



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

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA CON
SUPERCAPACITORES EN UN SISTEMA
FOTOVOLTAICO

Presenta:

Lic. Daniel Ortiz Hernández*

Asesores internos:

Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández

Dra. Liliana Cortez

Asesores externos:

Dr. José Italo Cortez

Dr. Pedro García Juárez

Agradecimientos

Agradezco a mis asesores por indicarme el camino correcto para poder realizar con éxito este trabajo, agradezco también a mi familia por apoyarme en todo momento.

Un agradecimiento especial a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla que ha forjado mi desarrollo en cada paso y ha hecho de mi un profesional

Agradecimiento al CONACYT

Agradezco a CONACYT por apoyarme económicamente a lo largo de mi estancia en esta maestría, porque gracias a su apoyo pude sustentar mi conocimiento.

Índice general

ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVO	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
justificación	4
CAPÍTULO 1 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	6
1.1 <i>Características de un sistema de almacenamiento de energía</i>	7
1.2 <i>Tipos de Sistemas de Almacenamiento de Energía.....</i>	7
1.2.1 Almacenamiento de energía Térmica	8
1.2.2 Almacenamiento mediante energía Mecánica	9
1.2.3 Almacenamiento mediante energía Eléctrica	10
1.3 <i>Estrategias de control del almacenamiento de energía</i>	12
1.3.1 Control de flujos de potencia en un sistema fotovoltaico.....	13
1.3.2 Control en rampa	13
1.3.3 Generación fotovoltaica, descarga de la batería.....	15
1.3.4 Abastecimiento solo desde la batería hacia la carga	16
1.4 <i>Criterios de gestión de energía usando supercapacitores</i>	16
CAPÍTULO 2 SISTEMA FOTOVOLTAICO Y ANÁLISIS DE RECURSO SOLAR	18
2.1 <i>Funcionamiento de un Sistema Fotovoltaico</i>	19
2.2 <i>Ventajas y desventajas de un Sistema Fotovoltaico</i>	20
2.3 <i>Determinación del recurso solar en un Sistema Fotovoltaico</i>	21

2.3.1	Cálculo de la disponibilidad de la radiación solar en la superficie horizontal con ausencia de atmósfera	22
2.3.3	Algoritmo de cálculo	24
CAPÍTULO 3	DISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	27
3.1	<i>Cálculo de la potencia generada</i>	29
3.2	<i>Cálculo de la energía consumida en una vivienda</i>	32
3.3	<i>Características de las Baterías</i>	34
3.3.1	Baterías de plomo ácido	36
3.3.2	Características de capacidad	37
3.3.3	Influencia de la temperatura en el desempeño de una Batería	37
3.4	<i>Análisis de respuesta de la Batería</i>	38
3.5	<i>Características de los Supercapacitores</i>	40
3.5.1	Análisis de repuesta de los Supercapacitores	41
3.6	<i>Comparación entre Batería y Supercapacitor</i>	43
CAPÍTULO 4:	DISEÑO DE LA ETAPA DE CARGA Y ENTREGA DE LA ENERGÍA	46
4.1	<i>Etapas de carga</i>	46
4.2.1	Diseño del convertidor CD/CD	48
4.2.2	Control para el convertidor	52
4.2.3	Sensado del estado de carga	53
4.2.4	Algoritmo de carga	55
4.3	<i>Entrega de la energía</i>	56
4.3.1	Algoritmo de decisión	57
4.3.2	Inversor de corriente directa a corriente alterna	59
CAPÍTULO 5:	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	47
5.1	<i>Funcionamiento de la etapa de carga</i>	66
5.2	<i>Funcionamiento de la etapa de entrega de la energía</i>	67
5.2	<i>Comparación de Sistemas de almacenamiento de energía</i>	71
5.3	<i>Prueba del algoritmo con diferentes valores de cargas</i>	73
5.3.1	Prueba del algoritmo con diferentes valores de la derivada	75
5.4	<i>Recomendaciones de uso de supercapacitores</i>	75
5.4	<i>Conclusiones</i>	76
APÉNDICE A	TABLAS Y GRAFICAS DE RADIACIÓN SOLAR	80
A.2	GRÁFICAS DE RADIACIÓN SOLAR	86
A.3	ÁNGULOS DE INCLINACIÓN SOLAR	88
APÉNDICE B.1	CÓDIGOS REALIZADOS EN MATLAB	90
APÉNDICE B.2	ALGORITMOS DE DECISIÓN	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		77

Índice de figuras

Capítulo I

FIGURA 1. 1. TIPOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	8
FIGURA 1. 2. MODO CARGA DE BATERÍA Y DESCONEXIÓN DE RED.	16
FIGURA 1. 3. MODO DESCARGA DE BATERÍA.	16

Capítulo II

FIGURA 2. 1. COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	20
FIGURA 2. 2. PANTALLA PRINCIPAL PARA EL CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR.	25
FIGURA 2. 3. RADIACIÓN SOLAR DIRECTA.....	26
FIGURA 2. 4. RADIACIÓN SOLAR DIFUSA.	26
FIGURA 2. 5. RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE.....	27
FIGURA 2. 6. RADIACIÓN SOLAR TOTAL.	27
FIGURA 2. 7. RADIACIÓN SOLAR PARA EL MES DE DICIEMBRE.	27

Capítulo III

FIGURA 3. 1. ARREGLO FOTOVOLTAICO.	30
FIGURA 3. 2. DEMANDA DE CONSUMO EN 24 HORAS.....	33
FIGURA 3. 3. BATERÍA DE GEL.	35
FIGURA 3. 4. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE CARGA.....	36
FIGURA 3. 5. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE DESCARGA.	36
FIGURA 3. 6. CIRCUITO DE DESCARGA DE UNA BATERÍA.	38
FIGURA 3. 7. VOLTAJE Y CORRIENTE CONTRA TIEMPO.	39
FIGURA 3. 8. CIRCUITO DE DESCARGA PARA SUPERCAPACITOR.....	42

FIGURA 3. 9. VOLTAJE Y CORRIENTE CONTRA TIEMPO EN SC.	42
FIGURA 3. 10. CIRCUITOS SIMULTÁNEOS DE DESCARGA.	43
FIGURA 3. 11. BATERÍA CONTRA SUPERCAPACITOR, VOLTAJE.	44
FIGURA 3. 12. BATERÍA CONTRA SUPERCAPACITOR, CORRIENTE.	45

Índice de tablas

Capítulo II

TABLA 2. 1. DÍAS MEDIOS DE CADA MES DURANTE EL AÑO.	22
TABLA 2. 2. ÁNGULOS DE INCLINACIÓN.	22
TABLA 2. 3. CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR PARA EL MES DE DICIEMBRE.	27

Capítulo III

TABLA 3. 1. DEMANDA DE CONSUMO DE ENERGÍA.	32
TABLA 3. 2. CONSUMO DIURNO.....	32
TABLA 3. 3. CONSUMO NOCTURNO.	33

Listado de acrónimos

SAE	Sistema de Almacenamiento de Energía
FER	Fuente de Energía Renovable
SC	Supercapacitor
CD/CD	Convertidor de corriente Directa a Corriente Directa
KWh	kilo what hora
Seg.	Segundos
SoC	Estado de carga
DoD	Profundidad de descarga
FV	Fotovoltaico
PWM	Modulador por ancho de pulsos
Ah/d	Ampere hora día
δ_m	Inclinación del sol
t^{alba}	Tiempo del alba
t^{ocaso}	Tiempo del ocaso
T_{sol}	Duración de la luz del día
$E_{horizontal}^{directo}$	Densidad de la radiación solar directa en la superficie horizontal con atmósfera despejada

$E_{horizontal}^{difuso}$	Densidad de la radiación difusa
$E_{horizontal}^{\Sigma}$	Radiación solar total
$W_{horizontal_{mes}}^{\Sigma}$	Potencia mensual de la radiación solar total
P_{diurna}	Es la Potencia diurna.
$P_{nocturna}$	Es la Potencia nocturna.
η_{inv}	Es la eficiencia del inversor para el consumo en AC (dato que proporciona el fabricante).
η_K	Es la eficiencia del controlador (dato proporcionado por el fabricante).
η_A	Es la eficiencia carga-descarga de los acumuladores (dato proporcionado por el fabricante).
K_1 y K_2	Son factores que disminuyen la producción
amp.	Amperios

Introducción

En la actualidad es inminente que el crecimiento del nivel de desarrollo de la humanidad va en aumento y con ello aumenta también la demanda de energía tanto en el ámbito industrial así como el doméstico. Los recursos de energía convencionales son limitados y debido a esto, en los últimos años se han estado promoviendo el ahorro energético y la generación de energía utilizando recursos renovables.

Las plantas generadoras de energía más destacadas son las que utilizan la radiación solar y la energía eólica. Una desventaja de este tipo de energías renovables es la discontinuidad de generación, debido principalmente a su dependencia hacia los factores climáticos lo que las hace más difícil de integrar en un sistema de generación de energía.

Tomando en cuenta estas complicaciones, es muy importante incorporar los sistemas de almacenamiento de energía (SAE), estos se convierten en un factor de vital importancia al conseguir el balance energético entre la energía demandada y la generada a partir de recursos renovables. Una planta de generación de energía renovable en conjunto con un sistema de almacenamiento de energía podría comportarse como una planta generadora de potencia constante durante periodos de tiempo establecidos. La generación de energía y el almacenamiento de ella a lugares cercanos al lugar de consumo implican menores pérdidas de energía en los sistemas de transmisión y distribución.

Los acumuladores de energía como su nombre lo indica, permiten almacenar energía en alguna de sus diferentes formas, para poder ser utilizada posteriormente en alguna acción que se le requiera, de esta manera se consigue separar la generación de energía de la demanda de la misma. Dichos acumuladores asociados a un sistema eléctrico, permiten mejorar su eficiencia, fiabilidad y costo, absorbiendo la energía generada.

Es sabido que una de las maneras más factibles de almacenar energía es en baterías o en cualquiera de sus presentaciones sin embargo, existe otro tipo de dispositivo en el cual también es posible almacenar energía en grandes cantidades, como lo es en los supercapacitores. Estos dispositivos son capaces de almacenar energía con alto valor de capacitancia y bajo valor de resistencia interna comparados con los dispositivos convencionales. Esta tecnología ha ido desarrollándose ya desde hace algunos años, hoy en día ha sobresalido en diversas aplicaciones, debido a las ventajas con las que estos dispositivos cuentan por encima de las baterías. Su construcción y funcionamiento es similar a un capacitor convencional a gran escala, el tiempo de carga y descarga y la capacidad alta en faradios es lo que los hace especialmente apropiados para responder a necesidades de picos de potencia o ante interruptores de suministro de poca duración.

Objetivo

Realizar el estudio de factibilidad operativa y de desempeño para un sistema de almacenamiento de energía, utilizando baterías y supercapacitores, para un sistema fotovoltaico de 85 W con un voltaje nominal de 12 V, ubicada en Ciudad Universitaria.

Objetivos específicos

- Realizar el análisis de flujos de potencia en una planta fotovoltaica.
- Calcular una carga adecuada para el sistema fotovoltaico.
- Diseñar un sistema de almacenamiento de energía con batería y supercapacitores que sea adecuado para la planta fotovoltaica.
- Desarrollar una estrategia de control de almacenamiento de energía.
- Diseñar una etapa de optimización para el sistema de acuerdo a la carga de consumo.
- Realizar un análisis comparativo de desempeño con sistemas de almacenamiento que no integren supercapacitores.
- Emitir recomendaciones para la implementación de SAE con supercapacitores.

Justificación

Hoy en día el desarrollo de las energías alternas implica la generación de energía usando fuentes renovables. Los sistemas de almacenamiento de energía proporcionan algunas ventajas y son necesarios para obtener el máximo rendimiento de las energías renovables y facilitar la conversión de estas energías en recursos confiables. Una desventaja que presentan los sistemas tradicionales, es que ofrecen limitaciones de eficiencia, durabilidad y disponibilidad.

Debido a estas limitaciones, en el presente trabajo se hace el estudio de un sistema de almacenamiento de energía para una planta fotovoltaica utilizando como almacenamiento de energía una manera híbrida entre una batería y supercapacitores. Los supercapacitores constituyen una tecnología cuya aplicación en sistemas de almacenamiento de energía para generación de energías renovables no se encuentra muy desarrollada. La importancia de

estos radica en que pueden funcionar mejor que los bancos de capacitores o las baterías convencionales que se utilizan en los actuales sistemas de almacenamiento. Los supercapacitores presentan altos valores de capacidad eléctrica (Faradios), esto es importante porque gracias a esa característica consiguen acumular más energía que los convencionales. Existen modelos comerciales con capacidades máximas del orden de 1 KWh y capaces de trabajar con potencias que van desde los KW a MW. Tienen alta disponibilidad de potencia, eficiencia elevada (superior al 95 %), bajo costo de mantenimiento y una vida útil lo suficientemente larga para lograr costos competitivos [2,3].

Otra ventaja que presentan estos dispositivos es que proporcionan corrientes de carga altas, además que el número de ciclos de vida está en el orden de millones de veces, trabajan en condiciones de temperatura muy adversas y no presentan en su composición elementos tóxicos, muy común en baterías [1]. Otra característica de los supercapacitores en comparación con los bancos de baterías, es el tiempo de carga y descarga, los supercapacitores tienen un rango de tiempo de carga y descarga de 0.3 seg. a 30 seg., en una batería de plomo ácido su tiempo de carga es de 1 a 5 horas mientras que su tiempo de descarga va desde 0.3seg. a las 10 horas dependiendo del tipo de batería [4].

De esta forma, el sistema de almacenamiento de energía presentaría una mayor capacidad de almacenamiento, que podría garantizar un suministro de producción de energía con mejor estabilidad y seguridad que los actuales con capacitores y baterías, cuya capacidad limita su uso como sistemas de almacenamiento en aplicaciones de baja potencia.

Tomando en cuenta las características mencionadas es importante contar con un sistema que sea capaz de controlar tanto los procesos de carga como los de descarga tomando en cuenta los estados de carga en los que se encuentren ambos acumuladores. Por ello se integra también dentro de este sistema un bloque en el cual se determine la entrega de energía hacia la carga dependiendo del consumo de corriente que la carga genere, este bloque podrá determinar con que banco de energía será alimentada la carga, de esta manera se garantiza una mejor distribución de la energía y podrían incluirse cargas más grandes al sistema de almacenamiento de energía.

CAPÍTULO

1

Sistemas de Almacenamiento de Energía

Los sistemas de almacenamiento de energía (SAE), permiten almacenar energía en alguna de sus formas, para ser utilizada posteriormente en alguna operación que la requiera. De esta manera, se consigue desacoplar la generación de energía de la demanda de la misma. Asociados a un sistema eléctrico, estos dispositivos permiten mejorar su eficiencia, fiabilidad y costo, absorbiendo la energía producida bien desde la red, durante los valles de demanda o de bajo costo de generación, o bien desde fuentes de energía renovables intermitentes y liberándola en los momentos de mayor demanda.

En este capítulo se analizará el funcionamiento de estos sistemas, se conocerán sus características y los propósitos para los que se usan, también se podrán conocer los diferentes tipos Sistemas de Almacenamiento de Energía que han surgido a lo largo del tiempo para poder entender la importancia de las energías renovable

1.1 Características de un Sistema de Almacenamiento de Energía

El almacenamiento energético comprende diversas tecnologías que se han desarrollado hasta la fecha, como son; baterías electroquímicas, supercapacitores (double-layer capacitors), almacenamiento magnético superconductor (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage), almacenadores cinéticos de energía (volantes de inercia o flywheels), almacenamiento por aire comprimido (CAES – Compressed air energy) e hidroelectricidad por medio de bombeo (Pumped Hydropower) [6]. Estos acumuladores permiten disponer de una reserva de energía, proveniente en principio de una fuente renovable. De esta forma se logra que siempre se disponga de un respaldo de energía, permitiendo abastecer una demanda de potencia mayor que la producida por una fuente de energía renovable (FER). Además, ante una posible falla en la red de distribución, el sistema puede desconectarse y abastecer a las cargas que estén conectadas al sistema mediante la FER en conjunto con un sistema de almacenamiento. Ello permitirá no dejar de abastecer el sistema y facilitar la recomposición del sistema de distribución primario sin desaprovechar la energía aportada por la FER.

Por lo tanto, los sistemas de generación mediante energías renovables que incorporan almacenamiento permiten gestionar la energía generada por la fuente renovable de una manera más óptima, aumentando la disponibilidad de estas. Además, estos sistemas pueden ser capaces de mantener la potencia ante fallas en la red por lo que aumentan la protección contra las perturbaciones de tensión en la red eléctrica reduciendo la distorsión armónica y eliminando los huecos de tensión [5].

Existen diferentes razones por las cuales son utilizados los dispositivos de almacenamiento de energía como:

- Aumentar la eficiencia de los sistemas eléctricos, al reducir la necesidad de generación de respaldo, suministrando los picos de potencia en la demanda diaria

- Aumentar la fiabilidad del sistema, al reducir las posibilidades de corte del suministro de energía
- Aumentar la disponibilidad de fuentes renovables (energía solar, eólica...etc.)
- Aumentar la eficiencia y el uso racional de la energía en procesos industriales

Algunas de las características más importantes de los sistemas de almacenamiento que son integrados en fuentes de energía renovables se describen a continuación.

- Gran capacidad de almacenamiento para lograr mantener la potencia subministrada por el sistema el mayor tiempo posible
- Sistemas de gran potencia, para conseguir poder responder ante la conexión de cargas puntuales y pico de demanda
- Tiempos de respuesta rápidos
- Alto rendimiento y con bajas tasas de auto-descarga
- Alta potencia y energía específica que permiten conseguir sistemas de alta potencia y gran capacidad de almacenamiento si ser muy voluminosos
- Larga vida útil, sin sufrir degradación
- Bajo impacto medioambiental [6]

1.2 Tipos de Sistemas de Almacenamiento de Energía

En la actualidad se han ido desarrollando diferentes formas de almacenar energía que se han desarrollado con el paso del tiempo, por ello los sistemas de almacenamiento de energía (SAE) se pueden clasificar de acuerdo a la forma de almacenar energía como se enlista a continuación:

- Almacenamiento mediante energía electromagnética: esta técnica de almacenamiento funciona transformando la energía eléctrica en energía electromagnética para su almacenamiento, por ejemplo SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) y supercapacitores.
- Almacenamiento mediante energía mecánica: se caracteriza por convertir energía eléctrica en mecánica para el almacenamiento, algunos ejemplos son: el almacenamiento por bombeo hidráulico o PHS por sus siglas en inglés (Pumping Hydraulic Storage), CAES (Compressed Air energy) o energía por aire comprimido y volantes de inercia.

- Almacenamiento mediante energía química: aquí la energía eléctrica es transformada en energía química, siendo esta técnica una de las más utilizadas en la actualidad para el almacenamiento de energía, por ejemplo las baterías de plomo ácido, Lithium-Ion, etc

Estas técnicas se ocupan dependiendo de los recursos con que se cuentan, en la figura 1.1 se muestra un esquema que nos muestra los diferentes tipos de almacenamiento de energía y su diferentes procesos de acumulación.

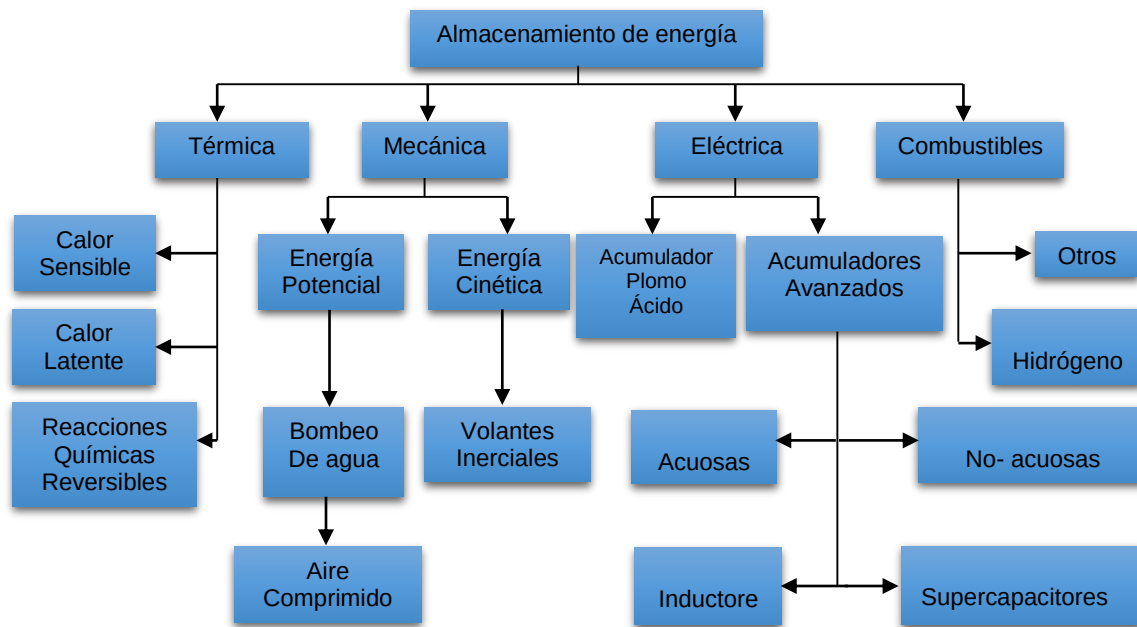


Figura 1. 1. Tipos de almacenamiento de energía.

