, una pequeña área de contacto eléctrico en la superficie superior, una alta concentración dopante y pocos centros de recombinación.
2. I_o debe de ser el mínimo: Por ejemplo mediante una alta concentración de dopante.
3. R_{sh} debe ser grande, tal como la cuidadosa construcción del borde.
4. R_s debe de ser pequeña, por ejemplo garantizando un camino corto para la superficie actual a los contactos eléctricos, mediante el uso de contactos y cables de baja resistencia.

5. $R_{carga} = R_{interna} = \frac{V}{I}$ para una adaptación óptima de energía.

En condiciones estándares, el máximo potencial en circuito abierto de los módulos comunes es de $\sim 22V$ y una corriente máxima en corto circuito en las terminales del módulo de $\sim 5.5A$. Estos módulos fueron desarrollados originalmente para la carga de baterías de 12 V [4]. Algunos ejemplos de dispositivos comunes, corresponden a aplicaciones como luces fluorescentes, un radio transmisor, un cargador portable de baterías recargables, un pequeño refrigerador o una bomba de agua.

La máxima eficiencia de una celda solar (ecuación 1.5) es la razón entre la máxima potencia (P_{max}) y la potencia de luz incidente (P_{in}), que también puede ser vista por el producto de la corriente de máxima potencia (I_{max}) por el voltaje de máxima potencia (V_{max}), entre el producto del área (A) de la celda solar por la irradiación (G_a) que está recibiendo en ese momento [1].

$$Eff = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max}V_{max}}{AG_a}, \quad (1.5)$$

El factor de llenado (ecuación 1.6) es la razón de la máxima potencia (P_{max}) que puede ser entregada a la carga y el producto de la corriente en corto circuito (I_{sc}) y el voltaje en circuito abierto (V_{oc}), pero también puede ser vista como la razón del producto I_{max} y V_{max} entre el producto de V_{oc} y I_{sc} . Este factor es una medición característica real de la curva I-V. Éste es mayor de 0.7 para celdas en buena condición, pero decrece cuando la temperatura de la celda aumenta.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{I_{max}V_{max}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (1.6)$$

1.3.4. Balance de los componentes del sistema fotovoltaico

La máxima energía se obtiene mediante el control de V y I al acotarse en la línea máxima de energía, como la radiación recibida y la resistencia de carga (figura 1.4). Se aproxima a un voltaje constante, dentro del 25 % de V_{OC} , incluso en celdas a temperatura constante (las condiciones para que la relación I-V presente una curva generalmente es indicada por el fabricante).

Si una carga (puramente resistiva o un motor de CD) se utiliza sin una batería (como puede ser por una bomba de agua), el rendimiento es mucho mayor por un seguidor del punto de máxima potencia, como se ilustra en la Figura 1.5. Esto es esencialmente un convertidor de CD-CD que mantiene el voltaje de entrada cercano al punto de máxima potencia (MPPT), según como varíe la radiación. Tal dispositivo de gestión de carga se construye generalmente en sistemas de bombeo solar llamado maximizador y pueden activar 95 % de la producción máxima, que puede usar ventajosamente para una carga bajo

las condiciones de variación solar [4].

Un inversor independiente utiliza un generador de frecuencia interna y un circuito de conmutación para transformar el voltaje de CD bajo a alto voltaje CA de alimentación. La forma de onda de CA puede ser una onda cuadrada (inversor económico) o una sinusoidal aproximadamente pura (inversor electrónico sofisticado de estado sólido). El inversor debe dimensionarse para una instalación en particular para que pueda hacer frente a las corrientes transitorias asociadas con el arranque de un motor (si corresponde), pero no tan grande que normalmente opera a una fracción pequeña de su potencia nominal (por ejemplo $<15\%$) y por lo tanto una baja eficiencia ($<85\%$). Inversores electrónicos de estado sólido son disponibles comercialmente con una fiabilidad, eficiencia ($\sim 95\%$) y un costo razonable [4].

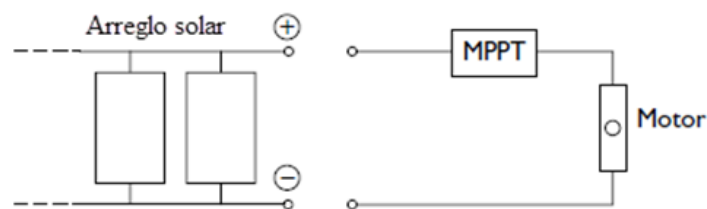


Figura 1.5. Sistema con seguidor del punto de máxima potencia MPP [4].

1.4. Efectos de sombreado en las celdas fotovoltaicas

Los efectos de sombreado ocurren cuando un generador fotovoltaico o parte de éste no está completamente irradiado debido al efecto de un obstáculo. Algunas de las celdas del módulo fotovoltaico pueden trabajar en polarización inversa actuando como cargas en lugar de generadores de energía cuando el módulo está parcialmente irradiado. Si la polarización inversa excede el voltaje de ruptura de la celda solar sombreada, esta puede actuar como un circuito abierto y dañar el generador completo [1].

Para reducir los efectos del sombreado, muchos módulos fotovoltaicos comerciales incluyen diodos internos de desviación. Sin embargo, el número de diodos en el módulo fotovoltaico es mucho menor que el número de celdas conectadas en serie en el módulo. Consecuentemente, se reduce el riesgo de circuito abierto; sin embargo, es reducida la potencia total de salida del módulo fotovoltaico, desde cuando uno de los diodos de desviación está conduciendo, un número de celdas solares salen fuera del generador.

En la figura 1.6 se muestran dos formas de arreglos fotovoltaicos. En el arreglo a), cada celda fotovoltaica tiene su propio diodo de desviación conectado en anti-paralelo.

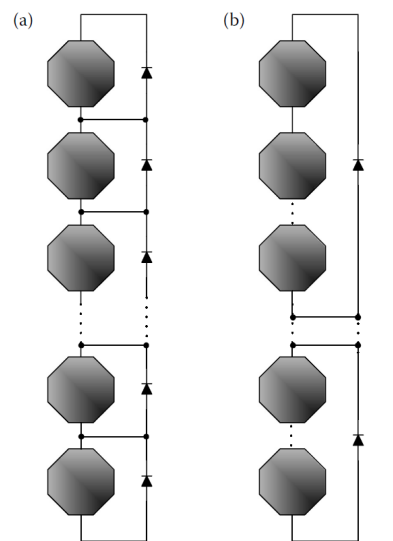


Figura 1.6. a) Diodos de desviación conectados a través de cada celda y b) Diodos de desviación conectados a través de una cadena de celdas [1].

La primera configuración es más resistente a las condiciones de sombreado y puede producir más energía comparada con la segunda configuración mostrada en la figura 1.6b). Cuando un arreglo está sujeto a sombreado parcial, en la configuración b) una cadena de celdas salen fuera de orden mientras que en la primera configuración únicamente las celdas afectadas salen fuera de orden[1].

La figura 1.7 muestra las curvas de corriente-voltaje para un arreglo completamente iluminado y las dos diferentes configuraciones.

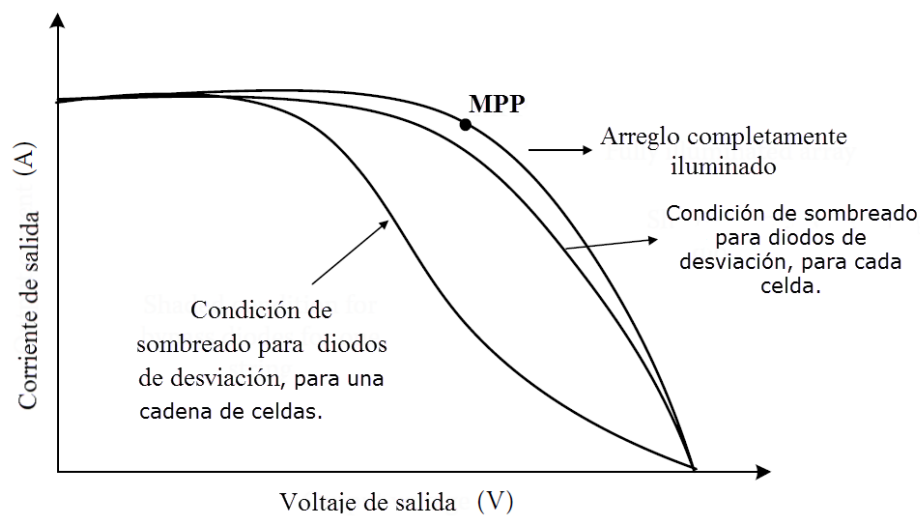


Figura 1.7. Características I-V para cadenas fotovoltaicas en condiciones de sombreado [1].

Para calcular los efectos del sombreado, un factor de sombreado(S) puede ser introducido.

$$S = \frac{A_S}{A_C} = 1 - \frac{\bar{E}}{E_0} \quad (1.7)$$

Donde A_S es el área de sombreado, A_C es el área total del módulo fotovoltaico y \bar{E} es la iluminación promedio en la celda sin sombra E_0 .

Las curvas I-V de la celda fotovoltaica bajo diferentes factores de sombreado se comporta como las celdas bajo diferentes condiciones de irradiación como es mostrado en la figura 1.8.

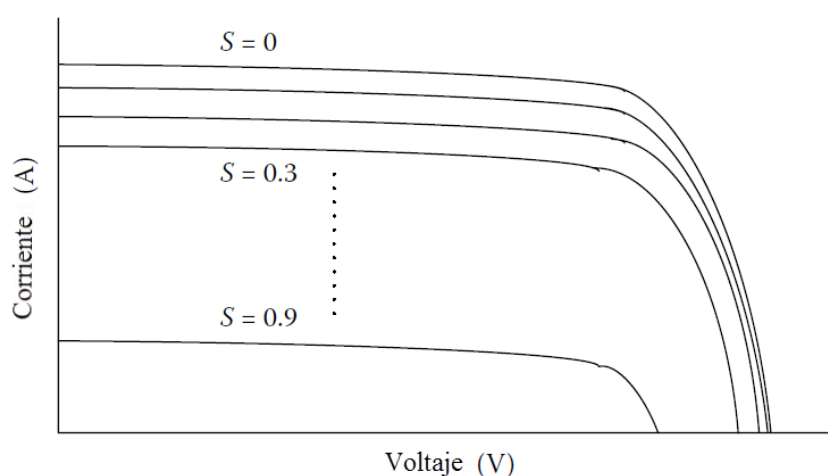


Figura 1.8. Características I-V bajo diferentes condiciones de sombreado [1].

Además, la curva potencia-voltaje (figura 1.9) también es afectada en condiciones de sombra. Cuando ocurre una sombra local, dos valores de potencia pico diferentes para dos valores existentes de voltaje diferentes.

Muchos métodos siguen un pico local y no podrían encontrar un valor global. Esto puede ser importante bajo las condiciones locales de sombreado. Por lo tanto, el efecto de sombreado deberá ser considerado en el cálculo del MPP.

El efecto de sombreado puede ser incluido en un modelo simple de diodo sin resistencias. La ecuación de un modelo simple de diodo se puede modificar para una celda fotovoltaica como.

$$I = I_{PH} - I_S(e^{V/mV_T} - 1) \quad (1.8)$$

Donde la fotocorriente(I_{PH}) está en una relación lineal con la irradiación solar, y la corriente de corto circuito (I_{SC}) es igual a I_{PH} . La misma relación lineal es válida para

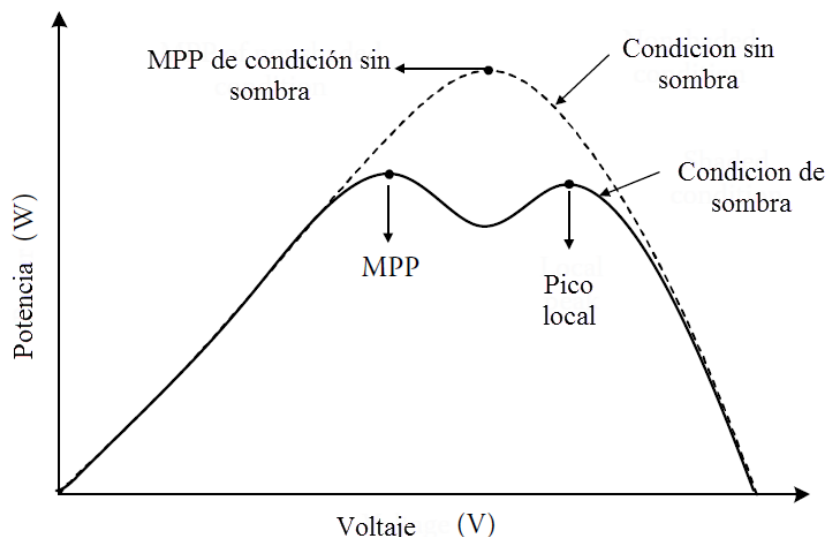


Figura 1.9. Relocalización del MPP bajo condiciones de sombreado [1].

efectos de sombreado (S) como:

$$I_{PH} \approx I_{SC}(S) = I_{SC0}(1 - S) \quad (1.9)$$

Donde I_{SC0} es la corriente de corto circuito de toda la celda iluminada.

Para $I=0$, la ecuación 1.10 puede ser escrita como

$$V_{OC} = mV_T \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_S} + 1\right) \quad (1.10)$$

Por lo tanto, V_{OC} puede escribirse como

$$V_{OC} = mV_T \ln\left(\frac{I_{SC0}}{I_S} + 1\right) \quad (1.11)$$

El voltaje de la celda en circuito abierto es

$$V_{OC}(S) = V_{OC0} + mV_T \ln(1 - S) \quad (1.12)$$

El problema del sombreado afecta el MPP del módulo fotovoltaico. Así, la relación de corriente y voltaje en el MPP puede ser escrita como

$$I_{MPP} = I(V_{MPP}) = I_{SC} - I_S(e^{V_{MPP}/mV_T} - 1) \quad (1.13)$$

El voltaje en el MPP puede ser obtenido como

$$\frac{dP(V_{MPP})}{dV} = I(V_{MPP}) + V_{MPP} \frac{dI(V_{MPP})}{dV} = 0 \quad (1.14)$$

Que resulta

$$V_{MPP} = V_{OC} - mV_T \ln\left(1 + \frac{V_{MPP}}{mV_T}\right) \quad (1.15)$$

1.5. Nuevas técnicas del control de generadores fotovoltaicos

En los cinco años pasados, el deseo de mejorar el control de generadores fotovoltaicos que trabajan en condiciones desiguales ha estimulado substancialmente investigaciones y desarrollos. Las recientes investigaciones han revivido la idea discontinuada de cambiar la conexión eléctrica entre los módulos fotovoltaicos de acuerdo con sus condiciones de operación y la solicitud de carga. La matriz de conmutación es confiable y permite un costo adicional en los convertidores de conmutación de nivel de módulo, que deben ser evitados y también mantener la alta eficiencia bajo condiciones desiguales no frecuentes. La reconfiguración eléctrica del generador FV también permite la mejor carga de desigualdad entre la fuente FV y su carga variable [6].

Como ya se mencionó en la sección anterior el efecto de sombreado afecta el MPP, además que también interviene la variación de la temperatura. Por esto son agregados los diodos de desviación en antiparalelo. Esto disminuye el efecto perjudicial de las celdas sombreadas para un número limitado de celdas, pero la curva de potencia contra voltaje (P-V) del panel fotovoltaico puede mostrar más de un MPP. Esta situación puede traer fallas al sistema del seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) del inversor, que no podría ser capaz de alcanzar un MPP global.

La desigualdad del panel FV podría también ser causada de forma deliberada en el diseño del sistema. Por ejemplo, una instalación necesitará nuevos paneles FV para reemplazar los viejos o paneles dañados, pero los paneles nuevos pueden ser de diferente tipo o de diferente manufactura por que los anteriores ya no están disponibles. Otro ejemplo, es para los sistemas que integran diferentes aplicaciones de FV, en los que las celdas FV tienen que seguir el perfil de las estructuras construidas de modo que las celdas en la misma cadena podrían tener diferentes orientaciones con respecto a la incidencia de la luz solar.

Los sistemas de procesamiento de energía distribuida (DPPSs), consisten en una solución de electrónica de potencia dedicada a pequeñas porciones de generadores FV, usualmente para módulos simples, se ha propuesto reducir los efectos de desajuste. En efecto, en los pasados cinco años, la atención de algunas compañías grandes y pequeñas, se han

enfocado en soluciones DPPS basados en convertidores cd/cd o cd/ca para procesar y maximizar la potencia en el nivel de cadena o en el nivel de panel individual. Los optimizadores y micro inversores en cada panel FV individual han sido propuestos por un número de compañías, con una variedad de soluciones, eficiencias, complementos. Estos productos han sido soportados por los esfuerzos de investigación de muchos grupos académicos en el mundo, que están concentrados en arquitecturas novedosas, topologías eficientes y estrategias de alto desempeño.

1.6. Aplicación de las nuevas técnicas del control de generadores fotovoltaicos

El tren de energía de la aeronave energizada por energía solar que se muestra en la figura 1.10a y b consiste de celdas solares en las alas, un sistema de almacenamiento de energía, electrónica de gestión de energía, motor de CD sin escobillas y hélices [5].

Como se muestra en la figura 1.10b, el generador solar está conectado al bus principal de CD mediante convertidores CD/CD MPP. Las baterías son cargadas por el bus de CD principal. La propulsión de la aeronave depende del sistema de control del motor, que es energizado por el bus de CD por medio del inversor CD/CA. Los requerimientos auxiliares de energía también son proporcionados por el bus principal de CD [1].

El esquema general del sistema de energía eléctrica de un aeroplano se muestra en la figura 1.11. Está compuesto de celdas solares ubicadas en las alas, son usados seguidores de máxima potencia para aumentar la energía obtenida del sol, baterías para almacenar la energía para el vuelo de noche, un inversor CD/CA y un administrador electrónico para controlar el motor con la hélice.

En esta configuración mostrada en la figura 1.11, los módulos solares están conectados a los convertidores CD/CD MPP individuales ya que cada módulo podría tener diferentes MPP debido a sus posiciones diferentes. Por lo tanto, tiene dos buses principales de CD para cada ala, con dos paquetes de baterías. Dos motores controlan las hélices en cada ala y estos motores son energizados por los inversores CD/CA conectados a los buses CD. La principal característica del administrador de energía es la eficiencia de energía en los sub módulos. La eficiencia del sistema depende extremadamente de los distintos modos de funcionamiento: el vuelo horizontal a baja altura, escalada y el vuelo horizontal a gran altura[1].

a)



b)

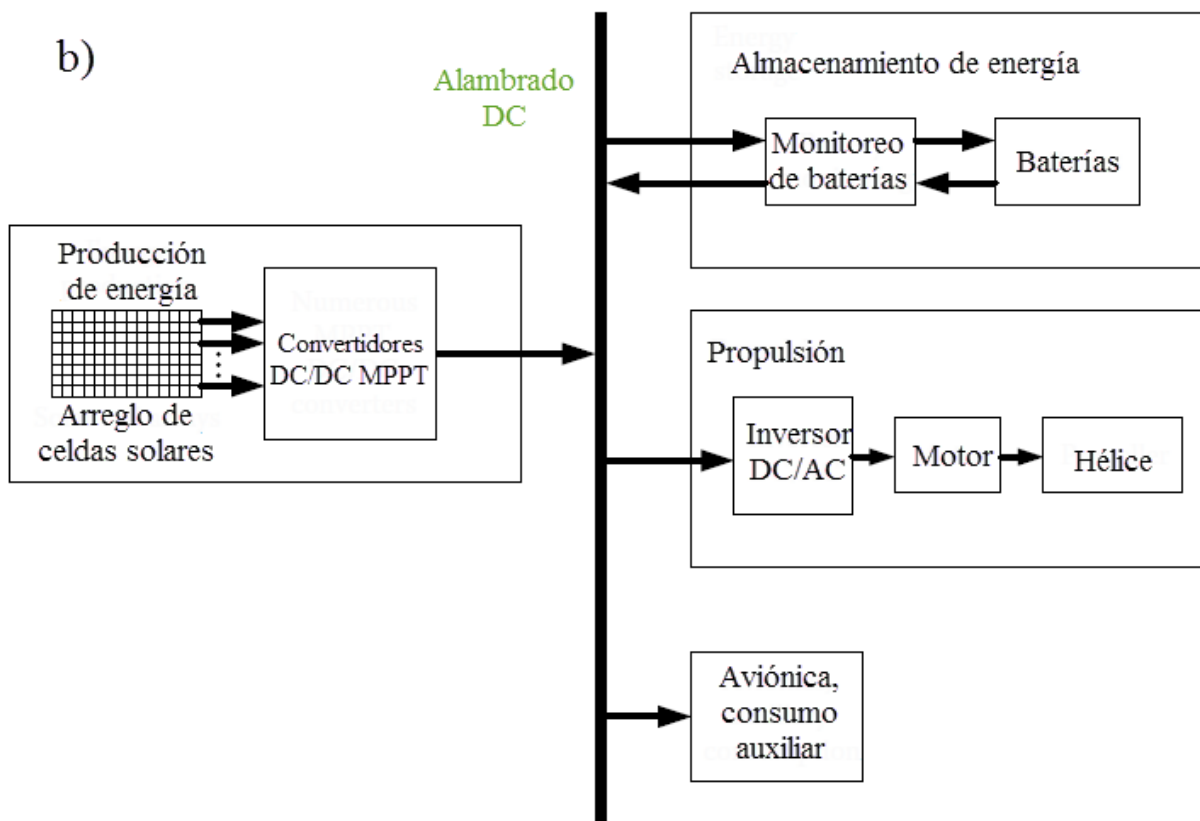


Figura 1.10. a) Aeronave energizada por energía solar b) Tren de energía de la aeronave[5].

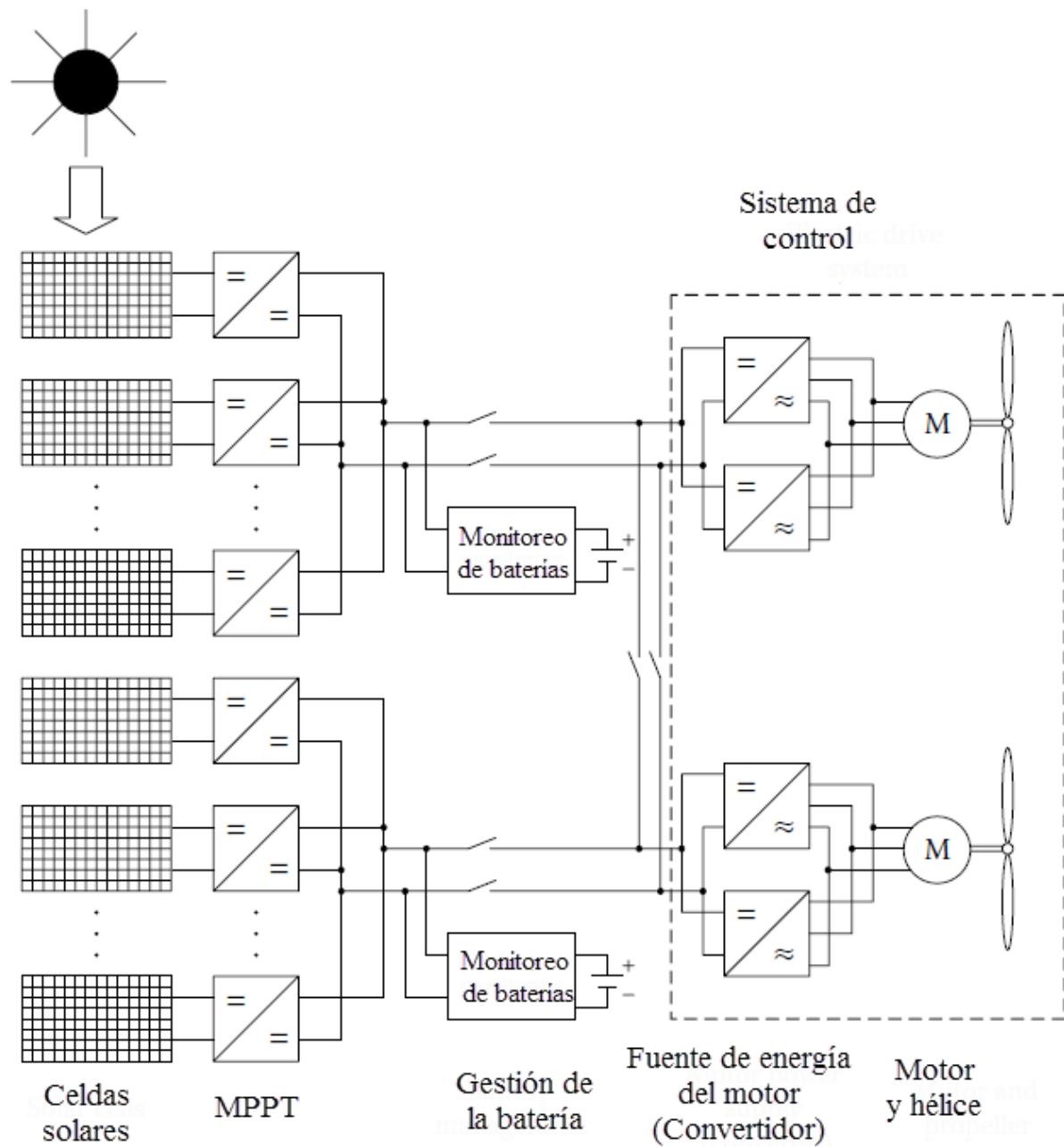


Figura 1.11. Sistema eléctrico del aeroplano propuesto [1].

Capítulo 2

Arquitecturas y algoritmos de reconfiguración

Las investigaciones reportadas de reconfiguración de arreglos FV en la literatura, se diferencian en la estructura física y el algoritmo de control pero casi todos inician con la suposición de que las unidades son reconfiguradas con un pico único en la curva de potencia contra voltaje (P-V). La única excepción es el enfoque presentado en [12], que está basado en el conocimiento previo del posible desajuste de la curva I-V de cada unidad FV. Algunas soluciones en la literatura requieren sistemas para medir o estimar la irradiación y/o la temperatura de cada elemento FV [6]. Por ejemplo, en [13], la irradiación se estima a partir de la corriente de corto circuito y en [14] el nivel del sombreado es deducido a partir del voltaje en circuito abierto. La irradiación también es estimada por las mediciones de corriente, voltaje y los valores de las hojas de especificaciones [15], pero se requiere un esfuerzo computacional significativo.

2.1. Arquitecturas para reconfiguración

Los estudios reportados en la literatura se refieren a tres arquitecturas fundamentales: Cadena reconfigurable (RSTs), arreglo serie-paralelo reconfigurable (RSP) y arreglo ligado en cruz totalmente reconfigurable, se muestran en la figura 2.1.

2.1.1. Cadenas reconfigurables

Las cadenas reconfigurables RST consisten de una cadena simple en que un módulo desigual se puede remover de la conexión en serie. Por lo tanto, la cadena cambia de voltaje en MPP significativamente dependiendo del desajuste del perfil. Esta arquitectura es la más simple por que sólo dos opciones están disponibles para cada módulo, requiere solo una pequeña cantidad de interruptores. En [16], una arquitectura RST emplea una comunicación en red para hacer la conexión de cada celda con las demás. La red incluye

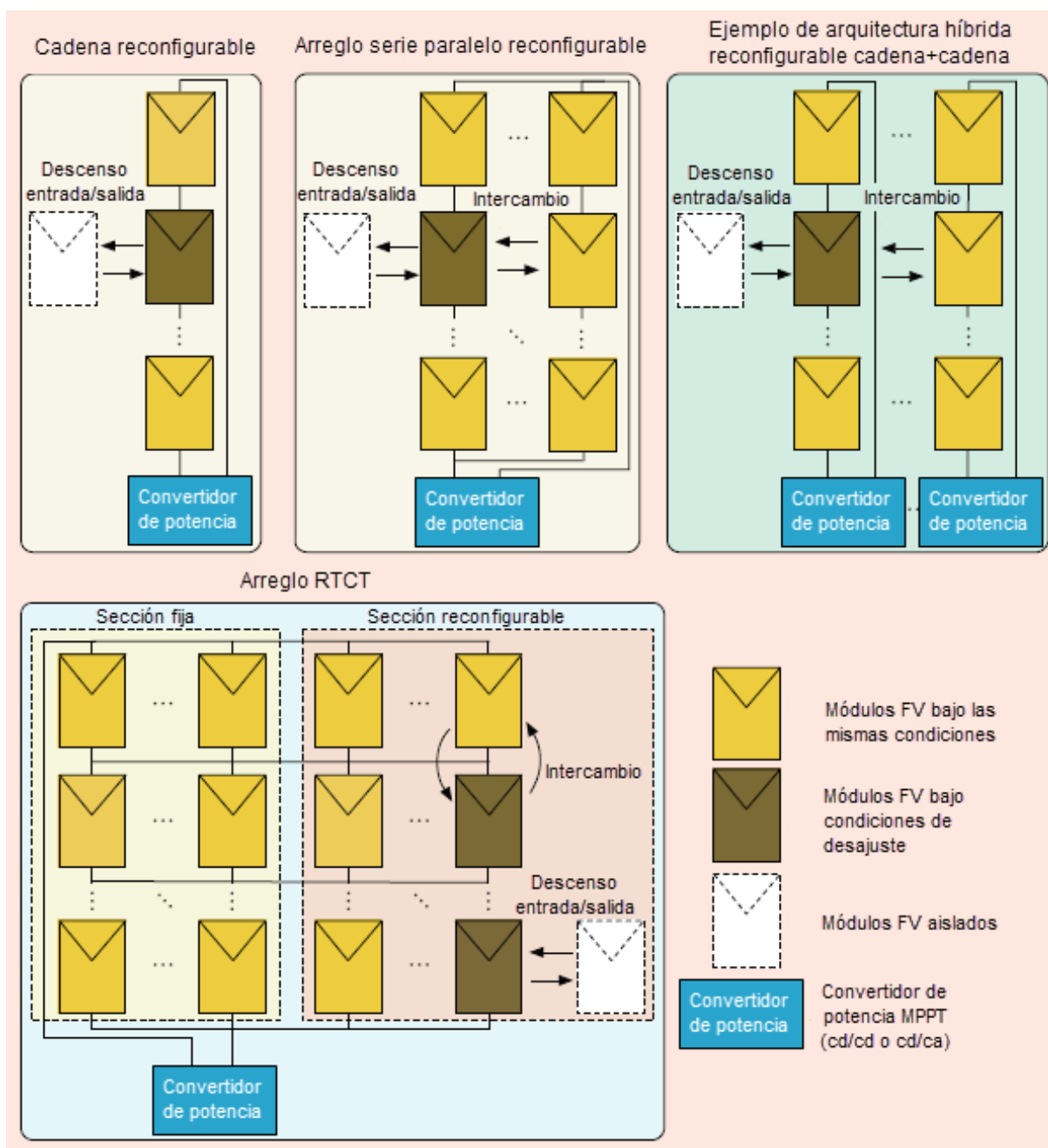


Figura 2.1. Arquitecturas para la reconfiguración de arreglos FV [6].

interruptores, capacitores de almacenamiento, sensores de voltaje/corriente usados para detectar el MPP y para medir la corriente de la cadena. Un controlador dedicado decide la conexión o desconexión de las celdas para formar una cadena [6].

2.1.2. Arreglo reconfigurable serie paralelo

La arquitectura de arreglo reconfigurable serie paralelo (RSP) consiste de múltiples cadenas conectadas en paralelo, en la cual cualquier módulo podría ser removido del arre-

glo. Además, el arreglo geométrico podría ser fijo o variable en términos del número de cadenas y constante el número de módulos por cadena.

Esta arquitectura requiere una gran cantidad de interruptores para su implementación, por que conecta cada módulo con una cadena [17]. La literatura se enfoca en alcanzar el mejor equilibrio entre la flexibilidad de la estructura RSP y la simplicidad de las acciones de control y de su implementación. Las geometrías fijas requieren un bajo número de interruptores, pero, al mismo tiempo, esto limita el número de posibles configuraciones y por lo tanto, no puede ser alcanzada una configuración óptima. En cambio, geometrías variables proveen más posibilidades a expensas de un aumento en el soporte físico y la complejidad del control.

Algunas aplicaciones de arquitecturas RSP se pueden encontrar en la literatura patentada. Por ejemplo, una configuración de arreglo dinámico ha sido usada para adaptar el voltaje y la corriente con un número reducido de celdas FV usando una simple topología de re-conexión para usar en naves espaciales, donde las variaciones extremas de la irradiación y temperatura producen el sobredimensionamiento de un arreglo FV fijo con un alto costo y peso. En [18], la reconfiguración es utilizada especialmente para propósitos de redundancia. Un beneficio adicional de este sistema de reconfiguración es para modificar la trayectoria de la corriente en el arreglo FV para obtener un torque magnético controlable usado para regular la orientación de una nave espacial.

2.1.3. Arreglo ligado en cruz totalmente reconfigurable

La arquitectura del arreglo ligado en cruz totalmente reconfigurable (RTCT) consiste en filas hechas de módulos conectados en paralelo conectados en serie. Cualquier módulo puede ser movido de un renglón a otro o removido del arreglo. Además, la geometría del arreglo podría ser fija o indefinida en términos del número de renglones o módulos por renglón. De forma parecida a la arquitectura RSP, las geometrías fijas requieren pocos interruptores pero a expensas de reducir el número de posibles configuraciones. Un enfoque común adoptado en la arquitectura RTCT involucra fijar la estructura del número de módulos, que no está sujeta a ningún proceso de reconfiguración.

Una arquitectura completa RTCT es usada en [19] para reducir las pérdidas por desigualdades, pero a precio de un gran número de interruptores [17], aumento en la complejidad del control y requerimientos adicionales del soporte físico. Esta configuración reduce el efecto de los módulos sombreados pero la efectividad del enfoque depende de la relación entre los tamaños de ambos, la sección fija y la reconfigurable.

2.1.4. Arquitectura híbrida

Las arquitecturas híbridas, combinan las estructuras RST, RSP y RTCT, resultado de soluciones que difieren, dependiendo del nivel de granularidad, en términos de flexibilidad y requerimientos del soporte físico. En [20], es propuesta una arquitectura híbrida RST/RSP donde los módulos sombreados de la parte RSP son quitados para formar arreglo SP irradiado uniformemente directamente conectado al inversor principal. Si el proceso de reconfiguración resulta en una cadena FV corta, este es conectado a la entrada de un convertidor CD/CD adicional, así se forma una estructura RST.

La principal ventaja de esta solución consiste en reducir el número de módulos excluidos de la cadena para que sea alcanzada la potencia máxima factible. El principal inconveniente consiste en el incremento del número de interruptores y la complejidad del control.

El uso conjunto de una matriz de conmutación y los convertidores CD/CD también se discute en algunas patentes como por ejemplo en [21] un sistema electrónico administrador es integrado en un módulo FV. Este sistema comprende una variedad de convertidores CD/CD estáticos conectados a una o más celdas FV y un módulo de reconfiguración conectado a las salidas del convertidor usadas para transmitir la energía hacia la carga.

2.2. Algoritmos de reconfiguración

Los arreglos FV de tamaño grande y mediano aumentan el número de posibles configuraciones, de modo que el número de combinaciones a ser examinada debería ser reducido introduciendo algunas restricciones de operación, tal como la arquitectura de conexión. La solución óptima es determinada por el uso de aproximaciones heurísticas, intuitivas, o matemáticas. En la tabla 2.1, se comparan las principales características de algunos algoritmos de reconfiguración. El análisis se basa en el tipo de implementación, analógica o digital, en la velocidad de convergencia, en la complejidad del algoritmo y la implementación y en el rendimiento del cálculo de la mejor configuración. Los algoritmos son caracterizados de acuerdo a las siguientes categorías.

2.2.1. Algoritmo de reconfiguración programable

El algoritmo de reconfiguración programable (PRA) requiere una fase de prueba para crear la relación entre las diferentes condiciones de operación óptima entre los elementos FV. Si las condiciones de funcionamiento actuales del generador fotovoltaico no caen en el conjunto de casos analizados durante el escenario de entrenamiento, el sistema conecta

Tabla 2.1. Categorías de los algoritmos de reconfiguración [6].

Categoría	Analógica digital	Velocidad de convergencia	Complejidad del algoritmo y la implementación	Rendimiento en el seguimiento de la mejor solución
PRA	Ambos	Rápido	Bajo	Bajo
ERA	Digital	Lento	Mediano	Alto
SRA	Digital	Medio	Medio	Medio
DRA	Analógico	Rápido	Alto	Medio
COA	Digital	Medio/Lento	Alto	Alto
CIA	Digital	Medio/Lento	Medio	Medio

los módulos FV en una forma que no asegura la máxima producción de energía.

Los algoritmos usualmente determinan la conexión entre los elementos FV usando tablas de búsqueda: en [22] el enfoque es usado para que coincida el punto de máxima potencia (MPP) con los requerimientos de la carga. Con baja irradiación, los módulos son conectados en paralelo, mientras que con alta irradiación, los módulos son conectados en serie.