1.2.1 Almacenamiento de Energía Térmica

Todos los procesos de almacenamiento procedentes son aplicables a la energía después de su conversión en energía eléctrica. El almacenamiento térmico ofrece la posibilidad de almacenar esta energía antes de dicha conversión.

El almacenamiento térmico puede realizarse de dos maneras básicas, mediante calor sensible y a través de calor latente. El calor sensible utiliza la capacidad térmica de un material y una elevación de temperatura. El calor latente utiliza el calor asociado con un cambio de fase de material el cual se produce a temperatura constante, a pesar de que existen

dos maneras básicas de almacenamiento térmico de energía, un sistema puede utilizar ambas formas [6, 8].

1.2.2 Almacenamiento Mediante Energía Mecánica

En esta categoría destacan tres tipos de tecnologías, el almacenamiento por bombeo hidráulico, almacenamiento por aire comprimido y volantes de inercia, que se describen a continuación:

- Almacenamiento por aire comprimido (CAES-Compressed air energy storage). En estos sistemas la energía se almacena comprimiendo aire. En el proceso de descarga el aire comprimido es liberado, mezclándose con combustible propulsando turbinas conectadas a un generador eléctrico. El aire comprimido generalmente se almacena en cavernas subterráneas selladas, modo más usual, o sobre superficies en contenedores especiales de alta presión, lo cual resulta más costoso.

CAES subterráneos es una tecnología madura presente desde 1978 en Alemania. Para aplicaciones de almacenamiento de grandes porciones de energía como desplazamiento de carga resulta una tecnología costosa, sin embargo, sus especiales requerimientos de cavidades subterráneas selladas impiden su amplia aplicación en los sistemas eléctrico de potencia [6].

- Volantes de inercia (FESS-Flywheel energy storage systems). Los volantes de inercia almacenan energía cinética, esta tecnología ya se encuentra más desarrollada en la actualidad. Los volantes de inercia actuales están constituidos por un cilindro masivo conectado a un motor –generador ambos soportados por rodamiento de levitación magnética, todo dentro de una cámara al vacío para disminuir las pérdidas por roce.

Las principales ventajas de los volantes de inercia son: alta capacidad cíclica (cerca de 10⁵ ciclos con descarga profunda o 20 años de servicio), alta densidad de potencia, alta eficiencia y bajo mantenimiento. En oposición, sus mayores desventajas son su baja densidad de energía y su razón de auto-descarga. Dada estas características su aplicación se encuentra en regulación de frecuencia y estabilidad del sistema ante fallas de corta duración (segundos hasta 15 minutos) [6].

1.2.3 Almacenamiento Mediante Energía Eléctrica

Dentro de este campo existen diferentes métodos de almacenamiento, pero para poder comprender y comparar las diferentes tecnologías de almacenamiento mediante energía eléctrica hay que comprender los siguientes conceptos técnicos:

- Auto-descarga: fenómeno donde el sistema de almacenamiento pierde energía almacenada al estar fuera de operación. El coeficiente o índice de auto-descarga se representa como el porcentaje de energía almacenada pérdida con respecto a la energía nominal del SAE por unidad de tiempo. Algunas tecnologías poseen altos niveles de auto-descarga que evitan almacenar por tiempos mayores que minutos.
- Densidad de energía: cantidad de energía almacenable en un sistema de almacenamiento por unidad de volumen (kwh/m^3). Una baja densidad de energía indica que el sistema requiere una mayor área de instalación y viceversa.
- Densidad de potencia: cantidad de potencia que puede suministrar un sistema de almacenamiento por unidad de volumen.
- Eficiencia o round-trip: corresponde a la eficiencia total del sistema considerado como eficiencia de carga y descarga.
- Efecto memoria: fenómeno presente en baterías de Níquel cadmio (NiCd) y Níquel metal hidruro (NiMH), donde la capacidad efectiva del almacenamiento decae debido a reiterados ciclos incompletos de carga-descarga.
- Estado de carga (SoC) del inglés State of Charge: representa la cantidad de energía almacenada en el sistema. Se representa como el cociente entre la energía almacenada y la capacidad nominal del sistema, comúnmente en porcentaje 100% indica lleno y 0% vacío.
- Profundidad de descarga (DoD) del inglés Depth of Discharge: es el complemento del estado de carga ($DoD = 1 - Soc$), indicando 0% lleno y 100% vacío [5, 6].

Teniendo en cuenta los anteriores aspectos podemos mencionar las siguientes técnicas que involucran algunos de esos parámetros:

- I. Almacenamiento magnético con supercapacitores (SMES-Superconducting Magnetic Energy Storage): Esta tecnología almacena energía en el campo magnético creado por la circulación de corriente continua en una bobina superconductora. Para lograr la condición de superconducción la bobina debe enfriarse criogénicamente, gracias a la condición de superconducción de la bobina casi constituida por tres partes: bobina superconductora, refrigerador criogénico y sistema de potencia que hace de interfaz con la red eléctrica. Usualmente el conductor está fabricado de niobio-titanio (Nb-Ti).

Las principales ventajas del SMES son, su alta eficiencia mayor al 95% y bajos tiempos de respuesta, sus principales desventajas son su elevado costo y los problemas ambientales debido a los fuertes campos magnéticos [6, 8].

- II. Supercapacitores (SCESS-Supercapacitor Energy Storage System): También denominados capacitores de doble capa, capacitores electroquímicos de doble capa o supercapacitores. Son capacitores que almacenan energía en campo eléctrico con una densidad energética del orden de miles de veces mayor que los capacitores convencionales utilizados en electrónica. Un capacitor simple está compuesto por dos placas conductoras paralelas separadas por un dieléctrico. En un supercapacitor se usan dieléctricos de alta permeabilidad y se maximiza la superficie entre electrodos utilizando carbón activo poroso, permitiendo una gran cantidad de energía almacenable en la superficie del electrodo. Los dos electrodos están separados por una barrera porosa muy delgada que está inmersa en el electrolito.

Como ventaja poseen: una alta densidad de potencia, capacidad de descarga profunda, alta eficiencia, no se produce calor mientras se encuentre en operación, ambientalmente inofensivos y poseen una larga vida útil (12 años). Por otro lado, su baja densidad energética y alto índice de auto-descarga impiden su uso para almacenamiento con huecos de energía mayores a minutos, además su vida útil se ve afectada por la variación de tensión, la cual implica el desarrollo de modelos de envejecimiento para una correcta operación de estos. Finalmente sus aplicaciones se encuentran en suplir variaciones instantáneas de corto tiempo, con fallas, caídas de tensión y variaciones de frecuencia [6, 8].

III. Acumuladores acuosos: Las baterías de Ion-Litio logran desempeños excelentes en electrónica portable y dispositivos médicos. Además esta tecnología es impulsada por el mercado de la electrónica de consumo puesto que estas baterías son más livianas, pequeñas y más potentes que otras baterías. Poseen la más alta densidad energética desde 190 Wh/kg y las más alta densidad de potencia desde a 2000 Wh/kg entre todas las baterías. Otras ventajas de las baterías de litio incluyen alta eficiencia, sin efecto memoria y bajo índice de auto-descarga. Esta es la razón esta es la razón porque estas baterías son tan utilizadas en la nueva generación de vehículos eléctricos. Este tipo de baterías cuentan con una vida útil de alrededor de 3000 ciclos a una profundidad de descarga del 80%.

Algunas desventajas que existen con respecto a estas baterías son: la poca robustez y fragilidad de sus materiales, los ciclos de vida son afectados por la temperatura y pueden ser severamente disminuidos por descargas profundas, usualmente requieren de circuitos de protección especial para evitar sobrecargas además, necesitan sistemas de administración sofisticados para mantener condiciones de operación seguras. Otra desventaja es el costo, el precio de estos dispositivos es elevado, generando una limitación en el uso de estas baterías para aplicaciones de gran capacidad y aplicaciones donde muy bajos estados de carga (SoC) podrían ser alcanzados [6, 8].

1.3 Estrategias de Control del Almacenamiento de Energía

Uno de los principales inconvenientes de las fuentes de energía renovable, como las plantas fotovoltaicas, es su imprevisible comportamiento. De hecho, la energía fotovoltaica depende en gran medida, de las condiciones ambientales (nubosidad, temperatura, tormentas de arena, humo, etc.). Estos factores pueden reducir, en gran medida, la inyección de potencia en la red en un corto periodo de tiempo. Para su gestión de plantas fotovoltaicas más eficiente, el pronóstico del tiempo y las estadísticas pueden ser útiles, pero desafortunadamente, no se pueden reflejar estas rápidas variaciones. Este comportamiento difiere mucho del comportamiento de los generadores síncronos convencionales debido a la diferente naturaleza de ambos sistemas.

1.3.1 Control de Flujos de Potencia en un Sistema Fotovoltaico

Algunos mecanismos para controlar los parámetros de la red eléctrica, como frecuencia o voltaje, han sido utilizados usualmente, tomando en cuenta el funcionamiento de los generadores convencionales. Por lo tanto, las plantas fotovoltaicas deberían tener un comportamiento similar a través del uso de las capacidades de sus sistemas de electrónica de potencia.

Otro inconveniente de la energía fotovoltaica radica en la producción de picos de corriente o excesos de corriente, normalmente, no coinciden con los picos de demanda por lo que, al menos que la planta utilice un sistema de almacenamiento de energía, la producción en exceso se pierde. Estos efectos deberían estar controlados cuidadosamente, de otro modo, podrían causar inestabilidad en la red y los beneficios del uso de energías renovables podría tornarse en un verdadero problema.

Una de las soluciones para aumentar la eficiencia del sistema sería una correcta gestión de la demanda. La gestión de la demanda es la planificación e implementación de distintas medidas destinadas a influir en el modo de consumir energía para que se modifique el perfil de consumo diario. Estas medidas contribuyen a la reducción de las emisiones de CO_2 , a la mejor integración de las energías renovables en el sistema eléctrico y a una mayor eficiencia energética del sistema en su conjunto.

La solución a esto radica en encontrar sistemas óptimos de almacenamiento de manera que nos permita almacenar energía en instantes en donde no exista consumo y poder utilizarla en horas de más demanda de energía, consiguiendo además maximizar los beneficios de la instalación ya que los precios de la energía son más altos en las horas punta. Es por eso que se debe tener algunas estrategias de control de la energía.

1.3.2 Control en Rampa

El control en rampa es requerido para evitar problemas de transición desde un nivel de potencia de salida a otro. La planta fotovoltaica deberá ser capaz de controlar que la tasa de potencia de salida cambio bajo ciertas circunstancias, incluyendo:

- Tasa de aumento/disminución de energía solar debido a la irradiación

- Tasa de incremento de potencia cuando una reducción externa de la potencia de salida se libera
- Tasa de disminución de potencia cuando se activa un límite de restricción externa

Una de las características que presenta este control rampa es, que puede aplicarse tanto al incremento como a la disminución de la potencia de salida, además de que es independiente de las condiciones meteorológicas.

Para incrementar la potencia cuando la desviación de frecuencia es negativa o para control de rampa, la planta FV necesita añadir un sistema de almacenamiento de energía externo. Un BPCS (Battery Power Converter System) introduce esta posibilidad de almacenamiento de energía. Considerando un control de algoritmos mediante el uso de un BPCS, el sistema queda listo para alimentar o almacenar una cantidad especificado energía en cada momento. En este punto el mantenimiento del estado de carga es fundamental. El control del mantenimiento del estado de carga hace que su valor este dentro de un margen objetivo siempre que sea posible. Así, la estrategia de control del mantenimiento del estado de carga debe evitar las siguientes situaciones:

- Si el BPCS alcanza el estado de carga máximo, el sistema de almacenamiento sólo estará disponible para aportar energía
- Si el BPCS alcanza el estado de carga mínimo, el sistema de almacenamiento sólo estará disponible para almacenar energía

De otro modo, el control de la potencia real se torna ineficiente y el sistema de producción de energía completo no alcanzará el punto óptimo [13].

Sin embargo también existen otros tipos de control, como el control amanecer/atardecer enfocado a los problemas asociados a grandes pendientes de potencia en amaneceres y atardeceres despejados que superan las tasas de altas y bajadas de carga del sistema, también existe el control de efecto nube enfocado a mitigar las variaciones aleatorias de potencia producidas por sombras en los paneles.

Otra estrategia de control para sistemas con almacenamiento es por medio del desplazamiento de la curva de generación. Esta permite desplazar la generación fuera de las horas solares, también permite adaptar la curva de generación a nuestro perfil de consumo y así poder tener una capacidad de almacenamiento más grande [12].

Sin embargo la variabilidad de la potencia producida y la potencia demandada ocasionan que a lo largo del día exista un déficit o un exceso de energía, cuya magnitud depende de la época del año. De esta manera, una estrategia de control puede servir para gestionar el sistema, si se plantea una evaluación constante de la diferencia de potencia existente entre la potencia producida por el sistema fotovoltaico y la potencia demanda. A partir de la diferencia determinada en cada instante de tiempo, el sistema toma acciones dependiendo del estado de carga de la batería.

La variabilidad del recurso solar disponible a lo largo e día en el desplazamiento, el SoC o estado de carga de la batería, la variabilidad de a potencia demandada y el coste de la energía de la red eléctrica, conllevan a que el comportamiento del sistema actúe en diversos modos de operación, por medio de la gestión de flujos de potencia.

1.3.3 Generación Fotovoltaica, Descarga de la Batería

Tomando en cuenta que la producción fotovoltaica, evidentemente depende del nivel de radiación del sol y la temperatura, la cual varía a lo largo del día, lo cual provoca que la producción de energía varíe de igual manera. De la misma forma, el comportamiento de la demanda no es constante y cambia a lo largo del día, haciendo que la potencia demandada se encuentre por encima o por debajo de la energía producida por el sistema fotovoltaico. Tomando en cuenta lo anterior, este modo de operación ocurre cuando la demanda es mayor a la energía fotovoltaica generada y en la cual, el sistema de almacenamiento presenta un estado de carga mayor al 70%, siendo así, capaz de apoyar el sistema fotovoltaico y finalmente abasteciendo la carga sin necesidad de conexión y suministro de energía desde la red eléctrica. En la figura 1.2 se representa el flujo de potencia para este modo de operación [14].

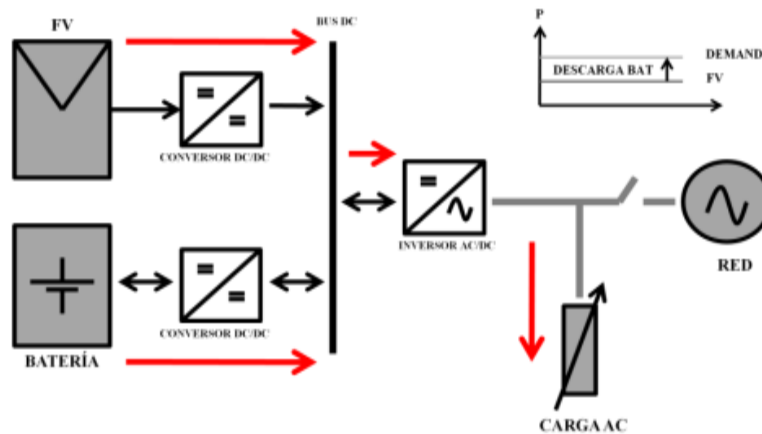


Figura 1. 2. Modo Carga de Batería y desconexión de red.

1.3.4 Abastecimiento Solo Desde la Batería Hacia la Carga

En este modo de operación, el sistema de almacenamiento permite suministrar la potencia demandada en las horas punta en donde la producción fotovoltaica es nula. Aunque en los otros modos de operación mantener un estado de carga elevado de la batería es un factor de consideración, en este modo de funcionamiento, a no ser de que la batería se encuentre en una descarga profunda, esta suministraría el 100% de la energía demandada, hasta alcanzar una profundidad de descarga igual al 30%. En la figura 1.3 se muestra una representación gráfica del modo de operación en descarga de la batería.

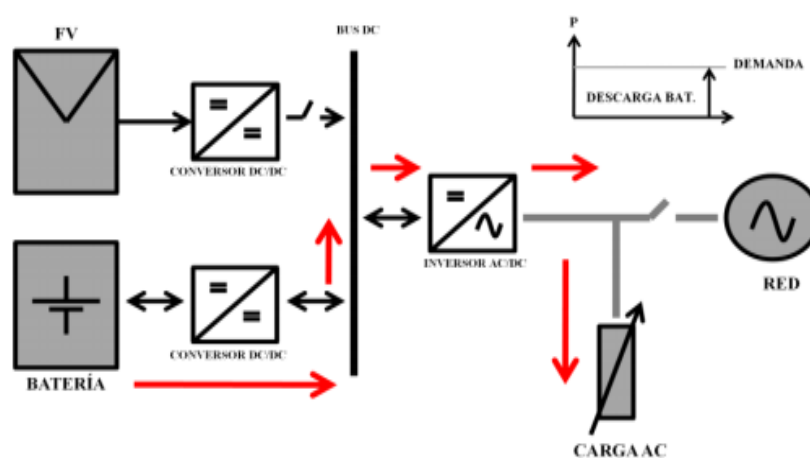


Figura 1. 3. Modo descarga de Batería.

1.4 Criterios de Gestión de Energía Usando Supercapacitores

Para poder tener un buen manejo de la energía utilizando supercapacitores es necesario tomar en cuenta sus principales características como por ejemplo, su tiempo de carga y descarga, es importante considerar esta cualidad para poder diseñar una manera controlada que sea capaz de cargar los supercapacitores en tiempos muy cortos. Una de las formas para lograr lo antes dicho es, por medio del aumento de la tensión y la corriente de carga.

Es importante tener presente que, si se conecta una fuente de carga a un supercapacitor totalmente descargado, la fuente observará un cortocircuito, con la finalidad

de protegerse simplemente no entregara corriente al supercapacitor haciendo inadecuada su carga. Cuando la carga de los supercapacitores se efectúa a corriente constante su voltaje incrementa de manera lineal, entonces el tiempo de carga dependerá del nivel de corriente con la que se produzca a carga.

Una manera sencilla para realizar este tipo de carga es por medio de un convertidor de convertidor CD/CD a corriente constante. Se debe de tener en cuenta que las pérdidas de energía y el calentamiento de los elementos para evitar un mal funcionamiento. El control de las señales de salida de cualquier convertidor CD/CD se realiza en lazo cerrado utilizando los principios de alimentación negativa. Los dos métodos más comunes en lazo cerrado de control para convertidores son, el control por modo voltaje y el control por modo corriente [10].

El uso de control de los convertidores deriva de la conmutación de los dispositivos semiconductores, misma que puede realizarse de dos maneras, por conmutación suave o conmutación forzada. El uso de técnicas de conmutación suave reduce las perdidas por conmutación he incrementa la frecuencia de conmutación, esta es una técnica establecida para obtener convertidores de tamaño reducido sin comprometer la eficiencia del mismo [10].

CAPÍTULO

2

Sistema Fotovoltaico y Análisis del Recurso Solar

La energía solar, es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente de la radiación solar, esto se genera mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina. Los sistemas

fotovoltaicos son el conjunto de dispositivos cuya función es transformar la energía solar directamente en energía eléctrica y acondicionarla para una aplicación específica.