2.2.2. Evaluación de los algoritmos de reconfiguración

En la evaluación exhaustiva de los algoritmos de reconfiguración (ERA), son evaluadas todas las posibilidades de combinación, pero en algunas aplicaciones, el tiempo de cálculo se acorta mediante la reducción del ancho del espacio de búsqueda mediante la imposición de ciertas restricciones operativas en la conexión de las unidades FV. En [15], el espacio de búsqueda es reducido fijando el número de módulos por renglón en una arquitectura RTCT. La forma anterior es usada para mejorar la producción de energía y esta es considerada para aumentar el tiempo de vida de los interruptores por la reducción de su frecuencia de conexión/desconexión. En contraste, un algoritmo de búsqueda exhaustivo se usa en [17] para reconfigurar los arreglos FV en arquitecturas RSP: este exclusivamente mide la corriente de cadena y el voltaje para calcular los parámetros eléctricos de los módulos. Se utilizan modelos parametrizados para evaluar todas las posibles configuraciones. En [23], una arquitectura híbrida basada en arquitecturas RST, es reconfigurada utilizando el algoritmo ERA. Tal solución evalúa todas las posibles configuraciones para encontrar el que suministre la misma corriente en MPP a los elementos de cada cadena. El procedimiento se realiza multiplicando una matriz predefinida, describiendo cada configuración con una matriz formada por las corrientes máximas de cada cadena para calcular la energía de configuración, repitiendo el proceso para todas las configuraciones.

2.2.3. Algoritmos de reconfiguración almacenados

En los algoritmos de reconfiguración almacenados (SRAs), los elementos FV son organizados en base a su nivel de irradiación recibido por cada uno de ellos. Entonces, es aplicado un criterio de almacenamiento para buscar una solución aceptable; algunas restricciones arquitectónicas son introducidas para limitar el ancho del espacio de búsqueda.

En general, en este algoritmo SRA ordena los módulos fotovoltaicos para buscar la configuración que cumple una determinada condición. El primer paso del algoritmo propuesto en [14] es organizar las celdas FV dependiendo de su nivel de irradiación (correspondiendo con su voltaje en circuito abierto medido). Después, el algoritmo reubica las celdas más iluminadas en la parte adaptiva de una arquitectura RTCT para compensar las celdas más sombreadas de la parte fija del arreglo. La solución presentada en [20] desconecta los módulos sombreados del arreglo, de modo que los módulos totalmente irradiados son conectados en una arquitectura híbrida RST-RSP. Este tipo de solución malgasta la energía producida por los módulos sombreados así que no es capaz de realizar una maximización real de la energía producida por el arreglo FV.

2.2.4. Algoritmo de reconfiguración distribuida

En el algoritmo de reconfiguración distribuida (DRA), cada elemento FV está equipado con un controlador que de forma autónoma decide la conexión/desconexión de elementos de el mismo a/de el arreglo. Esta solución aumenta la cantidad de circuitería adicional y su uso está limitado para arquitecturas RST.

La solución presentada en [16] usa un algoritmo DRA en una arquitectura RST: la celda es conectada a la cadena para un intervalo de tiempo dependiendo de su máxima potencia, mientras que la corriente de cadena se define por la corriente MPP más alta. En resumen, las otras celdas son conectadas a la cadena durante el tiempo que pueden contribuir para mantener la corriente de la cadena, así ecualizando la corriente de las celdas durante el periodo completo.

2.2.5. Algoritmos de optimización clásicos

Los algoritmos de optimización clásicos (COA) están basados en la teoría de optimización clásica, donde el valor de función del costo matemático es optimizado utilizando métodos clásicos. Además, algunas restricciones en las posibles conexiones de los elementos solares se introducen para limitar el ancho del espacio de búsqueda. Por ejemplo, una solución de algoritmo COA se propone en [24] para reconfigurar la arquitectura RTCT con una subsección fija. La función de costo a minimizar a través del algoritmo de la rama

y unida (BB) es la diferencia de irradiancia entre los módulos en cada fila. Desafortunadamente, las soluciones COA requieren un esfuerzo computacional significativo.

2.2.6. Algoritmos inteligentes computacionales

En los algoritmos inteligentes computacionales (CIA), la óptima configuración es determinada por el uso de algoritmos heurísticos basado en conjuntos difusos, redes neuronales, enfoque evolutivos, etc. En general, es requerido un conocimiento de diseñador o una gran cantidad de datos para definir el tren de reglas del algoritmo. En [25], un algoritmo difuso está diseñado usando un pequeño conjunto de reglas para buscar la mejor configuración en función de la nivel de irradiación y requerimientos de par-velocidad de un coche. Sin embargo, en [26] un conjunto de reglas difusas también tiene en cuenta la derivada de la irradiancia para mejorar el rendimiento dinámico. Ambas soluciones reducen el espacio de búsqueda mediante fijar la geometría de la matriz.

Capítulo 3

Validación y simulación de un arreglo fotovoltaico ante cambios de irradiación y temperatura

En la primera parte de este capítulo se obtienen las curvas características: corriente-voltaje (I-V), potencia-voltaje (P-V), potencia corriente(P-I) de una celda solar monocristalina que mide $7.7 \times 2.9 \text{ cm}^2$, esta celda proporciona 0.2W en su punto de máxima potencia (MPP), se utilizó el sistema SOL 2A de la marca Newport (facilitado por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica) para obtener dichas curvas, este sistema proporciona una irradiación 1000 W/m^2 , temperatura de operación de la celda 25°C , en la figura 3.1 se muestra una celda solar siendo caracterizada por el sistema Sol 2A. Las curvas características de ésta celda solar son comparadas las de una celda solar implementada en simulación en MATLAB/SIMULINK a partir del modelo matemático de un panel solar que fue detallado en la subsección 1.3.3 y también con las curvas del bloque SolarCell que se encuentra en MATLAB/SIMULINK/Simscape/SimElectronics. Las características de la celda solar que fueron consideradas para su simulación son las mismas que las que se obtuvieron con el sistema SOL 2A.

Ya validado el modelo matemático de una celda solar, se propone en simulación un arreglo de celdas solares para suministrar un voltaje de 5V y una corriente de 600mA (potencia: 3W) para la aviónica de un vehículo aéreo no tripulado, con el propósito de evaluar como es afectada la energía producida por el panel se hacen cambios en la temperatura de operación y se varía la irradiación que recibe el arreglo FV, las curvas características del arreglo son evaluadas en los diferentes casos.

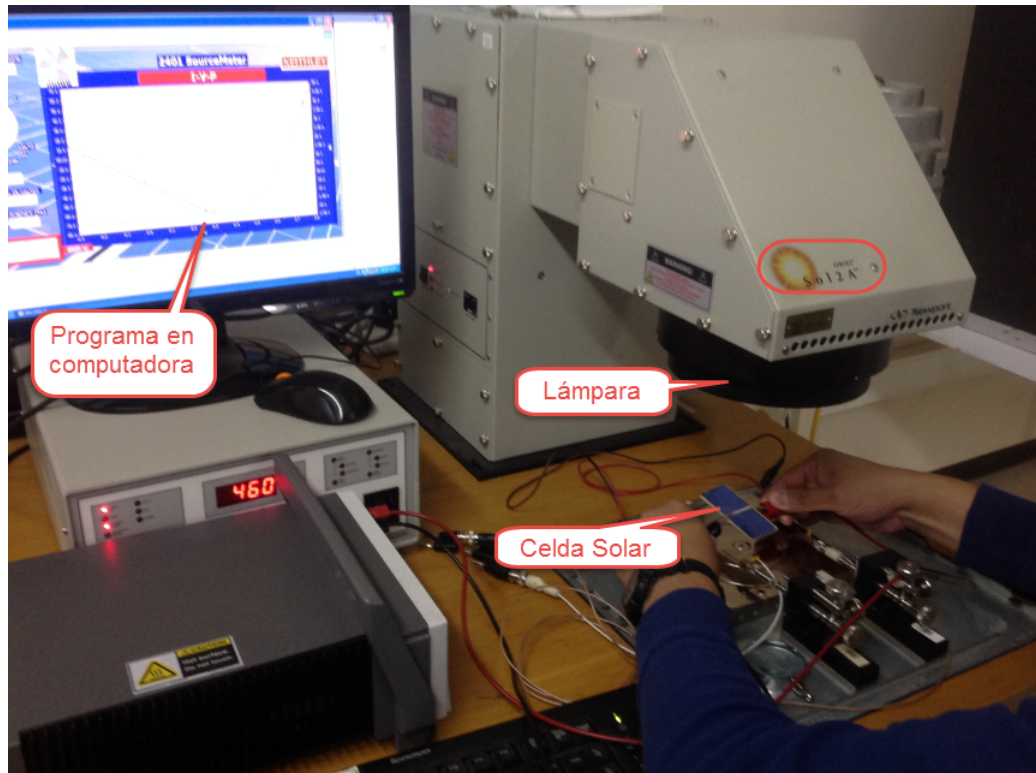


Figura 3.1. Sistema Sol 2A marca Newport, utilizado para caracterizar celdas solares.

3.1. Validación del modelo matemático y del bloque solar Cell de una celda solar

En esta sección se muestran las curvas características de una celda solar monocristalina de $7.7 \times 2.9 \text{ cm}^2$ para compararlas con la respuesta del modelo matemático de una celda solar y del bloque SolarCell de SimElectronics, esto con el objetivo de que sea validado el modelo matemático de una celda solar y el bloque SolarCell. En las pruebas sólo la radiación va a ser variada, es decir, cuando esté encendida la lámpara la celda solar va a tener una irradiación de 1000 W/m^2 y cuando la lámpara se apague se considerará que la celda tiene una irradiación aproximadamente de 0 W/m^2 , en ambas pruebas la temperatura va a ser de 25°C .

Las ecuaciones del modelo matemático de un panel fotovoltaico se introdujeron mediante bloques en MATLAB/SIMULINK (figura 3.2), donde se consideró que este panel solo tenía una celda, para poder comparar sus curvas características con las de dos muestras diferentes de celdas solares físicas.

También, se implementó en simulación un circuito (figura 3.3) para poder caracterizar la celda solar de SimElectronics de MATLAB/SIMULINK y comparar sus curvas características con las de dos muestras de celdas físicas, lo que se tiene que hacer du-

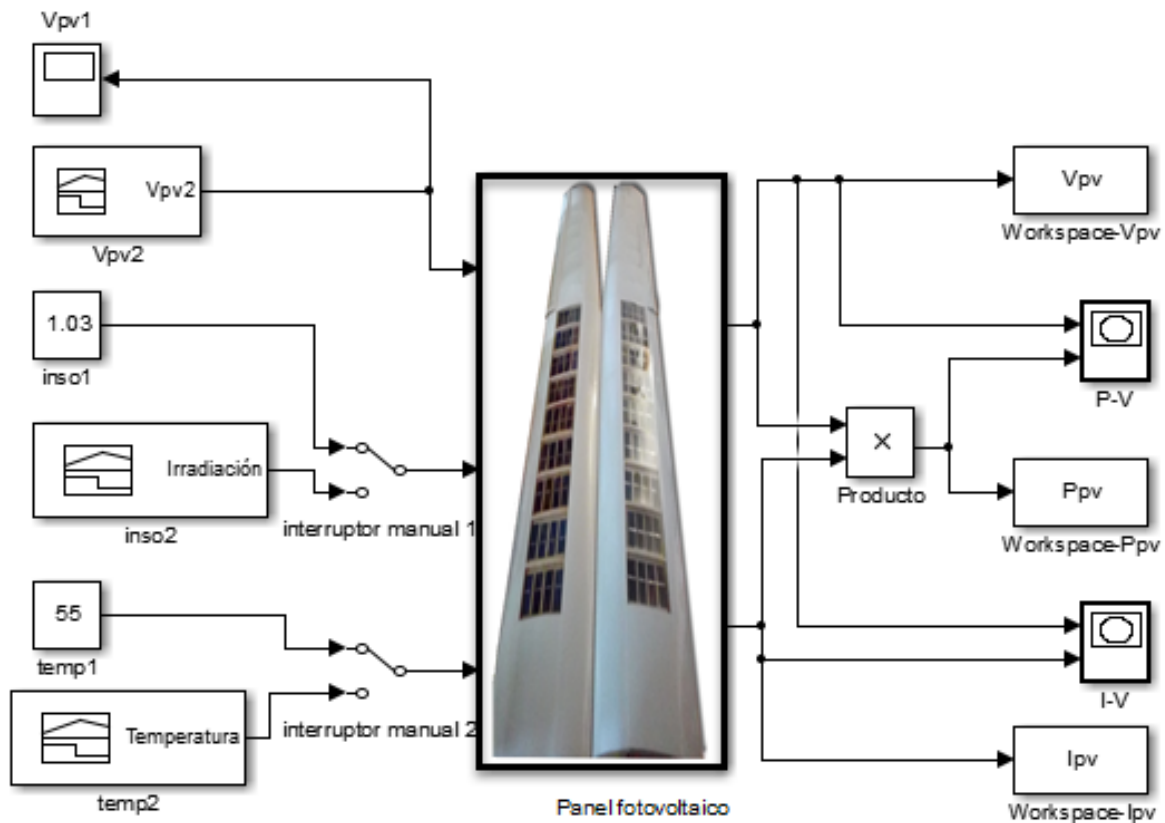


Figura 3.2. Diagrama de bloques de un panel FV implementado en MATLAB/SIMULINK.

durante el tiempo de simulación es hacer el barrido del valor de la resistencia variable que está conectada en paralelo de la celda solar, esto se logra barriendo el valor del bloque “SliderGain”. El bloque celda Solar (SolarCell) es configurado de acuerdo a los resultados obtenidos con el sistema Sol 2A, de una de las muestras de celda solar.

3.1.1. Curvas características de celdas FV sin ser iluminadas

Las primeras curvas características que se obtuvieron fueron cuando la celda solar no fue iluminada por la lámpara. El programa del sistema Sol 2A genera las curvas características: corriente contra voltaje I-V y potencia contra voltaje P-V, además genera una tabla, donde se muestran: potencia de entrada P_{in} (W/cm^2), área de la celda (cm^2), voltaje en circuito abierto V_{OC} (V), corriente en corto circuito I_{SC} (A), potencia máxima P_{max} (W), corriente en corto circuito generada por cada cm^2 J_{SC} (A/cm^2), factor de llenado FF (%), eficiencia Eff (%). La tabla 3.1, muestra los resultados de dos muestras de celdas del mismo tamaño sin ser iluminadas, en general los resultados son muy similares y en ambas muestras la potencia P_{max} es del orden de μW .

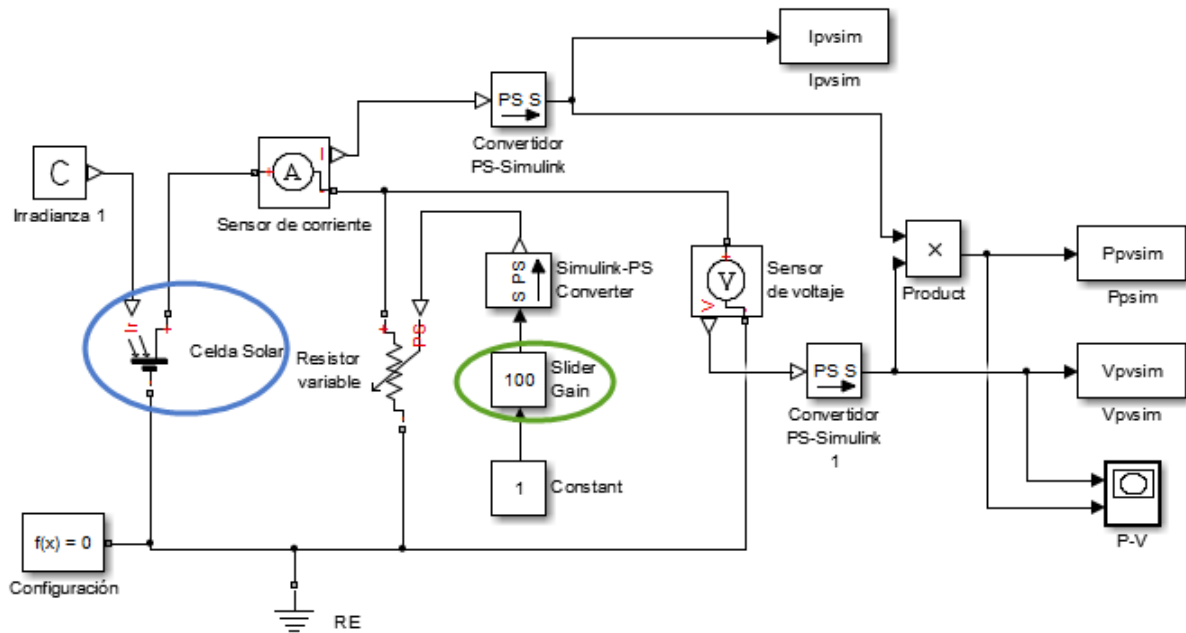


Figura 3.3. Circuito para caracterizar una celda solar de SimElectronics.

Tabla 3.1. Tabla de las características de dos muestras de celdas solares, sin ser iluminadas.

Datos	Valor		Unidades
	muestra1	muestra2	
P_{in}	0.1	0.1	W/cm^2
Área de la celda	22.3	22.3	cm^2
V_{OC}	0.137343	0.162858	V
I_{SC}	0.000122	0.000193	A
P_{max}	0.000006	0.000012	W
J_{SC}	0.000005	0.000009	A/cm^2
FF	0.338722	0.393312	$\%$
Eff	0.000254	0.000554	$\%$

La figura 3.4 muestra las curvas P-V de ambas muestras, donde se observa que la potencia más grande en los dos casos es de 1.2×10^{-5} con un voltaje de 0.09997V.

La figura 3.5 muestra las curvas P-I de ambas muestras, se ubica la potencia máxima en cada caso.

La figura 3.6 muestra las curvas I-V de ambas muestras, se muestran los valores del voltaje V_{pv} y la corriente I_{pv} donde la celda solar se encuentra en su máxima potencia P_{max} .

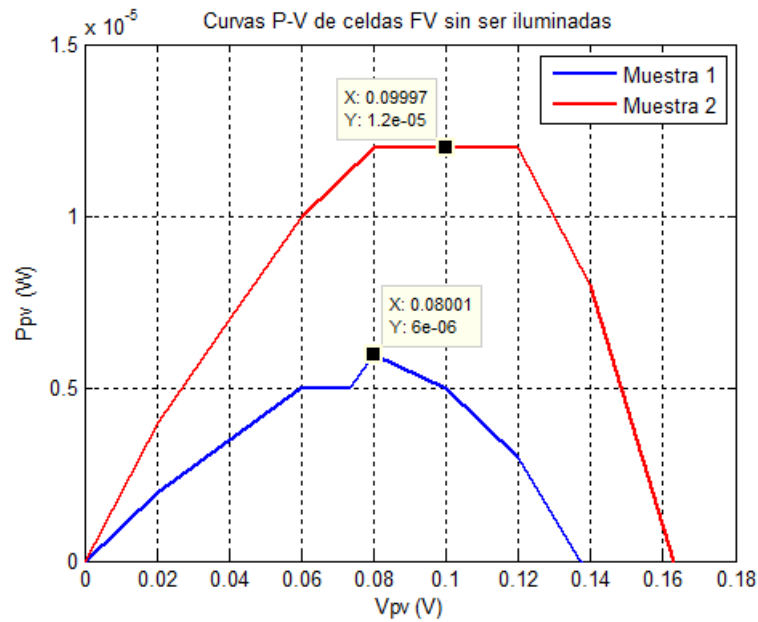


Figura 3.4. Curvas de potencia contra voltaje P-V de dos celdas solares del mismo tamaño, sin ser iluminadas.

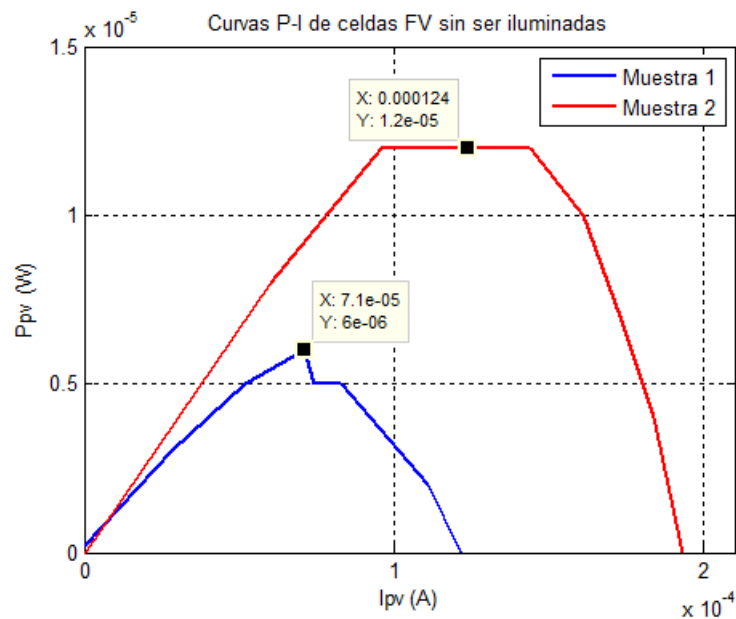


Figura 3.5. Curvas de potencia contra corriente P-I de dos celdas solares del mismo tamaño, sin ser iluminadas.

3.1.2. Curvas características de celdas FV al ser iluminadas

Ahora las dos celdas solares muestra fueron iluminadas, la radiación que recibió cada celda fue de $1000\text{W}/\text{m}^2$ con una temperatura de 25°C (para asegurar que la celda solar alcance su máxima potencia), en la tabla 3.2 se muestran los resultados de: P_{in} , Área de la celda solar, V_{OC} , I_{SC} , P_{max} , J_{SC} , FF , Eff de cada una de las celdas solares. La potencia P_{max} que alcanzan las dos celdas solares es aproximadamente 0.21W , su factor de llenado

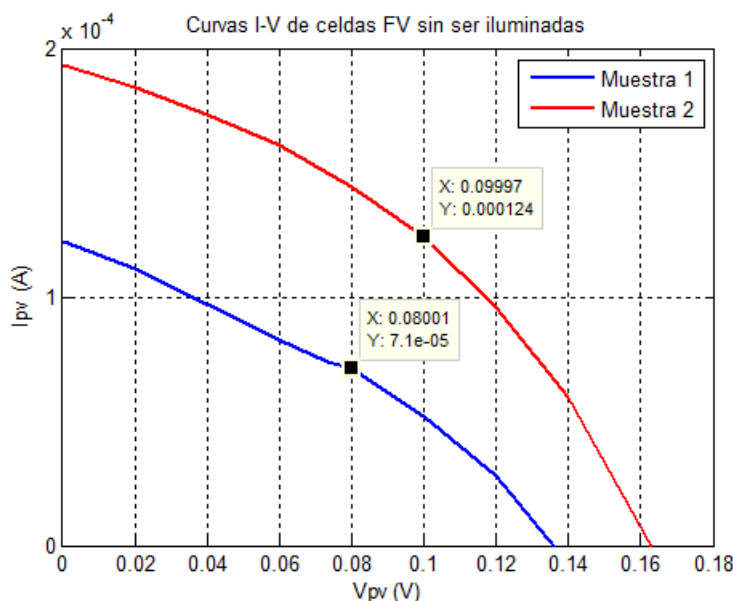


Figura 3.6. Curvas de corriente contra voltaje I-V de dos celdas solares del mismo tamaño, sin ser iluminadas.

FF es aproximadamente 0.45 %, la eficiencia es de aproximadamente 9.2 %.

Tabla 3.2. Tabla de las características de dos celdas solares muestra, al ser iluminadas.

Datos	Valor		Unidades
	muestra1	muestra2	
P_{in}	0.1	0.1	W/cm^2
Área de la celda	22.3	22.3	cm^2
V_{OC}	0.600061	0.600042	V
I_{SC}	0.734606	0.727112	A
P_{max}	0.212659	0.205116	W
J_{SC}	0.032942	0.032606	A/cm^2
FF	0.482429	0.470129	%
Eff	9.536266	9.198038	%

Para poder obtener las curvas P-V, P-I, I-V del modelo de una celda solar y del bloque SolarCell de Simelectronics, además de conocer los datos mostrados en la tabla 3.2 es necesario obtener la resistencia en serie (R_s) de las celdas solares físicas, para que R_s sea tomada en cuenta dentro del modelo matemático de una celda solar y el bloque SolarCell de SimElectronics. Para esto, se obtienen las gráficas de las curvas I-V de la celdas solare físicas (figura 3.7) donde se ubica la R_s en la pendiente donde decrece la corriente I_{pv} . Con los valores de I_{pv} y V_{pv} en los dos puntos que se observan en la figura 3.7, se calcula la resistencia en serie R_s mediante la siguiente operación:

$$R_s = \frac{0.52 - 0.5}{0.211 - 0.264} = -0.3703 \quad (3.1)$$

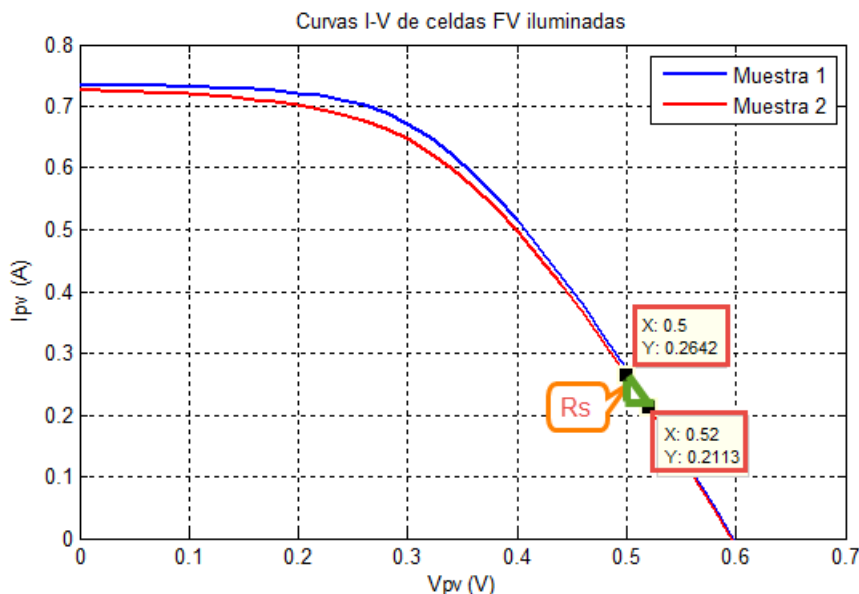


Figura 3.7. Curvas de corriente contra voltaje I-V de dos celdas solares del mismo tamaño, al ser iluminadas.

Las curvas características P-V, P-I, I-V de las celdas solares físicas son utilizadas para validar el modelo matemático y el bloque SolarCell, tanto en el modelo matemático como en el bloque SolarCell se considera el valor de R_s como positiva ($R_s=0.37$), la irradiación de $1000W/m^2$, temperatura de operación de la celda $25^{\circ}C$.

Las curvas de P-V de las dos celdas solares físicas, del modelo matemático y del bloque SolarCell se muestran en la figura 3.8. El punto donde la celda solar alcanza la potencia máxima (MPP) de $0.2W$ es cuando el voltaje $V_{pv} = 0.36V$.

Las curvas P-I de las dos celdas solares, del modelo matemático y del bloque SolarCell se muestran en la figura 3.9. El punto donde la celda solar alcanza la potencia máxima (MPP) de $0.2W$ es cuando la corriente $I_{pv} = 0.5697A$.

Las curvas I-V de las dos celdas solares físicas, del modelo matemático y del bloque SolarCell se muestran en la figura 3.10, en esta figura se muestra el punto de máxima potencia (MPP) que la celda solar alcanza con una corriente $I_{pv} = 0.5697A$ y un voltaje $V_{pv} = 0.36V$.

Por los resultados observados en las curvas característica P-V, P-I, I-V, (figuras 3.8, 3.9, 3.10) se puede afirmar que el modelo matemático y el bloque SolarCell de SimElectronics son válidos, por que las curvas características son muy idénticas a las de las dos celdas solares física caracterizadas con el simulador solar Sol2A, por lo tanto es válido utilizar el modelo matemático de una celda solar o el bloque SolarCell de SimElectronics para diseñar los arreglos fotovoltaicos para cumplir los objetivos de esta tesis.

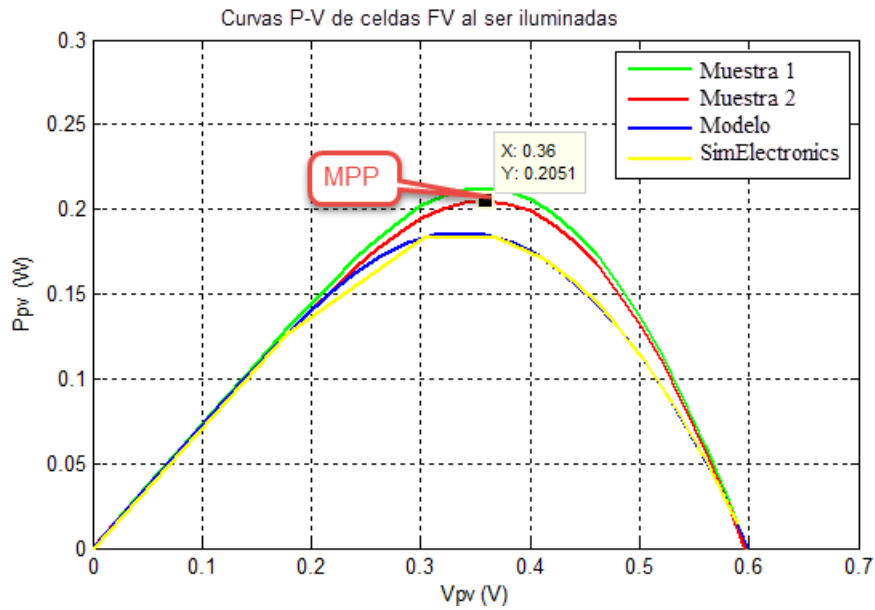


Figura 3.8. Comparación de las curvas de potencia contra voltaje P-V de dos celdas solares físicas con las curvas P-V de su modelo matemático y las del bloque SolarCell, considerando una irradiación de $1000W/m^2$ y una temperatura de operación de $25^{\circ}C$.

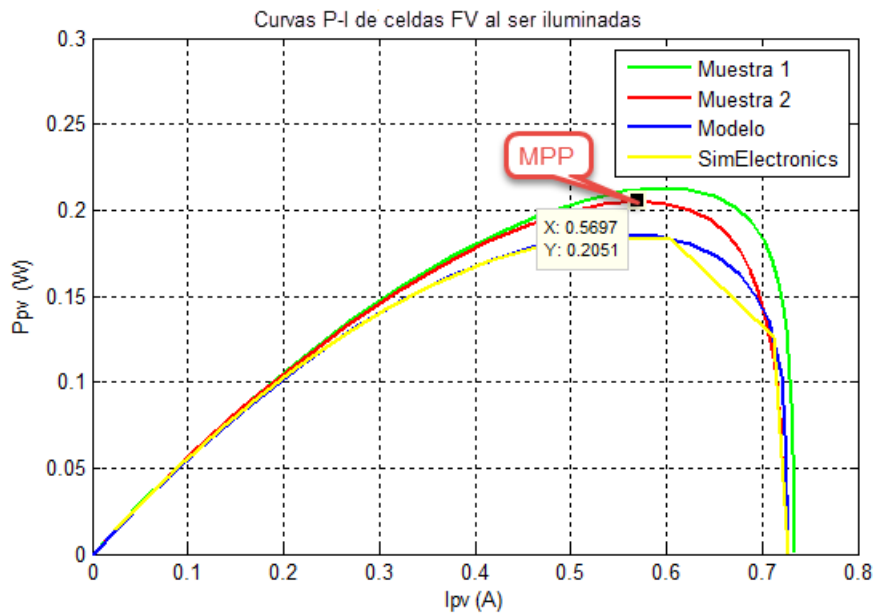


Figura 3.9. Comparación de las curvas de potencia contra corriente P-I de dos celdas solares físicas con las curvas P-I de su modelo matemático y las del bloque SolarCell, considerando una irradiación de $1000W/m^2$ y una temperatura de operación de $25^{\circ}C$.

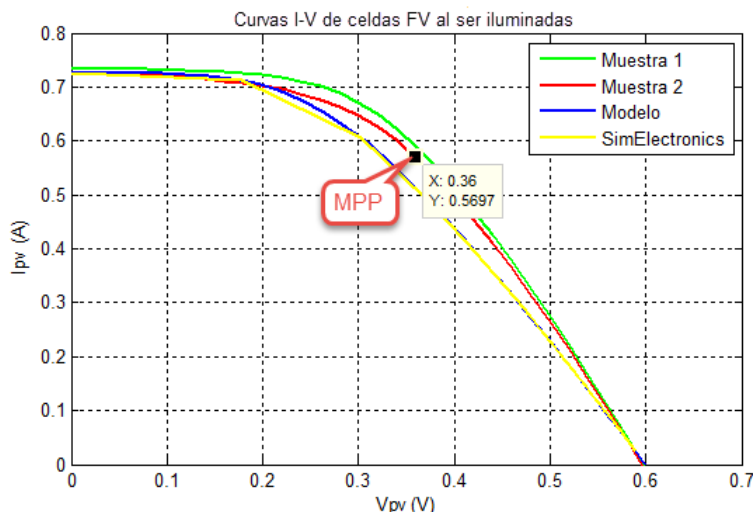


Figura 3.10. Comparación de las curvas de corriente contra voltaje de dos celdas solares físicas con las curvas I-V de su modelo matemático y las del bloque SolarCell, considerando una irradiación de $1000W/m^2$ y una temperatura de operación de $25^{\circ}C$.

3.2. Simulación de un panel fotovoltaico para suministrar energía a la aviónica de un VANT

En esta sección se muestra la simulación de un panel fotovoltaico para suministrar energía a la aviónica (voltaje 5V, corriente 600mA) de un VANT, se considera que 11 de las celdas caracterizadas en la sección 3.1 son conectadas en serie para poder generar un $V_{OC} = 6.6V$ y una $I_{SC} = 0.727A$.

3.2.1. Efecto de la variación de la irradiación en la potencia generada por el panel fotovoltaico

La primera prueba que se hace es variar la irradiación del panel fotovoltaico mientras que la temperatura se mantiene en $25^{\circ}C$. Para que se pueda obtener la máxima potencia del panel solar la irradiación que recibe el panel debe ser de $1000W/m^2$, los siguientes valores que toma la irradiación son $600W/m^2$ y finalmente desciende a $200W/m^2$.

Las curvas de potencia-voltaje se muestran en la figura 3.11, se observa que el punto de máxima potencia (MPP) es $P_{max} = 3.484W$, éste se alcanza cuando $V_{pv} = 5.2V$, que también es llamado voltaje de máxima potencia (V_{mpp}). A medida que disminuye la irradiación, se reduce la potencia generada por el panel sin que disminuya tan drásticamente el voltaje V_{mpp} .

Las curvas de potencia-corriente se muestran en la figura 3.12, se puede observar que con una irradiación de $1000W/m^2$ el panel FV alcanza la P_{max} con una corriente generada de $I_{mpp} = 0.67A$.

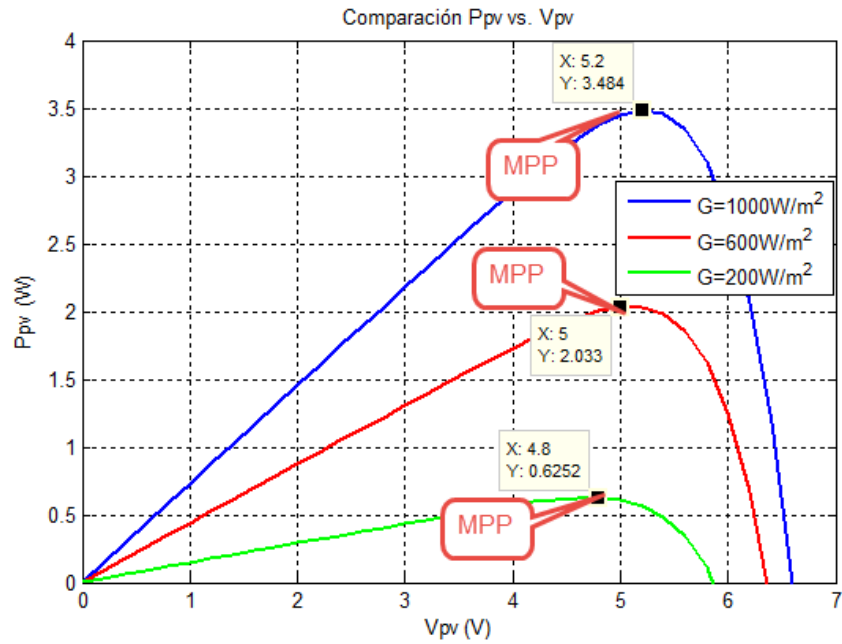


Figura 3.11. Curvas características P-V de un arreglo FV ante variaciones en la irradiación, para suministrar energía a un VANT.

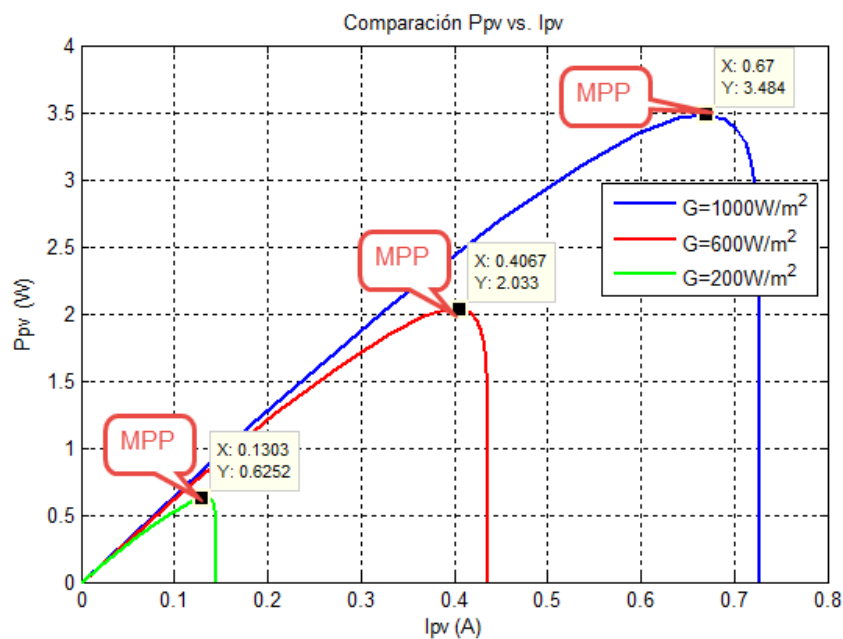


Figura 3.12. Curvas características P-I de un arreglo FV ante variaciones en la irradiación, para suministrar energía a un VANT.

El punto de máxima potencia (MPP) que se encuentra en $V_{mpp} = 5.2V$ y $I_{mpp} = 0.67A$ se puede ubicar en las curvas corriente-voltaje que se muestran en la figura 3.13.

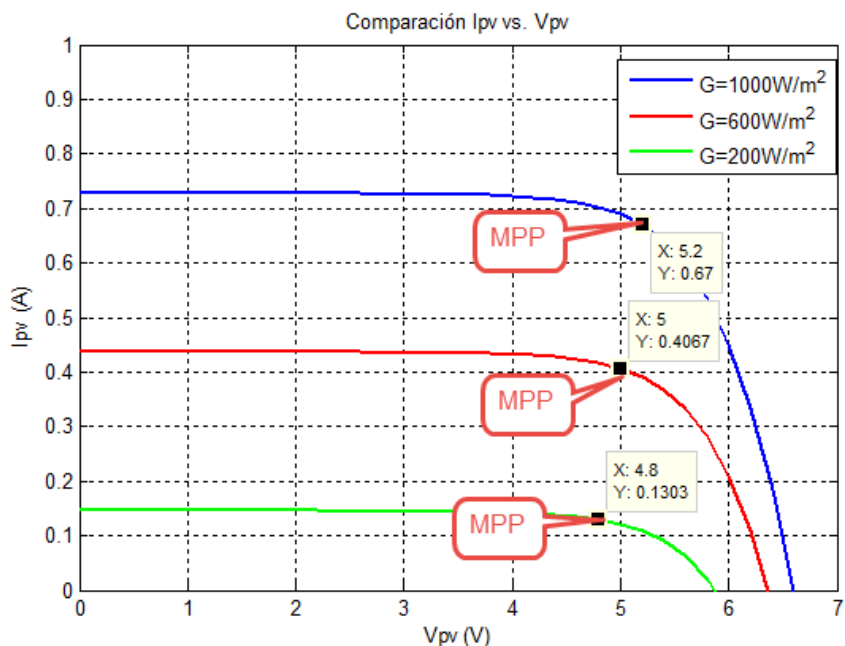


Figura 3.13. Curvas características I-V de un arreglo FV ante variaciones en la irradiación, para suministrar energía a un VANT.

3.2.2. Efecto de la variación de la temperatura en la potencia generada por el panel fotovoltaico

La segunda prueba se hizo fue con una irradiación de 1000W/m^2 y variando la temperatura de operación del panel FV de 25°C , 50°C , 75°C , esto para evaluar el efecto que tiene en la potencia generada la variación de la temperatura de operación del panel fotovoltaico.

Las curvas potencia-voltaje se muestran en la figura 3.14, se puede observar como varía el punto de máxima potencia (MPP) en los diferentes valores de temperatura, pero donde la potencia es más grande (3.484W), que es cuando la temperatura de operación del panel FV es de 25°C , entre mayor sea la temperatura de operación del panel FV se disminuirá la potencia generada por el panel. El voltaje en el MPP varía mucho más al variar la temperatura en comparación cuando varía la irradiación del panel solar.

Las curvas de potencia-corriente se muestran en la figura 3.15, de la misma forma se observa la variación del MPP en cada valor de la temperatura. Al variar la temperatura de operación del panel no existe mucha variación en la corriente generada por el panel FV.

En la figura 3.16 se observan las curvas características corriente-voltaje del panel FV, es ubicado el MPP en cada caso de la temperatura de operación del panel FV.

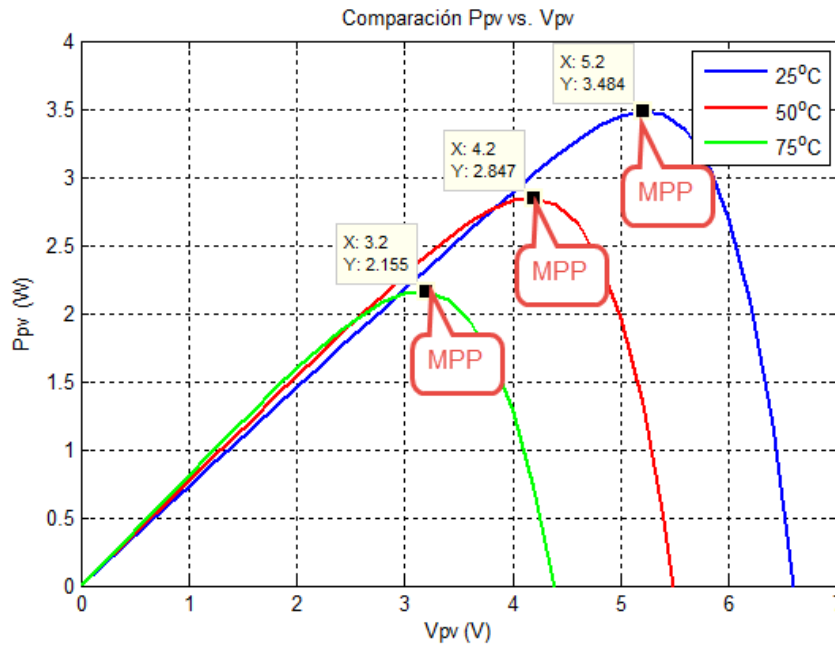


Figura 3.14. Curvas características P-V de un arreglo FV ante variaciones en la temperatura, para suministrar energía a un VANT.

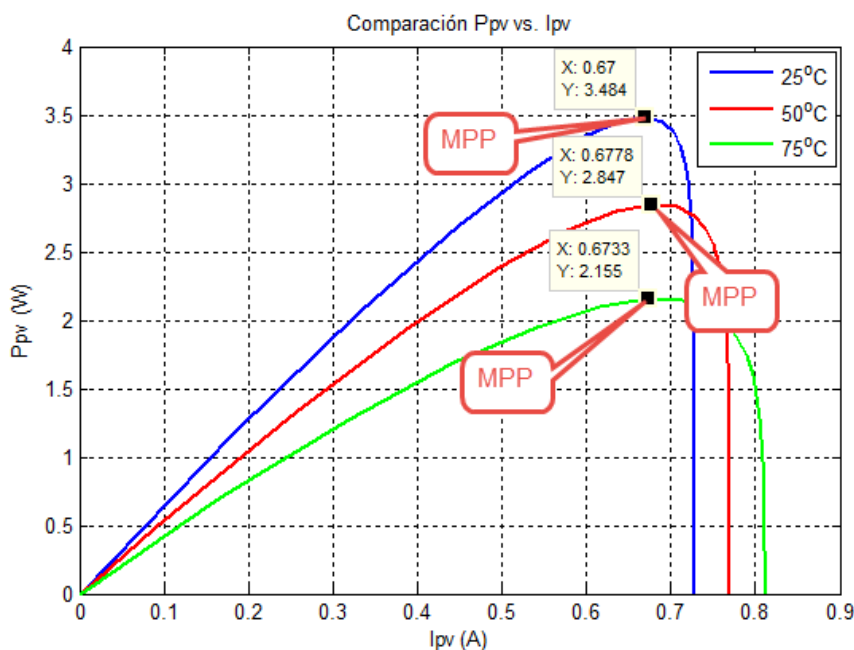


Figura 3.15. Curvas características P-I de un arreglo FV ante variaciones en la temperatura, para suministrar energía a un VANT.

De esta sección se concluye que el arreglo de celdas solares propuesto para la aviónica del VANT, con $1000\text{W}/\text{m}^2$ de irradiación y una temperatura de operación de 25°C puede suministrar una potencia máxima de 3.484W , con una corriente $I_{mpp} = 670\text{mA}$, corriente $I_{SC} = 727\text{mA}$, un voltaje $V_{mpp} = 5.2\text{V}$ y un voltaje $V_{OC} = 6.6\text{V}$.

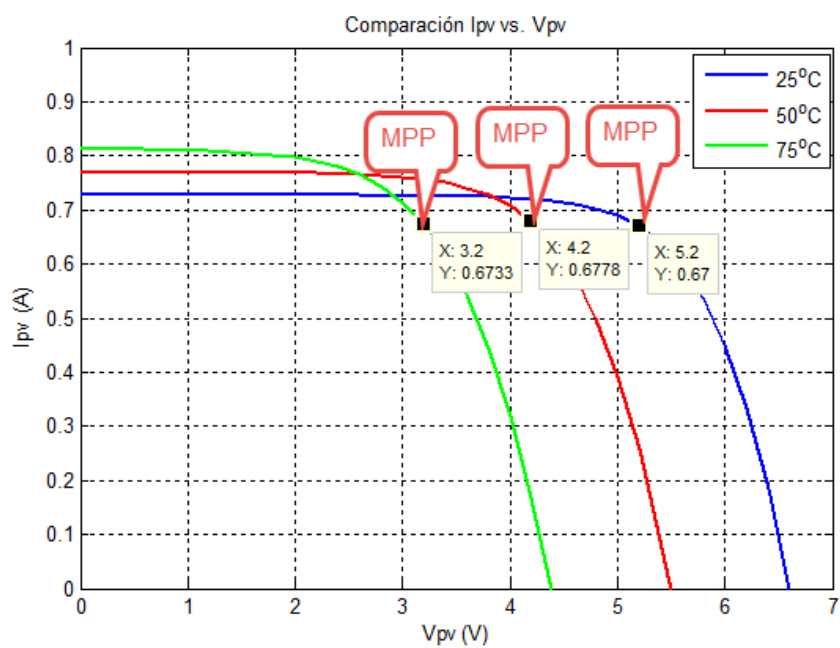


Figura 3.16. Curvas características I-V de un arreglo FV ante variaciones en la temperatura, para suministrar energía a un VANT.

Capítulo 4

Simulación de un arreglo FV reconfigurable para un sistema de tracción

En este capítulo se presenta la simulación de un arreglo fotovoltaico reconfigurable para atender la demanda de corriente y de voltaje de un sistema de tracción utilizando MATLAB/SIMULINK, en el apéndice C se analiza a detalle el consumo de corriente y de voltaje en diferentes casos. El sistema de tracción está compuesto de un motor de CD y una carga mecánica, este sistema es llamado *Modular Servo System* y es de la marca INTECO. La reconfiguración está basada en los siguientes principios:

1. Configuración Paralelo, suple mucha corriente y bajo voltaje, ésta es apropiada para los movimientos iniciales.
2. Configuración Serie-Paralelo, provee una corriente y un voltaje moderados, ésta es apropiada para una baja aceleración.
3. Configuración Serie, suple baja corriente pero un alto voltaje, ésta es apropiada para mantener una velocidad constante.

En el apéndice C se muestra a detalle el análisis del consumo de energía del motor de CD del sistema de tracción *Modular Servo System*, cuando tiene una carga constante. Las características electromecánicas del motor de CD se muestran en la tabla 4.1.

En la figura 4.1 se muestra uno de los resultados más importantes del análisis de consumo de voltaje y de corriente del sistema de tracción “Modular Servo System”. En MATLAB se construye una señal de referencia que tiene una rampa de aceleración y una rampa de desaceleración de 5 segundos, la velocidad a la que debe de llegar el motor es de 150rad/s. Se utiliza un control PID para controlar la velocidad del motor. En la figura

Tabla 4.1. Características del motor de CD “Bühler1.13.044.235” que forma parte del sistema de tracción “Modular Servo System”.

Parámetro	Valor	Unidad
Voltaje	12	V
Velocidad	429.35	rad/s
Corriente nominal	6.2	A
R	0.5	Ω
L	0.5×10^{-3}	H
K_b	0.0277	V/(rad/s)
K_m	0.027	Nm/A
J_m	18×10^{-6}	$Kg \cdot m^2$

4.1 a) se muestra como la velocidad actual del motor sigue a la velocidad de referencia. En b) se muestra que la señal de control aumenta a medida que la velocidad de referencia aumente para que la velocidad actual del motor sea igual a la velocidad de referencia, una vez que fue alcanzada la velocidad de referencia la señal de control permanece en su último valor, hasta que la velocidad de referencia comienza a disminuir la señal de control también comienza a disminuir. El pico de corriente (3.3A) que demanda el motor en su arranque se muestra en c), después de que el motor vence la inercia, la corriente disminuye hasta aproximadamente 250 mA, mientras que el voltaje aumenta a medida que la velocidad del motor va incrementando, cuando el motor comienza a desacelerar el voltaje disminuye mientras que la corriente no presenta un pico.

4.1. Representación en espacio de estados del sistema de tracción

En esta sección se describe la representación en espacio de estados del motor de CD descrito en la tabla 4.1, conectado a una carga constante con un momento de inercia $J_L = 7 \times 10^{-4} Kg \cdot m^2$. El circuito electromecánico de un motor de CD se muestra en la figura 4.2, en la tabla 4.2 son descritos cada uno de los parámetros de este circuito.

Tomando en cuenta las Leyes de Kirchhoff (LVK) para la parte eléctrica del motor, las Leyes de Newton para la parte mecánica y la fuerza contraelectromotriz del motor de CD $e_m(t)$ representada en la ecuación 4.1, el sistema de tracción puede ser representado en espacio de estados considerando las siguientes variables de estado:

$$X_1 = i_a, X_2 = \theta, X_3 = \dot{\theta},$$

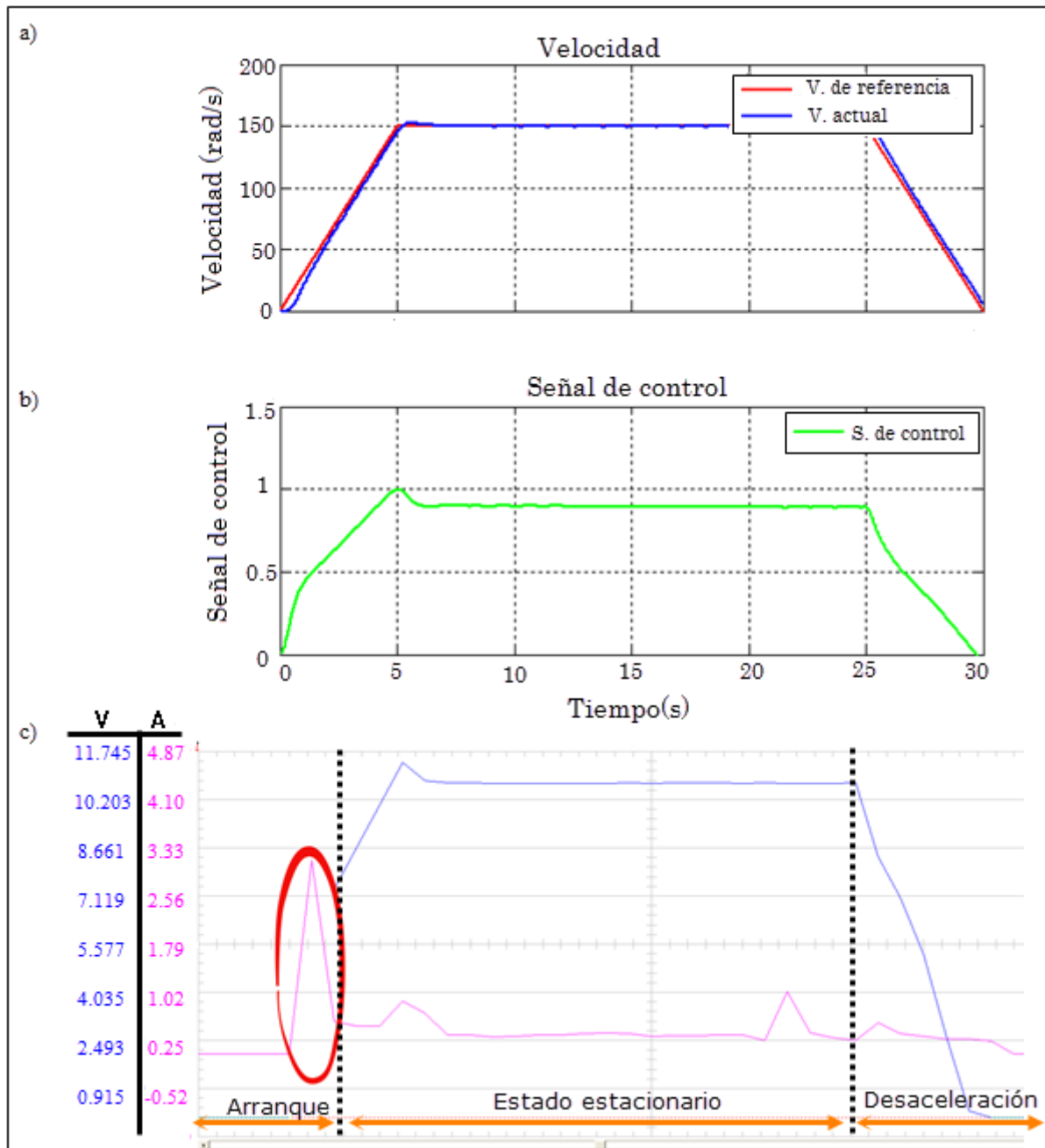


Figura 4.1. Análisis del consumo de energía de un motor de CD desde su arranque, estado estacionario y desaceleración.

Entonces, las derivadas de las variables seleccionadas quedan de la siguiente manera:

$$\dot{X}_1 = i_a, \dot{X}_2 = \dot{\theta}, \dot{X}_3 = \ddot{\theta}$$

$$e_m(t) = K_b \dot{\theta} \quad (4.1)$$

Con base en el circuito de la parte electromecánica del motor, que se muestra en la

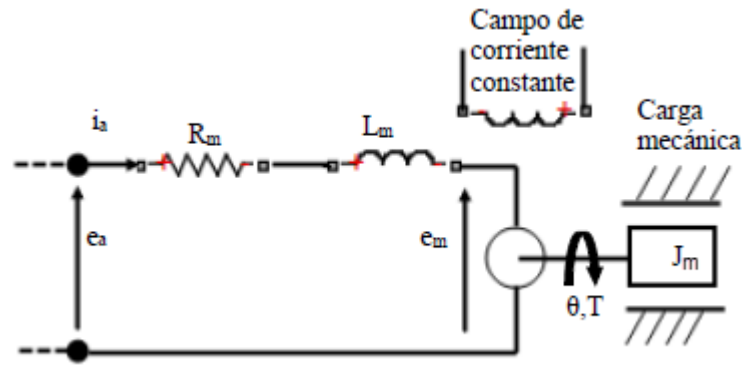


Figura 4.2. Circuito electromecánico de la armadura de un motor de CD [7].

Tabla 4.2. Descripción de los parámetros que se muestran en el circuito electromecánico que representa a un motor de DC.

Símbolo	Parámetro
$e_a(t)$	Voltaje de armadura
$e_m(t)$	Fuerza contraelectromotriz producida por el motor
$i_a(t)$	Corriente de armadura
R_m	Resistencia de armadura
L_m	Inductancia del motor
T	Par producido por el motor
J_m	Momento de inercia producido por el motor
$\theta(t)$	Desplazamiento angular del eje del motor
K_m	Constante del torque del motor
K_b	Constante contraelectromotriz
b_m	Constante de fricción viscosa del motor

figura 4.2, se obtiene la ecuación 4.2 en la que se muestra la representación en variables de estado del motor de CD. La parte eléctrica del motor está representada en el primer renglón de esta matriz y corresponde a la primera derivada de la corriente de armadura del motor i_a . El segundo renglón corresponde a la primera derivada de la posición angular del motor. El tercer renglón corresponde a la primera derivada de la velocidad angular del motor. El momento de inercia se considera como $J = J_m + J_L$.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -\frac{R_m}{L_m} & 0 & -\frac{k_b}{L_m} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_m}{J} & 0 & -\frac{b_m}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} e_a(t) \quad (4.2)$$

La salida de la representación en espacio de estados queda representada como se mues-

tra en la ecuación 4.3, se considera que la variable a controlar es la velocidad del motor.

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.2. Diseño y simulación en MATLAB/SIMULINK del arreglo FV reconfigurable

Considerando las especificaciones del fabricante del motor de CD (tabla 4.1) y que en su arranque un motor de CD consume hasta 5 veces su corriente nominal, el arreglo FV debería ser capaz de poder suplir al sistema de tracción $V_{max} = 12V$, $I_{max} = 25A$, pero en esta sección se propone un arreglo FV reconfigurable que proporcione diferentes niveles de voltaje y de corriente de acuerdo a como lo requiera el motor. Se propone un arreglo FV reconfigurable, el cual le proporcione en el arranque del motor de CD toda la corriente (conexión en paralelo), después la mitad de la corriente y la mitad del voltaje (conexión serie-paralelo) para comenzar a incrementar la velocidad del motor y finalmente el máximo voltaje (conexión en serie) para que el motor alcance una mayor velocidad (técnica mencionada en [25]). El arreglo FV reconfigurable propuesto debe tener 4 módulos FV (MFV), cada uno con las siguientes característica eléctrica: una corriente en corto circuito $I_{SC} = 6.75 A$, voltaje en circuito abierto $V_{OC} = 3.6V$. En la figura 4.3 a) se muestra un esquema del arreglo FV reconfigurable, los cuatro módulos FV están conectados a la matriz de interruptores que está conformada por nueve interruptores (S1...S9). La cantidad de interruptores fue definida por la ecuación 4.4[27], donde N es el número de módulos a ser reconfigurados. Las terminales positiva y negativa de arreglo FV irán conectadas a la entrada del motor de CD. En la figura 4.3 b) se muestran las curvas características corriente contra voltaje (I-V) del arreglo FV en cada caso de reconfiguración. En c) se muestran las curvas características de potencia contra voltaje (P-V) en cada configuración del arreglo FV. En la figura 4.3 también se muestran los interruptores que se accionan en cada configuración del arreglo FV.

$$N_{interruptores} = 3(N - 1) \quad (4.4)$$

4.3. Simulación del sistema de tracción alimentado por el arreglo FV reconfigurable

La simulación se hizo con bloques de MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE/SIMELECTRONICS, considerando los parámetros del motor mencionados en la tabla 4.1 y el arreglo

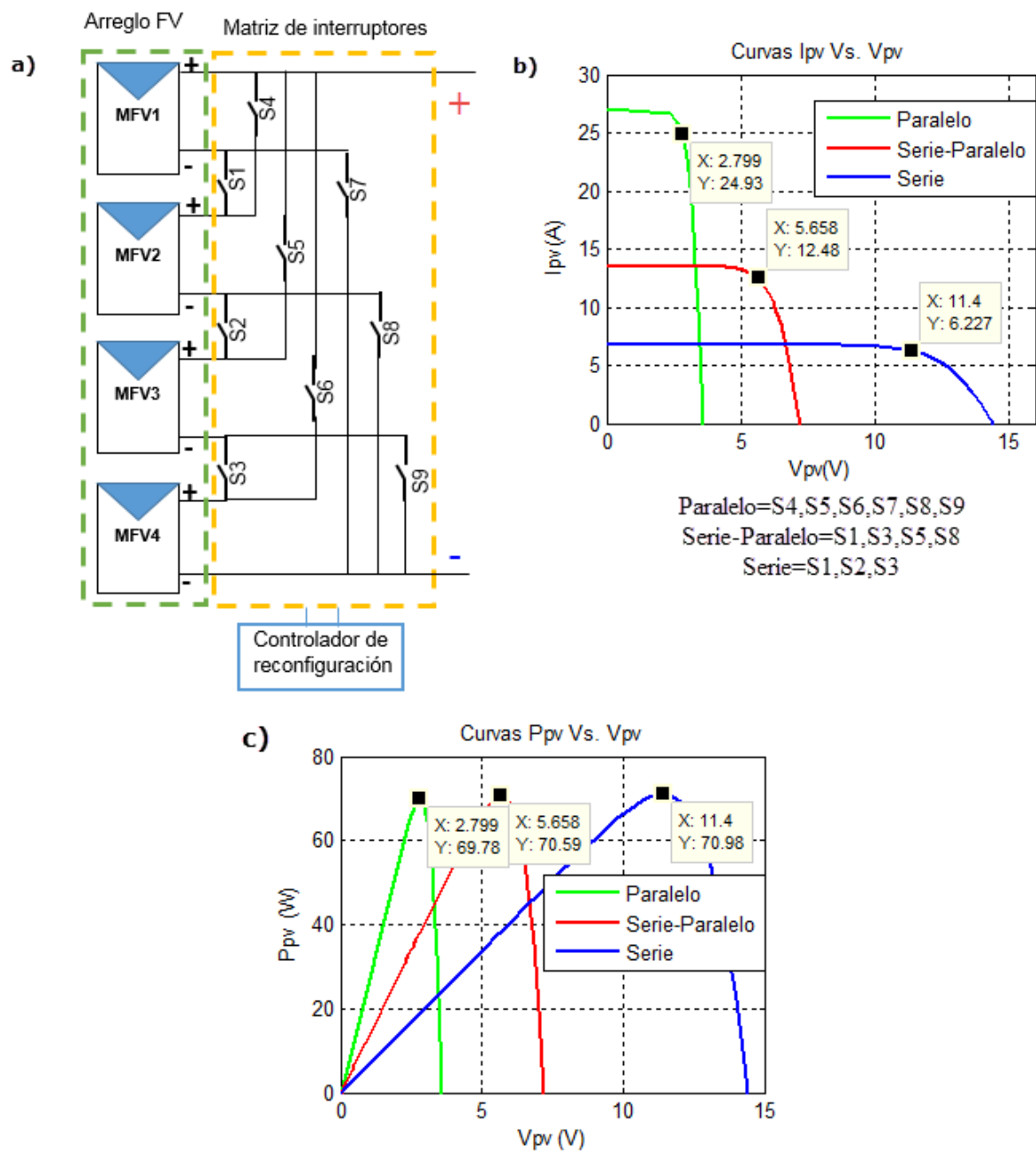


Figura 4.3. Curvas características del arreglo FV reconfigurable para el sistema de tracción en cada configuración. En a), el arreglo FV reconfigurable para el sistema de tracción INTECO, b) curvas características I-V , c) curvas característica P-V.

FV reconfigurable propuesto en la figura 4.3. En la figura 4.4 se muestra el sistema simulado en diagrama a bloques. La matriz de interruptores se encarga de reconfigurar la conexión de los 4 módulos que forman parte del arreglo. El motor de CD se configuró de acuerdo a las especificaciones del fabricante del motor que tiene el “Modular Servo System”. El controlador de velocidad se encarga de que el motor de DC llegue a la velocidad especificada por el usuario, el controlador de la velocidad fue diseñado utilizando el método de retroalimentación de variables de estado.

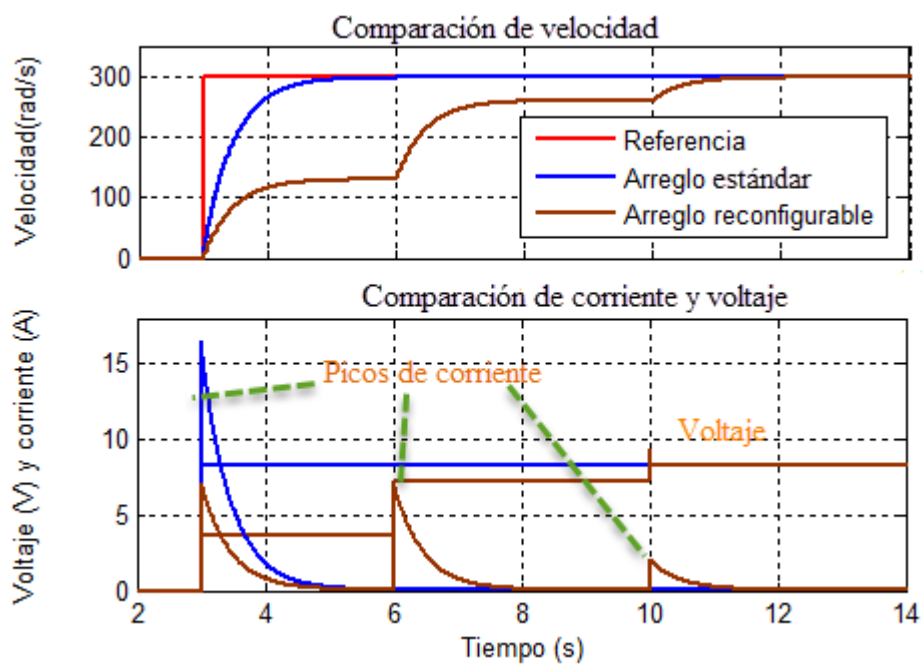


Figura 4.5. Comparación de un arreglo FV estándar Vs. un arreglo FV reconfigurable, para atender la demanda de corriente y de voltaje del motor de CD que forma parte del “Modular Servo System”, para que éste llegue a una velocidad de referencia de 300rad/seg .

Capítulo 5

Implementación de un Arreglo fotovoltaico reconfigurable para un VANT

En cada una de las secciones que conforman a este capítulo se describe el diseño y la implementación del arreglo fotovoltaico reconfigurable para suministrar energía a un vehículo aéreo no tripulado (VANT) de ala fija de tipo planeador. El diagrama a bloques general del arreglo FV reconfigurable que se propone se muestra en la figura 5.1, este arreglo estará integrado por cuatro módulos FV (MFV1..MFV4) que serán los que se reconfiguren con la matriz de interruptores para atender la demanda de corriente y de voltaje por parte del motor, la salida del arreglo FV reconfigurado se conectará directamente a un cargador de baterías y a un sistema gestor de energía, el gestor de energía se encargará de suministrar energía al motor de propulsión según la energía que requiera por éste. Cada uno de los módulos FV van a tener un voltaje en circuito abierto $V_{OC} = 4.8V$ y una corriente en corto circuito $I_{SC} = 908mA$, debido a que el espacio para los módulos del arreglo FV se restringe al área que indicó el fabricante del VANT, donde no se ve afectada la aerodinámica del vehículo.

El propósito de que el arreglo FV esté conformado por cuatro módulos es: cuando los cuatro módulos se configuren en serie el voltaje de salida de todo el arreglo será cuatro veces el voltaje de cada módulo, mientras que la corriente permanece igual a una de los módulos, cuando los módulos se configuren en serie-paralelo el voltaje y la corriente de todo el arreglo serán el doble de cada módulo, cuando los módulos se configuren en paralelo es para que la corriente de todo el arreglo sea cuatro veces la corriente de cada módulo mientras que el voltaje es igual al de uno de los módulos. La idea de reconfigurar el arreglo del VANT, es con el propósito de que en el arranque del motor de CD el arreglo FV le de su mayor corriente y se pueda disminuir la corriente que demanda el motor de

propulsión a la batería, después el arreglo FV le suplirá la mitad de corriente y la mitad de voltaje que este puede dar y finalmente cuando el motor solo requiere aumentar su velocidad el arreglo FV le proporcionará su mayor voltaje mientras que la corriente será solo la cuarta parte de la que puede dar todo el arreglo.

Esta tesis únicamente está enfocada en el diseño del arreglo FV reconfigurable, la conexión del cargador de batería y el sistema gestor de energía es solamente propuesta para la integración del arreglo FV reconfigurable a la red eléctrica del sistema de tracción de un VANT.

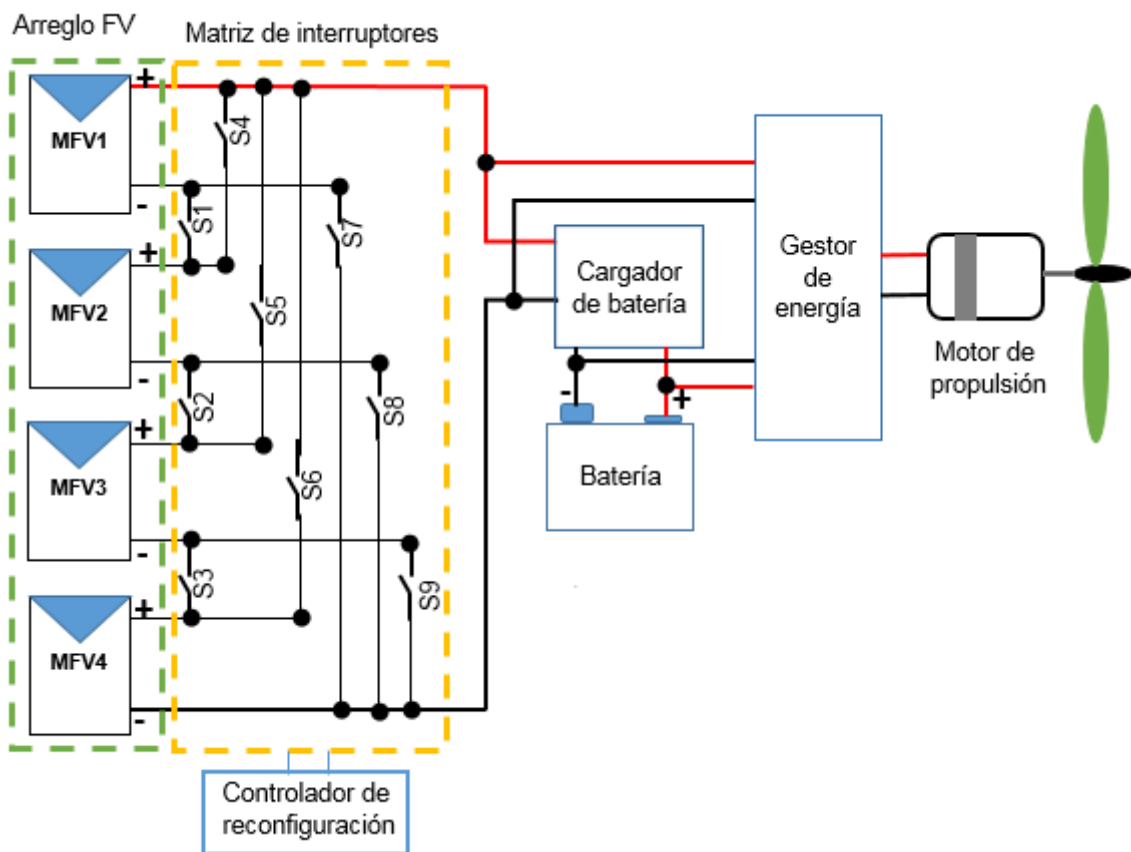


Figura 5.1. Diagrama a bloques de la red eléctrica para suplir energía al sistema de tracción de un VANT.

5.1. Diseño e implementación del arreglo fotovoltaico

En los vehículos aéreos la aerodinámica es un parámetro físico que siempre se debe de mantener, sino será afectada la estabilidad del vehículo. Tomado en cuenta la aerodinámica de un VANT de ala fija de tipo planeador, se determina que el área disponible para el arreglo fotovoltaico en cada una de las alas es de 48cmx12cm. En la figura 5.2 se muestra una de las alas de la aeronave, donde se remarca en color rojo el área disponible para

el arreglo FV. Debido a que el área disponible en cada ala está dividida en 8 secciones, se cuenta con un área de $6\text{cm} \times 12\text{cm}$ para cada submódulo FV que formará parte de los cuatro módulos del arreglo FV.