En este capítulo se analizará el funcionamiento de un sistema fotovoltaico, sus características y principales componentes, también sus ventajas y desventajas ante los métodos de generación de energía tradicionales, además se analizará el recurso solar para nuestro sistema.

2.1 Funcionamiento de un Sistema Fotovoltaico

Los principales elementos que integran un sistema fotovoltaico son 4, la radiación solar, paneles solares, regulador de carga, descarga y acumuladores o baterías. El funcionamiento general de un sistema fotovoltaico es el siguiente, la luz solar incide sobre celdas fotovoltaicas interconectadas, las cuales están dispuestas en un panel o arreglo de estos. Los paneles entregan a su salida una corriente continua, la cual va hacia un regulador, que está encargado de controlar la energía que será suministrada a la batería para mantenerla cargada, pero sin sobrecargarla. La batería o arreglo de baterías almacenan la energía para que se utilice por las noches o en días de baja insolación. Posteriormente, si se requiere el sistema fotovoltaico para alimentar cargas de corriente alterna, se conecta a las terminales de la batería un convertidor de corriente directa a corriente alterna (CD/CA), comúnmente llamados inversores de corriente. La energía eléctrica generada por el panel solar se almacena en baterías, para ser utilizada en cualquier momento y no solo cuando esté disponible la radiación solar. Esta acumulación de energía debe estar dimensionada de forma que el sistema siga funcionando en periodos largos de mal tiempo y cuando la radiación solar sea baja (por ejemplo, cuando sea un día nublado). De esta forma se asegura un suministro prácticamente continuo de energía. [9]-[10].

En la siguiente figura (figura 2.1) se muestra una descripción gráfica de los principales elementos que integran un sistema fotovoltaico y algunas aplicaciones.

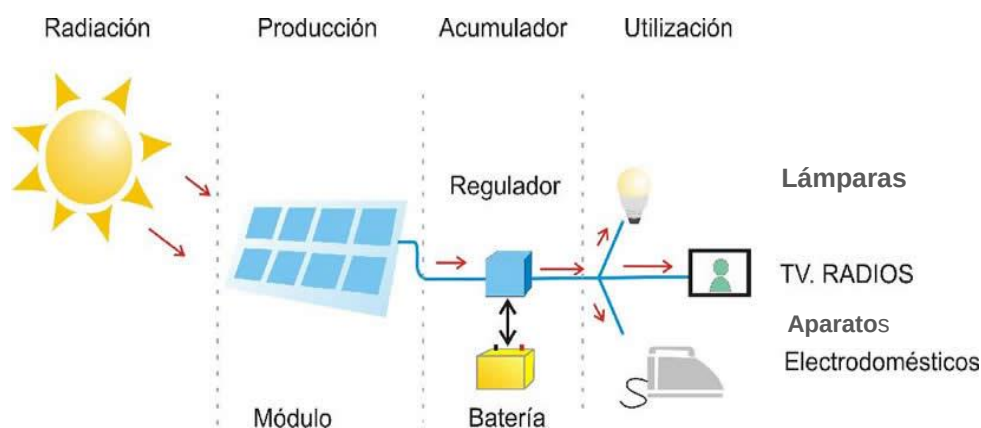


Figura 2. 1. Componentes de un sistema fotovoltaico.

2.2 Ventajas y Desventajas de un Sistema Fotovoltaico

Los sistemas fotovoltaicos cuentan con algunas ventajas comparándolos con los métodos de generación de energía eléctrica tradicionales como por ejemplo: que no utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento, no producen emisiones contaminantes ni gases de efecto invernadero y tampoco producen ruido. En cuanto a la fuente de obtención de energía, que en este caso es el sol, que es de una disponibilidad variable, pero gratuita y es utilizable casi en todos los lugares de la Tierra. Lo anterior contrasta con el manejo, la disponibilidad, transporte y transformación que se tiene que hacer de las fuentes de energía de otros métodos de generación.

Para los costos de operación y mantenimiento tenemos que los sistemas fotovoltaicos presentan un alto grado de confiabilidad, ya que la etapa de conversión de energía se realiza con dispositivos de estado sólido, los cuales no tienen partes móviles que presenten desgaste y su correspondiente mantenimiento. Mientras que la operación del sistema ya instalado se tiene un funcionamiento casi totalmente autónomo.

Otra ventaja es que su eficiencia se ve poco deteriorada con el transcurso de los años, existen fabricantes que garantizan hasta 25 años la producción de energía de los paneles fotovoltaicos.

Las instalaciones pueden realizarse en diversos lugares geográficos, debido a que los paneles son capaces de soportar muy adversas condiciones climáticas de calor, frío, lluvia, nieve, humedad, viento, etc. Pueden estar cercanos al lugar de demanda del consumo y donde la red de suministro eléctrico no llegue. Se pueden ubicar de tal manera que armonicen con

el entorno u ocupen espacio que no está siendo ocupado; como por ejemplo: azoteas y tejados. También tienen la ventaja de ser sistemas modulares escalables, es decir que se puede a futuro aumentar la capacidad del sistema ya existente de manera fácil y rápida [11].

Dependiendo de su aplicación y la potencia que generan, los sistemas fotovoltaicos se clasifican en:

- Hasta 1W de potencia. Calculadoras y dispositivos portátiles
- De 1W a 20 KW de potencia. En sistemas residenciales conectados a la red
- De 15W a 20KW de potencia. Aplicaciones especiales, satélites y estaciones
- De 50W a 100KW de potencia. En sistemas autónomos o remotos
- De 10W a 300KW de potencia. En sistemas comerciales conectados a la red
- Más de 50KW de potencia. En centrales que generan para alimentar la red

En particular se analizan a detalle las aplicaciones que pueden tener los sistemas aislados o remotos, los cuales no se encuentran conectados a la red eléctrica, su aplicación es casi siempre específica y pueden encontrarse en sitios rurales o residenciales. Entre estas aplicaciones tenemos: iluminación, bombeo de agua, electrodomésticos centros de servicio comunitario, repetidoras de telecomunicaciones, estaciones de telemetría, telefonía rural, equipos experimentales, investigaciones, etc.

2.3 Determinación del Recurso Solar en un Sistema Fotovoltaico

En este apartado se realizan todos los cálculos necesarios para determinar el recurso disponible de la energía solar y analizar las características de los paneles solares a utilizar. Para esto es necesario tener en cuenta algunos aspectos.

El primer lugar, hay que conocer la insolación media anual por día en el lugar pensado para la instalación fotovoltaica, para diseñar un sistema de este tipo en alguna zona que nosotros elijamos es necesario calcular la radiación solar para obtener una mayor eficiencia.

Es muy importante conocer los parámetros geográficos del lugar donde se realiza el estudio, como lo son, la latitud, la longitud y la longitud del meridiano medio de la franja de tiempo. Para este trabajo se tomaron los datos anteriores para el estado de Puebla.

Datos iniciales:

- Latitud $\varphi = 19.033333$
- Longitud $\lambda = -98.199997$
- Longitud del meridiano medio de la franja de tiempo $\lambda_m = -90$

2.3.1 Cálculo de la Disponibilidad de la Radiación Solar en la Superficie Horizontal con Ausencia de Atmósfera

Lo primero que debe realizarse para poder calcular la disponibilidad de la radiación solar en una superficie (en este caso del estado de Puebla) es, determinar el ángulo de inclinación del sol para el día seleccionado utilizando la ecuación 2.1.

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{n+284}{365}\right) \quad (2.1)$$

Donde (n) es el día medio del mes calculado, en energía metro cuadrado de superficie, es igual al promedio durante el mes (Tabla 2.1).

Tabla 2. 1. Días medios de cada mes durante el año.

Mes	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Fecha	17	15	16	15	15	11	17	16	15	16	15	10
# de día	17	46	75	105	135	162	198	228	258	289	319	344

La inclinación δ_m tiene signo positivo en el periodo del solsticio de primavera a otoño ($80 < n < 266$) y signo negativo en otros días del año como lo indica la siguiente tabla (Tabla 2.2).

Tabla 2. 2. Ángulos de inclinación.

Día	Fecha	# de día	Ángulo δ_m
Solsticio de primavera	21 de marzo	80	0
Solsticio de verano	22 de junio	173	+23,45°
Solsticio de otoño	23 de septiembre	266	0
Solsticio de invierno	22 de diciembre	356	-23,45°

Ahora para determinar el tiempo local del alba t^{alba} y ocaso t^{ocaso} del sol y duración de la luz del día T_{sol} se utilizan las siguientes ecuaciones (ecuación 2.2 a la 2.7).

$$T_M^{ocaso} = \frac{1}{15^\circ} [\arccos(-tg\varphi_M tg\delta_n) - (\lambda_M - \lambda_{medio})] + 12 + \Delta t_{decretado} - t_c \quad (2.2)$$

$$\Delta t_{decretado} = \begin{cases} 2H & \text{cuando } 91 < n < 304 \\ 1H & \text{cuando } 1 < n < 90 \\ & 305 < n < 365 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$t_c = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos B - 0.032077\sin B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sin 2B) \quad (2.4)$$

Donde:

$$B = 360^\circ \cdot (n - 81)/365 \quad (2.5)$$

$$T_c = \frac{2}{15} [\arccos(-\tan\varphi_M \tan\delta_m)] \quad (2.6)$$

$$T^{alba} = T^{ocaso} - T_c \quad (2.7)$$

Para determinar los ángulos temporales se divide el tiempo local en intervalos, desde el alba hasta el ocaso del sol como se muestra en la siguiente ecuación (ecuación 2.8).

$$\omega_{Ci} = (15^\circ/h (t_{Mi} - \Delta t_{decretado} - 12 + t_c)) + (\lambda_M - \lambda_{medio}) \quad (2.8)$$

Se determina el censo del ángulo de incidencia de los rayos del sol en la superficie horizontal para cada hora en consideración utilizando la siguiente ecuación (ecuación 2.9).

$$\cos\theta_{zi} = \cos\varphi_M \cos\delta_n \cos\omega_{Ci} + \sin\varphi_M \sin\delta_n \quad (2.9)$$

2.3.3 Algoritmo de Cálculo

Ahora, para determinar los coeficientes de atenuación de la radiación solar para una atmósfera despejada según las siguientes relaciones empíricas utilizando las siguientes ecuaciones (ecuación 2.10 a 2.12).

$$\tau_{ozono}^0 = 1 - \frac{0,051m_i}{(1+44,634m_i)^{0,683}} \quad (2.10)$$

$$\tau_{gas} = \exp - (0,0127m_i^{0,26}) \quad (2.11)$$

$$\tau_{H_2O} = 1 - \frac{2,496d_{H_2O}m_i}{6,385d_{H_2O}m_i + (1+49,03d_{H_2O}m_i)^{0,683}} \quad (2.12)$$

Donde la magnitud $d_{H_2O} = 1.3g/cm^2$ para invierno, $d_{H_2O} = 2g/cm^2$ para primavera y otoño y $d_{H_2O} = 3g/cm^2$ para verano.

Calculamos la densidad de la radiación solar directa en la superficie horizontal con ausencia de atmósfera despejada para cada hora en consideración (ecuación 2.13).

$$E_{horizontal}^{directo} = E_{horizontal}^0 \cdot \tau_{\Sigma_i}^{directo} W/M^2 \quad (2.13)$$

Con la siguiente ecuación (ecuación 2.14) nos ayuda para determinar la densidad de la radiación difusa para cada hora en consideración.

$$E_{horizontal}^{difuso} = 0.38(1 - \tau_{\Sigma_i}^{directo})E_{horizontal}^0 B_T/M^2 \quad (2.14)$$

Para determinar la densidad de la radiación solar total en la superficie horizontal con atmósfera despejada lo hacemos con la siguiente ecuación (ecuación 2.15).

$$E_{horizontal}^{difuso} = 0.38(1 - \tau_{\Sigma_i}^{directo})E_{horizontal}^0 B_T / M^2 \quad (2.15)$$

Para determinar la potencia mensual de la radiación solar total en la superficie horizontal en atmósfera despejada tenemos (ecuación 2.16).

$$W_{horizontal_{mes}}^{\Sigma} = W_{horizontal_{mes}}^{directo} + W_{horizontal_{mes}}^{difuso} \quad (2.16)$$

Para realizar Todos los cálculos anteriores se diseñó un programa en MATLAB en el cual, se utilizaron las variables y parámetros necesarios para obtener las radiaciones solares de cada mes. En la siguiente imagen (figura 2.2) se muestra la ventana principal del programa.

Figura 2. 2. Pantalla principal para el cálculo de la radiación solar.

Se puede observar que para el cálculo de cada se introducen tres variables, el tiempo de ocaseo (T_c), los ángulos temporales (ω_{Ci}) y el ángulo de inclinación del sol (δn), estos parámetros se calcularon de acuerdo a las formulas propuestas anteriormente.

En las siguientes gráficas (figura 2.3 a 2.6) se puede observar la energía generada para cada mes, también la radiación solar incidente, la radiación solar directa, la radiación solar difusa y la radiación solar total. Puede observarse que el mes que genera más energía es el mes de mayo, y el mes en el que se genera menos energía es en el mes de diciembre, en cuando a la radiación solar difusa los meses en donde se genera más energía, es en los meses de junio y julio.

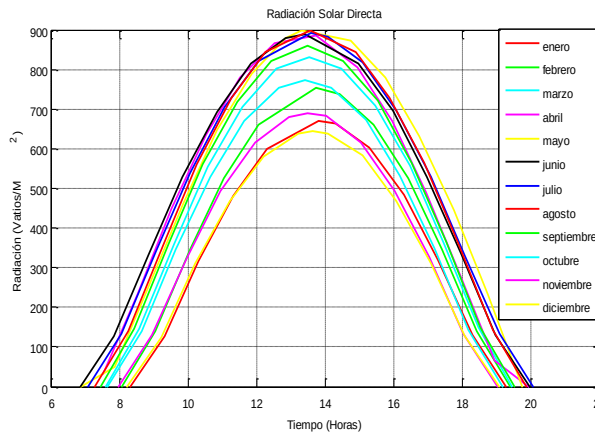


Figura 2. 3. Radiación solar directa.

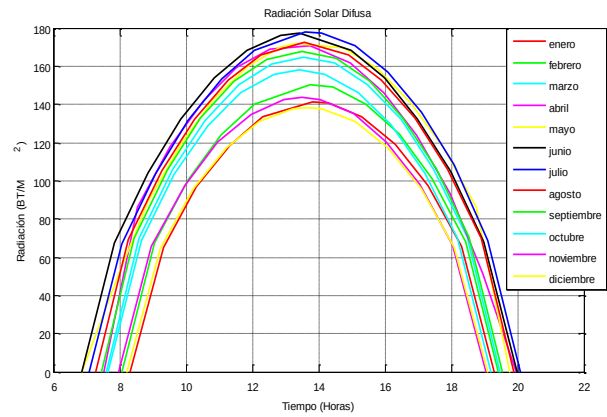


Figura 2. 4. Radiación solar difusa.

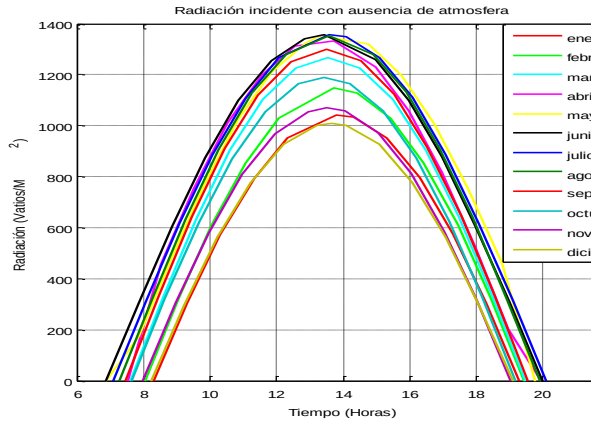


Figura 2. 5. Radiación solar incidente.

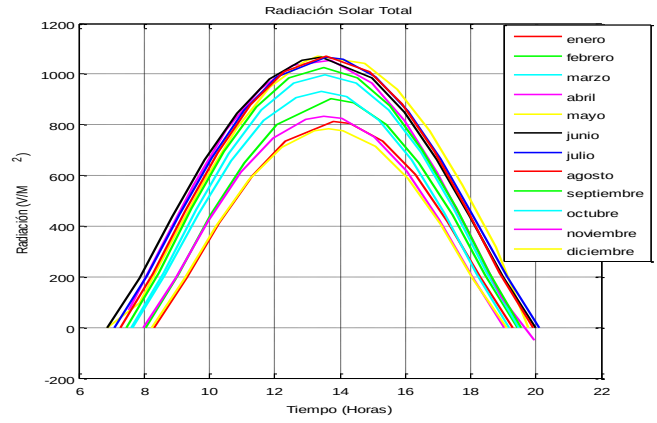


Figura 2. 6. Radiación solar total.

En la siguiente tabla (tabla 2.3), representa los resultados obtenidos para el mes de diciembre en donde la radiación solar calculada para dicho mes, es menor a la radiación solar calculada para el resto de los meses del año (apéndice A).

Tabla 2. 3. Cálculo de la radiación solar para el mes de diciembre.

Día 10/Diciembre																
		Delta(t)	w _{ci}	cos _{ci}	m *	τ _{o₃o₂}	τ _{gas}	τ _{H₂O}	τ _{R_i}	τ _{aerosoles}	τ _{directa} ₂	E ^D _{horizontal}	E ^{directo} _{horizontal}	E ^{difuso} _{horizontal}	E ^F _{horizontal}	W
0	8.21	-78.17	0.051	0	0	0	0	0	0	0	0	68.816	0	26.15	26.1501	0
1	9.21	-63.17	0.265	3.775	2.939	0.994	0.983	0.8415	0.7998	0.7876	0.466	360.26	168.123	73.014	241.136	241.13
1	10.21	-48.17	0.452	2.210	1.721	0.995	0.985	0.8575	0.8672	0.8628	0.566	615.26	348.62	101.32	449.945	449.94
1	11.21	-33.17	0.6	1.665	1.296	0.996	0.986	0.8657	0.8937	0.8919	0.610	816.54	498.308	120.93	619.237	619.23
1	12.21	-18.17	0.699	1.431	1.114	0.996	0.987	0.87	0.9058	0.9051	0.631	950.36	599.915	133.17	733.087	733.08
1	13.21	-3.171	0.741	1.349	1.051	0.996	0.987	0.8717	0.9101	0.9097	0.638	1007.4	643.688	138.24	781.932	781.93
0.44	13.65	3.391	0.741	1.350	1.051	0.996	0.987	0.8716	0.9101	0.9097	0.638	1007.2	643.441	138.23	781.675	341.98
0.44	14.09	9.953	0.729	1.371	1.067	0.996	0.987	0.8712	0.909	0.9085	0.636	991.57	631.559	136.81	768.366	336.1
1	15.09	24.95	0.661	1.512	1.177	0.996	0.986	0.8684	0.9016	0.9004	0.623	898.96	560.696	128.54	689.237	689.2
1	16.09	39.95	0.539	1.854	1.444	0.996	0.986	0.8626	0.8843	0.8816	0.594	733.17	435.825	112.99	548.818	548.81
1	17.09	54.95	0.372	2.689	2.094	0.995	0.984	0.8517	0.8453	0.8386	0.532	505.64	269.305	89.81	359.115	359.11
1	18.09	69.95	0.171	5.86	4.566	0.994	0.981	0.8281	0.7237	0.7011	0.368	231.88	85.5294	55.613	141.143	141.14
0	19.09	84.95	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	-69.49	0	-26.408	-26.408	0

En las gráfica 2.7 se muestra las radiaciones solares para el medio día de la mitad del mes de diciembre.

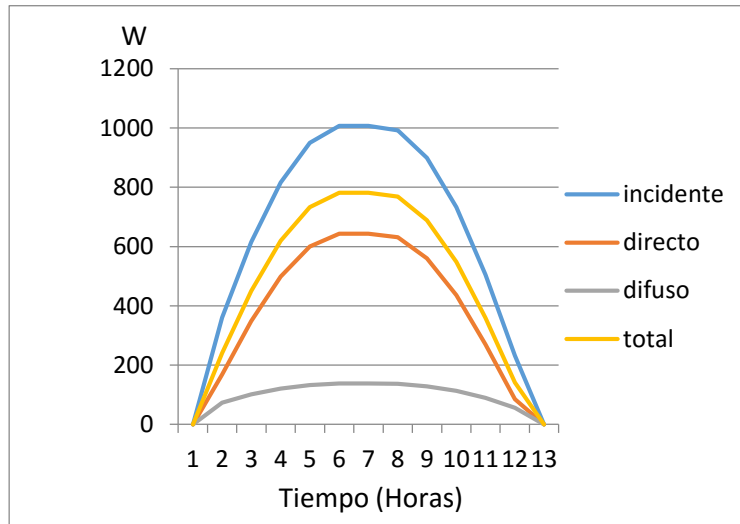


Figura 2. 7. Radiación solar para el mes de diciembre.

Diseño del Sistema de Almacenamiento de Energía

Uno de los elementos con más relevancia dentro de los SAE son los acumuladores que, como su nombre lo indica, son elementos que tienen la característica de almacenar y proporcionar energía si así se desea, de acuerdo a los requerimientos del sistema.

En este capítulo, podremos conocer la capacidad de nuestro sistema fotovoltaico, se realizará el diseño del sistema de almacenamiento híbrido de energía, se analizarán los tiempos de carga y descarga tanto de las baterías como de los supercapacitores así como la capacidad de la batería, todo de acuerdo al sistema fotovoltaico a utilizar y la radiación solar calculada en el capítulo anterior.

3.1 Cálculo de la Potencia Generada

Para poder diseñar el sistema de almacenamiento de energía, es necesario saber las especificaciones de los paneles a utilizar, y la potencia que estos generan. La figura 3.1, muestra un arreglo de paneles solares ubicados en Ciudad Universitaria Puebla.

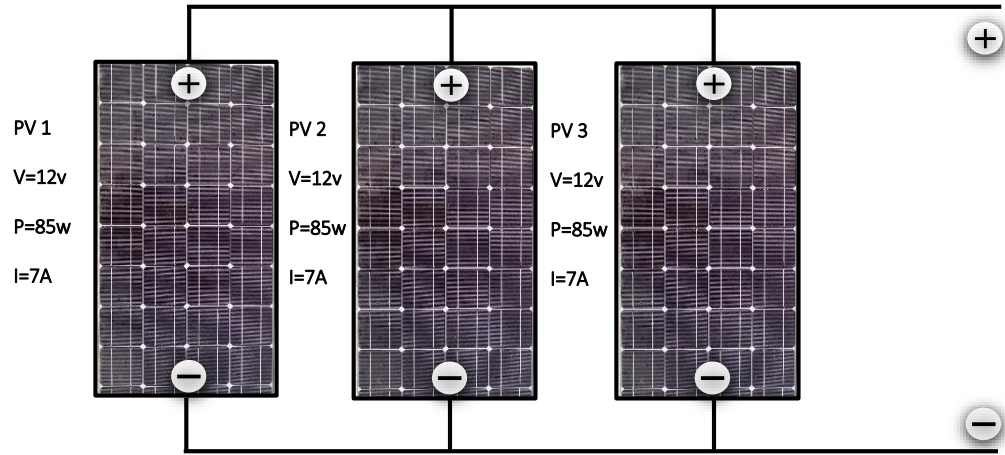


Figura 3. 1. Arreglo fotovoltaico.

El sistema fotovoltaico cuenta con tres paneles solares con una potencia individual de 85W y con un voltaje nominal de 12v, estos módulos están conectados en paralelo, lo que genera que el voltaje se mantenga en 12v y la corriente aumente.

Una vez obtenidos los cálculos de la radiación solar en la superficie terrestre, se toma el peor mes del año, de acuerdo a los datos obtenidos, el mes que menos radiación solar presentó fue el mes de diciembre, en este mes la densidad de la radiación solar total en la superficie con atmósfera para el medio día es:

$$E_{horizontal}^{\Sigma} = 781.67 \text{ w/m}^2 \quad (3.1)$$

Haciendo una conversión de w/m^2 a W:

$$100 \text{ w} = 1000 \text{ w/m}^2 \quad (3.2)$$

Por lo tanto se tiene que:

$$\frac{781.67 \frac{\text{w}}{\text{m}^2} \times 100 \text{ w}}{1000 \frac{\text{w}}{\text{m}^2}} = 78.16 \text{ w} \quad (3.3)$$

Para el cálculo total de potencia de los paneles solares, se divide el día en 2 partes, una en la cual se utiliza la potencia consumida a lo largo de las horas solares y otras en las que se hace uso de la potencia que deberá ser cubierta con el sistema fotovoltaico. Para este cálculo, se hace uso de las siguientes ecuaciones (ecuación 3.4 a 3.6):

$$P_{MS} = \frac{\frac{P_{diurna} + P_{nocturna}}{\eta_{inv} \cdot \eta_K} + \frac{P_{nocturna}}{\eta_{inv} \cdot \eta_K \cdot \eta_A}}{K_1 \cdot K_2 \cdot T_{sol}} \quad (3.4)$$

Donde:

P_{diurna} , es la Potencia diurna.

$P_{nocturna}$, es la Potencia nocturna.

η_{inv} , es la eficiencia del inversor para el consumo en AC (dato que proporciona el fabricante).

η_K , es la eficiencia del controlador (dato proporcionado por el fabricante).

η_A , es la eficiencia carga-descarga de los acumuladores (dato proporcionado por el fabricante).

K_1 y K_2 son factores que disminuyen la producción.

T_{sol} , es el tiempo de hora solar (recordar que es en el peor día del año).

En este caso, debido a que el aprovechamiento de la energía será por el día, se despreciará la $P_{nocturna}$, quedando entonces de la siguiente manera:

$$P_{MS} = \frac{\frac{P_{diurna}}{\eta_K}}{K_1 \cdot K_2 \cdot T_{sol}} \quad (3.5)$$

Si despejamos la P_{diurna} , se obtiene:

$$P_{diurna} = P_{ms}(nk)[(K_1)(K_2)(T_{sol})] \quad (3.6)$$

Donde:

$$P_{MS} = 78.16 \text{ w}$$

$$n_k = 0.95$$

$$k_1 = 0.85$$

$$k_2 = 0.9$$

$$T_{sol} = 10.975$$

Entonces, sustituyendo los valores en la ecuación anterior, se tiene que:

$$P_{diurna} = 623.4105W$$

3.2 Cálculo de la Energía Consumida en una Vivienda

Las siguientes tablas (tabla 3.1, 3.2 y 3.3) muestran el cálculo de la potencia consumida en una vivienda durante un día, esto se realizó con la finalidad de poder proponer una carga para el sistema y determinar qué tanto del consumo de esta vivienda, el sistema podría cubrir. Ahora, para determinar el consumo que se genera hay que dividir el día en dos partes: consumo en la mañana o consumo diurno y consumo por la noche o consumo nocturno.

Tabla 3. 1. Demanda de consumo de energía.

Consumo de Energía en una vivienda				
Carga		Potencia (W)	Horas de uso	Energía consumida
Recamara 1	Foco ahorrador	23	5	115
Recamara 2	Foco ahorrador	23	5	115
Cocina	Foco ahorrador	23	3	69
Sala	Foco ahorrador	23	2	46
Baño	Foco ahorrador	11	1	11
Licuadaora		350	0.16	56
Televisión		100	10	1000
Refrigerador		100	15	1500
Laptop		100	6	600
TOTAL				3512

En la tabla 3.2 y 3.3 se pude visualizar el consumo diurno y nocturno durante las 24 horas del día desglosado en horas.

Tabla 3. 2. Consumo diurno.

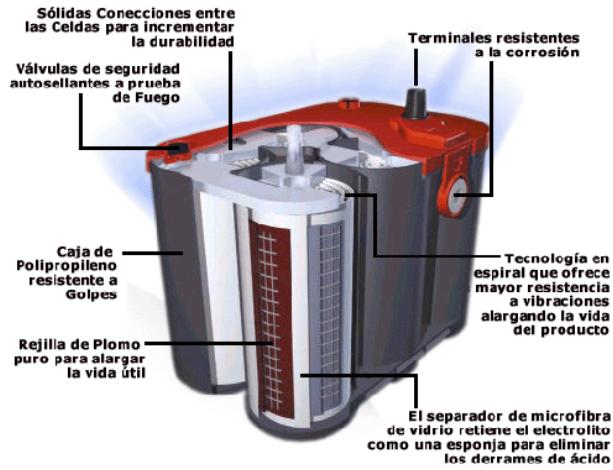
3.3 Características de las Baterías

Debido a que la radiación solar es un recurso variable, en parte previsible (ciclo día-noche) y en parte imprevisible (nubes, tormentas); se necesitan equipos apropiados para almacenar la energía eléctrica cuando existe radiación y para utilizarla cuando se necesite. El almacenamiento de la energía eléctrica producida por los módulos fotovoltaicos se hace a través de las baterías, estas baterías son construidas especialmente para sistemas fotovoltaicos.

Las baterías son un componente muy importante en un sistema fotovoltaico y realizan tres funciones esenciales para el buen funcionamiento de la instalación:

- Almacenan energía eléctrica en periodos de baja o nula radiación solar y/o bajo consumo de energía eléctrica. Durante el día los módulos solares producen más energía de la que realmente se consume en ese momento, y por tanto, una parte se almacena en la batería.
- Proveen la energía eléctrica necesaria en periodos de baja o nula radiación solar, normalmente en aplicaciones de electrificación rural la energía se utiliza intensamente durante la noche para hacer funcionar una carga cuando la radiación solar es nula.
- Proveen un suministro de energía eléctrica estable y adecuada para la utilización de aparatos eléctricos. La batería suministra energía eléctrica a un voltaje constante y permite operar aparatos que requieran de una corriente mayor de la que puede producir los paneles.

La figura 3.3, muestra una batería típica para aplicaciones fotovoltaicas. En su apariencia externa este tipo de baterías no difiere mucho de las baterías para automóviles, sin embargo, internamente las baterías para aplicaciones fotovoltaicas están construidas especialmente para trabajar con ciclos de carga/descarga lentos.

Figura 3. 3. Bateria de Gel.¹

Las baterías para sistemas fotovoltaicos generalmente son de ciclo profundo, lo cual significa que pueden descargar una cantidad significativa de la energía cargada antes de que requieran recargarse. En comparación de las baterías de automóviles que están construidas especialmente para soportar descargas breves pero superficiales durante el momento de arranque en cambio, las baterías fotovoltaicas están construidas especialmente para proveer energía durante muchas horas.

No es recomendable usar baterías de automóviles en sistemas fotovoltaicos aunque su costo sea más bajo, dado que no han sido construidas para esos fines. Las consecuencias graves en la batería de automóvil usada en un sistema fotovoltaico son:

- a) La vida útil de este tipo de baterías se acorta considerablemente.
- b) Los procesos de carga y descarga se hacen ineficientemente.

El ahorro en costos que se puede obtener al comprar baterías de automóviles en lugar de baterías fotovoltaicas, se pierde ante la necesidad de reemplazarlas frecuentemente sin embargo, puede funcionar de manera correcta tomando en cuenta que siempre es mejor utilizar los acumuladores adecuados [8].

¹ La figura 3.3. Fue tomada de la página Web de "Optima Batteries", <http://www.americanbattery.com.ar/optima/optima.html>

3.3.1 Baterías de Plomo Ácido

A continuación se revisan las características de carga y descarga para una batería de plomo ácido, con la finalidad de analizar la posibilidad de utilizar una batería de plomo ácido para el sistema.

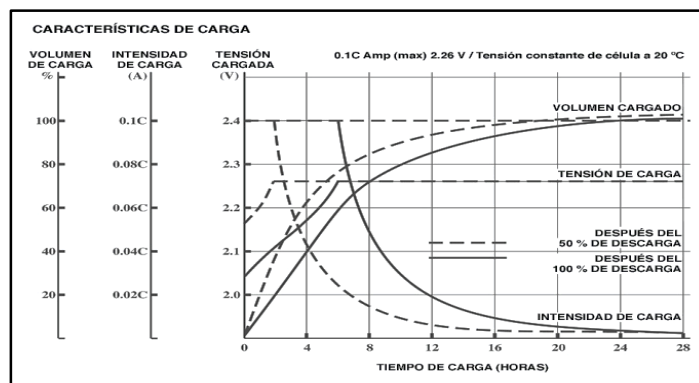


Figura 3. 4. Curvas características de carga.²

La especificación más importante de una Batería o Acumulador de Plomo-Ácido es la “Capacidad Nominal de Carga”, sin embargo, existen otras características o especificaciones que también son importantes conocer para poder realizar una correcta elección cuando requiramos emplear una batería. Vamos a analizarlas una por una.

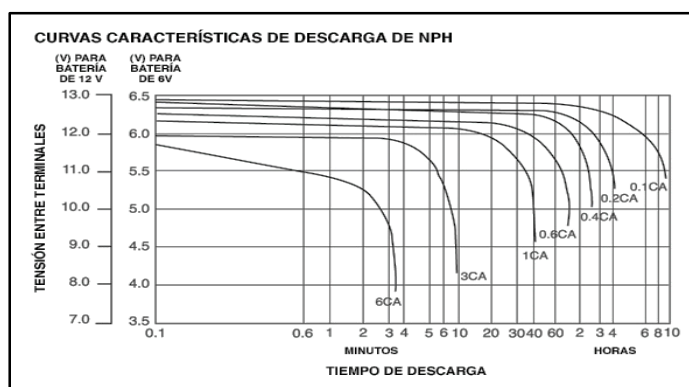


Figura 3. 5. Curvas características de descarga.³

² La figura 6 fue tomada de la página Web de “Kolff Energía Segura”, http://www.kolff.com.ar/?page_id=7957

³ La figura 6 fue tomada de la página Web de “Kolff Energía Segura”, http://www.kolff.com.ar/?page_id=7957

3.3.2 Características de Capacidad de una Batería

Las baterías cuentan con características importantes que hay que considerar al usarlas, como la reserva de capacidad, que es el tiempo en minutos que transcurre durante la descarga a una intensidad constante, hasta una tensión determinada y se expresa en minutos. También hay que tomar en cuenta las siguientes características:

- **Alta descarga:** Es la cantidad de amperes que entrega una batería, durante una *descarga intensa* con un tiempo preestablecido (entre dos a tres segundos). Se expresa en amperios. Normalmente, utilizado por las fábricas de baterías como último ensayo al 100 %, para detectar problemas de armado y carga generales (ronda entre los 800 y 1500 amp. dependiendo del tamaño y tipo de batería).
- **Ciclo de una batería:** Se denomina ciclo de una batería a la sucesión de una descarga seguida de su posterior recarga hasta recuperar completamente la energía extraída. Las normas definen la duración de ciclos normalizados para probar una batería. Se denomina profundidad de una descarga a la relación entre la capacidad descargada y la capacidad nominal de la batería. Cuanto mayor es la profundidad de la descarga, menor será la cantidad de ciclos que la batería nos podrá entregar. Por ejemplo, si una batería de tipo monoblock para aplicaciones estacionarias entrega 180 ciclos con una profundidad de descarga de 80%, reduciendo las descargas a un 30%, la misma batería entregará más de 1000 ciclos.

3.3.3 Influencia de la Temperatura en el Desempeño de una Batería

Las altas temperaturas aceleran la corrosión de las rejillas y la degradación de los materiales activos. A bajas temperaturas, la capacidad de entregar corriente disminuye pero la vida útil aumenta. Esto se debe a que todos los procesos de corrosión interna se hacen más lentos. A la inversa, si bien durarán menos tiempo, el rendimiento de las baterías se incrementa con las altas temperaturas.

Como regla general para la vida de las baterías, podemos decir que por cada 10°C de aumento de la temperatura ambiente por encima de la de referencia, la vida útil se reduce a

la mitad. Por ejemplo, una batería de cinco años de duración a 25°C, solo durará 30 meses si la temperatura en el ambiente es de 35°C.

Entonces, la expectativa de vida útil de una batería es el tiempo de funcionamiento que el fabricante pronostica para ella si se mantienen las condiciones especificadas. Por ejemplo, el funcionamiento en condiciones estacionarias a una temperatura de 25°C y una tensión de flote estabilizada. En algunos casos, el tiempo ha sido extrapolado a partir de los datos obtenidos en un ensayo denominado de “vida acelerada”: la batería se ensaya a una temperatura elevada (por ejemplo, 70 °C) hasta llegar al 80% de su capacidad.

3.4 Análisis de Respuesta de una Batería

Se realizaron las simulaciones de una batería y de un supercapacitor para entender mejor su manera de trabajar y poder conocer los tiempos de descarga frente a algún tipo de carga, para esta simulación se utilizó una carga resistiva.

Las siguientes simulaciones fueron realizadas con ayuda del programa MATLAB y su herramienta para simulación de circuitos en SIMULINK, en dónde se usaron elementos ideales para dicha simulación. Se puede observar en la figura 3.6, un circuito para descargar una batería de 12v utilizado una carga resistiva.

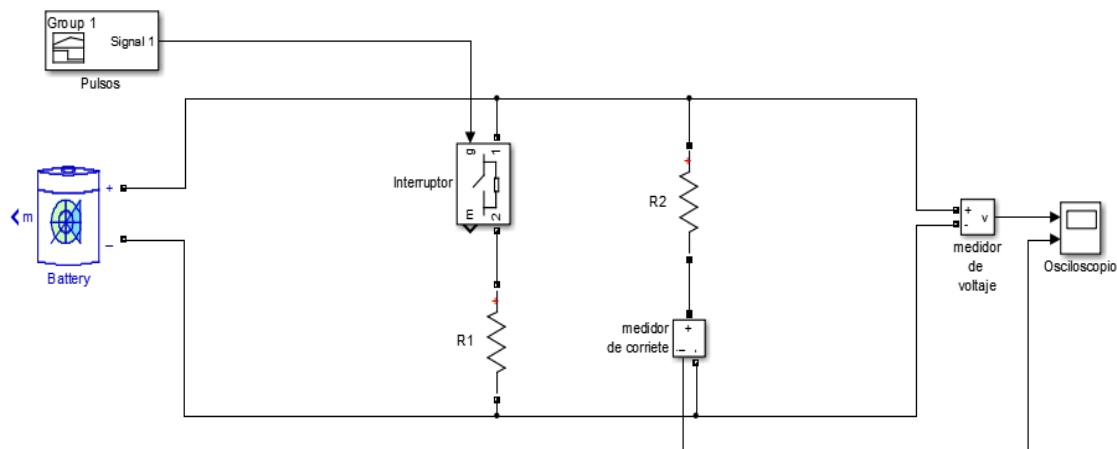


Figura 3. 6. Circuito de descarga de una Batería.

En el circuito se pueden observar elementos básicos como una batería (tomada de la librería de MATLAB) acondicionada a nuestros requerimientos, un interruptor ideal el cual

funciona con pulsos digitales para conmutar su estado, pulsos digitales y medidores de corriente y voltaje para monitorear las cargas resistivas.

Para realizar la descarga de la batería se utilizó un arreglo de dos resistencias conectadas en paralelo.

Los parámetros de la batería son:

- $V = 12V$
- Amperes hora (Ah) = 50Ah
- Estado de carga inicial del 100 %

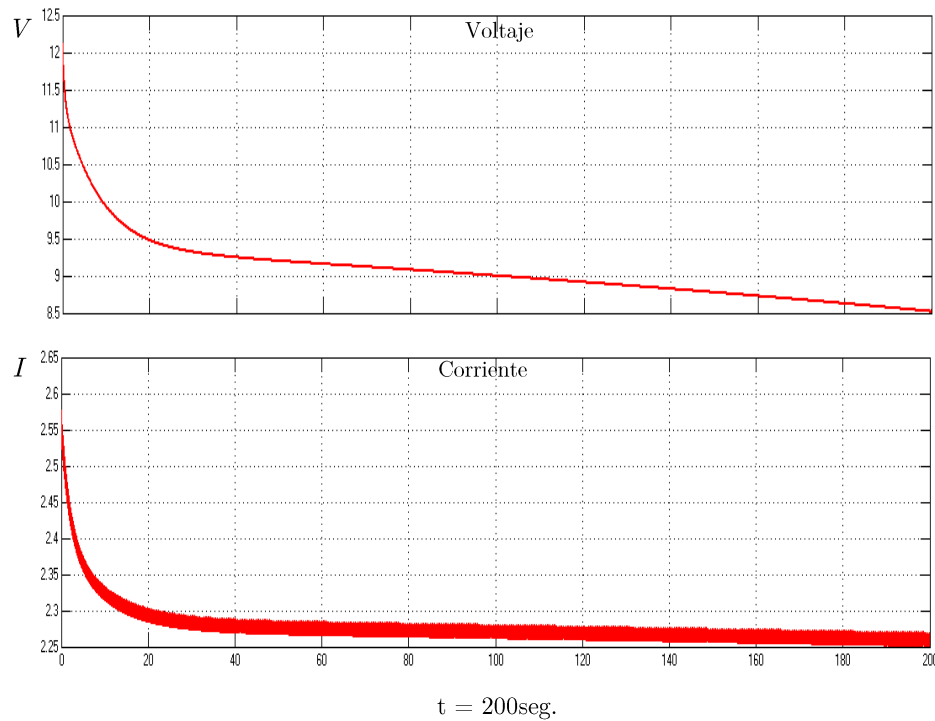


Figura 3. 7. Voltaje y corriente contra tiempo de la batería.