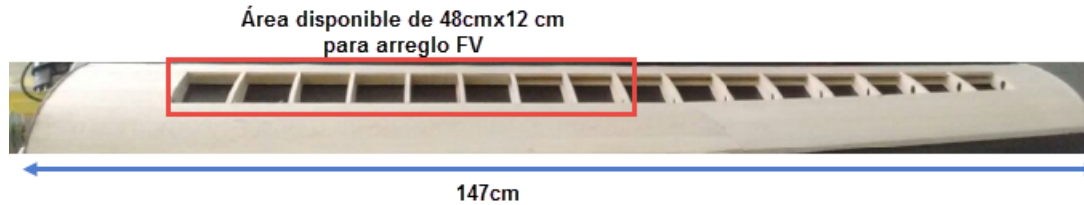


Figura 5.2. Una de las dos alas del VANT donde será colocado el arreglo FV reconfigurable, se remarca el área disponible para colocar arreglo FV y no afectar la aerodinámica de la aeronave.

Tomando en cuenta el área disponible para cada submódulo y las características de una celda FV que se muestran en la tabla 3.2, se propone que cada submódulo de un voltaje $V_{OC} = 2.4\text{V}$ y una corriente $I_{SC} = 0.450\text{A}$. Debido a que cada celda puede dar un $V_{OC} = 0.6\text{V}$ se conectan en serie 4 celdas para que se tengan 2.4V de V_{OC} por cada submódulo. Como la corriente de un submódulo depende del área de cada una de las celdas que lo conforman, por que 4 celdas FV estarán conectadas en serie, se determina que para que una celda pueda tener una corriente $I_{SC} = 0.450\text{A}$ ésta debe de medir $2.5 \times 5.5\text{cm}^2$, de acuerdo a los datos de una celda caracterizada (tabla 3.2) por cada cm^2 ésta tiene una corriente $I_{SC} = 0.033\text{A}$. En la implementación del arreglo del FV se utilizan celdas monocristalinas y policristalinas considerando que el área de cada una de ellas sea la misma para no sobrepasar o desaprovechar el espacio disponible en las alas del VANT.

Cada módulo FV estará formado por cuatro submódulos (SMF1...SMF4), de forma fija cada dos submódulos se conectarán en serie que a su vez se conectarán en paralelo con los otros dos submódulos conectados en paralelo para así suplir un voltaje $V_{OC} = 4.8$ con una corriente $I_{SC} = 900\text{mA}$. En algunas de las pruebas que se muestran en este trabajo los cuatro submódulos estarán conectados en serie. En la figura 5.3 se muestra la interconexión entre cada uno de los submódulos que forman un módulo del VANT, para reducir los efectos del sombreado cada submódulo tendrá conectado en antiparalelo un diodo de desviación que soporta hasta 1A . En el apéndice D se muestra el proceso del arreglo FV diseñado.

El arreglo FV montado sobre las dos alas del VANT se muestra en la figura 5.4, se pueden observar los diodos en antiparalelo a cada submódulo como se propusieron en el diseño del arreglo.

El VANT donde se colocó el arreglo FV diseñado se muestra en la figura 5.5.

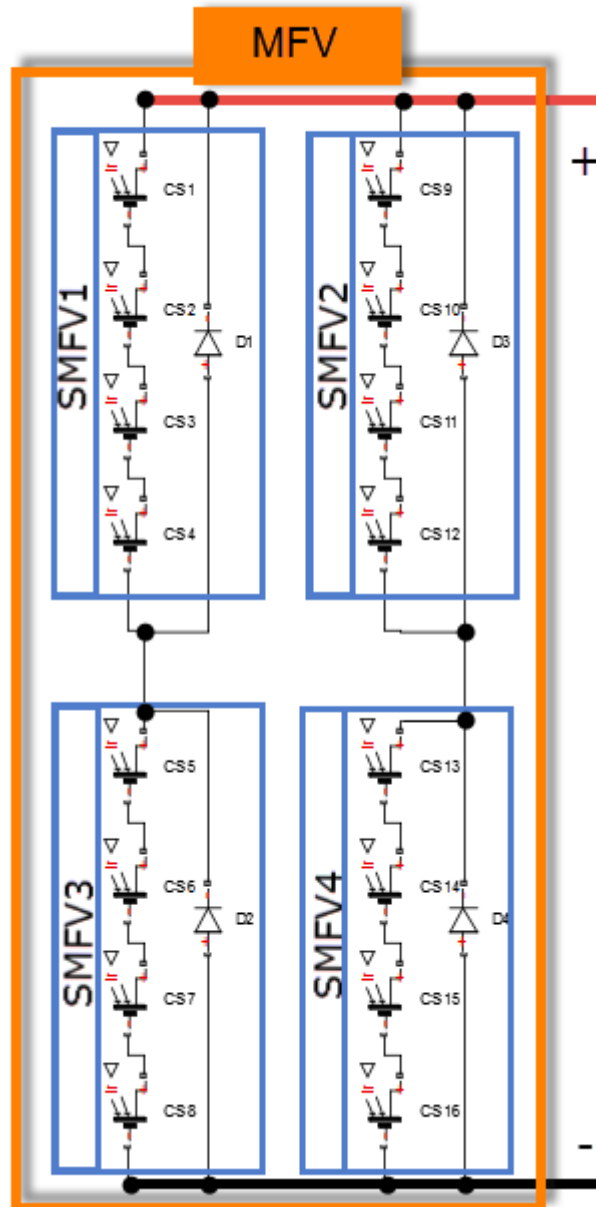


Figura 5.3. Integración de uno de los módulos del arreglo FV que se estarán reconfigurando, cada módulo puede suplir un voltaje $V_{OC} = 4.8V$ y una corriente $I_{SC} = 900mA$ si se considera que el módulo tiene una irradiación de $1000W/m^2$ y opera a $25^{\circ}C$.

5.2. Diseño e implementación de la matriz de interruptores

En esta sección se muestra el diseño de la matriz de interruptores para cambiar la configuración de conexión entre los cuatro módulos del arreglo FV. Para hacer la reconfiguración de los cuatro módulos FV según [27] son necesarios 9 interruptores, esta cantidad se encuentra utilizando la ecuación 5.1 en donde N es la cantidad de módulos a

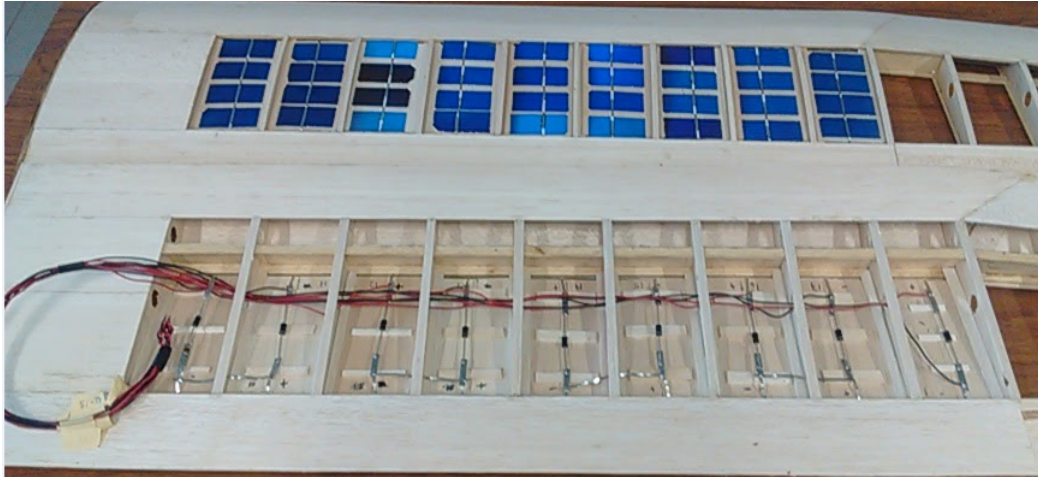


Figura 5.4. Montaje de los submódulos en las alas del VANT, para formar los módulos FV que se estarán reconfigurando.

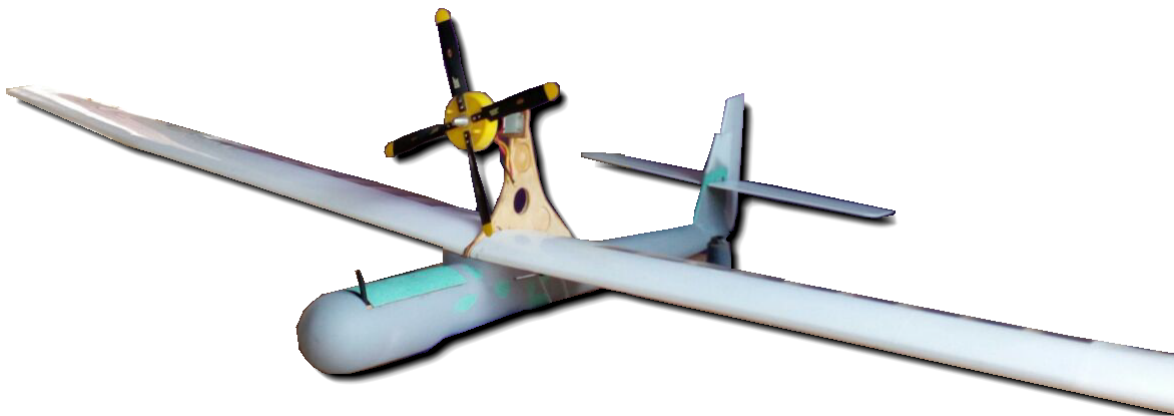


Figura 5.5. Vehículo aéreo no tripulado de ala fija con el arreglo FV que se estará reconfigurando.

ser reconfigurados.

$$N.Interruptores = 3(N - 1) \quad (5.1)$$

Los interruptores seleccionados fueron transistores HEXFET MOSFET de potencia IRF2804PbF, configurados como interruptores, se seleccionaron principalmente por que tienen una resistencia de encendido estática entre el drenaje y fuente $R_{DS(on)}$ de $2m\Omega$, también estos transistores llegan a conmutar a altas velocidades, su temperatura de operación unión es $175^{\circ}C$, en el anexo G se pueden ver con detalle las especificaciones de este transistor.

El diagrama de la matriz de transistores MOSFET conectados a los cuatro módulos FV se muestra en la figura 5.6, para eliminar el efecto del diodo del transistor MOSFET al drenaje de cada uno de los transistores (S1..S4) son conectados diodos de bloqueo de

la serie 1N400x G [27], [28].

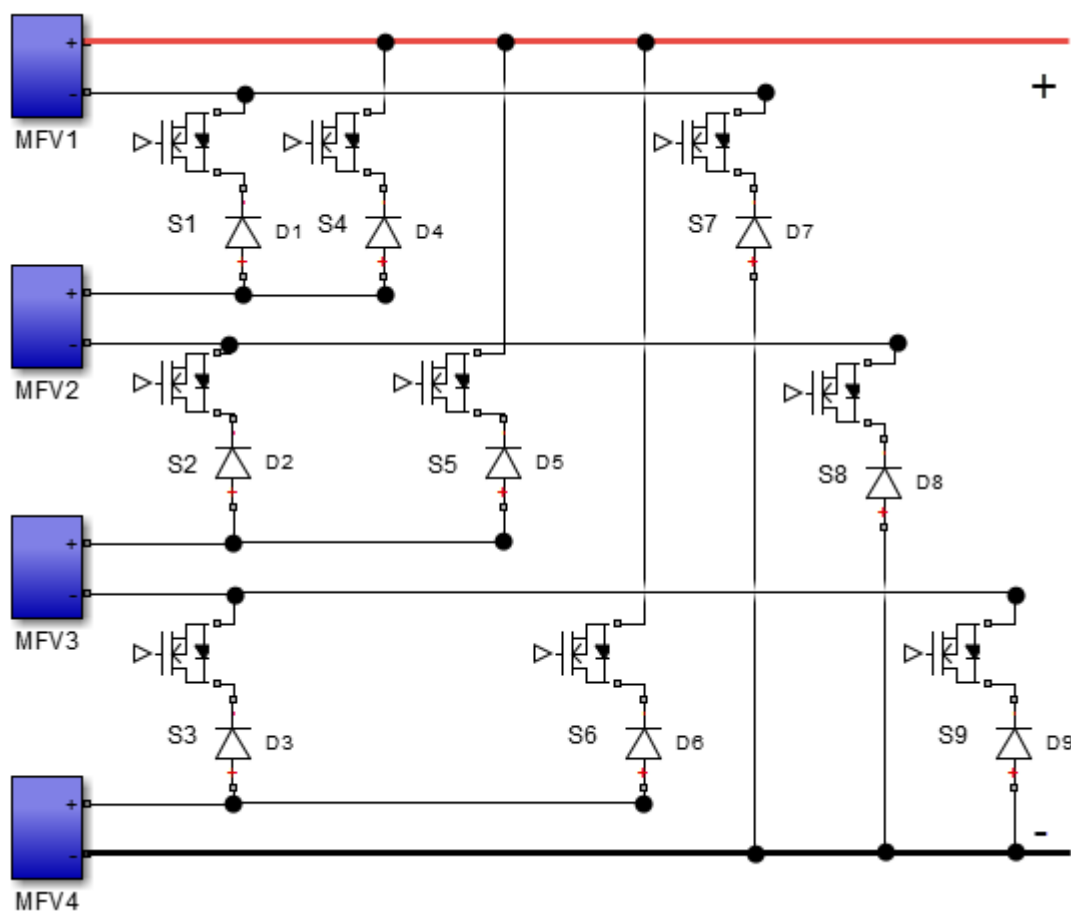


Figura 5.6. Matriz de transistores MOSFET conectados a los cuatro módulos FV para que sea cambiada la configuración de conexión entre cada uno de ellos [27].

Las señales lógicas para controlar los transistores se obtendrán de un microcontrolador, y como éste en su salida no proporciona la corriente y el voltaje necesarios para poder habilitar cada uno de los transistores se propone utilizar un GETDRIVER, pero no se pudo utilizar cualquier GETDRIVER para habilitar todos los transistores debido a que los transistores (S1 a S6) de forma fija y al hacerse la reconfiguración quedan conectadas a otros Módulos FV. En otras palabras, el *Source* o fuente de S1 a S6 quedan flotantes al conectarse a los módulos solares, por eso se propone utilizar el circuito integrado IR2110 (G) que es un GETDRIVER con parte alta y parte baja, los interruptores S1 a S6 serán conectados a la parte alta y los interruptores S7-S9 serán conectas a la parte baja de sus respectivos drivers. La parte alta de este *driver* es llamada *bootstrap* y sirve para proporcionarle a los transistores MOSFET el voltaje entre compuerta y fuente V_{GS} a pesar de que la referencia del transistor no esté a una referencia fija, el circuito *bootstrap* es un diodo conectado (ver G) en serie a un capacitor que está conectado entre las terminales V_B y V_S del driver, crean la referencia para que el transistor opere adecuadamente. La parte

baja del IR2110 funciona igual que los demás transistores y es suficiente para conectar los transistores de S7 a S9. Para habilitar cada uno de los transistores, se propone que la salida de los drivers sea de 12V, que es por encima del voltaje de encendido del transistor $V_{GS}(th) = 4V$ de este transistor. En el apéndice D se explica con detalle la conexión del arreglo FV con la matriz de transistores MOSFET.

Las combinaciones de los transistores (S1 a S9) para configurar en serie, serie-paralelo o en paralelo los módulos (MFV1 a MFV4) del arreglo FV se muestran en la tabla 5.1. Se muestra en cada caso el valor que se espera de voltaje en circuito abierto V_{OC} y corriente en corto circuito I_{SC} , considerando que el arreglo tiene una irradiación de $1000W/m^2$ y que opera a $25^{\circ}C$. En la simulación del arreglo FV reconfigurable y en los resultados experimentales son hechas las combinaciones de transistores que se muestran en esta tabla.

Tabla 5.1. Combinaciones de transistores para la reconfiguración del arreglo FV.

Configuración	Transistores encendidos	V_{OC}	I_{SC}
Paralelo	S4,S5,S6,S7,S8	4.8V	3.632A
Serie-Paralelo	S1,S3,S5,S8	9.6V	1.816A
Serie	S1,S2,S3	19.2V	0.908A

5.3. Simulación del arreglo FV reconfigurable

En esta sección se presenta la simulación en MATLAB/SIMULINK/SIMSCAPE del arreglo FV reconfigurable, cada módulo MF que será reconfigurado se integra como se mostró en la figura 5.3, la matriz de transistores estará conformada como se muestra en la figura 5.6, incluyendo a los diodos de bloqueo en el drenaje de cada transistor. Las compuertas de cada transistor serán activadas directamente con voltajes de 12V, para reconfigurar el arreglo FV se seguirán las combinaciones de la tabla 5.1. Con el objetivo de evaluar la robustez del arreglo FV reconfigurable propuesto, la curvas características P-V, I-V del arreglo FV se obtendrán en cada configuración en dos escenarios diferentes: cuando cada uno de los módulos del arreglo FV tienen una irradiación de $1000 W/m^2$ y están operando a una temperatura de $25^{\circ}C$, también cuando dos módulos FV reciben $1000W/m^2$ y los otros dos módulos FV tienen una irradiación de $300W/m^2$ y todos los módulos FV operan a $25^{\circ}C$, esto con el objetivo de comprobar la ventaja de usar diodos en antiparalelo a cada módulo como se detalló en la figura5.3.

5.3.1. Curvas características del arreglo FV cuando opera en condiciones ideales

En la figura 5.7, se muestran las curvas P-V e I-V de las tres configuraciones del arreglo FV, cuando éste tiene una irradiación de $1000W/m^2$ y opera a $25^{\circ}C$, en este caso todos los módulos FV del arreglo tiene diodos en antiparalelo. En la figura se resaltan los puntos de máxima potencia en cada configuración, el punto de máxima potencia más grande (7.7W) es alcanzado cuando el arreglo se reconfigura en serie y el menor punto de máxima potencia (3.7W) se alcanza cuando el arreglo se configura en paralelo. Existe un diferencia significativa de los valores de I_{SC} y V_{OC} mostrados en ésta figura con los que se mostraron en la tabla 5.1, esto debido a que los diodos de bloqueo que están conectados al drenaje de cada transistor consumen parte de la potencia que genera cada módulo del arreglo FV.

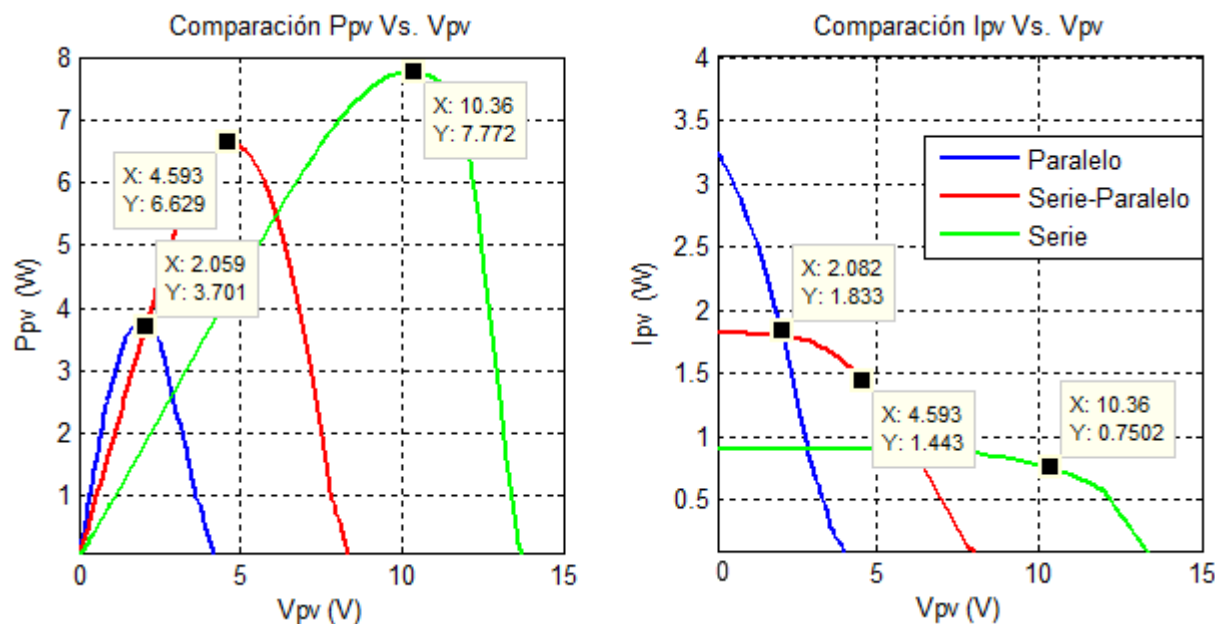


Figura 5.7. Curvas características en simulación del arreglo FV en cada una de sus configuraciones, cuando cada uno de sus módulos FV tiene una irradiación de $1000W/m^2$ y opera a $25^{\circ}C$, cada módulo tiene diodos en antiparalelo.

5.3.2. Curvas características cuando varía la irradiación en arreglo FV

En la figura 5.8 también se mostrarán las curvas P-V e I-V de la simulación del arreglo FV en cada una de sus tres configuraciones propuestas este trabajo, pero la irradiación de los módulos MFV1 y MFV2 es de $1000W/m^2$ y la irradiación de los módulos MFV3 y MFV4 es de $300W/m^2$, mientras que la temperatura de operación de los cuatro módulos

es de 25°C . Se muestra la ventaja que tiene el arreglo FV con diodos en antiparalelo a cada módulo a pesar que la irradiación no es la misma en todos los módulos del arreglo. En la configuración en paralelo del arreglo, el punto de máxima potencia es menor que en las otras configuraciones, la corriente que produce cada módulo se suma. En la configuración serie-paralelo el punto de máxima potencia es mucho mayor al de las otras dos configuraciones, se conectan en paralelo la conexión serie del MFV1 y MFV2 con la conexión serie de MFV3 y MFV4 (tabla 5.1); los módulos de cada una de las conexiones en serie reciben la misma irradiación, entonces la corriente de todo el arreglo es la suma de las corrientes de las dos conexiones en serie. Cuando el arreglo se configura en serie, el arreglo FV tiene dos puntos de máxima potencia, esto por que la mitad del arreglo recibe $1000\text{W}/\text{m}^2$ y la otra mitad recibe $300\text{W}/\text{m}^2$. Los diodos en antiparalelo en los MFVs permiten que la corriente de todo el arreglo no sea igual a la corriente que producen los MFVs con menor grado de irradiación, como ocurriría si los MFVs no tuvieran diodos en antiparalelo, por que la corriente de cada MFV conectado en serie es la misma.

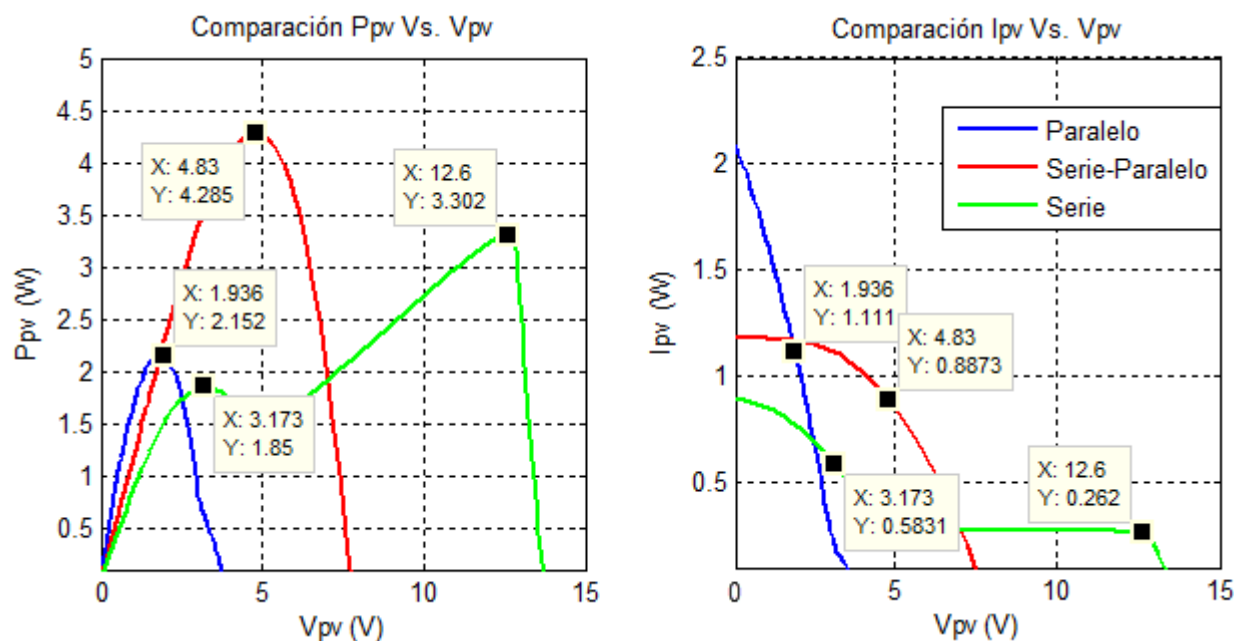


Figura 5.8. Curvas características en simulación del arreglo FV en cada una de sus configuraciones, cuando todos los módulos operan a 25°C , pero los módulos MFV1, MFV2 tienen una irradiación de $1000\text{W}/\text{m}^2$ y los módulos MFV3, MFV4 tiene una irradiación de $300\text{W}/\text{m}^2$, cada módulo tiene diodos en antiparalelo.

5.4. Resultados experimentales del arreglo FV reconfigurable

Cada uno de los siguientes resultados experimentales se obtuvieron del segundo arreglo FV que se implementó, como se mencionó anteriormente éste arreglo tiene las mismas dimensiones que el colocado sobre las alas del VANT. Los resultados que se esperan de corriente I_{SC} y de voltaje V_{OC} se mostraron en la tabla 5.1.

Las curvas características P-V e I-V del arreglo FV reconfigurable son obtenidos con el analizador fotovoltaico VA1011 de la marca LANGLOIS, éste en cada medición muestra los siguientes parámetros de arreglo FV: El voltaje en circuito abierto V_{OC} , la corriente en corto circuito I_{SC} , la potencia máxima P_{max} , el voltaje en la máxima potencia V_{mp} , la corriente en la máxima potencia I_{mp} , la eficiencia EFF , el factor de llenado FF , temperatura en grados Celsius T_c , irradiación irr , número de celdas conectadas en serie Nms , resistencia en serie R_s .

Las mediciones del arreglo FV en cada configuración son hechas cuando el arreglo FV tiene diferentes cargas, también cuando el arreglo recibe radiación solar y cuando recibe la radiación de una matriz de focos.

5.4.1. El arreglo FV con radiación solar

Los siguientes resultados se obtuvieron cuando el arreglo FV recibe radiación del sol.

5.4.1.1. El arreglo FV con el motor de un VANT como carga

Las siguientes curvas características del arreglo FV se obtienen cuando éste tiene conectado como carga un motor eléctrico, que es utilizado en vehículos aéreos de radio control, la serie del motor es T-400, el fabricante indica que este motor opera de 7.2 a 8.4 Volts. En la figura 5.9 se muestran las curvas P-V e I-V del arreglo cuando éste se configura en serie, la máxima potencia alcanzada por el arreglo es de 6.326W cuando éste tiene una irradiación de $920W/m^2$. Las curvas características del arreglo configurado en serie-paralelo se muestran en la figura 5.10, la potencia máxima que alcanza el arreglo es de 4.114W cuando el éste tiene una irradiación de $915W/m^2$. Cuando el arreglo FV se configura en paralelo, éste alcanza su menor valor de potencia máxima, que es únicamente de 887.9mW, con una irradiación de $912W/m^2$. Los voltajes producidos en la configuración en serie son mucho mayores que en la configuración en paralelo. La corriente es mucho menor en la configuración en paralelo que en la configuración en serie, debido a que el motor demanda menor corriente con una baja de velocidad por el bajo voltaje con el que se está alimentando el motor en ese momento. En las tres configuraciones arreglo FV solo

tiene un único punto de máxima potencia como se muestra en las figuras mencionadas con anterioridad, debido a que la irradiación que recibe todo el arreglo es la misma en cada uno de los módulos que lo conforman.

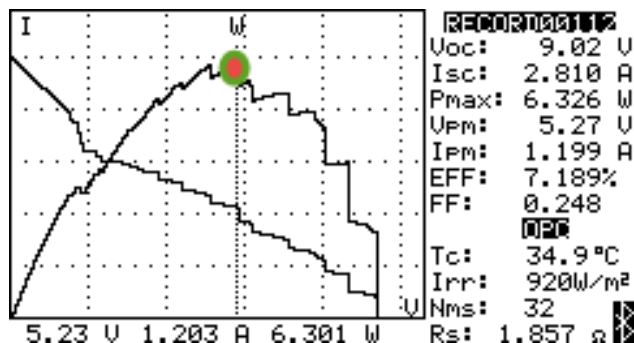


Figura 5.9. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie, cuando como carga tiene conectado el motor de un VANT de la serie T-400 y recibe radiación solar.

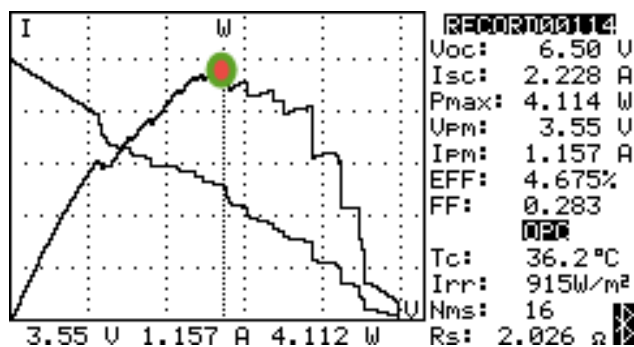


Figura 5.10. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie-paralelo, cuando como carga tiene conectado el motor de un VANT de la serie T-400 y recibe radiación solar.

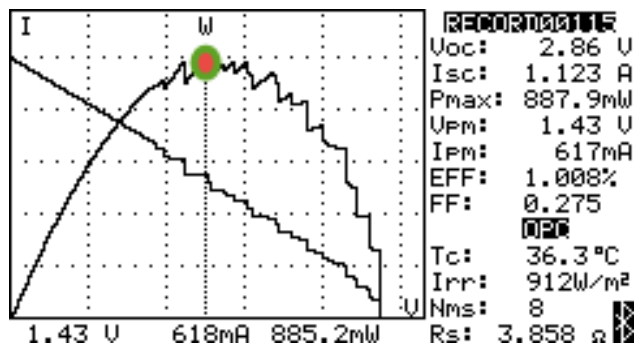


Figura 5.11. Curvas característica del arreglo FV en su configuración paralelo, cuando como carga tiene conectado el motor de un VANT de la serie T-400 y recibe radiación solar.

5.4.1.2. El arreglo FV con un cargador de baterías como carga

A continuación se muestran las curvas P-V e I-V del arreglo cuando como carga tienen conectado un cargador de baterías LiPo, que inicia a cargar con un voltaje de 10V a 15V y consume una corriente de:1A según su fabricante.

Las curvas características del arreglo cuando se configura en serie se muestran en la figura 5.12. Con esta configuración se presentan dos puntos de máxima potencia que se resaltan en la imagen, la máxima potencia medida es 4.985W con una irradiación de 1043W/m². Con este valor de corriente y de voltaje el cargador empezó a cargar, por que el voltaje producido por el arreglo FV está dentro del rango de voltaje con el que el cargador inicia a cargar.

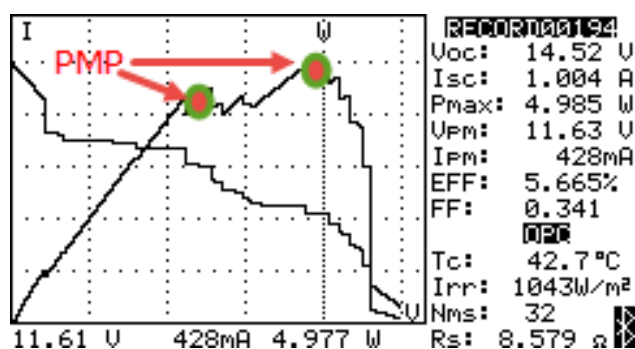


Figura 5.12. Curvas característica de arreglo FV en su configuración serie, cuando como carga tiene conectado un cargador de baterías y recibe radiación solar. Debido a que la irradiación de cada uno de los módulos FV no es la misma, el arreglo FV completo tiene dos puntos de máxima potencia (PMP).

Cuando el arreglo se configura en serie-paralelo únicamente se tienen un punto de máxima en 2.778W, por que con esta configuración aunque la irradiación variara en todo el arreglo, la corriente en un módulo FV se duplica, mientras que el voltaje de un módulo también se duplica. El cargador ya no inicia a cargar por que el voltaje ya no es suficiente. Las curvas P-V e I-V del arreglo con esta configuración se muestran en la figura 5.13.

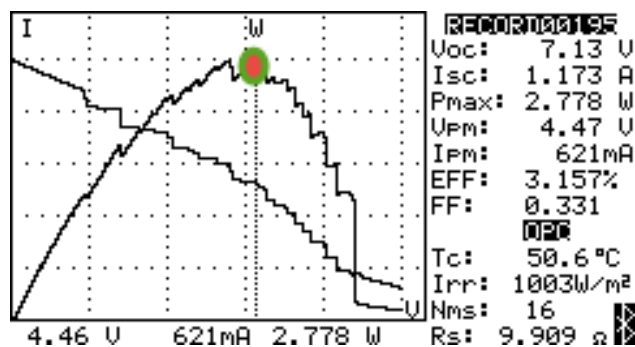


Figura 5.13. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie-paralelo, cuando como carga tiene conectado un cargador de baterías y recibe radiación solar.

Finalmente el arreglo se configura en paralelo, las curvas se muestran en la figura 5.14. El arreglo únicamente tiene un punto de máxima potencia en 892W, la corriente de un módulo se cuatriplica, mientras que el voltaje en todo el arreglo es igual al de un solo módulo. El cargador ya no enciende debido a que el voltaje es mucho menor al que éste requiere.

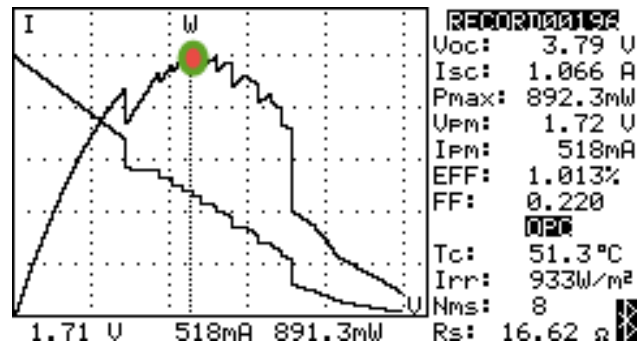


Figura 5.14. Curvas característica del arreglo FV en su configuración paralelo, cuando como carga tiene conectado un cargador de baterías y recibe radiación solar.

5.4.2. El arreglo FV con radiación de una matriz de focos

Las siguientes pruebas se realizan cuando el arreglo FV recibe radiación de cinco focos, cuatro son de 100W y uno es de 60W, el banco de pruebas se muestra en la figura 5.15. El propósito es evaluar el arreglo FV reconfigurable cuando éste tiene una irradiación baja, que está entre los $100W/m^2$ y $200W/m^2$. Además de que la irradiación es baja, ésta no es uniforme en todo el arreglo por las diferentes potencias de los focos y por el área que cubre la radiación de cada uno de ellos. En las siguientes pruebas la carga es una resistencia de $2.2K\Omega$, de $1/2W$. Por las características de la resistencia, los resultados que se obtienen de corriente y voltaje son parecidos a los que se esperan y que se muestran en la tabla 5.1. La corriente va incrementando a medida el arreglo se configura en paralelo mientras el voltaje disminuye proporcionalmente. El voltaje aumenta a medida que el arreglo se configura en serie, mientras que la corriente disminuye.

La primera prueba se realiza cuando se configura en serie el arreglo FV, en la figura 5.16 se pueden apreciar las curvas I-V y P-V con estas condiciones. En la figura se distinguen tres puntos de máxima potencia, pero el más grande es de 710mW. El voltaje $V_{OC} = 14.36V$ y la corriente $I_{SC} = 221mA$.

Después el arreglo se configura en serie-paralelo, las curvas del arreglo se muestran en la figura 5.17. Son muy distinguidos tres puntos de máxima potencia en las curvas, pero la potencia más grande es de 504mW. El voltaje $V_{OC} = 6.7V$, es aproximadamente la mitad del voltaje que se obtuvo en la configuración serie. La corriente $I_{SC} = 296A$, es más grande que la producida en el arreglo en serie.