La figura anterior (figura 3.7) muestra que al inicio, la batería comienza con su voltaje al 100 % de su capacidad pero cuando se realiza el primer cambio, la batería comienza a descargarse, así hasta el término de la simulación que tiene una duración de 200seg. Se observa que el voltaje de la batería reduce muy poco. De la misma manera ocurre con la corriente, el decremento de la corriente se va dando aún más lento que el voltaje como se puede observar en la parte inferior de la figura.

3.5 Características de los Supercapacitores

Los supercapacitores son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en forma de cargas electroestáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductivas separadas por un medio dieléctrico. La construcción y funcionamiento es similar a un condensador convencional a gran escala. Un supercapacitor puede llegar a tener capacidades del orden de miles de faradios. Los supercapacitores son caracterizados por poder ser cargados y descargados en brevísimos períodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante necesidades de puntas de potencia o ante interrupciones de suministro de poca duración. Ello es debido a que el almacenamiento de cargas es puramente electroestático.

Otras características de los supercapacitores son, la rapidez de carga y descarga, pueden proporcionar corrientes de carga altas, lo que daña a las baterías, el número de ciclos de vida de los mismos, del orden de millones de veces, no necesitan mantenimiento, trabajan en condiciones de temperatura muy adversas y por último, no presentan en su composición elementos tóxicos, muy común en baterías.

La principal desventaja de los supercapacitores es, la limitada capacidad de almacenar energía, y al día de hoy, su mayor precio. En realidad debido a sus diferentes prestaciones, condensadores y baterías no son sistemas que rivalicen entre sí, sino más bien, se pueden considerar en muchas aplicaciones como sistemas complementarios donde la batería aporta la energía mientras el supercapacitor aporta los picos de potencia.

La cantidad de energía almacenada en este dispositivo viene dada por la siguiente expresión, en Julios, siendo V_1 y V_2 las tensiones que marcan la profundidad del almacenamiento:

$$\Delta E = \frac{1}{2}(C)(V_1^2 - V_2^2) \quad (3.7)$$

Los materiales estudiados como electrodos para supercapacitores son principalmente de tres tipos: óxidos de metales de transición, polímeros conductores y materiales de carbono activados. Con óxidos metálicos se han conseguido valores de capacidad muy altos, pero

estos supercapacitores tienen la desventaja de que son excesivamente caros y por lo tanto sólo se utilizan en aplicaciones militares y en la industria aeroespacial. El uso de polímeros conductores también puede dar lugar a capacidades relativamente altas, pero estos materiales presentan el inconveniente de que sufren hinchamiento y contracción, lo cual es indeseable puesto que pueden ocasionar la degradación de los electrodos durante los ciclos de carga y descarga. Finalmente, los materiales de carbono se presentan como los materiales activos del electrodo más atractivos, debido a su bajo costo relativo, elevado en el área superficial (pueden superar los $2500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) y gran disponibilidad. Además, los materiales de carbono pueden presentar unas estructuras diferentes y están disponibles en una gran variedad de formas (fibras, telas).

Se puede decir que, actualmente sólo los supercapacitores basados en carbono, o también llamados condensadores de doble capa (double-layer capacitors), han conseguido llegar a la etapa de comercialización [8].

Las características principales de estos dispositivos se indican a continuación:

- Altas capacidades: 1-5000 F
- Densidad de energía: 1-10 Wh/Kg
- Densidad de potencia: 1-10 kW/Kg
- Tiempos de carga y descarga: minutos, segundos
- Número de ciclos de carga y descarga: 10⁶
- Tensión de trabajo limitada: 1-500V
- Rendimiento eléctrico: 95-99%
- Muy baja auto-descarga
- Precio relativamente alto
- No necesitan mantenimiento
- No poseen elementos tóxicos

3.5.1 Análisis de Respuesta de los Supercapacitores

Para realizar el análisis de respuesta de los supercapacitores, se presenta un circuito de descarga para un supercapacitor, en este caso se utilizó el modelo del supercapacitor que viene incluido en la librería de SIMULINK, esto se realizó para poder entender cómo funciona y poder utilizarlo en simulaciones posteriores.

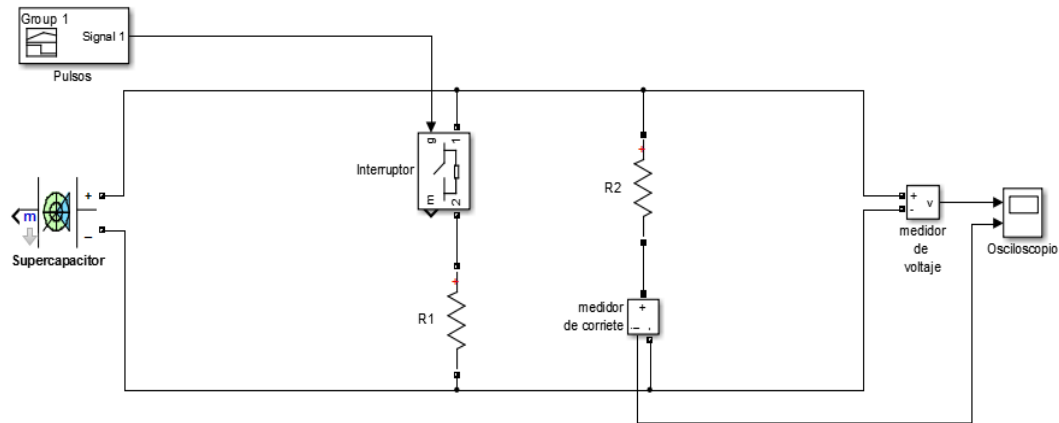


Figura 3. 8. Circuito de descarga para supercapacitor.

Se utilizó el mismo circuito de descarga como se muestra en la figura 3.8, en donde se observa que se utilizaron los mismos elementos que en el circuito de descarga de la batería como un interruptor y un arreglo de resistencias conectadas en paralelo para realizar la descarga.

Los parámetros del supercapacitor son:

- Capacitancia = 5F
- Voltaje inicial =12V

La figura 3.9 representa los resultados obtenidos de la simulación, para esta simulación se utilizó el mismo tiempo que el utilizado en la batería.

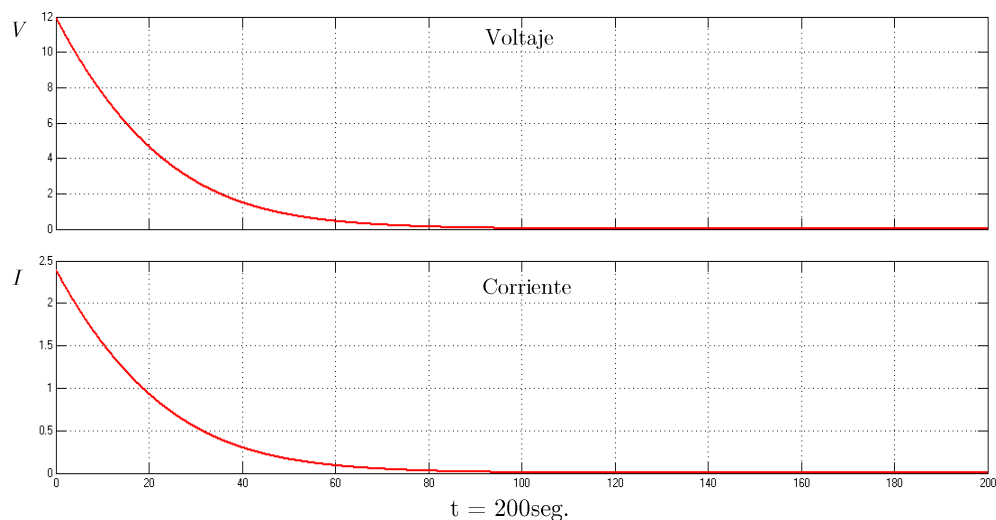


Figura 3. 9. Voltaje y corriente contra tiempo en SC.

Puede observarse que en el supercapacitor al inicio de la simulación, éste comienza con su capacidad total, transcurrido el tiempo total de la simulación, el voltaje y la corriente se aproximan a 0. Con esto se observa que el modelo de supercapacitor utilizado será útil debido a que cumple con el comportamiento esperado de descarga.

3.6 Comparación entre Batería y Supercapacitor

Tomando en cuenta el resultado de los análisis anteriores se puede hacer una comparación de respuesta entre los dos acumuladores (batería y supercapacitor) tanto en voltaje como en corriente.

Se realizó la comparación entre la batería y el supercapacitor utilizando los mismos valores y parámetros iniciales, ambos acumuladores en un estado inicial de carga del 100% y utilizando el mismo voltaje nominal de $V = 12V$, también se utilizó el mismo arreglo resistivo para realizar la descarga en ambos tomando los mismos valores de las resistencias para que la descarga sea equilibrada en los dos acumuladores. Para poder analizar sus comportamientos de descarga como se muestra en la figura 3.10, donde se observa que las características del circuito de descarga es el mismo en ambos, se utilizó la misma señal de pulsos para excitar ambos interruptores y tener una simulación simultánea.

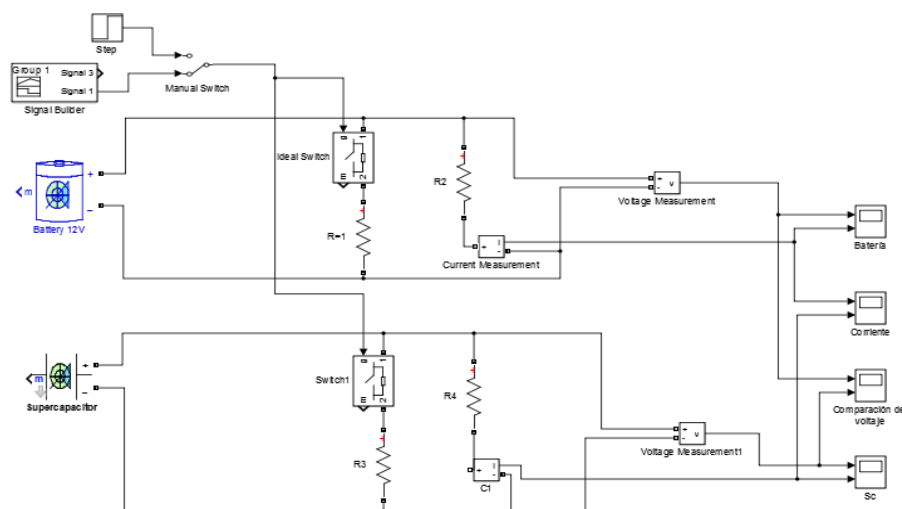


Figura 3. 10. Circuitos simultáneos de descarga, batería y Supercapacitor.

Tomando las simulaciones anteriores y haciendo una simulación simultánea mostrada en la figura 3.11, y dándoles el mismo tiempo de simulación se obtuvieron los siguientes resultados, donde la batería es la parte superior y el supercapacitor la parte inferior de la gráfica.

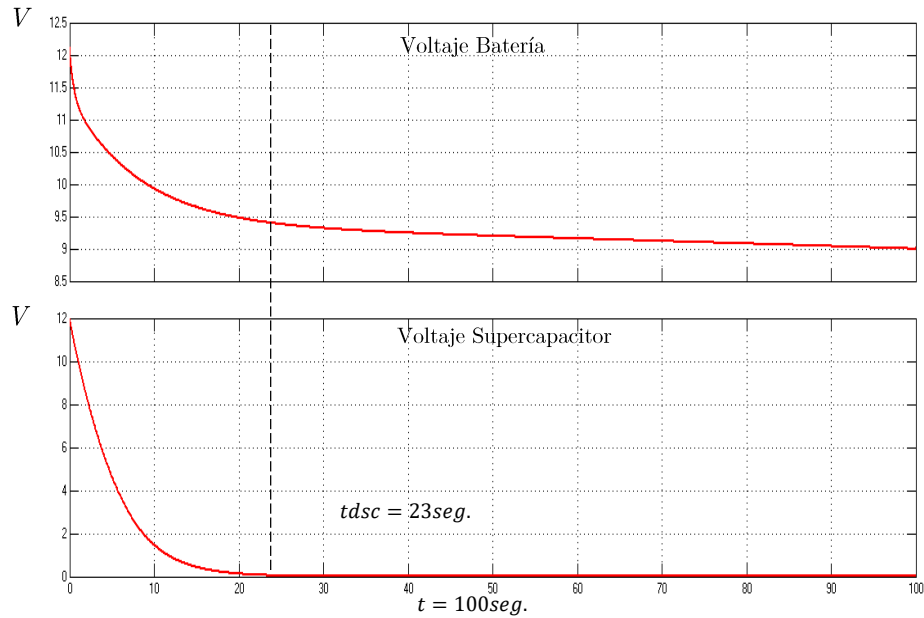


Figura 3. 11. Batería contra Supercapacitor en voltaje.

Se observa en la figura 3.11 que los tiempos de descarga son diferentes, la batería es más lenta para descargarse mientras que el supercapacitor se observa que el tiempo de descarga indicado por $tdsc = 23seg$ es más rápido que el tiempo de descarga de la batería, al transcurrir los primeros 23 segundos el supercapacitor se ha descargado casi en su totalidad, mientras que la batería solo ha llegado al 70% de su capacidad, recordando que ambos iniciaron con el 100% de carga.

La corriente funciona de manera similar, la batería se muestra más lenta ante el supercapacitor como se muestra en la figura 3.12.

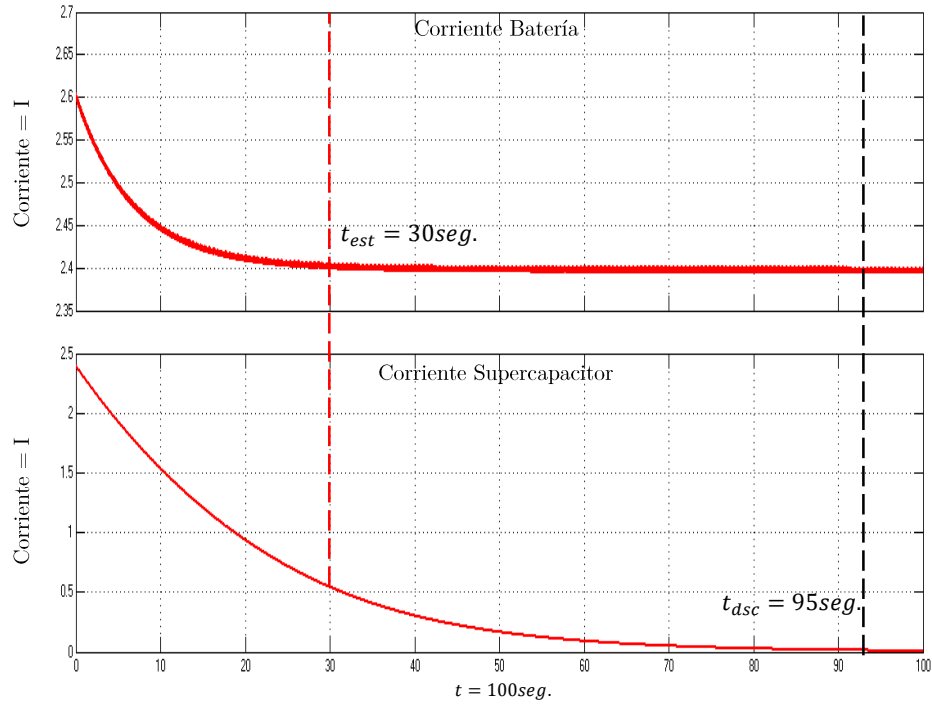


Figura 3. 12. Batería contra Supercapacitor, corriente.

La figura 3.12, muestra las gráficas de salida de corriente tanto en la batería como en el supercapacitor (Batería grafica superior, supercapacitor grafica inferior), donde $t_{est} = 30\text{seg}$. es el tiempo en donde se ve más estable la corriente de la batería, se puede observar que la corriente de la batería casi puede verse constante después de los 30 segundos, se observa también que está estabilidad que presenta la batería se mantiene a lo largo de la simulación, por otra parte, el supercapacitor reacciona de diferente manera, la pendiente de la corriente del supercapacitor se observa más suave en comparación con la de la batería que muestra una pendiente más abrupta, también se observa el tiempo en el que el supercapacitor llega a su descarga total indicado por $t_{dsc} = 95\text{seg}$., teniendo una duración aproximada de 95 segundos de descarga para este supercapacitor.

Después de haber realizado las simulaciones de descarga en corriente y voltaje para la batería y el supercapacitor, se analizaron los resultados y se compararon las señales de salida obtenidas de las simulaciones para poder resaltar algunos puntos que nos sirvan para realizar nuestra siguiente etapa del sistema:

- Se conocen los tiempos de descarga de la batería y del supercapacitor
- Se conoce su respuesta de descarga frente cargas resistivas
- De acuerdo a los resultados obtenidos pueden tomarse algunos datos para diseñarse la etapa de carga y descarga del sistema

Teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente, se puede comenzar a determinar algunos parámetros para el sistema tales como, la carga de consumo, por ejemplo: dependiendo de la carga que se utilice se determinará que acumulador proporcionará esa energía y por cuanto tiempo.

Diseño de la Etapa de Carga y Entrega de la Energía

La etapa de carga es una de las partes más importantes dentro de los sistemas de almacenamiento de energía, puesto que esta etapa determina el estado de carga en el que se encuentran los acumuladores, para que el sistema nunca se encuentre vacío o tenga un exceso de carga y pueda generar un mal funcionamiento en el sistema. Para esto, es necesario conocer algunas topologías de convertidores de corriente directa, los cuales puedan funcionar como alimentadores o fuentes de alimentación para los acumuladores.

Este capítulo está diseñado para la etapa de carga y entrega de la energía de los acumuladores (baterías y supercapacitores), de acuerdo a los datos recopilados en los capítulos anteriores.

4.1 Etapa de Carga

Para diseñar esta etapa se tiene que considerar que la generación del módulo solar no siempre será la misma, esto es debido a las diferentes condiciones climatológicas en las que se encuentre el módulo en cada día y en cada mes, por lo tanto, es necesario tomar en cuenta dos parámetros importantes:

- Cuando el módulo solar se encuentre generando energía
- Cuando el módulo solar no genere o genere poca energía

Cuando el módulo solar se encuentre en un día muy soleado y esté generando energía al máximo, de tal manera que el voltaje que reciba la batería pueda ser mayor que su capacidad total entonces, para controlar ese exceso de tensión se propone utilizar un convertidor reductor (DC/DC), el cual tendrá la función de reducir el exceso de voltaje para que no sobrepase la capacidad máxima de nuestros acumuladores (ya sea la batería o el SC).

Cuando el módulo fotovoltaico se encuentre en un día donde la radiación solar sea escasa y la producción de energía del panel solar también sea mínima, será necesario controlar dicha escases de voltaje que el módulo solar genere, para ello se utiliza un convertidor de tipo elevador (DC/DC) que ayude a incrementar el voltaje que se recibe de los paneles solares y así, poder elevarlo a una cantidad que sea considerable para los bancos de energía.

Sin embargo, para diseñar la etapa de carga de una manera eficiente, hay que considerar la principal cualidad de los supercapacitores (carga y descarga rápida) entonces, si los supercapacitores se cargan más rápido que las baterías, es necesario darle prioridad de carga a estos elementos.

Una vez conocidas las características del módulo solar y de los bancos de energía, se diseña la etapa de carga. La figura 4.1, muestra un diagrama del funcionamiento de esta etapa, el cual consta de dos fases, una marcada con un recuadro punteado de color azul, que representa la etapa de transformación y regulación de la energía y la otra, de color rojo que indica la etapa del sensado del nivel de voltaje que se detallará más adelante.