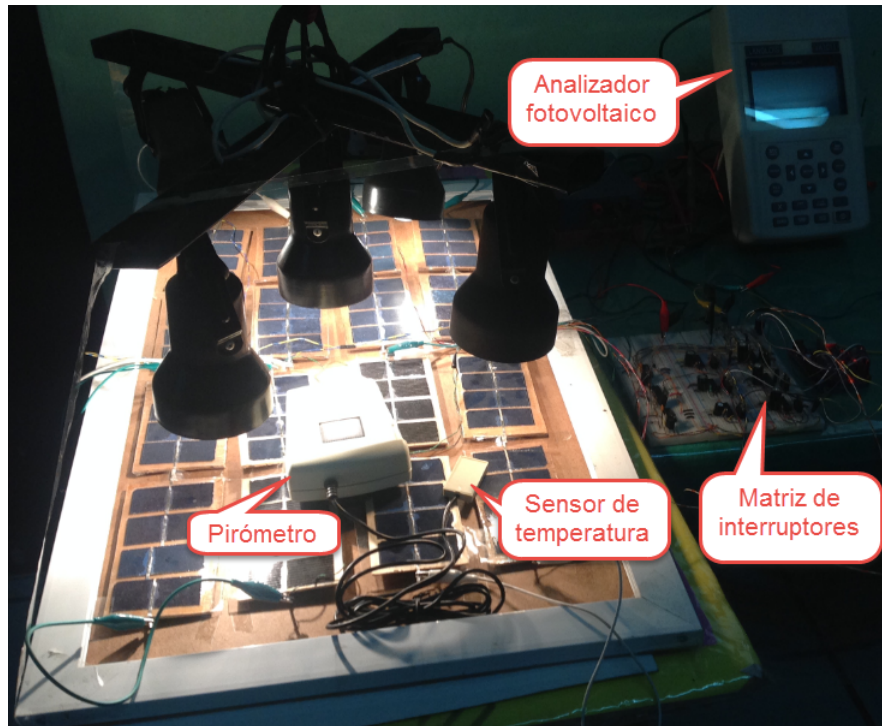


Figura 5.15. Banco de pruebas del arreglo FV cuando éste recibe la radiación de un arreglo de cinco focos.

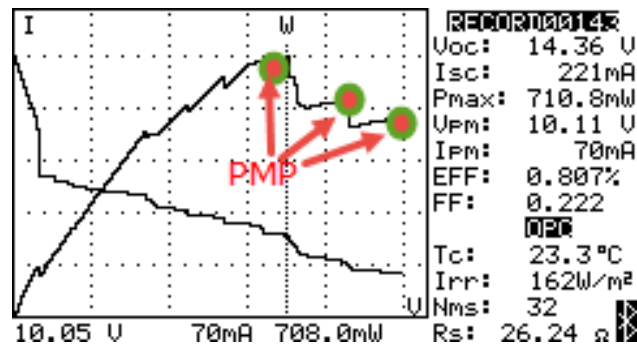


Figura 5.16. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie, cuando como carga tiene conectada una resistencia de $2.2K\Omega$ a $1/2W$ y recibe radiación de 5 focos.

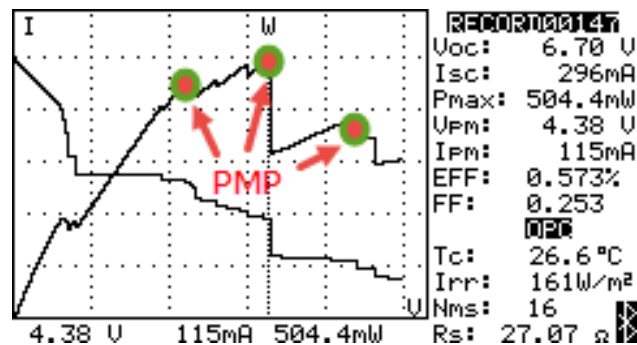


Figura 5.17. Curvas característica del arreglo FV en su configuración serie-paralelo, cuando como carga tiene conectada una resistencia de $2.2K\Omega$ a $1/2W$ y recibe radiación de 5 focos.

Finalmente el arreglo FV se configura en paralelo, las curvas características se muestran en la figura 5.18. Éstas presentan de forma muy notable seis puntos de máxima potencia, pero la potencia más grande es de 353mW. El voltaje $V_{OC} = 3.41V$, es la cuarta parte del voltaje que alcanzó el arreglo en su configuración en serie. La corriente $I_{SC} = 524$, es mayor a la corriente de la configuración serie-paralelo y a la de la configuración serie.

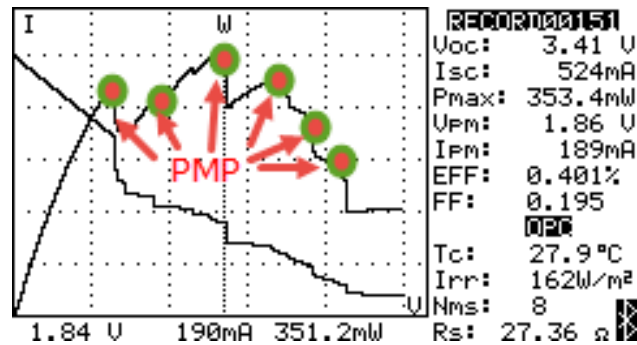


Figura 5.18. Curvas características del arreglo FV en su configuración paralela, cuando como carga tiene conectada una resistencia de $2.2K\Omega$ a $1/2W$ y recibe radiación de 5 focos.

5.4.3. Respuesta de la matriz de transistores MOSFET

A continuación se evalúa la eficiencia de la matriz de transistores para reconfigurar el arreglo FV implementado. La radiación que recibe el arreglo FV es la de una matriz de focos que se muestra en la figura 5.15, esto con el propósito de disminuir los posibles cambios de irradiación en cada medición que pudieran presentarse si es que las mediciones se hacen cuando el arreglo recibe radiación del sol y que ésta puede variar por un sombreado repentino. La carga del arreglo en cada caso es una resistencia de $2.2K\Omega$.

En la figura 5.19 se muestran las curvas del arreglo, en a) cuando la configuración serie-paralelo del arreglo se hace directamente con conexiones de cables (configuración manual), en b) cuando la configuración del arreglo se hace mediante la matriz de transistores MOSFET implementada. La máxima potencia P_{max} que alcanza el arreglo configurado de forma manual es mas grande por 15.3mW que P_{max} del arreglo configurado con la matriz de transistores. Las corrientes I_{SC} y V_{OC} en ambos casos no difieren por que son del orden de mA. Pero en el caso del voltaje si hay una grande diferencia, el voltaje V_{OC} del arreglo configurado manualmente es más grande por 1.73V que el V_{OC} del arreglo configurado con la matriz de transistores, el voltaje V_{mp} del arreglo configurado manualmente es más grande por 290mV que el V_{mp} del arreglo configurado con la matriz de transistores. La eficiencia EFF y el factor de llenado FF no difieren mucho en cada caso. La resistencia R_s del arreglo configurado manualmente es menor por 25.636Ω que la R_s del arreglo configurado con la matriz de transistores. Con la comparación anterior se afirma que con

la matriz de transistores implementada existe un pérdida de potencia del arreglo FV, que es mayormente originada por la disminución del V_{OC} y el aumento de la R_S .

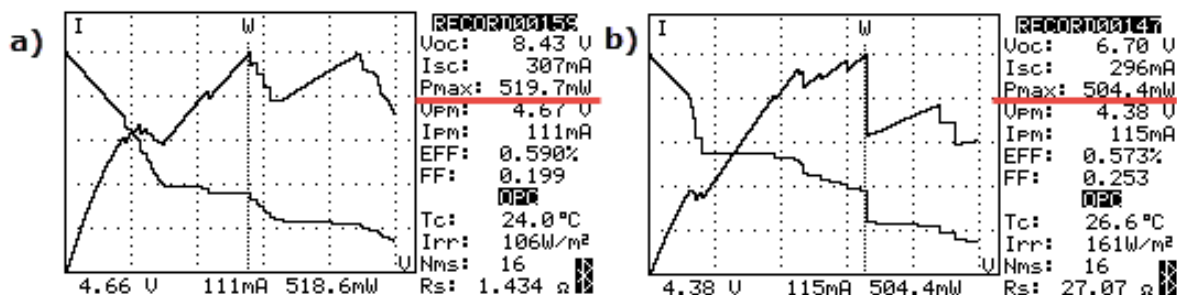


Figura 5.19. Comparación de las curvas característica del arreglo FV configurado en serie-paralelo de forma manual (a) con las curvas del arreglo cuando se configura en serie paralelo mediante la matriz de transistores implementada (b), como carga en ambos casos el arreglo tiene conectada una resistencia de $2.2K\Omega$ a $1/2W$ y recibe radiación de 5 focos.

Finalmente se mide el tiempo que tarda el arreglo FV en reconfigurarse con la matriz de transistores implementada, considerando que el tiempo de encendido de los transistores utilizados es de $13ns$ y el tiempo en que se apagan es de $130ns$ según las especificaciones del fabricante del transistor (apéndice G). Se utiliza un osciloscopio KEYSIGHT-Agilent para hacer las mediciones. Las primeras mediciones se hacen cuando el arreglo primeramente se reconfigura en paralelo, después en serie-paralelo y finalmente en serie. En la figura 5.20 se pueden observar los voltajes en cada configuración, cuando el arreglo se reconfigura por primera vez (paralelo) el tiempo en que tarda en llegar a $3.4V$ es de $1.6S$, en la última reconfiguración el arreglo tarda $170mS$ en llegar a $14.3V$.

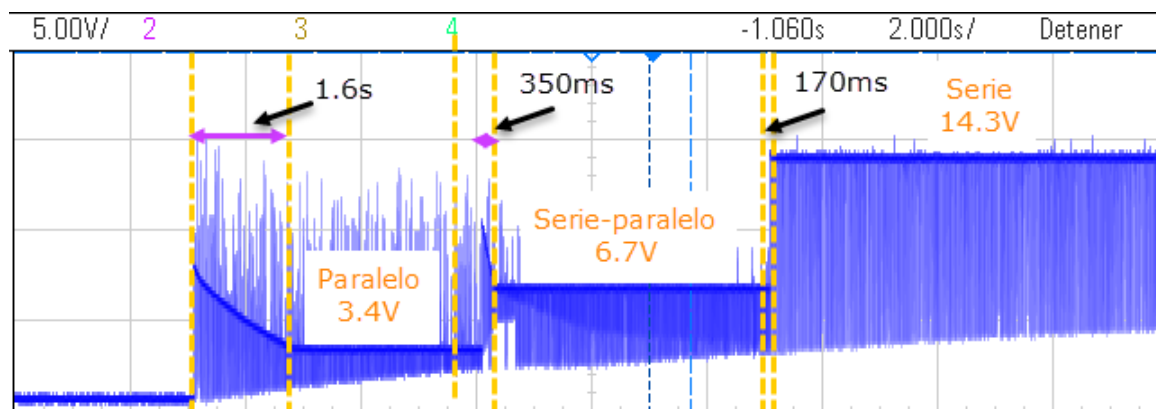


Figura 5.20. Tiempo de reconfiguración ascendente del arreglo FV con la matriz de transistores MOSFET, primero el arreglo se configura en paralelo, después en serie-paralelo y finalmente en serie.

En la última medición que se muestra en la figura 5.21, el arreglo primero se reconfigura en serie, después en serie-paralelo y finalmente en paralelo. De igual forma que en el caso anterior (figura 5.20) el arreglo FV tarda un mayor tiempo en llegar al voltaje de su

primera configuración (1.2s) que el tiempo que tarda en llegar al voltaje de su última configuración (320ms).

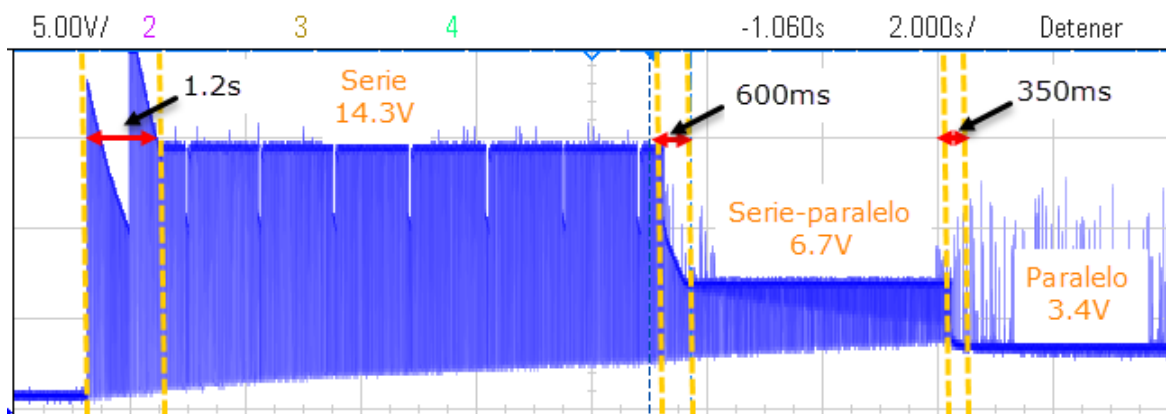


Figura 5.21. Tiempo de reconfiguración descendente del arreglo FV con la matriz de transistores MOSFET, primero el arreglo se configura en serie, después en serie-paralelo y finalmente en paralelo.

Por los resultados de las mediciones anteriores, el tiempo que tarda el arreglo FV en reconfigurarse con la matriz de transistores implementada principalmente está en función del tiempo en que tardan en cargarse y descargarse los capacitores de los GETDRIVERS que habilitan las compuertas de los transistores MOSFET S1 a S6 de la matriz de transistores que se mostró en la figura 5.6.

Conclusiones

Las curvas características de la simulación en MATLAB/SIMULINK de una celda solar: utilizando su modelo matemático y el bloque SolarCell tienen un 11 % de error respecto a las curvas características de una celda solar monocristalina real obtenidas con el simulador solar Sol2A de Newpot.

La corriente que produce un arreglo FV es proporcional a la irradiación que recibe cada una de las celdas que lo componen y la irradiación de una celda FV está en función de su área. El voltaje que genera un arreglo FV es afectado por la temperatura de operación de dicho arreglo que por la irradiación de éste. De éstos resultados se presentó un artículo en el congreso “43rd IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE”, en Junio del 2016 en Portlan Oregon, EUA.

La resistencia R_s de una celda fotovoltaica tiene un gran peso en la corriente que produce un arreglo de celdas FV, por que en el modelo matemático de una celda solar la corriente generada por cada celda disminuye si ésta resistencia crece. Por eso es importante en el diseño de un arreglo FV cuidar que la R_s no aumente mucho. Entre mayor sea el número de celdas conectadas en paralelo la resistencia R_s aumenta, debido a que las R_s de cada celda quedan conectadas en serie con la conexión en paralelo. Al conectar varias celdas en serie la resistencia R_s del arreglo FV no crece tan drásticamente.

El sombreado parcial de un arreglo FV afecta de forma drástica la corriente producida por un arreglo formado por celdas o módulos conectados en serie porque la corriente producida por todo el arreglo FV será igual a la corriente de la celda o modulo FV que tiene una menor irradiación. Los diodos en antiparalelo a los módulos o celdas que se conectarán en serie siguen siendo una solución inmediata para mitigar el efecto del sombreado parcial, aunque estos provocarán que el arreglo FV tenga diferentes puntos de máxima potencia.

El área de un arreglo FV reconfigurable enfocado atender la demanda de corriente y voltaje de una carga puede ser mucho menor que el área de un arreglo FV estándar (no reconfigurable) dimensionado para atender atender la misma corriente y el mismo voltaje

que el arreglo reconfigurable. La velocidad con la que llega a su referencia una carga conectada a un arreglo FV reconfigurable es mucho menor que la velocidad que la misma carga tardaría en llegar a su referencia si ésta estuviera conectada a un arreglo estándar. De estos resultados se presentó un artículo en “La semana de la energía solar”, octubre 2016, evento organizado por la Asociación Nacional de la Energía Solar.

La matriz de transistores MOSFET implementada (capítulo 5) reduce un poco la potencia generada por el arreglo FV, debido a que los diodos conectados al drenaje de cada transistor le restan potencia al arreglo FV. La matriz de transistores implementada también puede ser utilizada para mitigar el efecto del sombreado parcial de un arreglo FV.

El arreglo FV reconfigurable implementado no solo puede suplir los tres niveles de voltaje y de corriente propuestos en esta tesis, sino que se pueden realizar más combinaciones de los transistores para tener más niveles de voltaje y de corriente.

Como a trabajo a futuro de esta tesis, se propone cambiar el tipo de celdas utilizadas en el arreglo FV, es decir usar celdas FV de mayor eficiencia y un mejor factor de llenado. También evaluar la posibilidad de agregar más celdas solares en la superficie exterior de las alas y del fuselaje del VANT, sin que se afecte la aerodinámica del VANT, para así poder aumentar la energía que viene del arreglo FV. Diseñar un gestor de energía para que el arreglo FV reconfigurable funcione como fuente de energía secundaria, para que reduzca el consumo de energía de la batería en los arranques de los actuadores que van conectados al BUS de CD. Agregar seguidores de máxima potencia en cada uno de los módulos FV del arreglo FV reconfigurable, para que sea aumentada la eficiencia del arreglo FV completo.

Apéndice A

Técnicas para el MPPT

Las características de las celdas solares son afectadas por las condiciones de radiación y temperatura. El voltaje y la corriente deberían ser controlados para seguir la máxima potencia del sistema fotovoltaico (FV). Las técnicas de MPPT son usadas para extraer la máxima energía disponible de la celda solar. Los sistemas compuestos por varios módulos FV localizados en diferentes lugares deberían de tener sistemas de condicionamiento de energía individual para asegurar el MPPT para cada módulo [1].

A.1. Técnica basada en el incremento de la conductancia

La técnica del incremento de la conductancia es la más comúnmente utilizada para sistemas FV. Ésta técnica está basada en el hecho de que la suma de la conductancia instantánea I/V con la conductancia incremental $\Delta I/\Delta V$ es cero en el MPP, negativa en el lado derecho del MPP y positiva en el lado izquierdo del MPP. La figura A.1 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de la técnica de incremento de la conductancia [1].

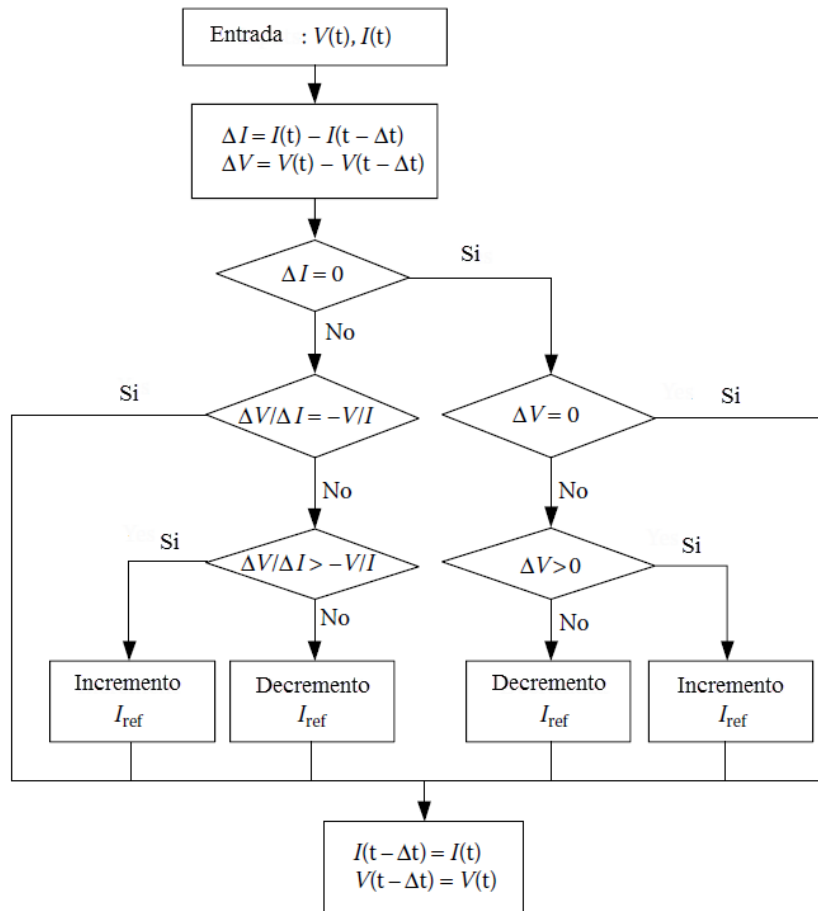


Figura A.1. Diagrama de flujo del algoritmo incremento de la conductancia [1].

Si el cambio en la corriente y el cambio en el voltaje es cero al mismo tiempo, no se requiere un incremento o decremento para la corriente de referencia. Si no hay cambio en la corriente mientras el cambio en el voltaje es positivo, la corriente de referencia debería de ser aumentada.

Similarmente si no hay cambio en la corriente mientras el cambio en el voltaje es negativo, la corriente de referencia debería ser disminuida. Si el cambio en la corriente es cero mientras $\Delta V/\Delta I = -V/I$, la celda FV está operando en el MPP. Si $\Delta V/\Delta I \neq -V/I$ y $\Delta V/\Delta I > -V/I$, la corriente de referencia debería de ser disminuida. Sin embargo, si $\Delta V/\Delta I \neq -V/I$ y $\Delta V/\Delta I < -V/I$, la corriente de referencia debería de ser aumentada en orden para seguir el MPP.

Prácticamente, debido a los ruidos y errores, satisfacer la condición de $\Delta I/\Delta V = -I/V$ podría ser muy difícil. Por lo tanto, esta condición puede ser satisfecha con una buena aproximación por:

$$|\Delta I/\Delta V + I/V| < \varepsilon \tag{A.1}$$

Donde ε es un valor pequeño positivo.

Basado en este algoritmo, el punto de operación también es encontrado en el intervalo BC o puede oscilar entre los intervalos AB y CD, como se muestra en la figura A.2.

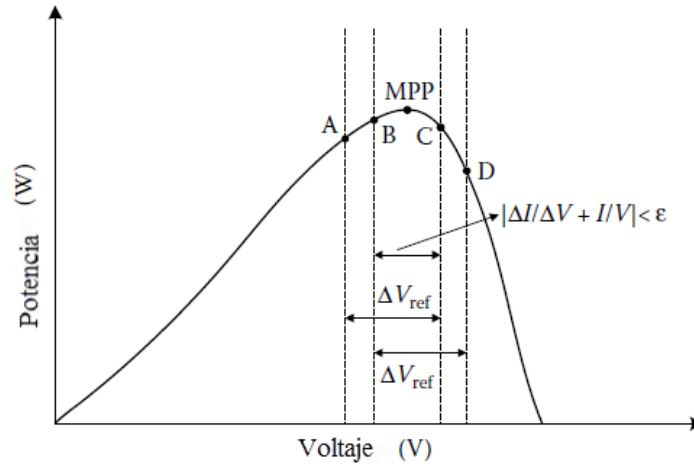


Figura A.2. Trayectoria del punto de operación del MPPT basado en el incremento de la conductancia [1].

Seleccionando el tamaño del paso (ΔV_{ref}), mostrado en la figura A.2 es un compromiso entre la precisión de seguimiento constante y la respuesta dinámica. Si es usado un tamaño de paso grande para una respuesta dinámica rápida, la precisión de seguimiento decrece y el seguimiento del punto oscila al rededor del MPP. Por otra parte, cuando son seleccionados tamaños de paso pequeños, la precisión de seguimiento aumentará. Mientras tanto, aumentará el tiempo de duración requerido para alcanzar el MPP.

La normalización IV, PV(potencia-voltaje) y el origen absoluto de las características foto-voltaicas del generador foto-voltaico se muestra en la figura A.3.

Por esta característica, se ve que $|dP/dV|$ disminuye como el MPP es aproximado y aumenta cuando el punto de operación se mueve lejos del MPP. Esta relación puede ser dada por:

$$\begin{cases} dP/dV < 0 & \text{derecha del MPP} \\ dP/dV = 0 & \text{en el MPP} \\ dP/dV > 0 & \text{izquierda del MPP} \end{cases} \quad (A.2)$$

En resumen, para que el panel fotovoltaico opere en el MPP, debería ser calculado

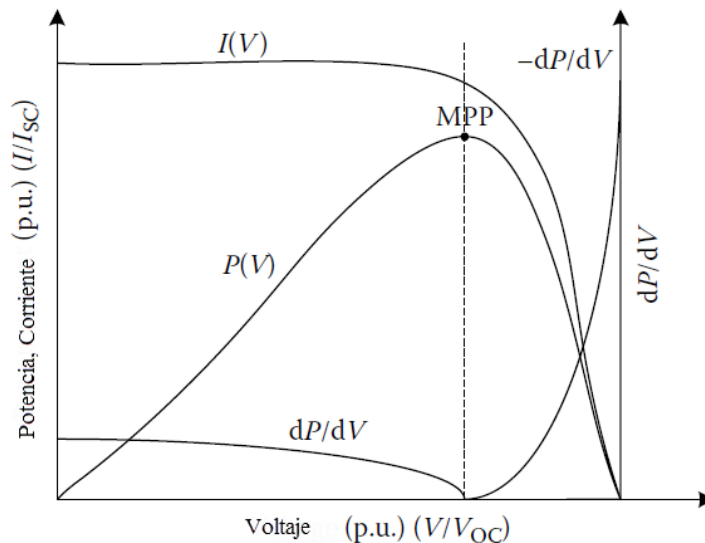


Figura A.3. Normalización IV, PV y características $|dP/dV|$ del generador fotovoltaico [1].

dP/dV :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (\text{A.3})$$

dP/dV puede ser obtenido por medir únicamente la conductancia incremental e instantánea del generador foto-voltaico, esto es, $\Delta I/\Delta V$ y I/V [1].

A.2. Técnicas MPPT basada en *escalar la colina* / Perturbar y Observar (P & O)

Muchos reportes se enfocan en los métodos *Escalar la colina* y *Perturbar y Observar*, prácticamente tienen un algoritmo muy similar. La técnica de escalamiento de la colina involucra una perturbación en la relación de trabajo del convertidor de potencia y P&O una perturbación en el voltaje de operación del arreglo FV. En el caso de que el generador fotovoltaico esté conectado al convertidor de potencia, al perturbar la relación de trabajo del convertidor de potencia perturba la corriente del generador fotovoltaico y consecuentemente su voltaje [8].

En la figura A.4, se puede ver que incrementar(decrementar) el voltaje, aumenta(disminuye) la potencia cuando opera en el lado izquierdo del MPP y disminuye (aumenta) la potencia en el lado derecho del MPP. Por lo tanto, si hay un aumento en la potencia, la siguiente perturbación debería permanecer igual para alcanzar el MPP y si hay una disminución en la potencia, debería ser cambiada la dirección de la perturbación. Este algoritmo está

resumido en la tabla A.1.

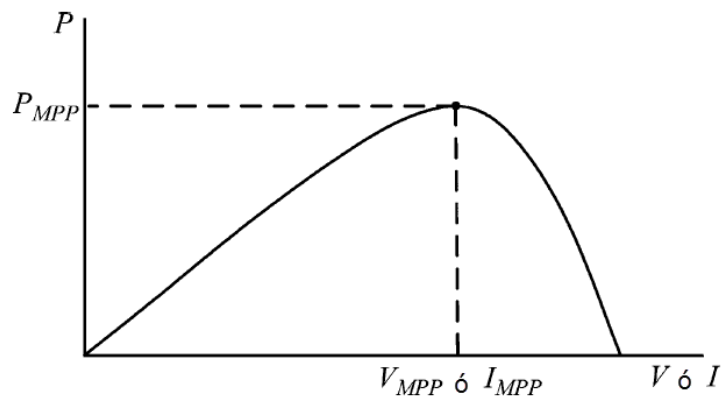


Figura A.4. Curva de potencia característica del generador FV [8].

Perturbación	Cambio en la potencia	Siguiente perturbación
Positiva	Positiva	Positiva
Positiva	Negativa	Negativa
Negativa	Positiva	Negativa
Negativa	Negativa	Positiva

Tabla A.1. Resumen del algoritmo escalamiento de colina y P&O.

El proceso se repite periódicamente hasta que el MPP es alcanzado. El sistema entonces oscila cerca del MPP. La oscilación es disminuida por una reducción en el tamaño del paso de la perturbación. Sin embargo, un tamaño de perturbación pequeño realiza el MPPT. Una solución para esta situación conflictiva es tener un tamaño de perturbación variable que es más pequeña para llegar al MPP.

Los métodos de *Escalamiento de la colina* y P&O pueden fallar bajo condiciones de cambio atmosférico rápido como se muestra en la figura A.5. Iniciando en un punto de operación A, si las condiciones atmosféricas son aproximadamente constantes, una perturbación ΔV en el voltaje V traerá al punto de operación a B y la perturbación será revertida debido a una disminución en la potencia. Sin embargo, si la irradiancia aumenta y cambia la curva de potencia de P1 a P2 dentro de un periodo de muestreo, el punto de operación se moverá de A para C. Esto representa un aumento en la potencia y se mantiene la misma perturbación. Consecuentemente, el punto de operación del MPP diverge y se guardará divergiendo si la irradiancia continuamente aumenta. Para asegurar que el MPP sea seguido incluso bajo repentinos cambios en la irradiancia, se utiliza un método de P&O de comparación de peso de tres puntos, que compara el punto de potencia actual

con los dos anteriores antes de tomar una decisión del signo de la perturbación.

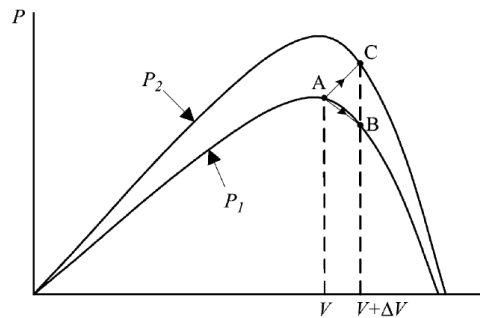


Figura A.5. Divergencia del escalamiento de colina/P&O del MPP [8].

En la figura A.6 se muestra el diagrama de flujo del método perturbar y observar utilizado en [9]. Donde $pact$ es la potencia medida, $pant$ es la potencia anterior, $pert$ es una variable binaria que indica la dirección de la perturbación, $step$ es el tamaño de la perturbación y pwm es el valor de ciclo útil utilizado para variar el voltaje del arreglo fotovoltaico, el algoritmo compara la potencia actual con la anterior y con base en ello determina si se sigue aplicando la misma perturbación o se deberá invertir en el siguiente ciclo.

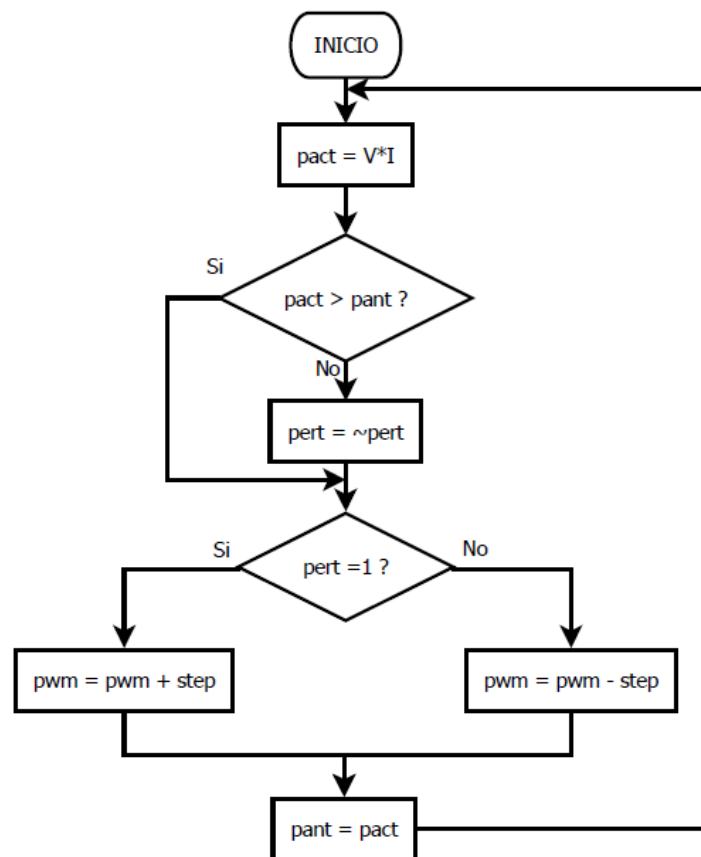


Figura A.6. Algoritmo perturbar y observar [9].

Apéndice B

Simulación de un panel fotovoltaico a partir de su modelo matemático

En este apartado se describe como se implementa y como funciona un panel fotovoltaico (figura B.1) a partir del modelo matemático descrito en la sección 1.3.3.

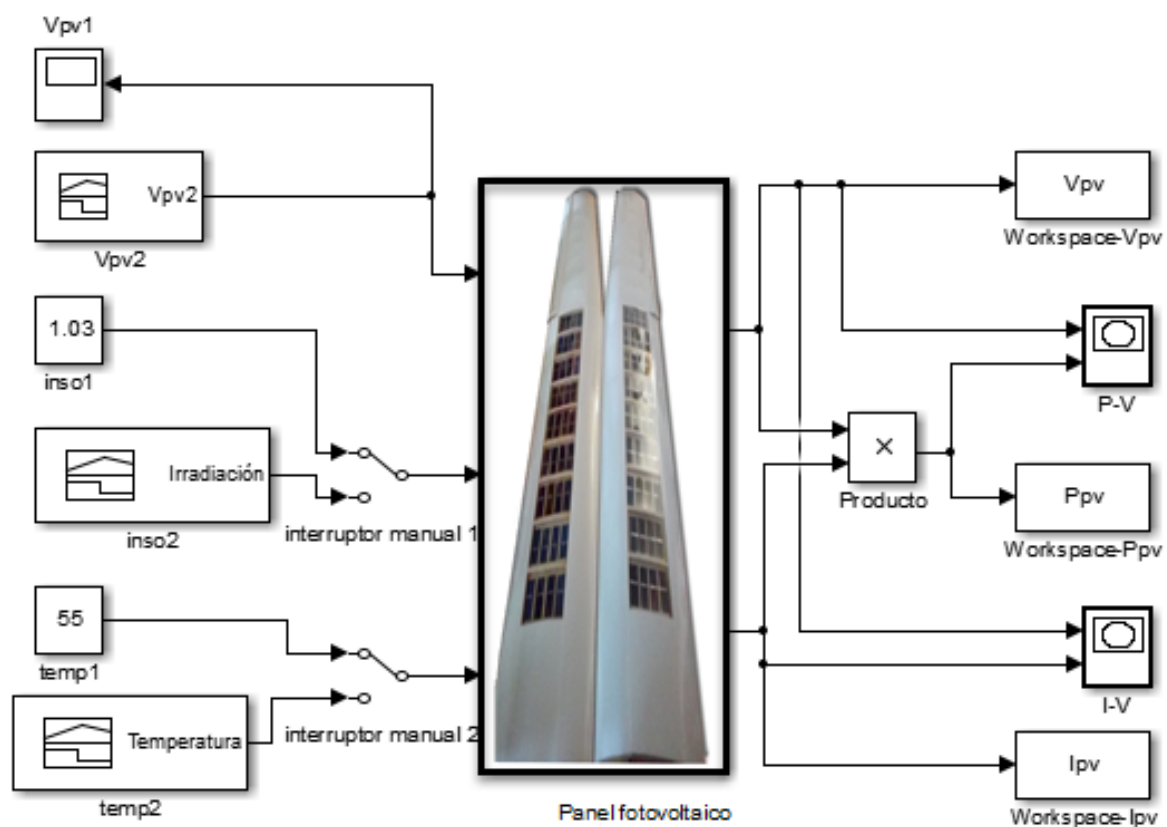


Figura B.1. Diagrama de bloques de un panel FV en simulación en MATLAB/SIMULINK.

En las siguientes secciones se describe las variables de entrada al bloque “*panel fotovoltaico*” y sus salidas.

B.1. Variables y características del panel fotovoltaico

Las *variables ambientales* que son entradas del bloque que describe un panel fotovoltaico son:

- V_{pv} : Es el voltaje fotovoltaico, es una señal rampa de bajada, que inicia desde el valor del voltaje V_{oc} hasta cero, con un tiempo de bajada muy largo.
- $insol1$ y $insol2$: Son la irradiación que recibe el panel fotovoltaico; el valor que pueden tomar es de 0 a 1, que en términos de irradiación serían de 0 a $1000W/m^2$. $insol1$ es para que el panel reciba una irradiación constante y $insol2$ es para que el panel tenga una irradiación que varía dentro del rango. El *interruptor manual 1* sirve para cambiar entre $insol1$ y $insol2$.
- $temp1$ y $temp2$: Son la temperatura de operación del panel fotovoltaico. $temp1$ es para indicar una temperatura constante y $temp2$ es para indicar que panel opera a una temperatura que es variable. El *interruptormanual2* sirve para cambiar entre $temp1$ y $temp2$.

Las características de panel FV se introducen en el cuadro de dialogo que se muestra en la figura B.2. Estas características son las siguientes: La corriente de referencia en corto circuito I_{SCr} que es suministrada por el panel fotovoltaico a $25^{\circ}C$, el voltaje en circuito abierto V_{OC} , cantidad de celdas en serie N_S , cantidad de celdas en paralelo N_P , resistencia en serie R_s de la celda FV.