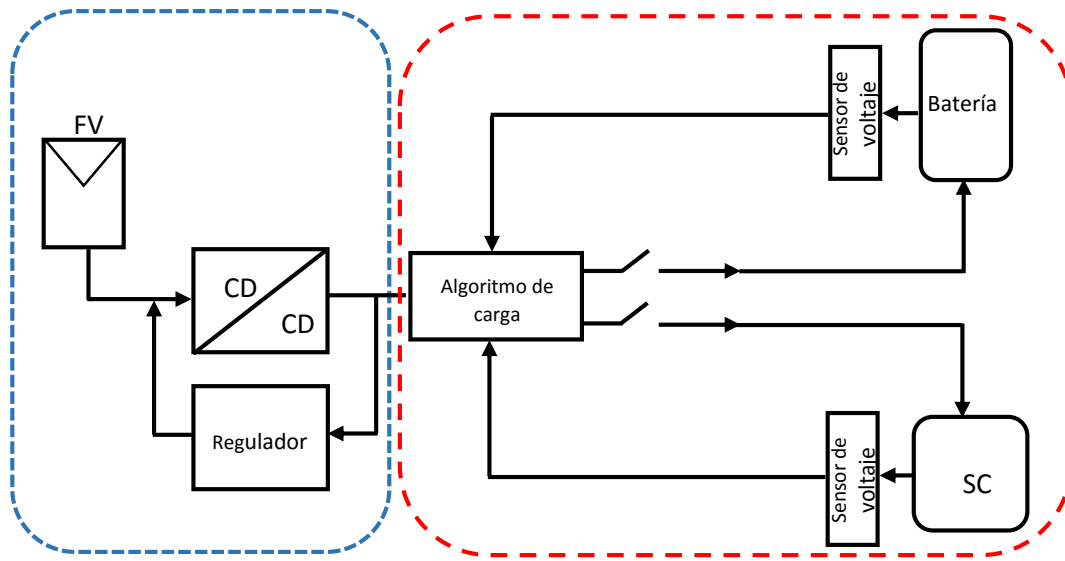


Figura 4. 1. Esquema de la etapa de carga.

En la figura 4.1, se observan las diferentes partes del sistema, acoplados para la etapa de carga de los bancos de energía, este esquema consta de dos bloques.

- El primer bloque llamado transformación y regulación de la energía, se encarga de transformar la radiación solar recibida por los módulos fotovoltaicos para después ser introducida a un convertidor CD/CD a corriente constante y poder garantizar que los acumuladores se carguen, después, esa energía se hace pasar a través de un bloque, que es capaz de regular el voltaje que proporciona el módulo solar y proporcione un voltaje adecuado para la batería y el banco de supercapacitores.
- En el segundo bloque se encuentra el registro del nivel de voltaje. En esta etapa se acoplan dos bloques, uno por cada banco de energía, el cual consiste en un divisor de voltaje para poder determinar el estado en el que se encuentran los acumuladores. Después, este valor es enviado y comparado con un voltaje de referencia para poder determinar su estado de carga y así controlar el flujo de energía del convertidor hacia los acumuladores. Dependiendo del registro de voltaje que el arreglo resistivo registre, será

enviado a un bloque el cual determinará a que acumulador deberá dejar pasar el flujo de energía para ser abastecido.

4.2.1 Diseño del Convertidor CD/CD

Los convertidores CD/CD son configuraciones de electrónica de potencia que permiten a partir de una fuente de CD constante, controlar el voltaje CD a la salida del convertidor. Estos convertidores tienen múltiples aplicaciones como: fuentes de poder en computadoras, sistemas distribuidos de potencia, sistemas de potencia en vehículos eléctricos, etc. Existen diferentes topologías de convertidores de corriente directa, entre las configuraciones más comunes se encuentran: Buck (reductora), Boost (elevadora) y Buck-Boost (elevador-reductor). Estas configuraciones permiten elevar, reducir o elevar/reducir el voltaje de alimentación (v_s) en la salida (v_o). Cada configuración, a su vez contiene cuatro elementos básicos: bobina (L), capacitor (C), diodo y un interruptor controlado (Q); así las propiedades de cada topología dependen de la ubicación de estos cuatro elementos.

Para este sistema se requiere de ambos modos de operación, por lo que se propone utilizar un convertidor Buck-Boost o elevador-reductor y así evitar una circuitería muy grande y reducir el costo de implementación. La figura 4.2, muestra un diagrama eléctrico de este convertidor.

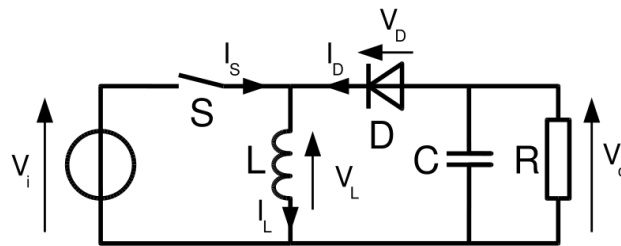


Figura 4. 2. Diagrama eléctrico, convertidor Buck-Boost.

Los convertidores CD-CD son usualmente diseñados para trabajar bajo ciertas condiciones de operación. De esta manera, se define el voltaje de salida (v_o) deseado, el voltaje nominal de alimentación (v_s) y el valor de la carga. Así, bajo este panorama se puede calcular cual debe ser el ciclo de trabajo promedio del convertidor. Sin embargo, en la realidad el convertidor está sujeto a diversos agentes externos como:

- Perturbaciones en el voltaje de alimentación.

- Variaciones en la carga.
- Resistencias parásitas y caídas de voltaje en los elementos reactivos del circuito.

Debido a estos factores, se debe añadir un lazo de control y así poder regular el voltaje de salida en el valor deseado.

Este convertidor es una combinación de los dos mencionados anteriormente, debido a la característica que presentan en su salida, ya que puede ser mayor o menor que la entrada. Funciona en modo de fuente de alimentación conmutada con una forma similar a la del convertidor boost y el convertidor buck. El voltaje de salida es ajustable variando el ciclo de trabajo del transistor de conmutación. Un posible inconveniente de este convertidor es que el interruptor no tiene una terminal conectado a tierra; esto complica el circuito. Además, la polaridad del voltaje de salida es opuesta al voltaje de entrada. Ninguno de los anteriores inconvenientes tiene consecuencias si la fuente de suministro está aislada del circuito de carga.

Se calculó el convertidor para que su salida sea igual a 12V, se tomó este rango por la capacidad de la batería, para no sobrepasarla y evitar dañarla, tanto para el caso elevador como el reductor, tomando en cuenta que en la entrada del convertidor habrá un rango de voltaje que oscila entre 9V a 15V, debido a que la entrega de voltaje del módulo fotovoltaico varía entre este rango dependiendo de las condiciones solares en el que se encuentre. Se realizó el diseño de tal manera que la bobina opere en corriente permanente. Se calcula el ciclo de trabajo, el tamaño de la bobina y el condensador, el valor máximo de la tensión de pico de cada dispositivo y la corriente eficaz en la bobina y en el condensador.

El ciclo de trabajo (D) para cada valor se calculó con la siguiente ecuación.

$$D = \frac{11}{11-9} = 5.5 \quad (4.1)$$

$$D = \frac{11}{11-15} = 2.7 \quad (4.2)$$

Por lo tanto, se tendrá lo siguiente:

$$D_e = Vin(9), Vout(11) = 5.5 = 55\%$$

$$D_r = Vin(15), Vout(11) = 2.7 = 27\%$$

En donde D_e es el ciclo de trabajo para el modo elevador y D_r es el ciclo de trabajo para el modo reductor.

Para seleccionar la frecuencia de conmutación adecuada y el tamaño de la bobina, de forma que ésta opere en modo de corriente permanente, se seleccionó una frecuencia de conmutación de 20 kHz, que es lo suficientemente pequeña como para que las pérdidas en los interruptores sean pequeñas [15]. El tamaño mínimo de la bobina se obtiene con la siguiente ecuación:

$$L_{min} = \frac{D(1-D)(1-D)R}{2f} \quad (4.3)$$

Para asegurar una corriente permanente le sumaremos un 25% más a la bobina por lo tanto el tamaño de la bobina es: $82 \mu H$ [15].

Para determinar las corrientes máximas y mínimas en la bobina utilizamos las ecuaciones 4.4 y 4.5.

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta_{IL}}{2} \quad (4.4)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta_{IL}}{2} \quad (4.5)$$

Para calcular el capacitor utilizamos la ecuación 4.6 y 4.7

$$\frac{\Delta V_O}{V_O} \cong \frac{D}{RCf} < 1\% \quad (4.6)$$

$$C > \frac{D}{Rf(\Delta V_O/V_O)} \quad (4.7)$$

En la figura 4.3, se visualiza el diagrama eléctrico del convertidor operando en modo elevador-reductor, se pueden observar todos los elementos que interactúan en esta simulación incluyendo un generador de pulsos para que el Mosfet pueda conmutar, el circuito fue

realizado en Matlab, se simuló el diseño del convertidor ya calculado y utilizando los parámetros de diseño obtenidos, para esta simulación se utilizaron elementos ideales.

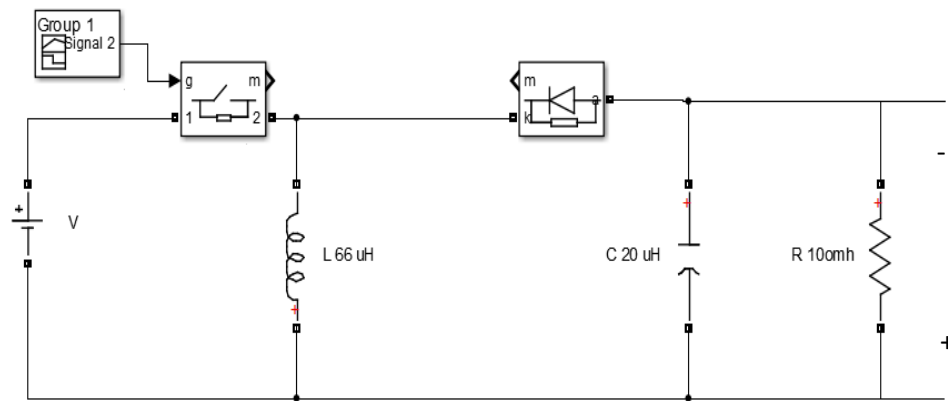


Figura 4. 3. Circuito eléctrico, convertidor Buck-Boost.

El funcionamiento de este convertidor varía dependiendo del voltaje de entrada y del ciclo de trabajo ya que, si el ciclo de trabajo es mayor al 50%, la salida del convertidor será más grande que la entrada y si el ciclo de trabajo es menor entonces la salida será menor que la entrada.

Para modo elevador se necesita un ciclo de trabajo del 55% y para el modo reductor se requiere un ciclo de trabajo del 27%. En la figura 4.4, se observa la salida obtenida en voltaje para el modo elevador, para esta simulación se utilizó un voltaje de entrada de 15v.

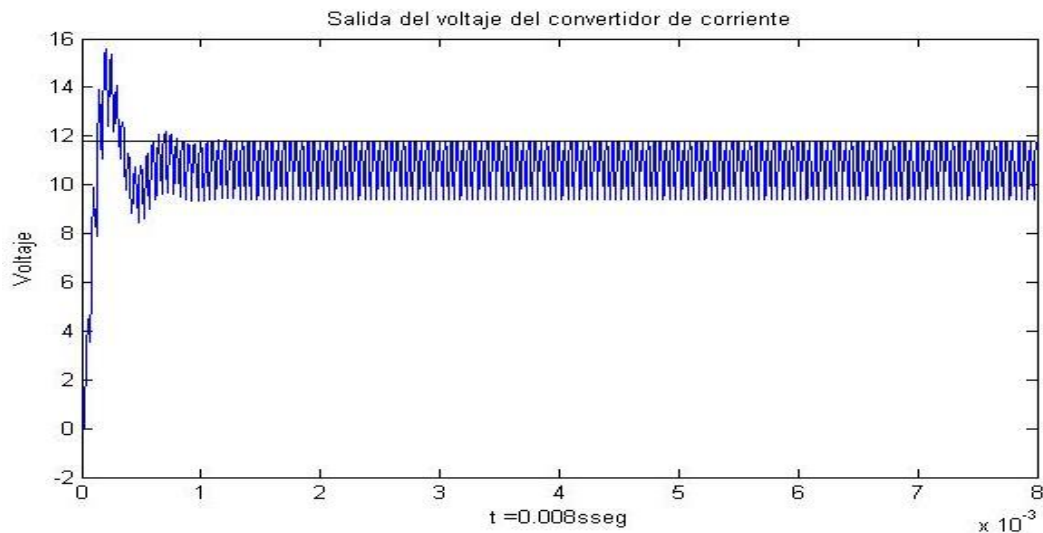


Figura 4. 4. Convertidor Buck-Boost modo elevador.

En la figura 4.4, se observa el comportamiento del voltaje de salida, cuando el ciclo de trabajo es mayor al 50 %. La salida oscila entre los 10 V y los 12 V eso quiere decir que la entrada del convertidor debe ser menor a la salida, lo cual concuerda con los datos de diseño.

A continuación, en la figura 4.5 se muestra la respuesta del convertidor operando en modo reductor utilizando un ciclo de trabajo del 27% y un voltaje de entrada de 15V.

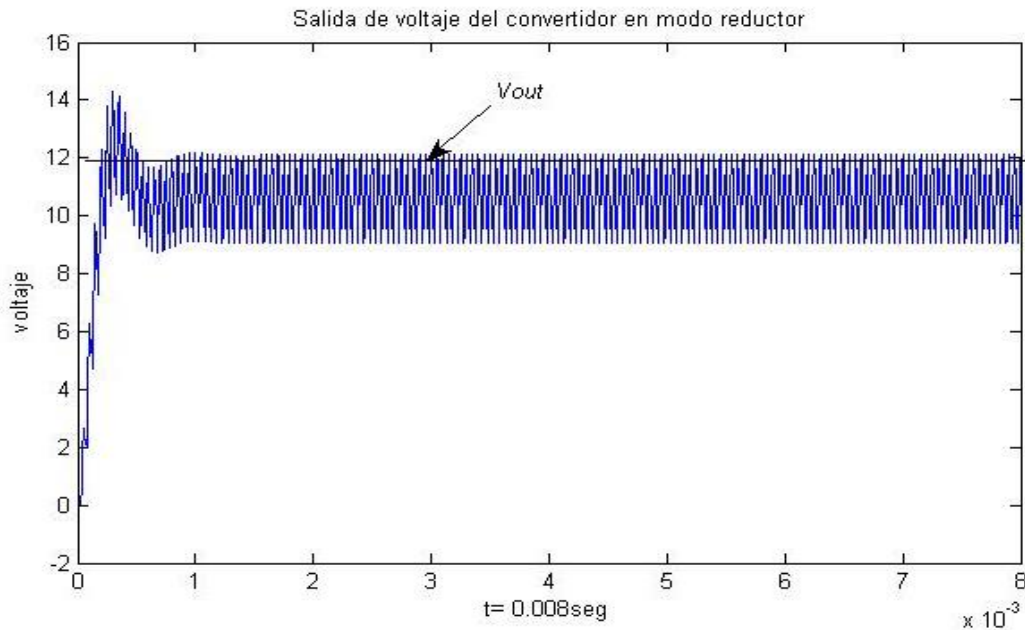


Figura 4. 5. Convertidor Buck-Boost modo reductor.

Se observa que la salida en esta ocasión es un poco menor que en el modo elevador, el voltaje de salida oscila entre 10V y los 11.5.

Con los resultados de esta simulación se puede decir que el diseño del convertidor propuesto funciona de manera adecuada ahora se puede pasar a la siguiente etapa que es el control, la manera en que se puede variar el ciclo de trabajo entre el 27% y el 50%.

4.2.2 Control Para el Convertidor

La variable a controlar para regular el voltaje de salida es el patrón de conmutación del interruptor controlado. Siendo la estrategia base, conmutar el interruptor a una frecuencia fija variando solamente el tiempo de activación del mismo: estrategia PWM

(modulador de ancho de pulsos). Esta estrategia se puede implementar a través de comparar una señal (*Vrampo* o *Vescalón*) de frecuencia fija y voltaje pico o voltaje máximo, con un voltaje de referencia (*vref*) para lograr el voltaje de activación (*vPWM*). Notar que se debe de cumplir siempre que $0 \leq vref \leq Vmax$.

En consecuencia, se busca reducir las variaciones en el voltaje de salida ante el efecto de las posibles perturbaciones del voltaje de alimentación y resistencia de carga, añadiendo un factor de corrección en el ciclo de trabajo. Esto se logra utilizando un lazo de retroalimentación proporcional-integral (Figura 4.6).

En la figura 4.6, se puede observar el diagrama de bloques para el sistema de carga donde ya se incluye el control PI seguido del Modulador de ancho de pulsos (PWM) y después la planta (convertidor CD/CD). Es un sistema de lazo cerrado.

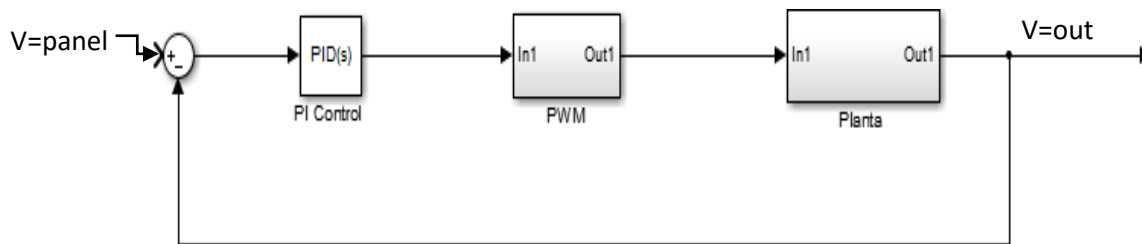


Figura 4.6. Diagrama a bloques del control para el convertidor.

4.2.3 Sensado del Estado de Carga

Tomando en cuenta las condiciones de la batería y de los supercapacitores, es muy importante saber el nivel en el que se encuentren ya que si no se toma ninguna acción de medida pueden llegar a dañarse. Para ello, se utiliza un divisor de voltaje para cada elemento de almacenamiento y poder sensar constantemente el nivel en el que se encuentren los bancos de almacenamiento. En la figura 4.7 se muestra un circuito eléctrico en el que se observan sus dos únicos componentes, que consta de un arreglo de dos resistencias conectadas en serie.

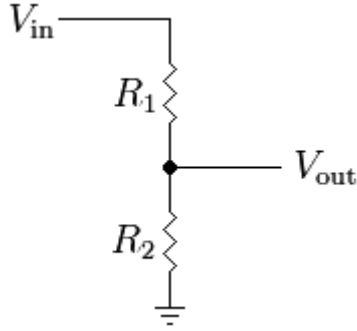


Figura 4.7. Divisor de voltaje.

Donde V_{in} es el voltaje de referencia que viene de la batería, V_{out} el voltaje de salida del divisor y R_{tot} es la resistencia total será la suma de R_1 y R_2 .

Seleccionaremos un $V_{out} = 5V$, en base a ese valor se calcula el valor de R_1 y R_2 con la ecuación 4.8.

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.8)$$

Si queremos obtener un $V_{out} = 5V$, se propone el valor de $R_1 = 1K$

La tabla 4.1 muestra los porcentajes del estado de carga o SoC por sus siglas en inglés (State of Charge) y el voltaje que le corresponde a cada porcentaje

Tabla 4.1 Porcentajes de SoC.

V_{in}	V_{out}	SoC
12V	5V	100%
11.5V	4.75V	95%
11V	4.5V	90%
10.5V	4.3V	85%
10V	4.1V	80%

4.2.4 Algoritmo de carga

La parte final para la etapa de carga, consiste en determinar el orden en que serán cargados los acumuladores, ya que no es posible cargar los dos bancos en el mismo instante de tiempo, para ello se realizó un algoritmo que sea capaz de decidir, de acuerdo a los parámetros obtenidos anteriormente (Tabla 4.1) cuál de los dos acumuladores será cargado, pero siempre dándole prioridad al supercapacitor, esto debido a que los supercapacitores pueden ser cargados más rápido. La figura 4.8, muestra un diagrama de flujo el cual describe el funcionamiento de dicho algoritmo.