Las *variables de salida* del panel fotovoltaico son: Voltaje de salida del módulo fotovoltaico (V_{pv}), corriente de salida del módulo fotovoltaico (I_{pv}). La multiplicación de I_{pv} por V_{pv} da como resultado la potencia de salida del módulo fotovoltaico P_{pv} .

B.2. Bloques de cada ecuación del modelo matemático

La nomenclatura utilizada en el modelo matemático del panel solar es la siguiente:

V_{pv} es el voltaje de salida del módulo FV dada en Volts (V).

I_{pv} es la corriente de salida del módulo FV, dada en Amperes(A).

T_r Temperatura de referencia $25^{\circ}C$.

T_{rk} es la temperatura de referencia en grados kelvin, que es igual a $298^{\circ}K$.

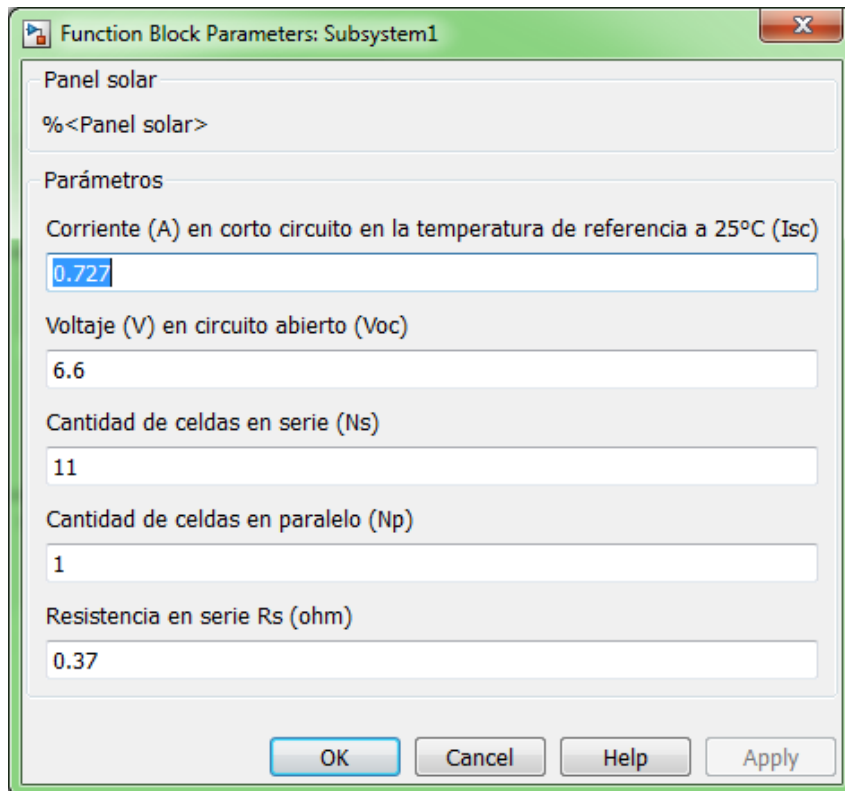


Figura B.2. Cuadro de dialogo, donde se introducen las características del panel fotovoltaico que va a ser simulado.

T_{op} es la temperatura de operación del módulo FV en grados Celsius.

T_{ak} es la temperatura de operación del módulo, dada en grados Kelvin (K).

I_{ph} Es la corriente generada por la luz en un módulo FV, dada en Amperes (A).

I_o Es la corriente de saturación del módulo FV, dada en Amperes (A).

$A=B$ es el factor de idealidad, que es igual a 1.6.

k es la constante de Boltzman, igual a $1.3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$.

q es la carga del electrón, es igual $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

R_s es la resistencia en serie del módulo FV.

I_{SCR} es la corriente en corto circuito de referencia del módulo FV a 25°C y 1000 W/m^2 .

K_i es el coeficiente de temperatura de la corriente I_{scr} , el valor de $K_i = 0.0017 \text{ A/}^\circ\text{C}$.

λ es la iluminación del módulo FV (W/m^2).

E_{go} es el coeficiente de la banda prohibida del silicio, es igual a 1.1eV.

N_s es el número de celdas conectadas en serie.

N_p es el número de celdas conectadas en paralelo.

La fuente de corriente I_{ph} representa la fotocorriente de la celda. R_{sh} y R_s son las resistencias en serie y derivación intrínseca de la celda, respectivamente. Usualmente el valor de R_{sh} es muy grande y R_s es muy pequeña, por lo tanto esto podría ser despreciado para simplificar el análisis.

Internamente el bloque panel solar (figura B.1) tiene los bloques que se muestran en la figura B.3.

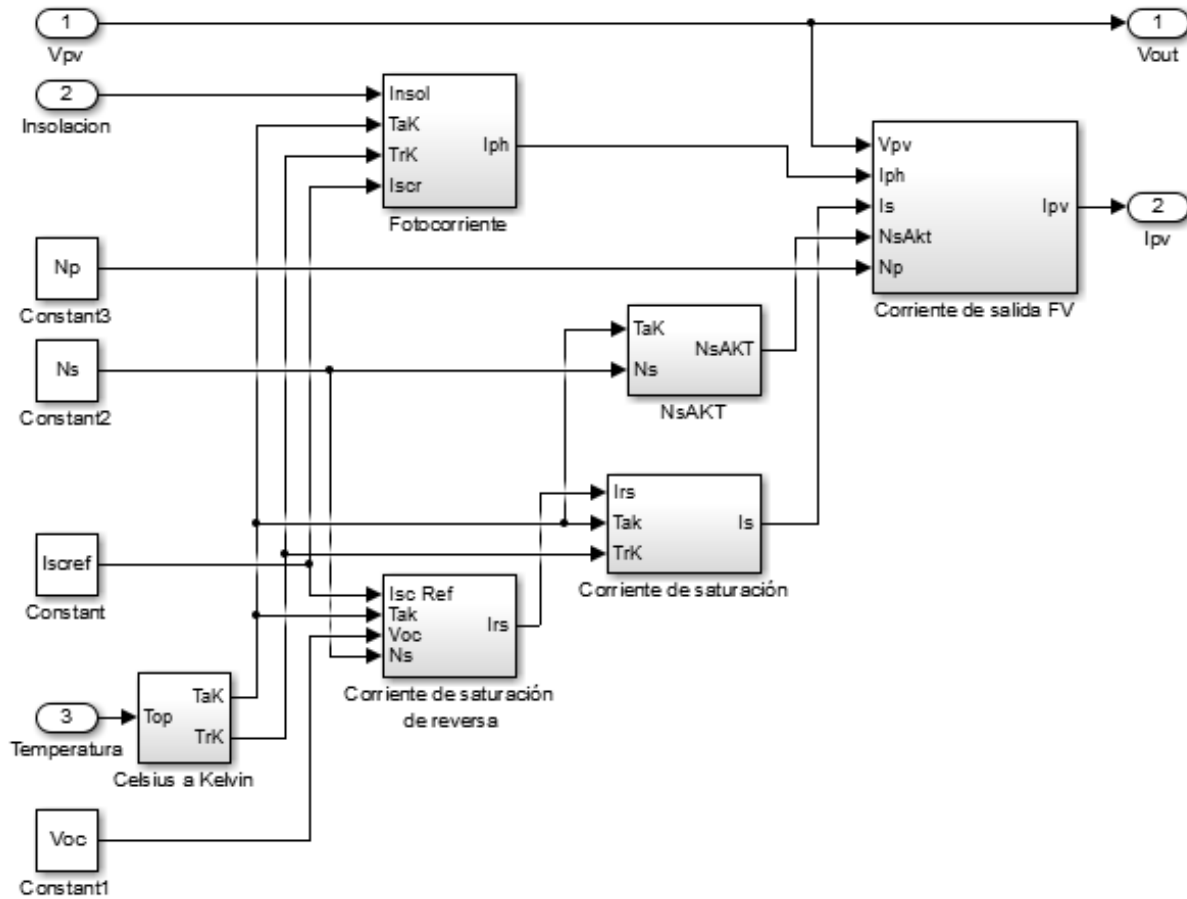


Figura B.3. Diagrama de bloques interno del bloque panel solar de la figura B.1.

Conversión de grados Celsius a Kelvin

En este bloque (figura B.4) implementan la siguiente ecuación de la conversión de grados Celsius a grados Kelvin, de la temperatura de operación T_{op} y la temperatura de referencia T_r que es $25^{\circ}C$.

$$\begin{aligned} T_{rK} &= 25 + 273 \\ T_{aK} &= T_{op} + 273 \end{aligned} \tag{B.1}$$

Fotocorriente

La ecuación de fotocorriente 1.1 se muestra a continuación.

$$I_{ph} = [I_{SCr} + K_i(T_{ak} - 298)] * \lambda/1000$$

La figura B.5 muestra la ecuación 1.1 en diagrama de bloques de SIMULINK.

Corriente de saturación de reversa

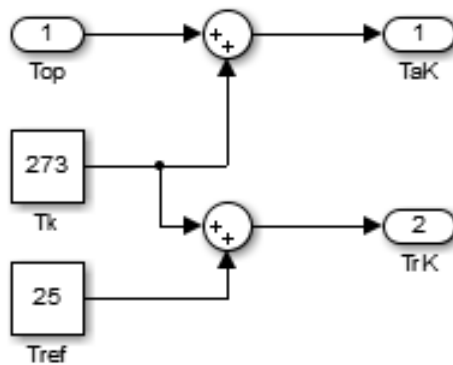


Figura B.4. Diagrama de bloques en SIMULINK de la conversión de grados Celsius a Kelvin .

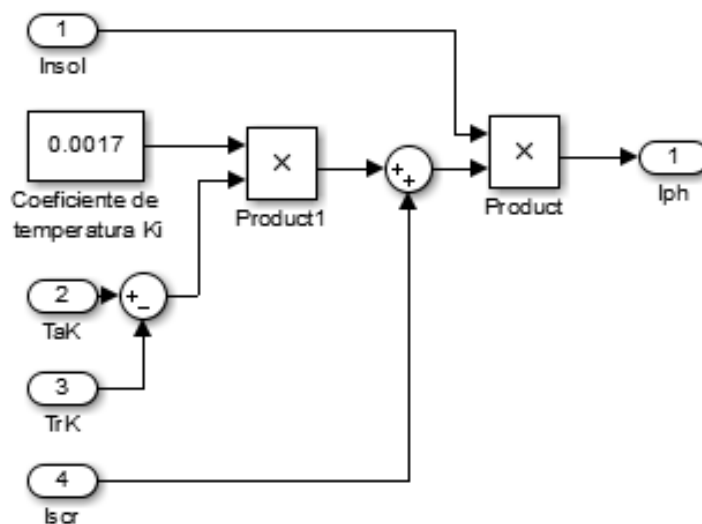


Figura B.5. Diagrama de bloques en SIMULINK de la ecuación de fotocorriente .

La ecuación de la corriente de saturación de reversa 1.2 se muestra a continuación.

$$I_{rs} = \frac{I_{SCr}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s k A T_{ak}}\right) - 1}$$

El diagrama a bloques de la ecuación 1.2 se muestra en la figura B.6.

Ganancia $N_s A K T$

Esta ecuación solo es para multiplicar $N_s * A * K * T_{ak}$. El diagrama a bloques implementado en SIMULINK se muestra en la figura B.7.

Corriente de saturación

La ecuación de la corriente de saturación 1.3 se muestra a continuación:

$$I_s = I_{rs} \left[\frac{T_{ak}}{T_{rk}} \right]^3 \exp \left[\frac{q E_{g0}}{B k} \left(\frac{1}{T_{rk}} - \frac{1}{T_{ak}} \right) \right]$$

La ecuación 1.3 en diagrama de bloques de SIMULINK se muestra en la figura B.8.

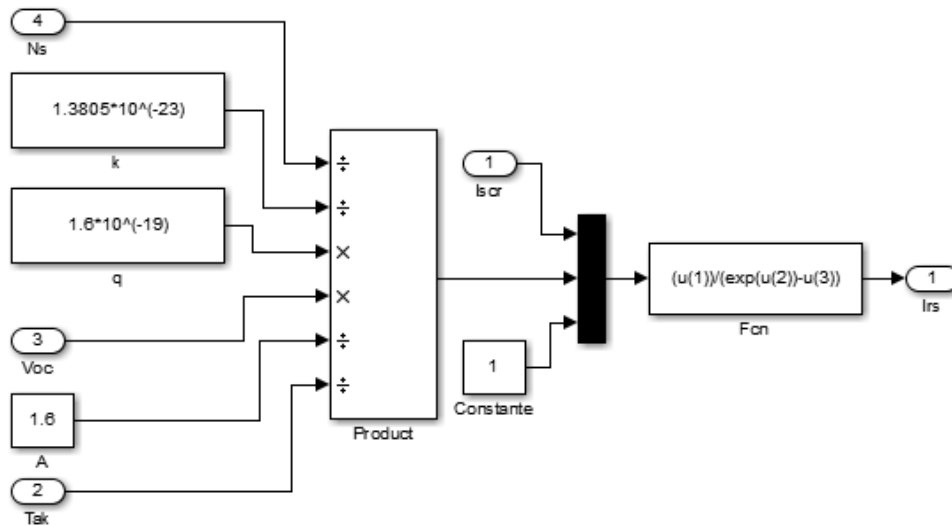


Figura B.6. Diagrama de bloques en SIMULINK de la ecuación de corriente de saturación de reversa i_{rs} .

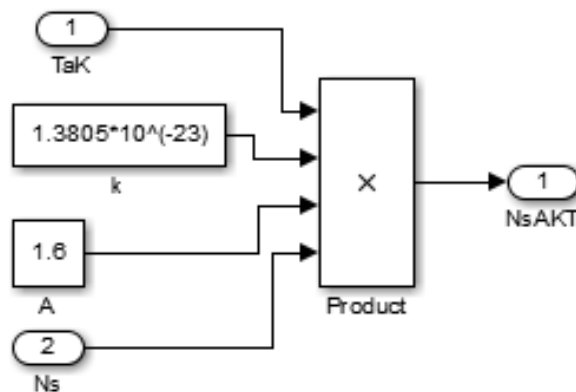


Figura B.7. Diagrama de bloques en SIMULINK para calcular la ganancia NsAKT.

Corriente de salida del módulo fotovoltaico

La ecuación de la corriente de salida del módulo fotovoltaico 1.4 se muestra a continuación:

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV} R_S)}{N_S A k T_{ak}} \right) - 1 \right]$$

El diagrama a bloques de la ecuación 1.4 se muestra en la figura B.9.

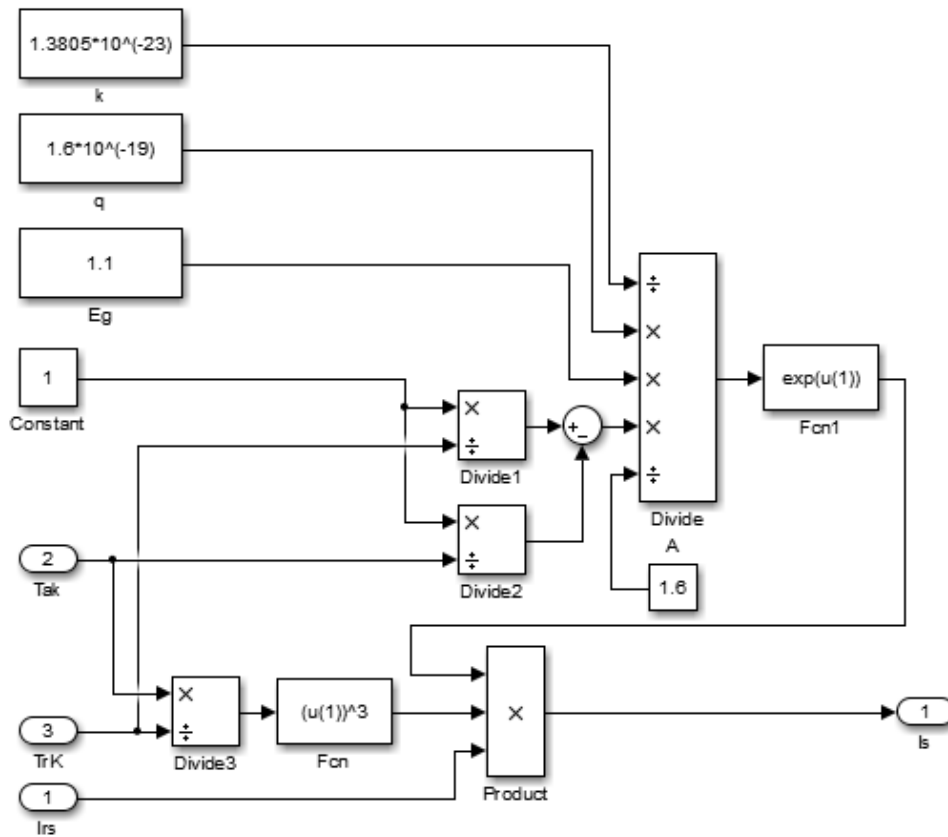


Figura B.8. Diagrama de bloques en SIMULINK de la corriente de saturación I_s .

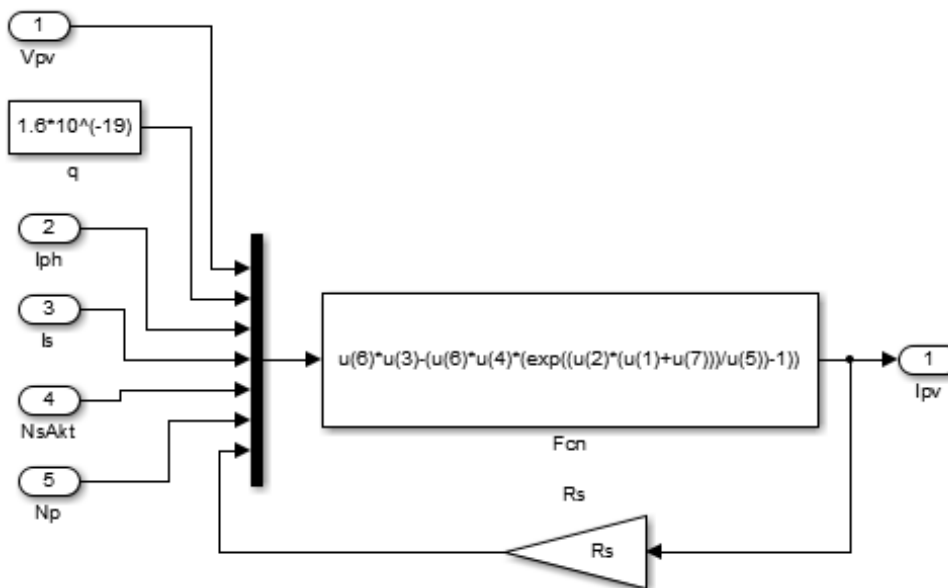


Figura B.9. Diagrama de bloques en SIMULINK de la corriente de salida del módulo fotovoltaico I_{pv} .

Apéndice C

Análisis de consumo de energía de un motor de CD

Con el objetivo de hacer la reconfiguración de un arreglo de celdas solares para atender a la demanda de potencia por parte de la carga, se realizó el análisis de consumo energético de un motor de 12V que es utilizado en el “Modular Servo System” de la marca INTECO (www.inteco.com.pl), éste sistema trae diferentes ejemplos de controles para el motor de CD, pero como la mayor variación de corriente y voltaje se da cuando cambia la velocidad del motor de CD este análisis energético será hecho en los resultados obtenidos de un control PID de velocidad que viene como ejemplo en el sistema “Modular Servo System”. En la figura C.1 se muestra el banco de pruebas implementado para obtener el consumo de energía del motor de CD, en una computadora se corre en MATLAB/SIMULINK el control de velocidad PID del motor de CD, la tarjeta RT-DAC/PCI se encarga de hacer contacto con el sistema “Modular Servo System”, con el analizador de calidad de energía Fluke 32B se obtiene en tiempo real la respuesta de corriente y voltaje.

El diagrama de bloques del ejemplo del control de velocidad PID se muestra en la figura C.2, las ganancias del control PI para éste caso son $P=0.02$ y $I=0.03$.

C.0.1. Señales de referencia sin pendiente de inclinación

La primera prueba se realizó con un tiempo de simulación de 30s, la señal de referencia es la velocidad (rad/s) deseada para el motor de CD que tiene 3 escalones, el primer valor es 15rad/s, el segundo es 25rad/s, el tercero es en 35 rad/s. En la figura C.3 a) se muestra como la velocidad actual sigue la velocidad de referencia y en la figura C.3 b) se muestra como varía la señal de control según cambia la señal de referencia.

En la figura C.4 se observa como es el consumo de corriente y de voltaje por parte del motor ante los cambios de las señales de referencia, el caso más crítico es cuando la señal

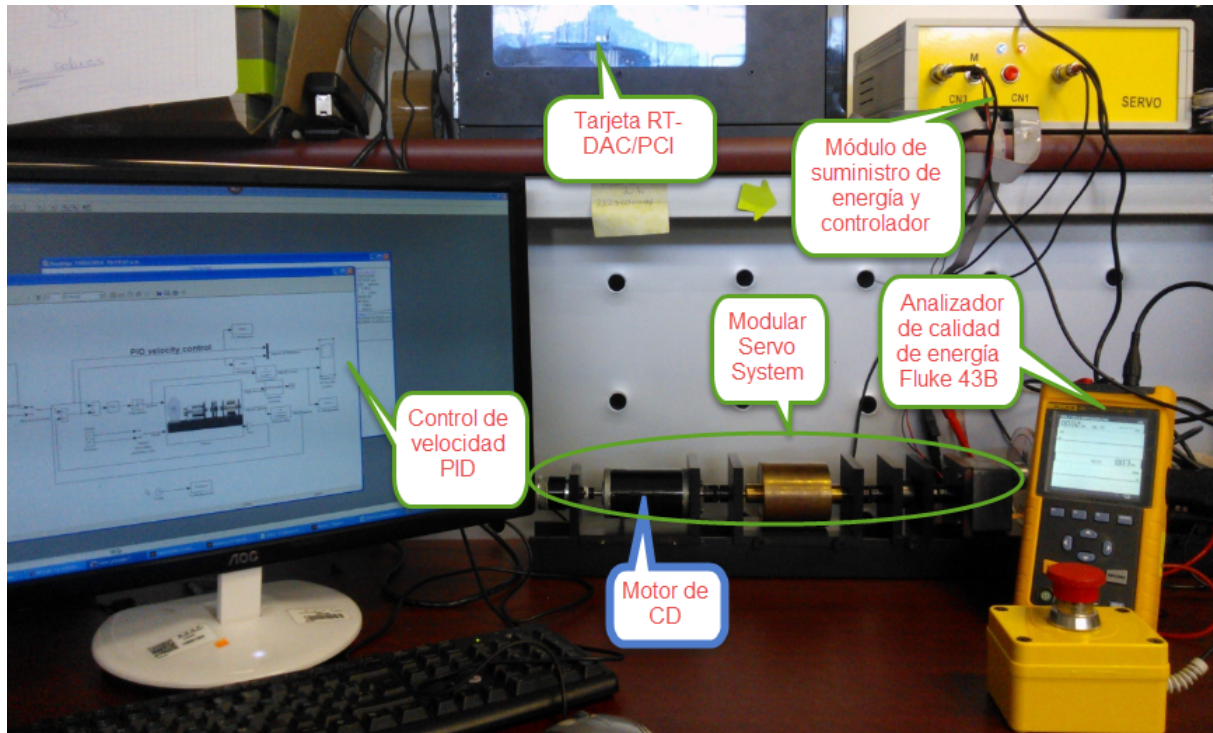


Figura C.1. Implementación del banco de pruebas para analizar el consumo de energía del motor de CD del “Modular Servo System”.

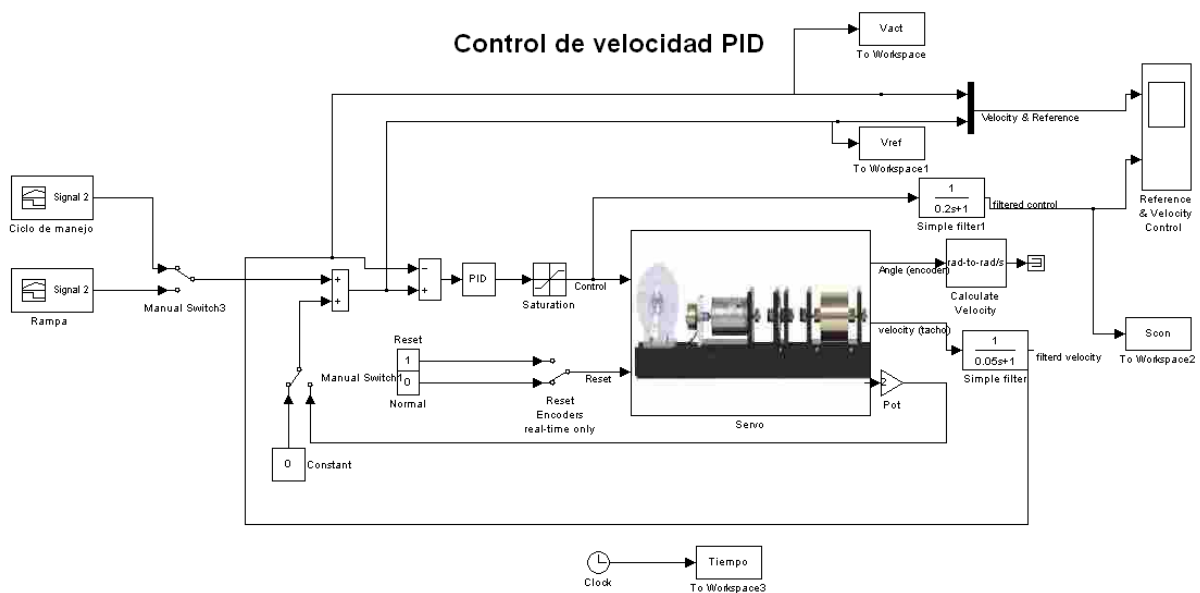


Figura C.2. Implementación del banco de pruebas para analizar el consumo de energía del motor de CD del “Modular Servo System”.

de referencia pasa de 25 rad/s a 35 rad/s por que se consume la corriente más grande de toda la prueba que es 3.4A y el mayor voltaje de 5.6V.

El segundo caso es cuando la referencia es una señal periódica de tipo de onda cua-

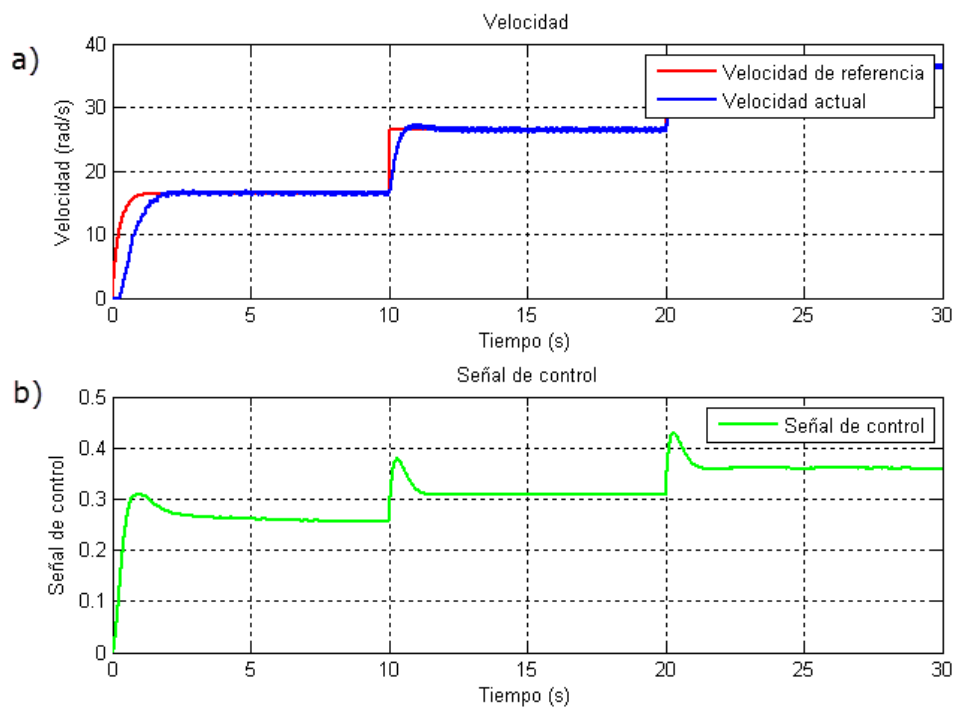


Figura C.3. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia está formada por tres diferentes valores escalonados, a) Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.

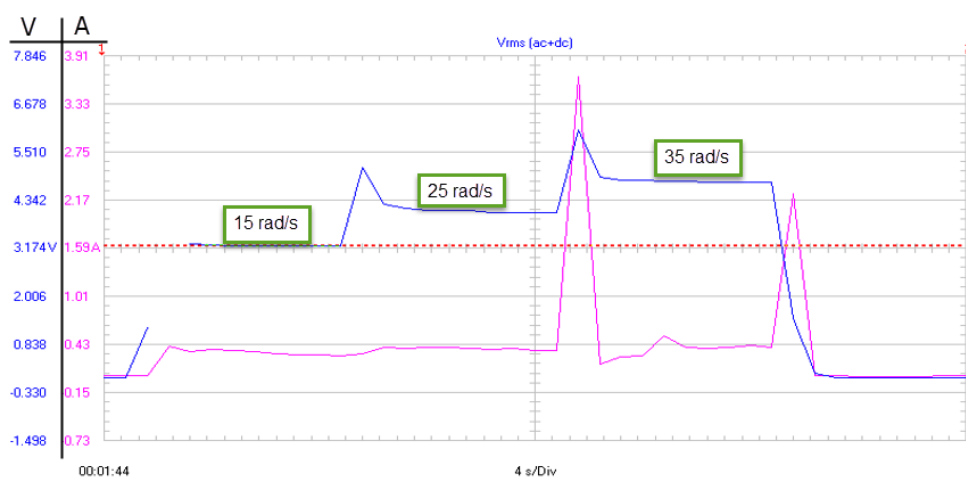


Figura C.4. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD al tener una señal de referencia con tres velocidades de referencia diferentes escalonados.

drada, tiene una frecuencia de 0.1Hz, que va de -21 rad/s a 49 rad/s. La velocidad de referencia vs. velocidad actual se muestra en la figura C.5 a), la respuesta de la señal de control se muestra en b).

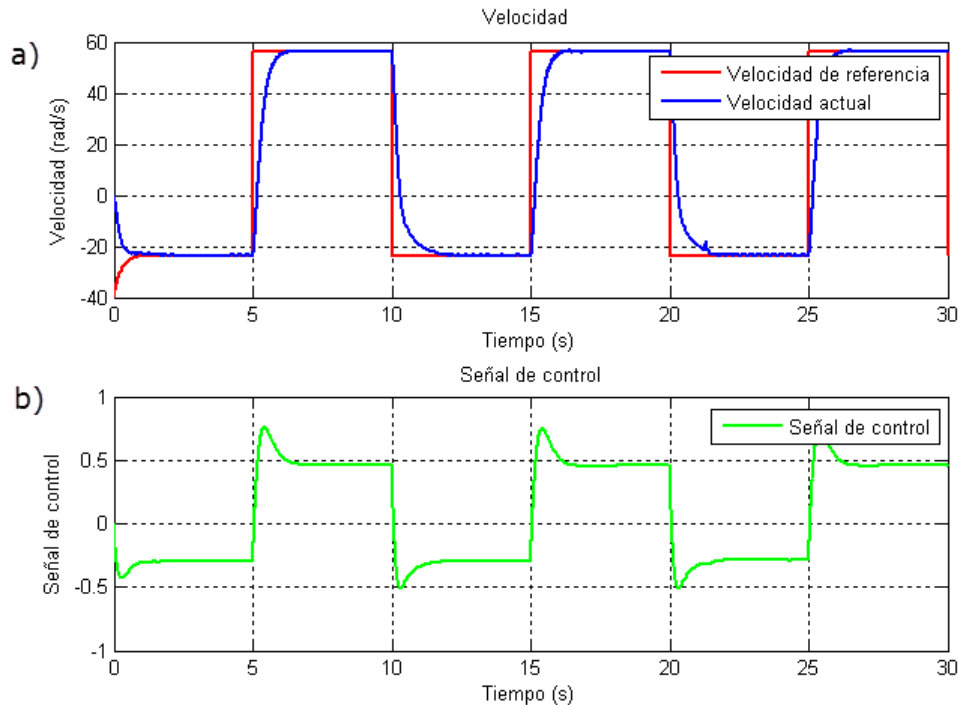


Figura C.5. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia es una señal cuadrada periódica a una frecuencia de 0.1Hz. a) Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.

El consumo de corriente y voltaje del motor de CD con la señal de referencia cuadrada periódica se muestra en la figura C.6. Se puede observar que cada vez que la velocidad de referencia va de -21 rad/s a 49 rad/s se requiere al mismo tiempo la máxima corriente y el máximo voltaje.

C.0.2. Señales de referencia con pendiente de inclinación

En lo anterior se observó que cuando la señal de referencia no tiene pendiente en los momentos que cambia la señal de referencia se consume al mismo tiempo la máxima corriente y el máximo voltaje en todo el tiempo de la evaluación. Ahora en esta subsección se hace el análisis de consumo de energía cuando la señal de referencia ya tiene una inclinación.

La prueba se hace cuando la señal de referencia tiene una rampa de subida a 150 rad/s en 5s, permanece la señal de referencia en 150 rad/s hasta 25s donde la señal de referencia comienza a descender hasta que la velocidad es de 0 rad/s en 30s que dura la simulación. La figura C.7 muestra la velocidad actual del sistema vs. velocidad de referencia a) y la señal de control b).

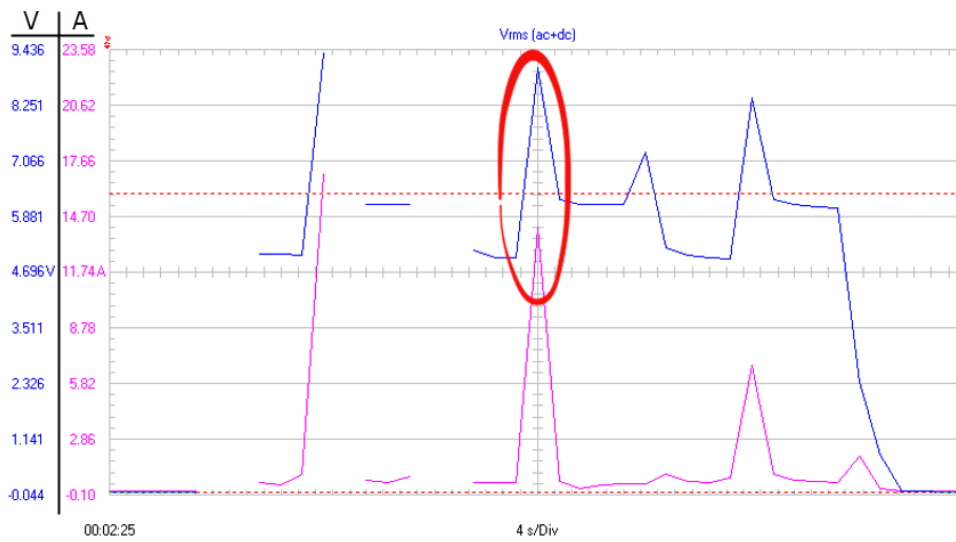


Figura C.6. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD al tener una señal de referencia cuadrada periódica a una frecuencia de 0.1Hz.

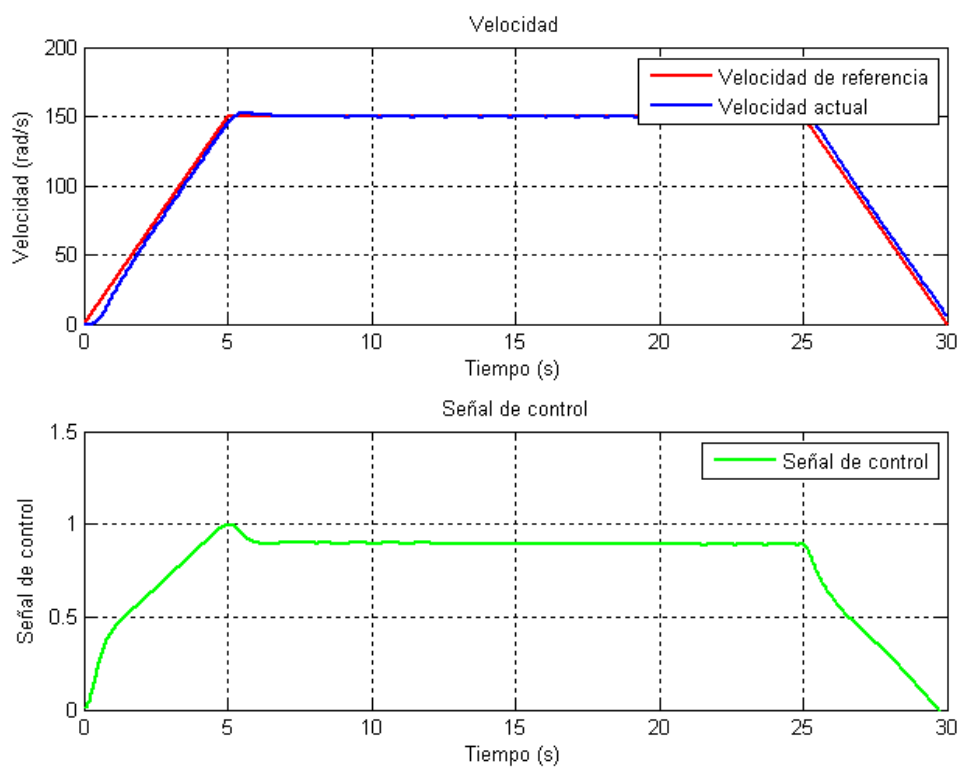


Figura C.7. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia es una rampa de subida y una rampa de bajada en 5s. a) Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.