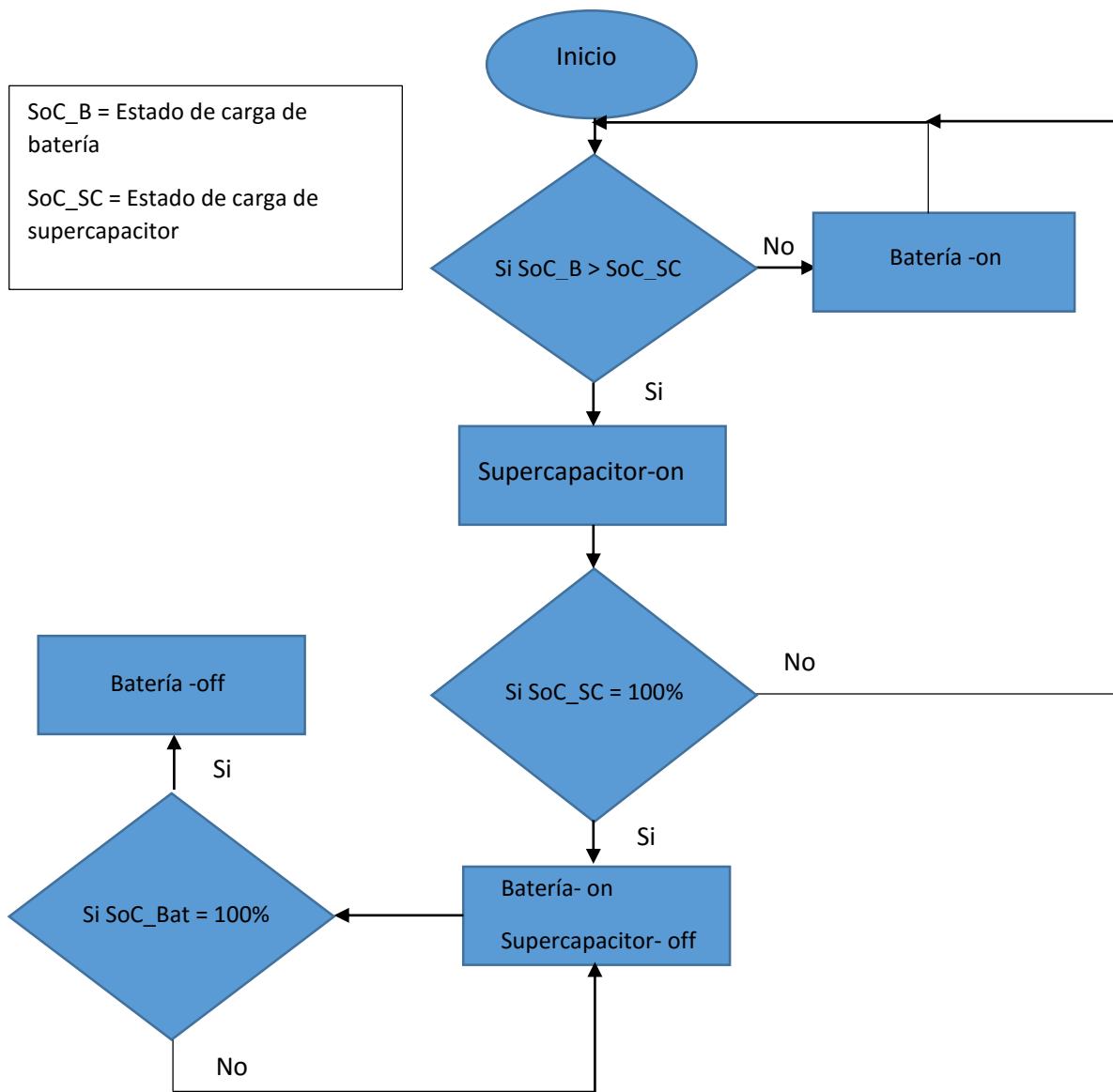


Figura 4.8. Diagrama de flujo, algoritmo de carga.

4.3 Entrega de la Energía

En este último bloque se realiza la entrega de la energía, en este bloque la energía proveniente de los acumuladores será insertada en un bloque de decisión, después esa energía pasará por un convertidor de corriente directa a corriente alterna (CD/CA), para finalmente ser entregada una carga resistiva o inductiva

Si sabemos que las baterías son lentas para entregar la energía cuando se presenta una exigencia de corriente alta lo cual, pueda ocasionar que existan huecos de suministro de energía o que la carga no reciba toda la corriente que necesita y si sabemos también, que los supercapacitores funcionan diferente ante esta problemática, es decir que por la alta capacidad que tienen de almacenar energía y la rapidez con la que estos dispositivos entregan la energía entonces, podemos decir que los SC son mejor en cuanto a arranque pero malos a largo tiempo y las baterías son malas para el arranque pero buenas para suministrar energía de manera constante a largo plazo.

Entonces, para ello se emplea un bloque de decisión a la salida de los bancos de almacenamiento y poder proporcionar la energía a la carga, dependiendo de cómo sea requerida, si se requiere una alimentación de energía lenta y constante entonces, el control abastecerá la energía de la batería, si la carga requiere de una alimentación rápida entonces, el control proporcionará la energía del banco de supercapacitores al arranque para después cambiar a la batería. En la figura 4.9 se observa el esquema de esta etapa.

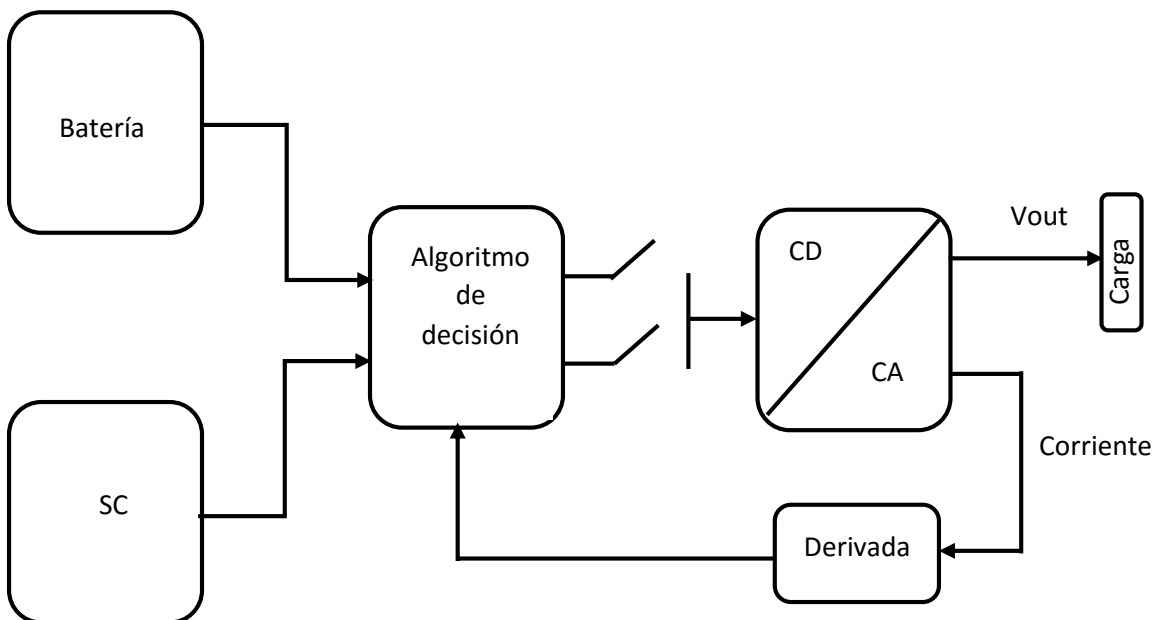


Figura 4.9. Etapa de entrega de la energía.

4.3.1 Algoritmo de decisión

Este algoritmo está basado en algoritmos de decisión y administración de la energía, estos funcionan basados en toma de decisiones de eventos, dependiendo de parámetros iniciales que se le indiquen. Para este algoritmo se tomó en cuenta el estado de carga (SoC) de los bancos de energía, con la finalidad de garantizar que este bloque realice una buena entrega de la energía.

El parámetro más importante dentro de este algoritmo es la derivada de la corriente, si la derivada de una función se define como, una medida de la rapidez con la que cambia el valor de dicha función matemática, según cambie el valor de su variable independiente. La derivada de una función es un concepto local, es decir, se calcula como el límite de la rapidez de cambio media de la función en un cierto intervalo, cuando el intervalo considerado para la variable independiente se torna cada vez más pequeño. Por ello, se habla del valor de la derivada de una cierta función en un punto dado [16]. Entonces al hacer de la corriente una función y aplicarle la derivada, se consigue obtener la rapidez con la que la corriente cambia con respecto a la carga, eso nos ayuda a saber la exigencia de corriente que la carga requiera sin importar el valor de esta.

Los parámetros de entrada que se tomaron para este algoritmo son:

- El SoC de la batería
- El SoC de banco de supercapacitores
- Derivada de la corriente

Al final de este bloque se obtendrán dos salidas, esto es debido a que una salida será la energía que viene de la batería y la otra, será la energía que proviene del supercapacitor, las cuales habilitan dos interruptores que se irán accionando dependiendo de las decisiones que tome el algoritmo después, este voltaje alimentara a un inversor de corriente directa a corriente alterna. En la figura 4.10, se observa el diagrama de flujo de este algoritmo en donde se describe todo el proceso.

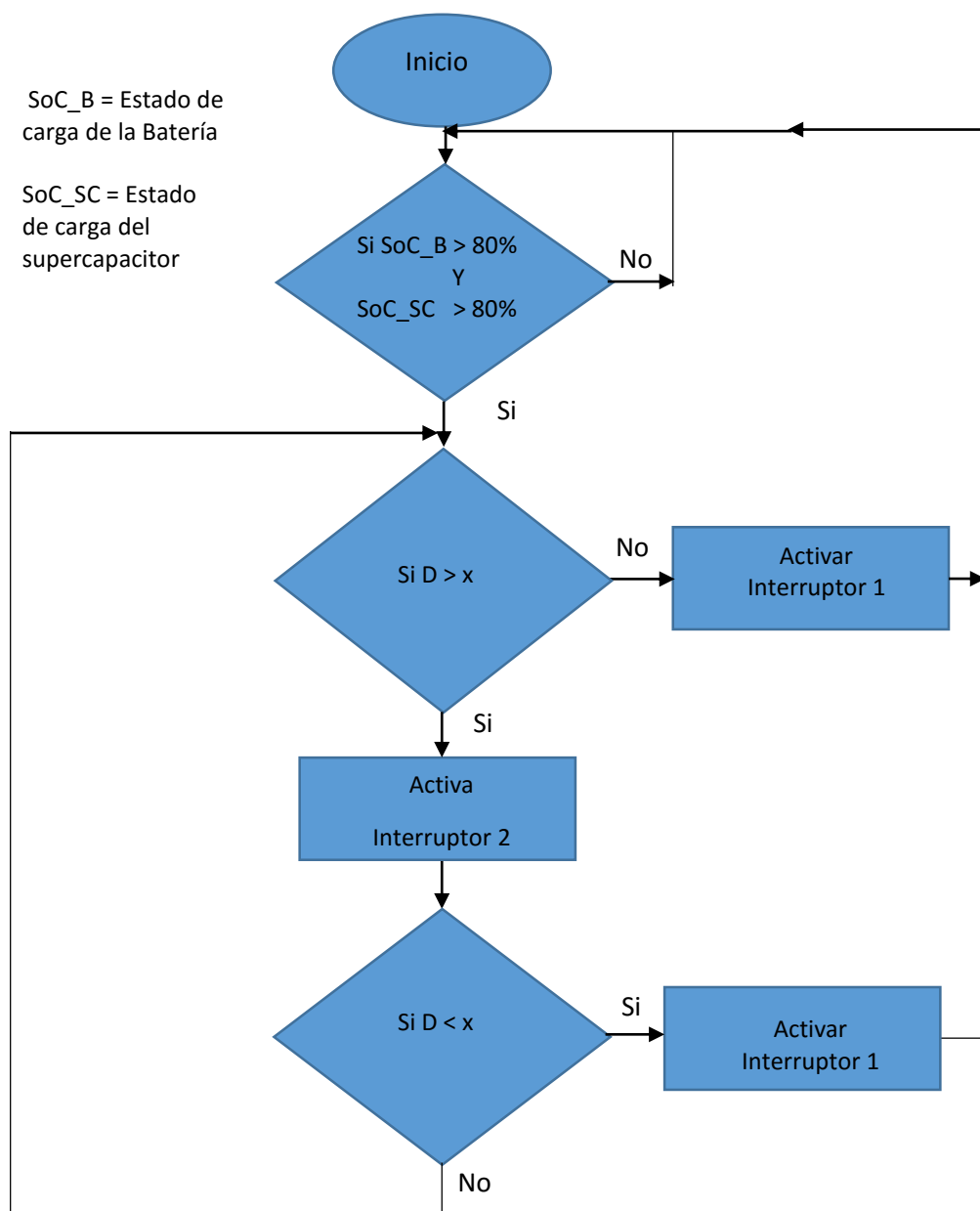


Figura 4.10. Diagrama de flujo, Algoritmo de decisión.

Primero se monitorea el estado de carga de los acumuladores (SoC_b y SoC_SC) si el SoC en ambos es menor del 80% el sistema no funciona, eso quiere decir que los bancos de energía no cuentan con la suficiente energía para alimentar la carga que se haya conectado, se tomó este parámetro con la finalidad de que los acumuladores cuenten con energía suficiente y así evitar un daño en ellos. En cuanto se cumpla esa condición se compara el valor de la derivada (D) de la corriente con un valor propuesto (X) esto se hizo con el fin de

poder observar los momentos en los que es accionado cada acumulador. El decremento de la derivada también es importante, si la derivada presenta un decremento entonces, eso quiere decir que la exigencia de corriente que pide la carga ha disminuido y la batería ahora hará el suministro de energía.

4.3.2 Inversor de corriente directa a corriente alterna

Para este sistema se propone utilizar un inversor de CD/CA y observar su salida para fines de estudio, el inversor que se propone a continuación es un inversor de la topología de puente completo, este inversor es un modelo de manera general no se calculó ninguno de su elementos y los valores de las cargas se cambian dependiendo de lo que se necesite, a continuación se describe el funcionamiento de este inversor.

Los convertidores de CD a CA se conocen como inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de CD en un voltaje simétrico de salida en corriente alterna, con la magnitud y frecuencias deseadas. Así mismo, tanto el voltaje de salida como la frecuencia pueden ser variables o fijos [10]. En la figura 4.11 se muestra la topología básica de un inversor de puente completo.

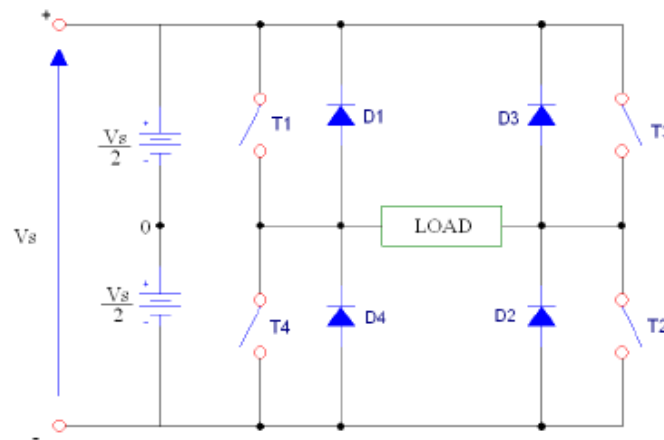


Figura 4.11. Inversor de puente completo.

En este tipo de topología no deben estar cerrados T1 y T4 a la vez, así como tampoco debería estarlo nunca T2 y T3, para evitar un cortocircuito que podría ocurrir en este estado, funcionarán por parejas pero siempre será T1 con T2 y T3 con T4.

Además en aquellos momentos en las que las conmutaciones en las cuales la corriente y la tensión no posean el mismo signo, los interruptores se cortarán, por ello existen los diodos antiparalelo, para cuando esto ocurra poder poseer un conmutador bidireccional en corriente.

El funcionamiento en esta topología es la siguiente: primero estarán en corto T1 y T2 dejando una caída de tensión en la carga de V_s ; en el siguiente instante de tiempo T1 y T2 se abrirán, y T3 y T4 se cerrarán, provocando una caída de tensión en la carga $-V_s$. Con lo cual la tensión en la carga en una onda cuadrada con amplitud V_s .

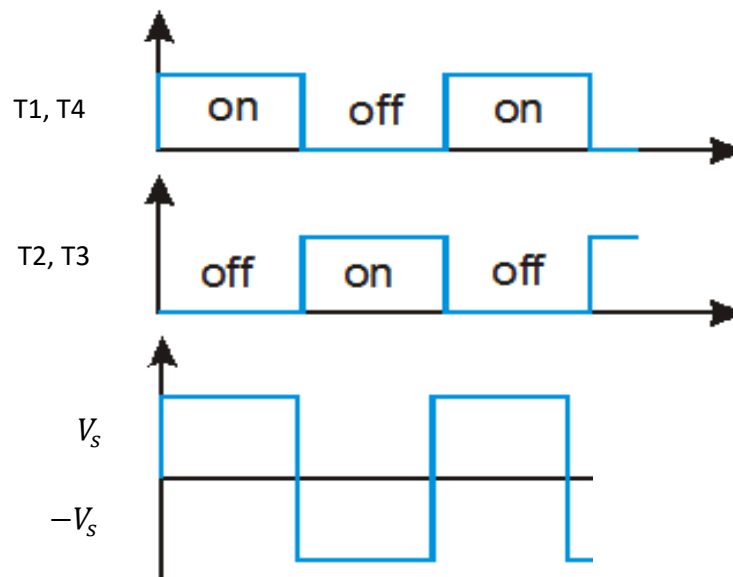


Figura 4.12. Funcionamiento del inversor.

En la figura 4.12 se observa el funcionamiento antes descrito, es claro ver los momentos en los que hacen su trabajo los interruptores y la señal de salida final, que es una señal cuadrada.

Utilizando esta topología se propone un inversor de puente completo a 12V de entrada y 12V de salida, la salida dependerá del nivel de voltaje en que se encuentre la batería y el supercapacitor, esto, debido a que el inversor será alimentado por ellos.

Para fines prácticos de simulación, el inversor fue alimentado por un fuente de voltaje de 12V, solo para probar de manera individual el inversor, más adelante se realizan pruebas pero ahora alimentado por la batería y el supercapacitor.

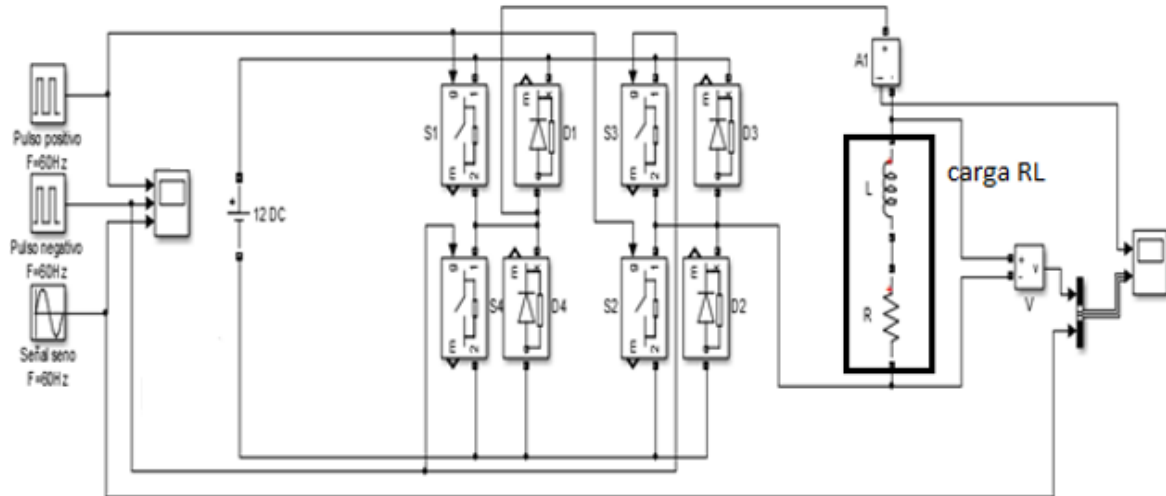


Figura 4.13. Simulación del inversor.