La demanda de corriente y de voltaje se muestra en la figura C.8, aquí se ve que al iniciar el motor de CD existe solo un mayor consumo de corriente mientras que el consumo de voltaje va aumentando a medida que incrementa la velocidad del motor, ya cuando el motor llega a los 150rad/s solo es consumido el mayor voltaje mientras que la corriente oscila entre los 600mA, finalmente en la rampa de bajada va disminuyendo el consumo de voltaje a medida que baja la velocidad mientras que la corriente permanece en el orden de los 600mA.

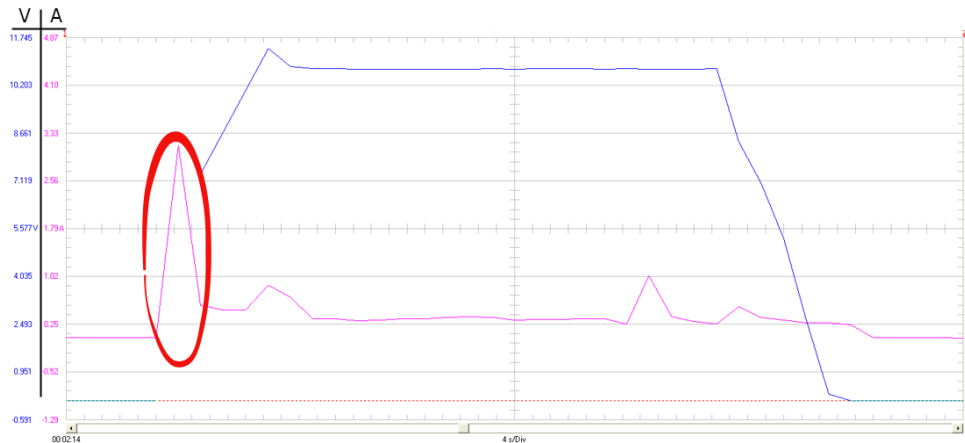


Figura C.8. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD, cuando se tiene por señal de referencia una rampa de subida y una rampa de bajada en 5s .

C.0.3. Señales de referencia emulación del ciclo de manejo europeo EU 91/441

Ahora la señal de referencia será una emulación del ciclo de manejo europeo EU 91/441, que maneja la velocidad de avance en Km/h contra el tiempo , pero para estas pruebas se graficará la velocidad angular en rad/s contra el tiempo (s). Según lo especifica la norma EU 91/441 [29] la aceleración de avance debe de ser de $0.5m/s^2$, en este reporte se maneja una aceleración angular de $0.5rad/s$. El tiempo que dura la prueba es 1200s.

En la figura C.9 se muestra la primera parte del ciclo de manejo, que va de 0s a600s. En a) se muestra como la velocidad actual sigue la velocidad de referencia, en b) la señal de control reacciona al cambio de la velocidad de referencia.

En la figura C.10 se muestra el consumo de energía, tanto de corriente y voltaje, durante la primera parte del ciclo de manejo. Debido a que la señal de referencia no cambia tan drásticamente, el pico de corriente es solo cuando comienza a aumentar la velocidad de referencia mientras que el voltaje aumenta poco a poco, una vez que llegó la velocidad actual a la velocidad de referencia la corriente disminuye.

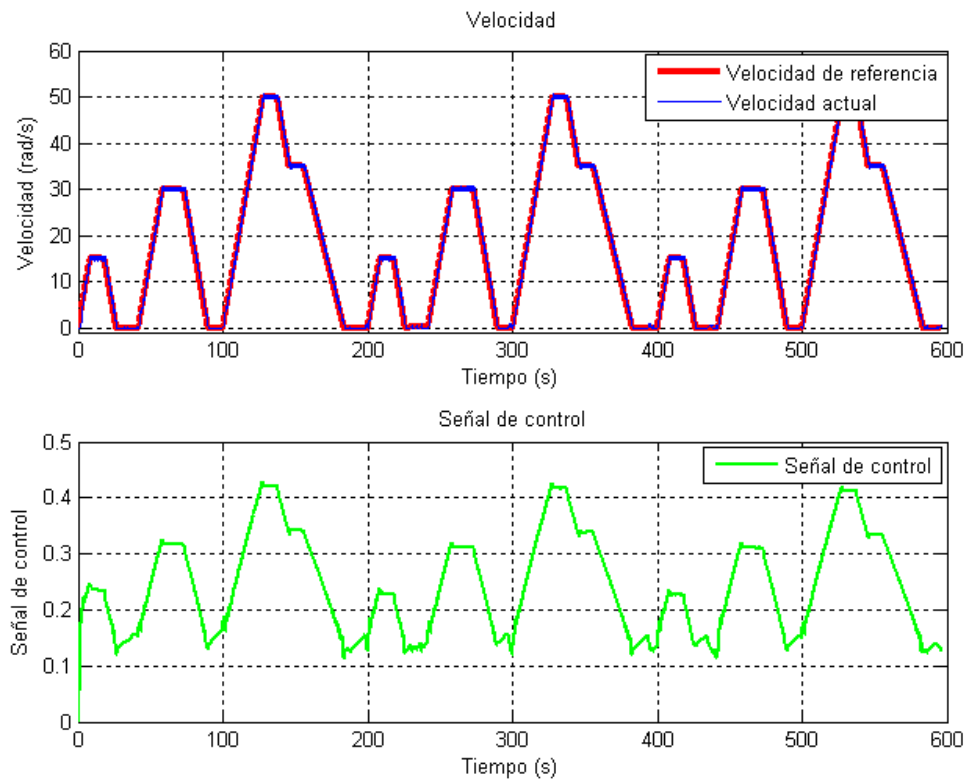


Figura C.9. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia es la primera parte del ciclo de manejo EU 91/441, que va de 0s a 600s. a) Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.

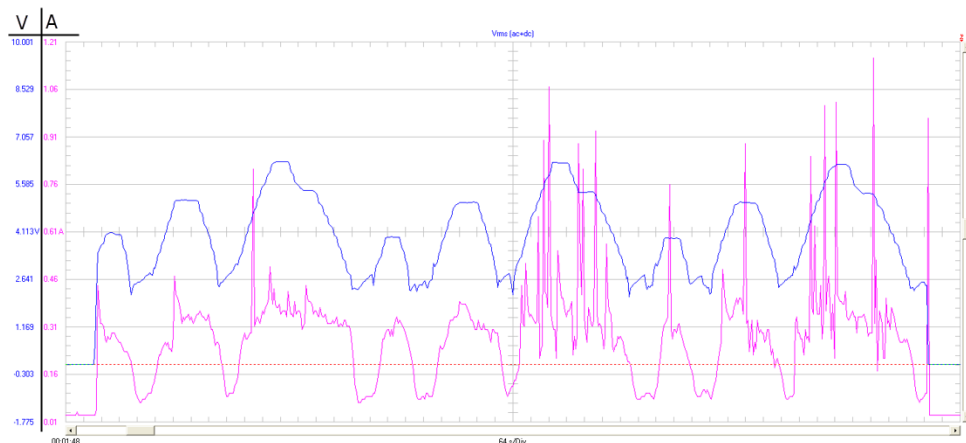


Figura C.10. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD, cuando la señal de referencia es la primera parte del ciclo de manejo EU 91/441, que va de 0s a 600s.

En la figura C.11 se muestra la segunda parte del ciclo de manejo, que va de 600s a 1200s.

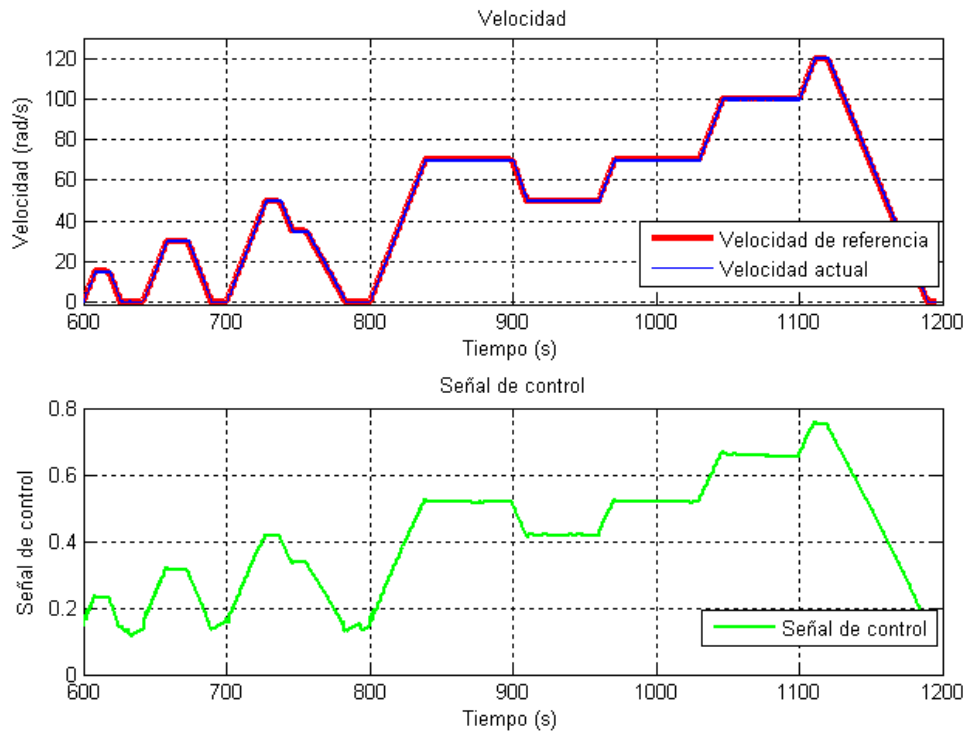


Figura C.11. Respuesta del control de velocidad PID cuando la señal de referencia es la segunda parte del ciclo de manejo EU 91/441, que va de 600s a 1200. a) Velocidad actual vs. velocidad de referencia, b) Señal de control.

Finalmente en la figura C.12 se muestra el consumo de corriente y de voltaje por parte del motor de CD en la segunda parte del ciclo de manejo, que va de 600s a 1200s.

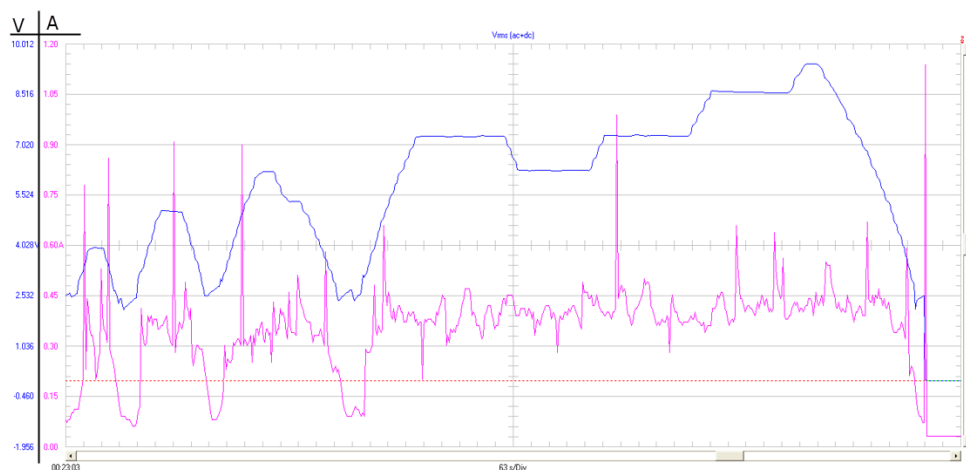


Figura C.12. Consumo de corriente y voltaje (obtenido con el sistema Fluke 43B) del motor de CD, cuando la señal de referencia es la segunda parte del ciclo de manejo EU 91/441, que va de 600s 1200s.

Finalmente de esta subsección se concluye que en el momento que comienza a crecer

la velocidad de referencia del motor de CD, éste demandará más corriente mientras que el voltaje comienza a aumentar a medida que crece la velocidad de referencia, después que el motor vence la inercia, la corriente consumida será mucho menor.

Apéndice D

Construcción del arreglo FV reconfigurable

En este apéndice se muestra el proceso de construcción del arreglo FV que se montó sobre las alas de un VANT de ala fija de tipo planeador. Este arreglo se va a reconfigurar con la matriz de transistores MOSFET que también se muestra en éste apéndice.

D.1. Construcción del arreglo FV

Considerando que el área necesaria para cada una de las celdas del VANT es de 13.75cm^2 , celdas FV de $15.5 \times 15.5\text{cm}^2$ son divididas con un cortador que se construyó con esta finalidad. En especial este cortador cuenta con una base movable donde es colocada la celda a ser cortada, el operador tiene que ir moviendo esta base en dirección a un disco de diamante que está girando, éste gira en una base que está fija a la estructura de la máquina. La calidad de los cortes será de acuerdo al movimiento constante de la base que sujeta a la celda FV primaria. En la figura D.1 se muestra el proceso que se siguió para la construcción de cada submódulo del arreglo, primeramente celdas de $15.5 \times 15.5\text{cm}^2$ fueron divididas, luego cada 4 celdas se soldaron en serie para formar todos los submódulos del arreglo FV.

Una vez ya soldados cada uno de los submódulos, éstos fueron colocados entre la estructura de las dos alas, en el espacio indicado por el fabricante del VANT para que éste no perdiera su aerodinámica. Los submódulos se soldaron de acuerdo al diagrama de la figura 5.3 para formar los cuatro módulos que se estarán reconfigurando, también fueron soldados los diodos de desviación en antiparalelo a cada uno de los submódulos como se puede apreciar en la figura D.2. En las alas se puede notar que el arreglo FV tiene 18 submódulos, pero dos de ellos tendrán otra finalidad, con esto se da a entender que el arreglo FV que se estará reconfigurando va a estar formado por 16 submódulos.

Finalmente, las alas del VANT con el arreglo FV fueron protegidas con un material

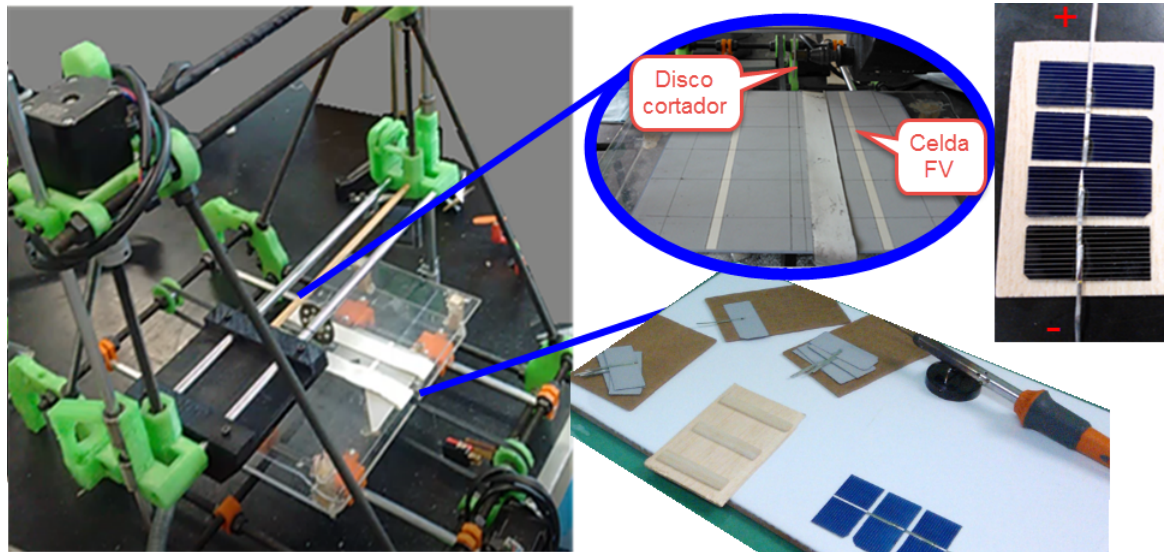


Figura D.1. Proceso de construcción de los submódulos que formarán parte del arreglo FV.



Figura D.2. Montaje de los submódulos en las alas del VANT, para formar los módulos FV que se estarán reconfigurando.

transparente figura D.3, para que el arreglo FV no disminuya su potencia producida y también para que el VANT no pierda su aerodinámica, en la figura D.4 se muestra el VANT con el arreglo FV que se va a reconfigurar.

Para poder realizar pruebas de la reconfiguración del arreglo FV del VANT sin que éste se dañe por un mal movimiento, se construyó un segundo arreglo FV con las mismas dimensiones. En la figura D.5 se muestra el segundo arreglo FV construido.



Figura D.3. Alas del VANT terminadas, con el arreglo FV montado sobre éstas.

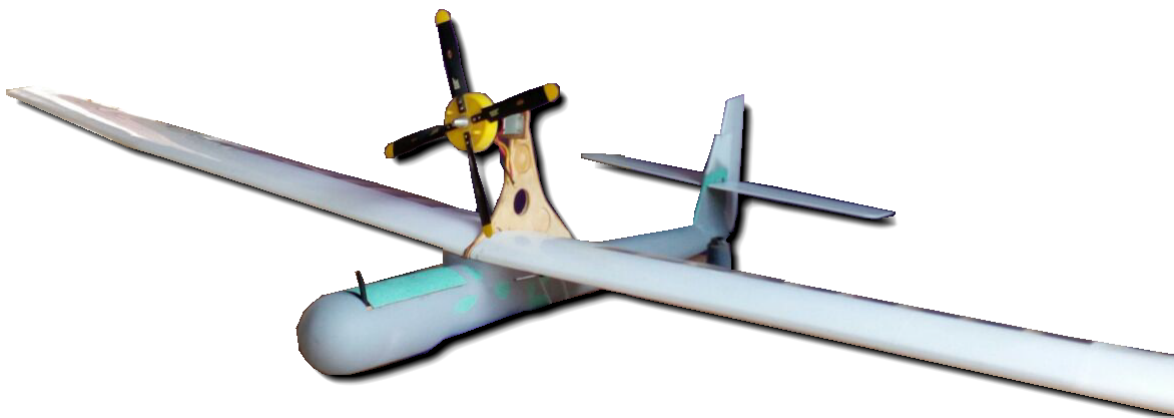


Figura D.4. Vehículo aéreo no tripulado de ala fija con el arreglo FV que se estará reconfigurando.



Figura D.5. Segundo arreglo FV construido para evaluar el comportamiento de la reconfiguración del arreglo que fue montado en el VANT.

D.2. Conexión de la matriz de transistores con el arreglo FV

En esta sección se explica con detalle la conexión de la matriz de transistores MOSFET con el arreglo FV construido. En la figura D.6 se muestra la forma de conexión los tres drivers que habilitarán los transistores S1 a S3, las compuertas de estos transistores estarán conectadas a las salidas altas *HO* de sus respectivos drivers, las terminales *Source* de cada transistor van a ser conectadas respectivamente a las terminales negativas de los módulos

MF1 a MFV3 y a las terminales V_S de sus respectivos drivers, las terminales *Drain* van a ser conectadas respectivamente a los diodos que conectan con las terminales positivas de los módulos MFV2 a MFV4.

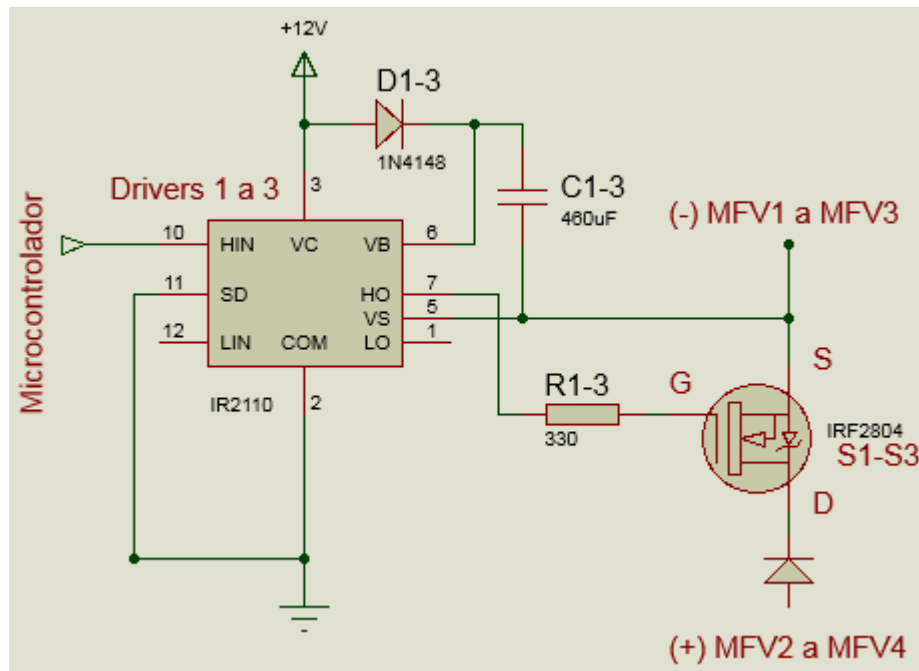


Figura D.6. Modo de conexión de los GETDRIVERS que habilitarán los interruptores S1 a S3.

Para habilitar los transistores S4 a S6 también se utiliza la parte alta *HO* de sus respectivos drivers, en la figura D.7 se muestra como las partes altas de los drivers habilitan los transistores S1 a S6, todas las terminales *Source* de S4 a S6 estarán conectadas a la parte positiva de todo arreglo FV y a las terminales V_S de sus respectivos drivers, las terminales *Drain* de los transistores estarán conectadas respectivamente con los diodos que conectan con los módulos MFV2 a MFV4.

La habilitación de los transistores s7 a S9 también se hará mediante los drivers seleccionados (figura D.8), pero en este caso los transistores van a ser habilitados por la parte baja *LO* de los drivers, las terminales *Source* de cada transistor únicamente se conectarán respectivamente con las terminales negativas de los módulos MFV1 a MFV4, las terminales *Drain* se conectarán respectivamente con los diodos que conectan a la terminal negativa de todo el arreglo FV.

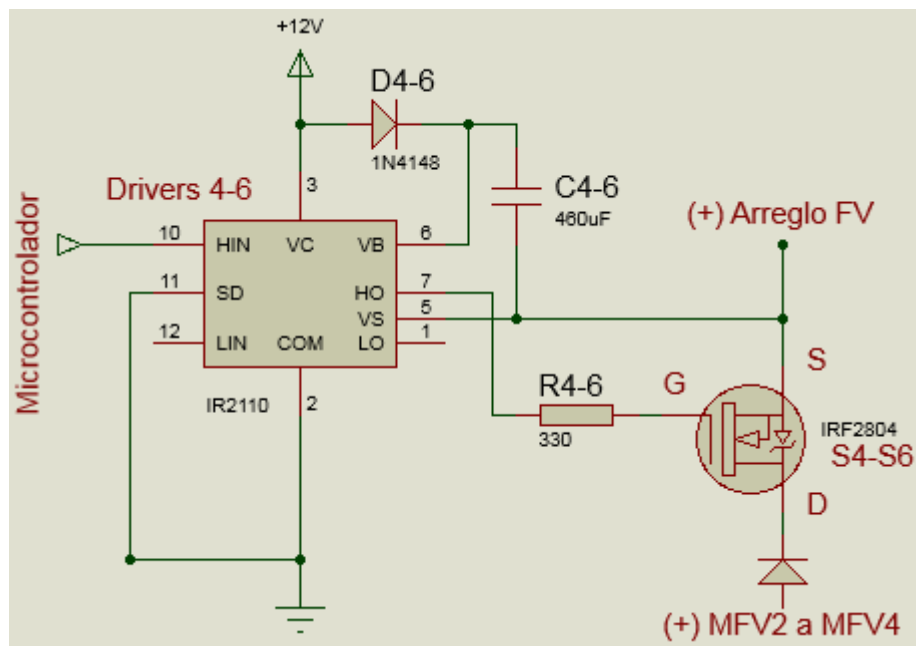


Figura D.7. Modo de conexión de los GETDRIVERS que habilitarán los interruptores S4 a S6.

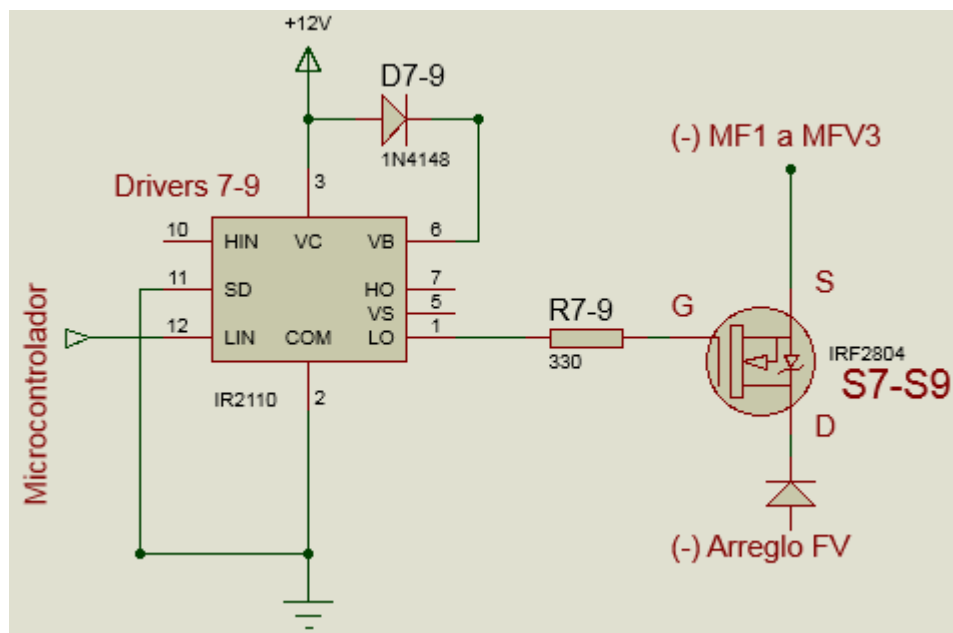


Figura D.8. Modo de conexión de los GETDRIVERS que habilitarán los interruptores S7 a S9.

Apéndice E

Constancias de artículos publicados

En este apéndice se muestran las constancias de los artículos presentados en congresos, a lo largo del desarrollo de ésta tesis. Las constancias se encuentran ordenadas en orden cronológico.



Este documento certifica que

**CRISTIAN GRANO ROMERO, MOISES GARCÍA JUÁREZ Y JOSÉ
FERMI GUERRERO CASTELLANOS**

presentaron el trabajo:

**“Configuración de celdas fotovoltaicas para un vehículo aéreo no
tripulado (VANT) de ala fija.”**

en Exposición Oral en el

3er. Coloquio de Energía:

**Uso Actual de la Energía y Energías Renovables,
Seminario Regional ICTP-UNACH-UNESCO Sesión Energía,
que se realizó en la Biblioteca Central de la Universidad Autónoma
de Chiapas, Campus I, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.**

Del 1 al 4 de septiembre de 2015.

Dr. Arnulfo Zepeda Domínguez
Coordinador General del MCTP



Dr. Gerardo Ruiz Chavarría
Comité Organizador

Estudio de estrategias de control PI disparado por eventos para sistemas basados en red *

M. García Juárez *, J. F. Guerrero Castellanos **,
C. Grano Romero, R.C. Ambrosio Lázaro,
J. Castañeda Camacho

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE-BUAP)*

* e-mail: chamoy12@hotmail.com

** e-mail: fguerrero@ece.buap.mx.

Resumen: A diferencia de las técnicas de control comúnmente usadas, donde se considera que la ley de control es calculada y actualizada de manera periódica, ya sea bajo un enfoque de diseño en tiempo continuo o en tiempo discreto, en el control disparado por eventos, la ley de control se calcula y la señal de control se envía a los actuadores “solamente” cuando un evento ocurre. Esta característica es de gran beneficio en sistemas de control donde el lazo de retroalimentación se cierra mediante una red de comunicaciones, ya que permite reducir el tráfico de datos en la red de comunicación sin sacrificar el desempeño del sistema en lazo cerrado. El presente trabajo presenta un estudio y análisis de un conjunto de técnicas de control PI disparado por eventos propuestas por (Durand., (2011)). A diferencia del trabajo citado, aquí se analizan tales técnicas en un sistema de control retroalimentado por una red CAN-BUS. Cada estrategia se evalúa en simulación utilizando el toolbox TrueTime, el cual es un simulador basado en MATLAB/Simulink para sistemas de control embebidos y en red. Cada estrategia de control PI disparado por eventos es evaluada y comparada con una estrategia de control diseñada en tiempo continuo (control disparado por tiempo). En cada estrategia se comprueba la robustez ante perturbaciones en la red y perturbaciones en el sistema controlado, así como el número de mensajes enviados a través de la red. Los resultados muestran la eficiencia de las estrategias de control PI disparado por eventos y su gran ventaja en la implementación de éstas respecto al control basado en tiempo, para el control de sistemas distribuidos y basados en red.

Keywords: Control disparado por eventos, sistemas de control basados en red, Estudio comparativo, Red CAN-BUS, anti win-dup.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el interés y la investigación de técnicas de control automático utilizando muestreo asíncrono han aumentado considerablemente. La razón es una consecuencia directa del impacto de las redes inalámbricas de sensores (Wireless Sensor Networks (WSN)) y Sistemas de Control Basados en Red (SCBR o NCS del inglés Networked Control Systems). Los SCBR son sistemas de control en los cuales el lazo de control se cierra a través de una red en tiempo real. Las ventajas de este tipo de sistemas son principalmente la arquitectura flexible y la reducción de costo en instalación y mantenimiento.

Los SCBR son aplicados en un rango muy amplio de sistemas, tales como redes de sensores móviles, cirugía

remota, sistemas de automatización de autopistas y en vehículos aéreos no tripulados (Tipsuwan et al., (2003)), (Hespanha et al., (2007)), (Yang., (2006)).

Las principales desventajas de los SCBR son los efectos de la red, los cuales influyen en el desempeño y estabilidad del lazo de control. Tales efectos son los retardos y la pérdida de paquetes de información los cuales producen una pérdida de sincronización entre el control principal y los diferentes agentes o nodos. En esta situación se han propuesto diferentes estrategias de control basado en eventos, donde el intercambio de la información conjuntamente con los demás agentes se realiza sólo cuando se produce un evento y no por el paso del tiempo, como lo marcaría la teoría de control en tiempo continuo o digital (Åström et al., (2008)).

Las estrategias de control basado en eventos utilizando una estructura PI y PID han sido abordadas desde hace más de una década. En la primera estrategia de control basada en eventos propuesta en (Årzén., (1999)) y posteriormente retomada en (Dormido et al., (2008)), se propone una

* Este trabajo fue apoyado por la Vicerrectoría de Investigación y estudios de posgrado, bajo el proyecto GUCJ-ING15-1. El trabajo fue desarrollado en el laboratorio de control de sistemas ciber-físicos de la FCE-BUAP. De manera especial se agradece al Dr. S. Durand por sus valiosos comentarios y consejos durante la elaboración de este trabajo.

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

CONGRESO NACIONAL
DE CONTROL AUTOMÁTICO
ASOCIACIÓN DE MÉXICO DE CONTROL AUTOMÁTICO
2015
CUERNAVACA
MORELOS



del 14 al 16 de octubre de 2015

CERTIFICADO DE PARTICIPACIÓN

El presente certifica la participación de

García, Moisés; Guerrero-Castellanos, J. Fermi; Grano Romero, Cristian; Ambrosio Lázaro, Roberto Carlos; Castañeda Camacho, Josefina;

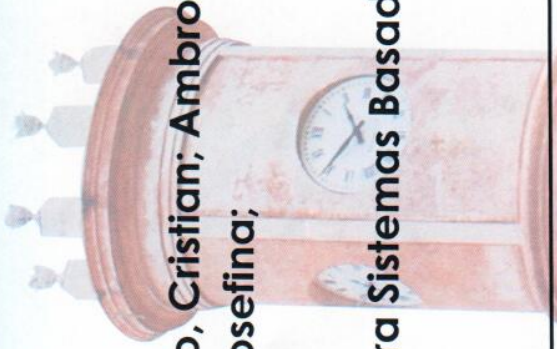
por su presentación oral del artículo

Estudio De Estrategias De Control PI Disparado Por Eventos Para Sistemas Basados En Red

En el congreso nacional de control automático, celebrado Del 14 al 16 de octubre de 2015, en Cuernavaca, Morelos.

A blue ink signature of Carlos M. Astorga Zaragoza, written in a cursive style.

Carlos M. Astorga Zaragoza
Presidente del Congreso



A blue ink signature of Gerardo V. Guerrero Ramirez, written in a cursive style.

Gerardo V. Guerrero Ramirez
Presidente del AMCA

Modeling and Simulation of a Photovoltaic Array for a fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle

Moisés García¹, Cristian Grano¹, J. Fermi Guerrero¹, Roberto C. Ambrosio¹, Mario Moreno², W. Fermín Guerrero¹, Gerardo Mino¹, and Victor R. González¹

¹Meritorious Autonomous University of Puebla, Puebla, Mexico, 72570

²National Institute for Astrophysics Optics and Electronics, Puebla, Mexico, 7200

Abstract—Nowadays the unmanned aerial vehicles (UAV) have received attention as a tool for the human and military applications, such as monitoring, surveillance and also in the development of sensors networks. Therefore, some of the critical tasks of UAVs are: planning, control and autonomy. Regarding the autonomy, it is limited for the durability and lifetime of battery. In this way, the solar energy plays an important role for the unmanned vehicles in order to provide the enough power. This work presents the modeling and simulation of photovoltaic (PV) array for application in unmanned aerial vehicle to supply the energy of the UAV avionics. The model was developed in MATLAB/Simulink for 3 Watts of photovoltaic array. It is based on mathematical equations taking into account the equivalent circuit. The simulation allows determining the performance of PV array under different values of solar radiation and temperature. The model was validated and compared with experimental data and it presented an error of 11%.

Index Terms—Simulation in MATLAB/SIMULINK, Modeling Validation, Avionics, solar array.

I. INTRODUCTION

Currently, unmanned aerial vehicles (UAVs) have gained much attention due to the applications of inspection, surveillance and development of sensors networks among others [1]. In the development of UAVs, the fixed wing has been positioned to revolutionize aerial observation, commercial communication and military field [2]. However, the most challenging for autonomy and endurance in an UAV is referent to the power source. Batteries and fuel are two common power sources for this aircraft, however these present a big challenge since they do not provide the enough capacity for large time of flight. Using solar energy as an alternative power source is possible to increase the endurance and continuous flight. Thus, solar energy is captured through PV arrays and it is used to propel the aircraft or it can be stored and used when the solar conditions are non optimal [3]. Therefore to address the issues mentioned, the goal is to obtain the necessary power to flight and to provide autonomy tasks for fixed wing UAV. In order to implement the UAV prototype and its electronic control and energy management circuits, a complete flight simulation environment of the solar UAV is developed currently for the control systems group and renewable energy group at Meritorious Autonomous University of Puebla (BUAP) and National Institute for Astrophysics Optics and Electronics (INAOE). This simulator allows developing the algorithms for guidance and control combined with the energy

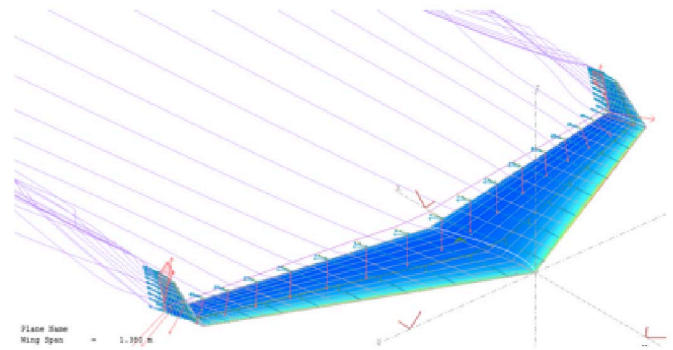


Fig. 1. XLR5 simulation of a Delta-wing unmanned aerial vehicle.

management system (see Fig. 1). Actually, it is composed by three main modules: kinematic and dynamic, guidance and control, propulsion and energy management system.

The main objective is to investigate how the environmental conditions and power requirements impact in the performance of the aircraft. In addition, this study will be essential in order to determine the requirement of DC-DC converters, Maximum Power Point tracking (MPPT) algorithms, which allow to implement the electronic systems for the energy management.

This work is focused in the modeling and simulation of a photovoltaic array with a total power of 3W, using the combination of 11 solar cells. The model was developed in MATLAB/Simulink and compared with simelectronics Toolbox. The output parameters are the current-voltage (I-V) and power-voltage (P-V) characteristics under variations of environmental parameters such as temperature and irradiance. Also, we taking account the effects of resistor R_S in the modeling. The developed model was validated experimentally using the photovoltaic array built with mono-crystalline silicon solar cells with dimensions of $7.7 \times 2.9 \text{ cm}^2$ solar cells. The experimental results obtained, exhibited a good agreement with the simulated data. Thus the model developed here is a powerful tool to determine the performance of the photovoltaic array for the energy system of the UAV.

The paper is structured as follows: the modeling of PV arrays is given in section II. Then, in section III the development

CERTIFICATE
of POSTER PRESENTATION

This certifies that:
MOISÉS, GARCÍA

Has attended and presented the poster titled, "Modeling and Simulation of a Photovoltaic Array for a fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle", at the
43RD IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE
At the Oregon Convention Center, Portland, Oregon June 5-10, 2016

June 10, 2016

DATE



ADAM KOHM, PHD
PVSC ORGANIZER

Modeling and Control of a fixed-wing UAV powered by solar energy: an electric array reconfiguration approach

C. Grano-Romero*, M. García-Juárez*, J.F. Guerrero-Castellanos*,
W.F. Guerrero-Sánchez†, R.C. Ambrosio-Lázaro*, G. Mino-Aguilar*

*Autonomous University of Puebla (BUAP), Faculty of Electronics, Puebla, Mexico

† Autonomous University of Puebla (BUAP), Faculty of Physic and Mathematics, Puebla, Mexico,

Email: cristian.grano.romero@gmail.com

Abstract—In this paper the mathematical model of a fixed-wing UAV powered by solar energy is presented, the aim is to show the performance of a longitudinal control for this UAV, using successive loop closure. Also is presented a methodology for a photovoltaic (PV) array reconfiguration allowing the load to be matched and delivering the maximum power. The system model the longitudinal controller together with the PV reconfiguration methodology is validated using numerical simulations.

I. INTRODUCTION

In recent years the use of mini Unmanned Aerial Vehicles (UAV) has been increased for applications on urban surveillance, traffic monitoring, border surveillance, digital mapping, forest fire detection and rescue missions. The most used mini UAV is currently the rotary wing since it has greater stability and can perform maneuvers that require precision on the air, however for applications where it is required that the UAVs cover greater distances it does not works well, in those cases fixed-wing aircrafts are prefer for their aerodynamic efficiency. The flight time in the fixed-aircrafts depends on the capacity of their source of energy, but this time is not always enough to accomplish their tasks, a solution for this problem is to use solar cells in order to increase the flight time.

The most common structure in solar aircrafts is the use of a photovoltaic panel, a maximum power point tracker (MPPT) and a battery bank as is shown in [1] and [2]. This structure is very useful when we have a big area and a large payload. In [3] and [4], is presented a reconfigurable photovoltaic panel, the aim is attend the variable energy demanded for the charge, for example in an electric car there are current peaks when the motor starts, or each time the motor reduce its velocity. The same behavior can be observed in UAVs during a track path, each time the vehicle arrives at a desired point the velocity is reduced and more current is needed to achieve the velocity wanted. In this paper is presented a longitudinal controller based on transfer functions, and also a methodology of photovoltaic array reconfiguration to provide electric energy to the UAV.

The paper is organized as follow, in section II are given some mathematical preliminaries about the model of a Fixed-Wing UAV, a description of its propulsion system and a mathematical model of a PV. In section III is explained the concept of PV reconfigurable for loading request. In section IV are presented the equations to develop a longitudinal control. In section V is presented the idea of the PV reconfigurable and also is described the solar cell used in the simulations. In section VI are presented results about the behavior of the PV reconfigurable during the take-off zone, climb zone and the altitude hold zone and finally are given some conclusions of the work.

II. MATHEMATICAL PRELIMINARIES

A. Mathematical model of a Fixed-Wing UAV

The representation of a Fixed-Wing UAV, which have six degrees of freedom and only two control surfaces, are shown in Fig. 1. In an aircraft we have three control surfaces know as timon (δ_r), aileron (δ_a) and elevator (δ_e) in the case of a delta-wing the aileron and elevator are combined and called elevons (δ_{er} and δ_{el}). Generally the fix-wing aircrafts only have one propulsion motor δ_t .

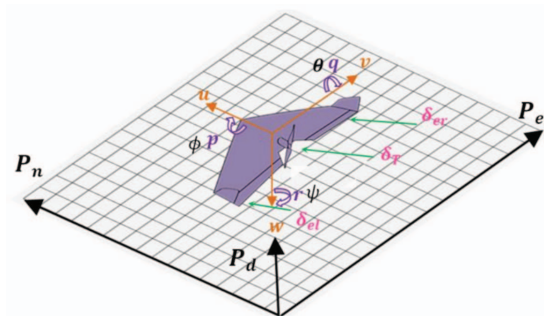


Fig. 1. Position of Delta-Wing UAV over the inertial frame.

B. The Flat-Earth Equations

The equations for modeling a fixed-wing are divided into kinematic and dynamic equations. The kinematics equations



Certificate of Presentation

This is to certify that

CRISTIAN GRANO ROMERO

Has presented the paper entitled:

**MODELING AND CONTROL OF A FIXED-WING UAV
POWERED BY SOLAR ENERGY: ELECTRICAL ARRAY
RECONFIGURATION APPROACH**

in the 13th International Conference on Power
Electronics, CIEP 2016, June 20 - 23, 2016 at
Guanajuato, Mexico.

A blue ink handwritten signature, appearing to read 'Gerardo Vazquez Guzman', is written over a large, stylized blue scribble.

General Chair

Dr. Gerardo Vazquez Guzman

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

13th International Conference on Power Electronics, CIEP 2016





XL Semana Nacional de
Energía Solar 2016
17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO
¡OH TIERRA DEL SOL!
"Transición Energética para el Desarrollo Sustentable"



DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN ARREGLO FOTOVOLTAICO RECONFIGURABLE PARA SUMINISTRAR ENERGÍA A UN SISTEMA DE TRACCIÓN

Moisés García Juárez, Cristian Grano Romero, José F. Guerrero Castellanos, Roberto C. Ambrosio Lázaro, Wuiyevaldo F. Guerrero Sánchez, Gerardo Mino Aguilar, Victor Rodolfo González Díaz

Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 4 Sur No. 104, Puebla, Puebla, 72000, México, +52(222)2295500, moises.garciaj@alumno.buap.mx.

Mario Moreno Moreno

Microelectrónica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Luis Enrique Erro No.1, Santa María Tonantzintla, Puebla, 72840, México, 2474306, mmoreno@inaoep.mx.

RESUMEN

El presente artículo presenta el modelado y la simulación utilizando MATLAB/SIMULINK de un arreglo fotovoltaico reconfigurable junto con un sistema de tracción eléctrico. El sistema de tracción está compuesto de un motor de CD y una carga mecánica. La reconfiguración de éste arreglo es llevada a cabo para satisfacer la corriente y el voltaje necesarios para el sistema de tracción [1]. La reconfiguración está basada en los siguientes principios:

1. Configuración Paralelo, suple mucha corriente y bajo voltaje, ésta es apropiada para los movimientos iniciales.
2. Configuración Serie-Paralelo, provee una corriente y un voltaje moderados, ésta es apropiada para una baja aceleración.
3. Configuración Serie, suple baja corriente pero un alto voltaje, ésta es apropiada para mantener una velocidad constante.

Los resultados de simulación muestran que la estrategia propuesta cumple con los requerimientos de potencia para que el sistema de tracción alcance determinado perfil de velocidad.

ABSTRACT

This paper presents the modeling and simulation using MATLAB/Simulink of a photovoltaic reconfigurable array together with an electrical traction system. The traction system is composed of a DC motor and mechanical load. The reconfiguration of this array is carried out to meet the current and voltages needs to the traction system [1]. This reconfiguration is based on the following principles:

1. Parallel type provides much current and low voltage, then appropriate to initial movements.
2. Parallel- Series provides moderate current and voltage, then appropriate to small accelerations.
3. Series type provides low current but high voltage, then appropriate to maintain a constant speed.

Simulation results shown that the proposed strategy meets the power requirements and profile velocity for the traction system is reached.

Palabras claves: Arreglo fotovoltaico reconfigurable, espacio de estados, picos de corriente, SimElectronics, velocidad de respuesta.

INTRODUCCIÓN

Las energías más rentables en la república Mexicana actualmente son: la hidráulica y la eólica, pero la solar tiene mucho más potencial, por ejemplo con el 1% de la radiación solar que recibe el estado de Sonora se podría abastecer la demanda eléctrica de todo el país que asciende a 234, 219 GWh al año, de acuerdo con las cifras del Sector Eléctrico 2013-2027, realizado por el SENER (Secretaría de energía) [2], por esta razón es importante enfocar las distintas áreas de investigación de la República Mexicana en buscar aumentar la eficiencia de los generadores fotovoltaicos. A nivel mundial, el control de los generadores fotovoltaicos se está utilizando para lograr aumentar la eficiencia de éstos [1].

Uno de los problemas más drásticos de los generadores fotovoltaicos es el efecto que tiene el sombreado parcial, debido a que la corriente eléctrica proporcionada por un grupo de celdas conectadas en serie es igual a la corriente de la celda que se encuentra bajo el grado más alto de sombreado, porque la corriente es la misma en un circuito en serie; la celda con el grado más alto de sombreado también es llamada punto caliente, porque a la vez se comporta como una resistencia. La forma más sencilla para reducir este efecto es conectar un diodo en anti-paralelo a un grupo de celdas conectadas en serie o en los mejores casos un diodo en anti-paralelo por cada celda, por este diodo será desviada la corriente en vez de pasar por las celdas que están sombreadas, pero entre mayor sea la cantidad de diodos conectados anti-paralelo se tendrán diferentes puntos de máxima potencia (PMP) en un el arreglo fotovoltaico completo. Para mejorar el rendimiento de los generadores fotovoltaicos se están utilizando los sistemas seguidores del punto de máxima potencia (SPMP) del acrónimo en inglés (MPPT: *Maximum Power Point Tracking*), que se encargan de que el generador fotovoltaico suministre su máxima potencia. Diversas técnicas de



XL Semana Nacional de Energía Solar 2016

17 AL 21 DE OCTUBRE
CENTRO EXPOSITOR PUEBLA, MÉXICO

¡OH TIERRA DEL SOL!

“Transición Energética para el Desarrollo Sustentable”



Otorgan la presente

CONSTANCIA

a:

Moisés García Juárez

POR SU VALIOSA PARTICIPACIÓN CON EL ARTICULO:

Diseño Y Simulación De Un Arreglo Fotovoltaico Reconfigurable Para Suministrar Energía A Un Sistema De Tracción

M. en I. Alberto Valdes Palacios
Presidente XVIII Consejo Directivo ANES

Apéndice F

Estancia de investigación

Sta. Maria Tonantzintla, Pue., 15 de Febrero del 2016



Asunto: Carta de aceptación de estancia primavera 2016

Dr. Gerardo Mino Aguilar
Secretario de Investigación y Estudios de Posgrado
Facultad de Ciencias de la Electrónica
BUAP
P r e s e n t e.

Por medio de la presente me permito comunicarle que el **C. Moisés García Juárez** con matrícula: **214470654** del programa de posgrado: Maestría en Ingeniería Electrónica, opción instrumentación electrónica, de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla ha sido aceptado para realizar una estancia de investigación bajo mi tutela en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. La estancia estará enfocada a su tema titulado: Reconfiguración dinámica de arreglos fotovoltaicos: aplicación a un vehículo aéreo no tripulado; y se desarrollará del 1 de Abril del 2016 al 30 de Junio del 2016, cubriendo un total de 40 horas semanales. Dándole las facilidades y apoyo para que realice su investigación y actividad académica.

Sin más por el momento me despido enviándole un cordial saludo.

Dr. Mario Moreno Moreno

Investigador titular A

INAOE

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Calle Luis Enrique Erro No.1 Santa María Tonantzintla, Puebla-México C.P. 72840 Conmutador 266 31 00

Dirección General Tel: 247 20 44 Fax 247 25 80

Dirección de Administración y Finanzas Tel: 247 43 21 Fax 247 01 81

Dirección de Formación Académica Tel: 247 27 42

Dirección de Investigación Tel: 247 43 06

Dirección de Desarrollo Tecnológico Tel: 247 43 14

Coordinación Astrofísica Tel: 247 22 31

Coordinación Óptica Tel: 247 29 40

Coordinación Electrónica Tel: 247 05 17

Coordinación Cs. Computacionales Tel: 266 31 00 Ext. 8302



Santa María Tonantzintla, Puebla a 04 de julio de 2016.
Asunto: Carta de Liberación.

M.C. RODRIGO LUCIO MAYA RAMÍREZ
Coordinador de la Maestría en Ingeniería
Electrónica opción Instrumentación Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Presente.

Estimado M.C. Maya,

Por este medio me permito comunicarle que el **C. García Juárez Moisés**, con número de matrícula 214470654 de la carrera de Maestría en Ingeniería Electrónica opción Instrumentación Electrónica, ha finalizado su Estancia bajo la dirección del Dr. Mario Moreno Moreno, Investigador de la Coordinación de Electrónica de este Instituto, en el proyecto "Reconfiguración dinámica de arreglos fotovoltaicos: aplicación a un vehículo aéreo no tripulado".

La colaboración deberá realizarla en el periodo comprendido del 01 de abril de 2016 al 30 de junio de 2016 cubriendo un total de 480 horas

Sin otro particular por el momento, hago propicia la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente,

Mtra. Yenni María Carpinteyro Tlapanco
Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Dirección de Formación Académica

YMCT**lcrm

Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica

Luis Enrique Erro No. 1 Santa María Tonantzintla, Puebla C.P. 72840 Apartado Postal 51 y 216 Puebla C.P. 72000 Conmutador 266-31-00

Dirección General Tel. 247 40 44 Fax. 247 25 80
Dirección de Investigación Tel. 247 43 06

Dirección de Administración y Finanzas Tel. 247 43 21 Fax. 247 01 81
Dirección de Desarrollo Tecnológico Tel. 247 43 14

Coordinación Astrofísica Tel. 247 22 31
Coordinación Óptica Tel. 247 29 40

Coordinación Electrónica Tel. 247 05 17
Dirección de Formación Académica Tel. 247 27 42

Apéndice G

Hojas de especificaciones de dispositivos electrónicos utilizados

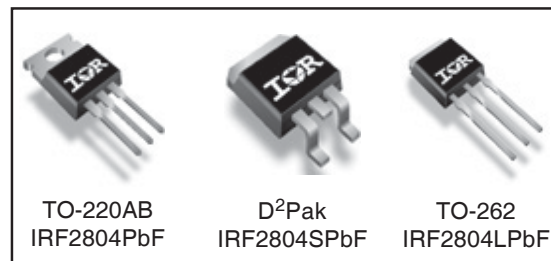
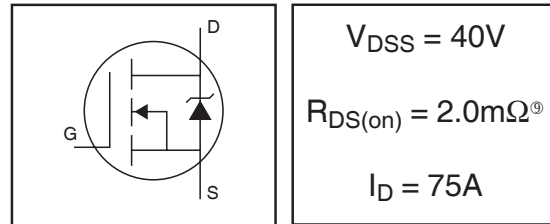
IRF2804PbF
IRF2804SPbF
IRF2804LPbF
HEXFET® Power MOSFET

Features

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Repetitive Avalanche Allowed up to Tjmax
- Lead-Free

Description

This HEXFET® Power MOSFET utilizes the latest processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. Additional features of this design are a 175°C junction operating temperature, fast switching speed and improved repetitive avalanche rating. These features combine to make this design an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of other applications.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^{\circ}C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ (Silicon Limited)	270	A
$I_D @ T_C = 100^{\circ}C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ (See Fig. 9)	190	
$I_D @ T_C = 25^{\circ}C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$ (Package Limited)	75	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	1080	
$P_D @ T_C = 25^{\circ}C$	Maximum Power Dissipation	300	W
	Linear Derating Factor	2.0	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy (Thermally Limited) ②	540	mJ
$E_{AS} (tested)$	Single Pulse Avalanche Energy Tested Value ②	1160	
I_{AR}	Avalanche Current ①	See Fig.12a,12b,15,16	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ③		mJ
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.50④	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient (PCB Mount, steady state)⑤	—	40	

HEXFET® is a registered trademark of International Rectifier.
www.irf.com

IRF2804/S/LPbF

International
IR Rectifier

Static @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V _{(BR)DSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	40	—	—	V	V _{GS} = 0V, I _D = 250μA
ΔBV _{DSS} /ΔT _J	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.031	—	V/°C	Reference to 25°C, I _D = 1mA
R _{DS(on)} SMD	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	1.5	2.0	mΩ	V _{GS} = 10V, I _D = 75A ④
R _{DS(on)} TO-220	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	1.8	2.3		V _{GS} = 10V, I _D = 75A ④
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} = V _{GS} , I _D = 250μA
g _{fs}	Forward Transconductance	130	—	—	S	V _{DS} = 10V, I _D = 75A
I _{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	20	μA	V _{DS} = 40V, V _{GS} = 0V
		—	—	250		V _{DS} = 40V, V _{GS} = 0V, T _J = 125°C
I _{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	200	nA	V _{GS} = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-200		V _{GS} = -20V
Q _g	Total Gate Charge	—	160	240	nC	I _D = 75A
Q _{gs}	Gate-to-Source Charge	—	41	62		V _{DS} = 32V
Q _{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	66	99		V _{GS} = 10V ④
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	13	—	ns	V _{DD} = 20V
t _r	Rise Time	—	120	—		I _D = 75A
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	130	—		R _G = 2.5Ω
t _f	Fall Time	—	130	—		V _{GS} = 10V ④
L _D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L _S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C _{iss}	Input Capacitance	—	6450	—	pF	V _{GS} = 0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	1690	—		V _{DS} = 25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	840	—		f = 1.0MHz, See Fig. 5
C _{oss}	Output Capacitance	—	5350	—		V _{GS} = 0V, V _{DS} = 1.0V, f = 1.0MHz
C _{oss}	Output Capacitance	—	1520	—		V _{GS} = 0V, V _{DS} = 32V, f = 1.0MHz
C _{oss eff.}	Effective Output Capacitance	—	2210	—		V _{GS} = 0V, V _{DS} = 0V to 32V

Diode Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I _S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	270	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I _{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	1080		
V _{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	T _J = 25°C, I _S = 75A, V _{GS} = 0V ④
t _{rr}	Reverse Recovery Time	—	56	84	ns	T _J = 25°C, I _F = 75A, V _{DD} = 20V
Q _{rr}	Reverse Recovery Charge	—	67	100	nC	di/dt = 100A/μs ④
t _{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by LS+LD)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11).
- ② Limited by T_{Jmax}, starting T_J = 25°C, L=0.24mH, R_G = 25Ω, I_{AS} = 75A, V_{GS} = 10V. Part not recommended for use above this value.
- ③ I_{SD} ≤ 75A, di/dt ≤ 220A/μs, V_{DD} ≤ V_{(BR)DSS}, T_J ≤ 175°C.
- ④ Pulse width ≤ 1.0ms; duty cycle ≤ 2%.
- ⑤ C_{oss eff.} is a fixed capacitance that gives the same charging time as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DSS}.
- ⑥ Limited by T_{Jmax}, see Fig.12a, 12b, 15, 16 for typical repetitive avalanche performance.
- ⑦ This value determined from sample failure population. 100% tested to this value in production.
- ⑧ This is applied to D²Pak, when mounted on 1" square PCB (FR-4 or G-10 Material). For recommended footprint and soldering techniques refer to application note #AN-994.
- ⑨ Max R_{DS(on)} for D²Pak and TO-262 (SMD) devices.
- ⑩ TO-220 device will have an R_{th} value of 0.45°C/W.



November 2014

1N4001 - 1N4007 General-Purpose Rectifiers

Features

- Low Forward Voltage Drop
- High Surge Current Capability



DO-41
COLOR BAND DENOTES CATHODE

Ordering Information

Part Number	Top Mark	Package	Packing Method
1N4001	1N4001	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4002	1N4002	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4003	1N4003	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4004	1N4004	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4005	1N4005	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4006	1N4006	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel
1N4007	1N4007	DO-204AL (DO-41)	Tape and Reel

Absolute Maximum Ratings

Stresses exceeding the absolute maximum ratings may damage the device. The device may not function or be operable above the recommended operating conditions and stressing the parts to these levels is not recommended. In addition, extended exposure to stresses above the recommended operating conditions may affect device reliability. The absolute maximum ratings are stress ratings only. Values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Value							Unit
		1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current .375 " Lead Length at $T_A = 75^\circ\text{C}$	1.0							A
I_{FSM}	Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave	30							A
I^2t	Rating for Fusing ($t < 8.3$ ms)	3.7							A^2sec
T_{STG}	Storage Temperature Range	-55 to +175							$^\circ\text{C}$
T_J	Operating Junction Temperature	-55 to +175							$^\circ\text{C}$

1N4001 - 1N4007 — General-Purpose Rectifiers

Thermal Characteristics

Values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Value	Unit
P_D	Power Dissipation	3.0	W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	50	$^\circ\text{C/W}$

Electrical Characteristics

Values are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

Symbol	Parameter	Conditions	Value	Unit
V_F	Forward Voltage	$I_F = 1.0\text{ A}$	1.1	V
I_{rr}	Maximum Full Load Reverse Current, Full Cycle	$T_A = 75^\circ\text{C}$	30	μA
I_R	Reverse Current at Rated V_R	$T_A = 25^\circ\text{C}$	5.0	μA
		$T_A = 100^\circ\text{C}$	50	
C_T	Total Capacitance	$V_R = 4.0\text{ V}, f = 1.0\text{ MHz}$	15	pF

IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
 Fully operational to +500V or +600V
 Tolerant to negative transient voltage
 dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
 Separate logic supply range from 3.3V to 20V
 Logic and power ground $\pm 5V$ offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

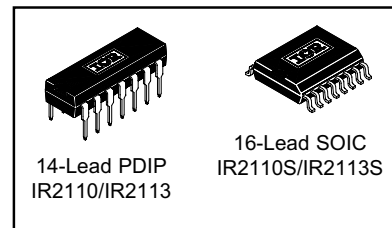
Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{O+/-}$	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

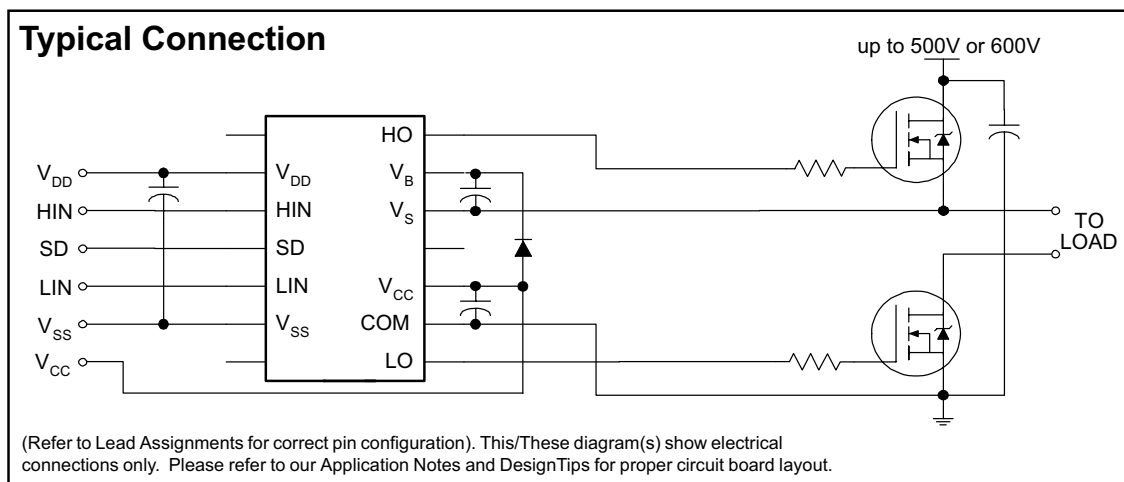
Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Packages



Typical Connection



IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V
	(IR2113)	-0.3	625	
V _S	High side floating supply offset voltage	V _B - 25	V _B + 0.3	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S - 0.3	V _B + 0.3	
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	-0.3	25	
V _{LO}	Low side output voltage	-0.3	V _{CC} + 0.3	
V _{DD}	Logic supply voltage	-0.3	V _{SS} + 25	
V _{SS}	Logic supply offset voltage	V _{CC} - 25	V _{CC} + 0.3	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS} - 0.3	V _{DD} + 0.3	
dV _S /dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50	
P _D	Package power dissipation @ T _A ≤ +25°C (14 lead DIP)	—	1.6	W
	(16 lead SOIC)	—	1.25	
R _{THJA}	Thermal resistance, junction to ambient (14 lead DIP)	—	75	°C/W
	(16 lead SOIC)	—	100	
T _J	Junction temperature	—	150	°C
T _S	Storage temperature	-55	150	
T _L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300	

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S and V_{SS} offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply absolute voltage	V _S + 10	V _S + 20	V
V _S	High side floating supply offset voltage (IR2110)	Note 1	500	
	(IR2113)	Note 1	600	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S	V _B	
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	10	20	
V _{LO}	Low side output voltage	0	V _{CC}	
V _{DD}	Logic supply voltage	V _{SS} + 3	V _{SS} + 20	
V _{SS}	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS}	V _{DD}	
T _A	Ambient temperature	-40	125	

Note 1: Logic operational for V_S of -4 to +500V. Logic state held for V_S of -4V to -V_{BS}. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When V_{DD} < 5V, the minimum V_{SS} offset is limited to -V_{DD}.

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, C_L = 1000 pF, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in Figure 3.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	7	—	120	150	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	8	—	94	125		$V_S = 500V/600V$
t_{sd}	Shutdown propagation delay	9	—	110	140		$V_S = 500V/600V$
t_r	Turn-on rise time	10	—	25	35		
t_f	Turn-off fall time	11	—	17	25		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	(IR2110)	—	—	—		10
		(IR2113)	—	—	—	20	

Static Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The V_{IN} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to V_{SS} and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage	12	9.5	—	—	V	
V_{IL}	Logic "0" input voltage	13	—	—	6.0		
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	14	—	—	1.2		$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	15	—	—	0.1		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	16	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 500V/600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	17	—	125	230		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	18	—	180	340		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QDD}	Quiescent V_{DD} supply current	19	—	15	30		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	20	—	20	40		$V_{IN} = V_{DD}$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	21	—	—	1.0	$V_{IN} = 0V$	
V_{BSUV+}	V_{BS} supply undervoltage positive going threshold	22	7.5	8.6	9.7	V	
V_{BSUV-}	V_{BS} supply undervoltage negative going threshold	23	7.0	8.2	9.4		
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	24	7.4	8.5	9.6		
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	25	7.0	8.2	9.4		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	26	2.0	2.5	—	A	$V_O = 0V$, $V_{IN} = V_{DD}$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—		$V_O = 15V$, $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

FEATURES

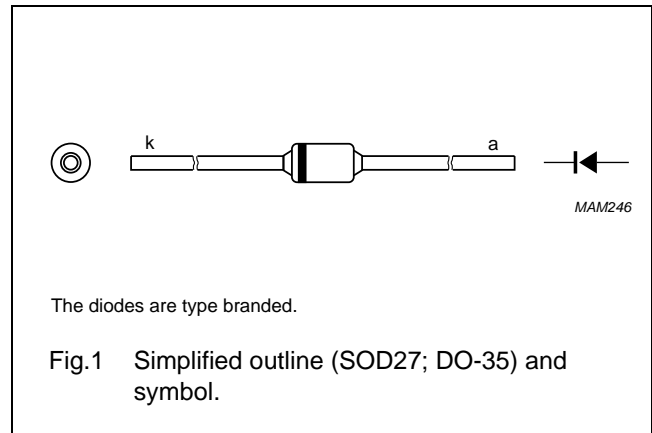
- Hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) package
- High switching speed: max. 4 ns
- General application
- Continuous reverse voltage: max. 100 V
- Repetitive peak reverse voltage: max. 100 V
- Repetitive peak forward current: max. 450 mA.

APPLICATIONS

- High-speed switching.

DESCRIPTION

The 1N4148 and 1N4448 are high-speed switching diodes fabricated in planar technology, and encapsulated in hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) packages.



MARKING

TYPE NUMBER	MARKING CODE
1N4148	1N4148PH or 4148PH
1N4448	1N4448

ORDERING INFORMATION

TYPE NUMBER	PACKAGE		
	NAME	DESCRIPTION	VERSION
1N4148	-	hermetically sealed glass package; axial leaded; 2 leads	SOD27
1N4448			

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 60134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{RRM}	repetitive peak reverse voltage		–	100	V
V_R	continuous reverse voltage		–	100	V
I_F	continuous forward current	see Fig.2; note 1	–	200	mA
I_{FRM}	repetitive peak forward current		–	450	mA
I_{FSM}	non-repetitive peak forward current	square wave; $T_j = 25\text{ °C}$ prior to surge; see Fig.4			
		$t = 1\ \mu\text{s}$	–	4	A
		$t = 1\ \text{ms}$	–	1	A
		$t = 1\ \text{s}$	–	0.5	A
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} = 25\text{ °C}$; note 1	–	500	mW
T_{stg}	storage temperature		–65	+200	°C
T_j	junction temperature		–	200	°C

Note

1. Device mounted on an FR4 printed-circuit board; lead length 10 mm.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS $T_j = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_F	forward voltage 1N4148 1N4448	see Fig.3 $I_F = 10\ \text{mA}$	–	1	V
		$I_F = 5\ \text{mA}$	0.62	0.72	V
		$I_F = 100\ \text{mA}$	–	1	V
I_R	reverse current	$V_R = 20\ \text{V}$; see Fig.5		25	nA
		$V_R = 20\ \text{V}$; $T_j = 150\text{ °C}$; see Fig.5	–	50	μA
I_R	reverse current; 1N4448	$V_R = 20\ \text{V}$; $T_j = 100\text{ °C}$; see Fig.5	–	3	μA
C_d	diode capacitance	$f = 1\ \text{MHz}$; $V_R = 0\ \text{V}$; see Fig.6	–	4	pF
t_{rr}	reverse recovery time	when switched from $I_F = 10\ \text{mA}$ to $I_R = 60\ \text{mA}$; $R_L = 100\ \Omega$; measured at $I_R = 1\ \text{mA}$; see Fig.7	–	4	ns
V_{fr}	forward recovery voltage	when switched from $I_F = 50\ \text{mA}$; $t_r = 20\ \text{ns}$; see Fig.8	–	2.5	V

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th(j-tp)}$	thermal resistance from junction to tie-point	lead length 10 mm	240	K/W
$R_{th(j-a)}$	thermal resistance from junction to ambient	lead length 10 mm; note 1	350	K/W

Note

1. Device mounted on a printed-circuit board without metallization pad.

Bibliografía

- [1] Alireza Khaligh and Omer C Onar. *Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. CRC press, 2009.
- [2] Raúl Castillo Meraz, Roberto Carlos Martínez Montejano, Finees Delgado Aranda, and Isaac Campos Cantón. Sistema híbrido fotovoltaico-eólico para la generación de energía eléctrica. *Tlatemoani*, (13), 2013.
- [3] N Pandiarajan and Ranganath Muthu. Mathematical modeling of photovoltaic module with simulink. In *Proceeding of International Conference on Electrical Energy System*, pages 3–5, 2011.
- [4] John Twidell, Tony Weir, et al. *Renewable energy resources*. Routledge, 2015.
- [5] Yves Perriard, Patrick Ragot, and Miroslav Markovic. Round the world flight with a solar aircraft: complex system optimization process yves perriard, senior member, patrick ragot, student member, miroslav markovic, member ecole polytechnique fédérale de lausanne (epfl). In *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*, pages 1459–1465. IEEE, 2005.
- [6] G. Petrone, G. Spagnuolo, Y. Zhao, B. Lehman, C. A. Ramos, and M. L. Orozco. Control of photovoltaic arrays. *REVISTA DE ELECTRÓNICA INDUSTRIAL*, 2015.
- [7] Wilmer Sunz, Jorge Castellanos, César Peraza, and Francisco Arteaga. Modelación y control en espacio de estados de un servomecanismo usando matlab. *INGENIERÍA UC*, 8(1), Junio 2001.
- [8] Trishan ESRAM, Patrick L Chapman, et al. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion EC*, 22(2):439, 2007.
- [9] L Ruiz, J Beristáin, T Sosa, and J Hernández. Estudio del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia perturbado y observado. *Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*, 8(1):17–23, 2010.
- [10] Vaughn C Nelson. *Introduction to renewable energy*. CRC press, 2011.

-
- [11] V. Sanchez. Sonora podría abastecer de energía a todo México con tecnología fotovoltaica. *Agencia informativa CONACYT*, 2014.
- [12] Pietro Luigi Carotenuto, Salvatore Curcio, Patrizio Manganiello, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli. Algorithms and devices for the dynamical reconfiguration of pv arrays. In *Int. Exhib. Conf. Power Electron., Intell. Motion, Renewable Energy Energy Manage., Nuremberg, Germany*, 2013.
- [13] Hideaki Obane, Keiichi Okajima, Takashi Oozeki, and Takuro Ishii. Pv system with reconnection to improve output under nonuniform illumination. *Photovoltaics, IEEE Journal of*, 2(3):341–347, 2012.
- [14] Dzung Nguyen and Brad Lehman. An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 55(7):2644–2654, 2008.
- [15] Guillermo Velasco-Quesada, Francisco Guinjoan-Gispert, Robert Piqué-López, Manuel Román-Lumbreras, and Alfonso Conesa-Roca. Electrical pv array reconfiguration strategy for energy extraction improvement in grid-connected pv systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 56(11):4319–4331, 2009.
- [16] Vaibhav Vaidya and Denise Wilson. Maximum power tracking in solar cell arrays using time-based reconfiguration. *Renewable Energy*, 50:74–81, 2013.
- [17] Juan David Bastidas-Rodríguez, Carlos Andres Ramos-Paja, and Andres Julian Saavedra-Montes. Reconfiguration analysis of photovoltaic arrays based on parameters estimation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 35:50–68, 2013.
- [18] Yasuo Horiuchi and Hitoshi Kuninaka. Solar photovoltaic power generation device capable of adjusting voltage and electric power, March 19 1996. US Patent 5,500,052.
- [19] Jonathan P Storey, Peter R Wilson, and Darren Bagnall. Improved optimization strategy for irradiance equalization in dynamic photovoltaic arrays. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 28(6):2946–2956, 2013.
- [20] Mahmoud Alahmad, Mohamed Amer Chaaban, Su kit Lau, Jonathan Shi, and Jill Neal. An adaptive utility interactive photovoltaic system based on a flexible switch matrix to optimize performance in real-time. *Solar Energy*, 86(3):951–963, 2012.
- [21] Marc Vermeersch, Bruno Estibals, and Corrine Alonso. Electronic management system for photovoltaic cells, December 18 2009. US Patent App. 13/140,628.
- [22] Eugenio Faldella, Gian Carlo Cardinali, and Pier Ugo Calzolari. Architectural and design issues on optimal management of photovoltaic pumping systems. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 38(5):385–392, 1991.

-
- [23] Jonathan Storey, Peter R Wilson, and Darren Bagnall. The optimized-string dynamic photovoltaic array. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 29(4):1768–1776, 2014.
- [24] MZ Shams El-Dein, Mehrdad Kazerani, and MMA Salama. Optimal photovoltaic array reconfiguration to reduce partial shading losses. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 4(1):145–153, 2013.
- [25] Yingrak Auttawaitkul, Boonnua Pungsiri, Kosin Chammongthai, and Makoto Okuda. A method of appropriate electrical array reconfiguration management for photovoltaic powered car. In *Circuits and Systems, 1998. IEEE APCCAS 1998. The 1998 IEEE Asia-Pacific Conference on*, pages 201–204. IEEE, 1998.
- [26] Ze Cheng, Zhichao Pang, Yanli Liu, and Peng Xue. An adaptive solar photovoltaic array reconfiguration method based on fuzzy control. In *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on*, pages 176–181. IEEE, 2010.
- [27] Lew R Andrew Tria, MT Escoto, and Carl F Michael Odulio. Photovoltaic array reconfiguration for maximum power transfer. In *TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- [28] Payman Zarkesh-Ha Rakeshkumar Mahto and Olga Lavrova. Reconfigurable photovoltaic integrated with cmos for a fault tolerant system. In *Photovoltaic Specialits Conference*, pages 1–2. IEEE, 2016.
- [29] P Kågeson. Cycle-beating and the eu test cycle for cars. *European Federation for Transport and Environment (T&E)*, Brussels, 1998.