La figura 4.13 muestra el circuito de conexión, se utilizaron 4 diodos ideales y 4 interruptores ideales para simular los elementos de potencia que realizan los cambios, a estos interruptores se les introdujo un pulso para conmutarlos, estos pulsos se muestran en la figura 4.14. y 4.15.

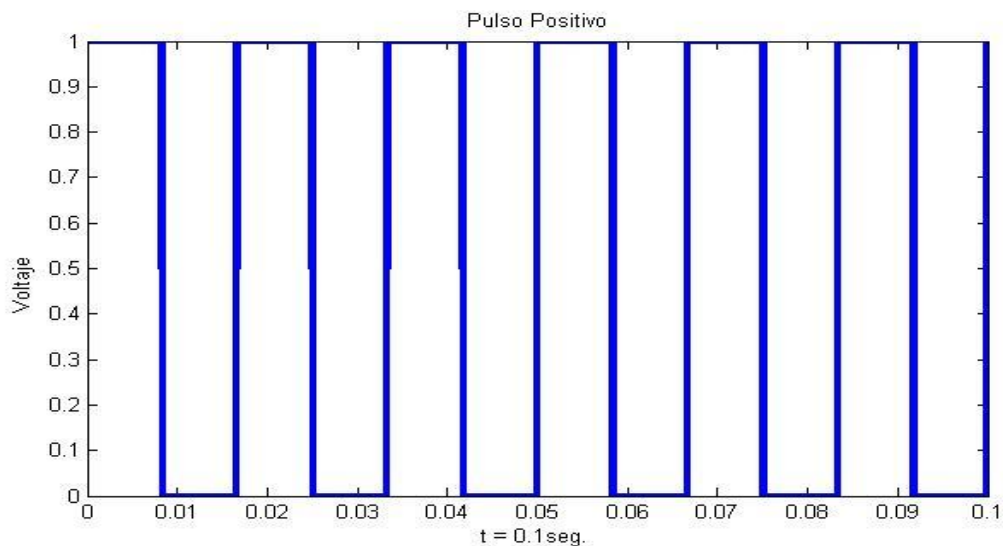


Figura 4.14. Pulso positivo de entrada para los interruptores del inversor.

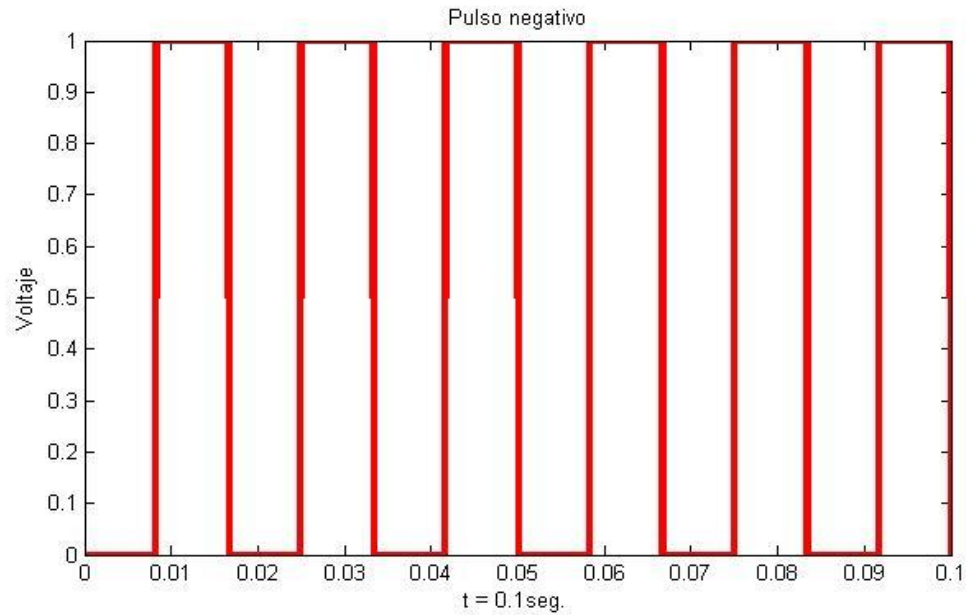


Figura 4.15. Pulso negativo para los interruptores del inversor.

Estas señales que se utilizaron tienen una frecuencia de 60Hz y tienen una amplitud de 1V cada pulso.

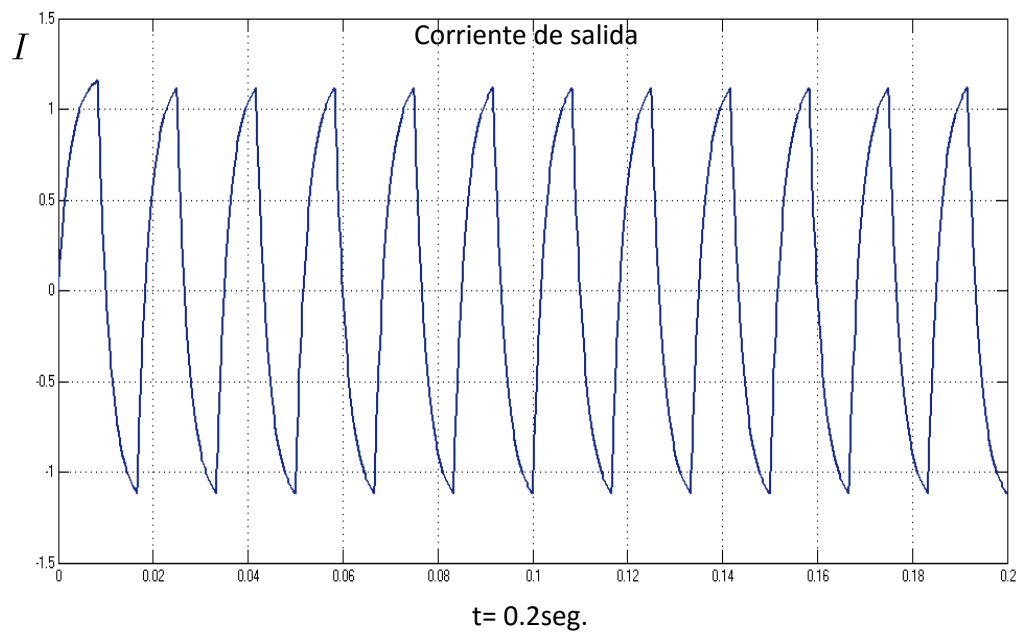


Figura 4.16. Corriente de salida del inversor.

La figura 4.16 muestra la señal de salida del inversor en corriente, esta forma de onda se obtuvo debido al tipo de carga que se conectó al inversor, como se mostró en la figura 4.13, es una carga compuesta por dos elementos, una resistencia y un inductor, a este tipo de cargas también se le conoce como cargas RL

El voltaje de salida se observa en la figura 4.16 se puede notar que el voltaje de salida oscila entre 12V y -12V y su forma de onda es más parecido a una señal cuadrada.

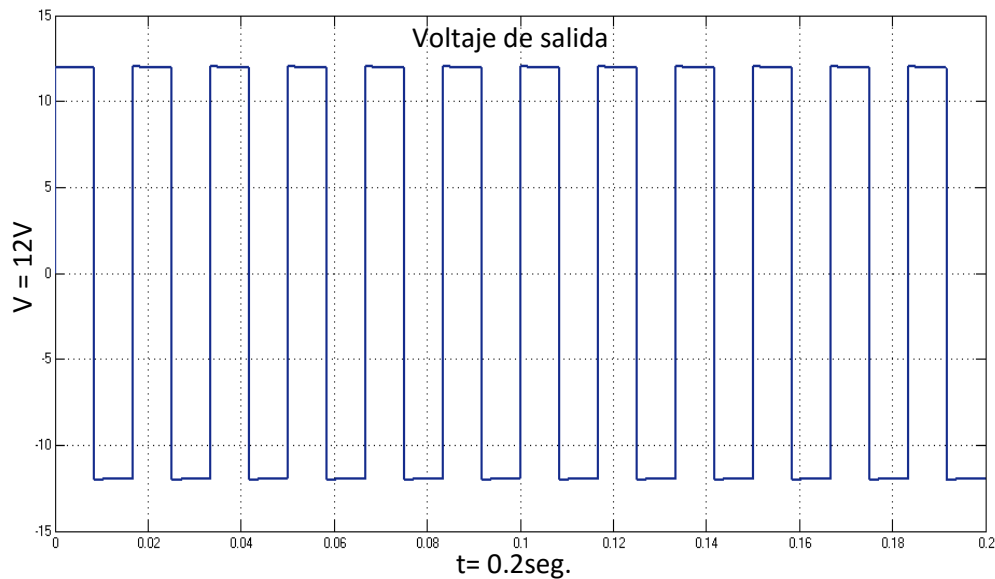


Figura 4.16. Voltaje de salida.

Ahora comparamos la señal del voltaje de salida con una señal de referencia que tiene una forma de onda senoidal poder observar si la señal de salida del inversor se encuentra en fase con la señal de referencia y que tanto se aproxima a una señal seno como se muestra en la figura 4.17.

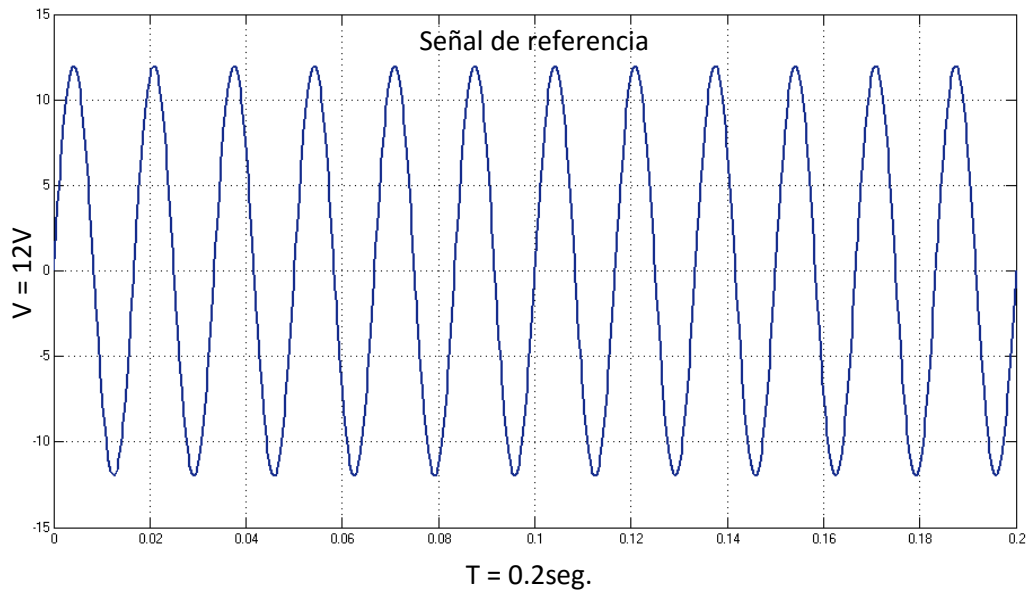


Figura 4.17. Señal de referencia.

La figura 4.17 muestra una señal senoidal con una amplitud de 12V y una frecuencia de 60Hz., con la que se compara la señal de salida. Como se observa en la figura 4.18.

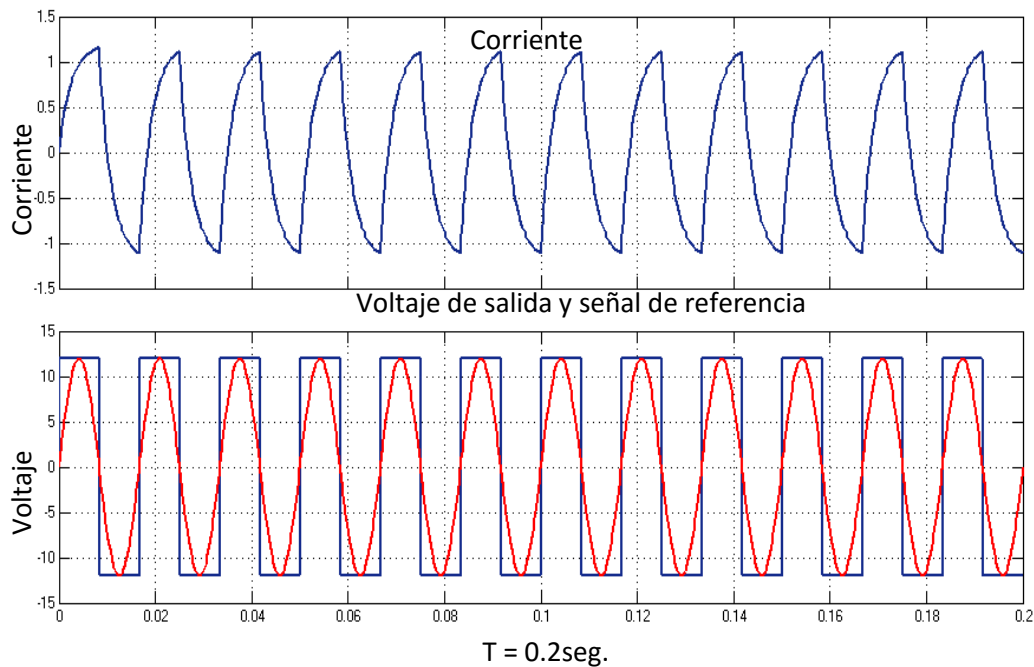


Figura 4.18. Comparación de señales.

Se puede observar en la figura 4.18 que nuestra la señal de salida del inversor en voltaje y corriente, es correcta ya que comparándola con la señal senoidal, nos damos cuenta que ambas señales se encuentran en fase.

Resultados y Conclusiones

En este capítulo se analizan todos los resultados obtenidos en el capítulo 4, se realizan las pruebas del sistema completo incluyendo el algoritmo de carga y el de descarga, también se compara a un sistema de alimentación de energía que utiliza solo almacenamiento solo con baterías contra el sistema propuesto en este trabajo, se analiza los beneficios que los supercapacitores aportan a este tipo de sistemas.

Por último se enuncian algunos aspectos que se deben de tomar si se quiere utilizar supercapacitores en sistemas de almacenamiento de energía.

5.1 Funcionamiento de la etapa de carga.

Para probar si el funcionamiento de la etapa de carga se puso en marcha todo el sistema iniciando con el convertidor de voltaje y el algoritmo de carga en la figura 5.1 se observa la etapa de carga estas simulaciones se realizaron con a herramienta de MATLAB y su librería de Simulink.

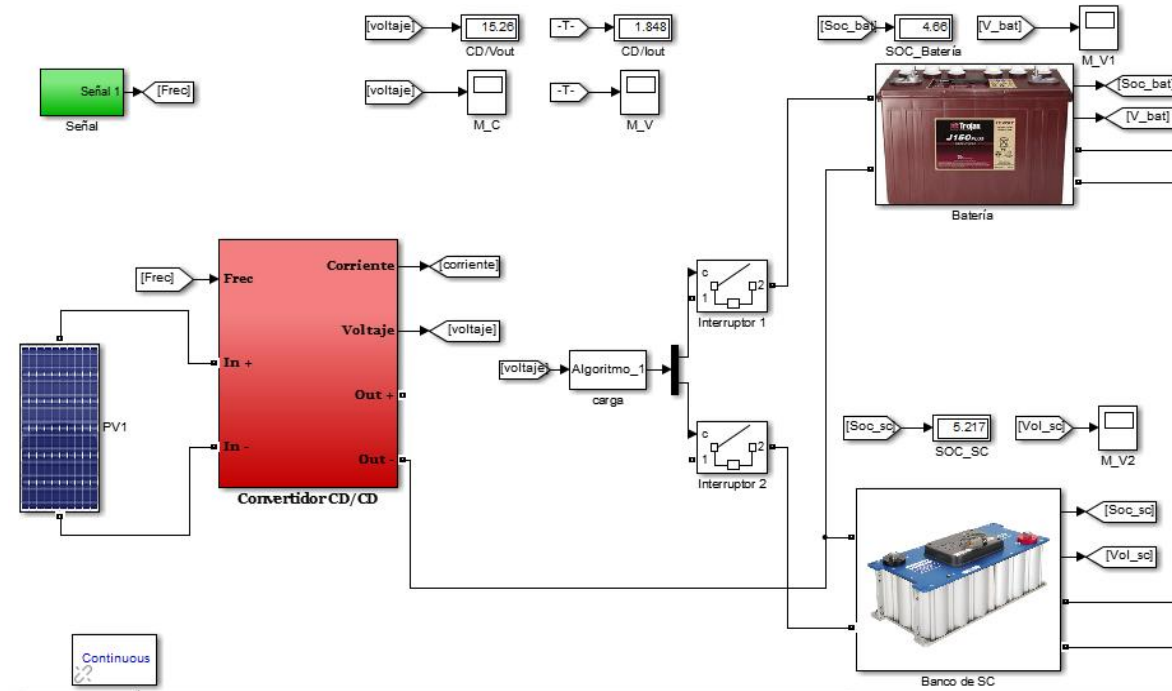


Figura 5.1. Primera etapa

Para poder realizar esta simulación se utilizó una fuente de voltaje que representa al panel solar, esta fuente se caracterizó de la misma manera que el panel solar en cuanto a voltaje, el bloque rojo representa el convertidor de corriente CD/CD que fue propuesto y revisado en el capítulo 4, en el bloque de color verde se encuentran el control de las señales el cual se encarga de modificar el ciclo de trabajo para que el algoritmo de carga determine hacia hace banco de almacenamiento deje pasar la energía. Para esta simulación se incluyeron también medidores de corriente y de voltaje para poder monitorear la salida del convertidor de corriente a cada instante.

Para la simulación de a batería y el supercapacitor se utilizaron las mismas que fueron utilizadas en el capítulo 3. El algoritmo de descarga se encuentra conectado al convertidor de corriente a la salida de voltaje y después se conectan en el dos don interruptores los cuales están conectados, uno hacia la batería y el otro hacia el supercapacitor.

En la figura 5.2 se observa la salida del convertidor de corriente aplicando el control de señales para modificar el ciclo de trabajo.

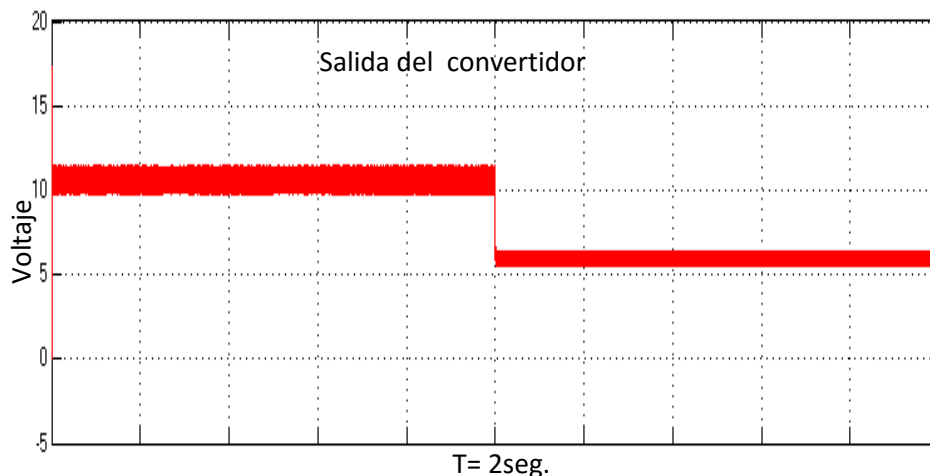


Figura 5.2. Salida del convertidor.

En la figura 5.2 se observa que la salida sufre un cambio a la mitad de la simulación, ese cambio es debido al cambio automático de ciclo de trabajo que se hace cuando existe una variación de voltaje a la entrada del convertidor de corriente, en estas oraciones ya para fines prácticos de que se observara el cambio que se presenta y se pueda observar que la etapa de carga. En esta simulación se introdujo un voltaje de entrada de 9v, con este voltaje podemos observar cuando el convertidor funciona de las dos maneras, cuando inicia la simulación el voltaje aumenta hasta los 12v comprobando el modo elevador, cuando se hace el cambio de ciclo el voltaje cae aproximadamente hasta 5v comprobando que el modo reductor del convertidor funciona.

5.2 Funcionamiento de la Etapa de Entrega de la Energía

En este apartado se presentan las pruebas y simulaciones que se realizaron para observar el funcionamiento general de la etapa de entrega de la energía, se presentan parte por parte los resultados obtenidos del algoritmo de decisión al momento de interactuar con sus parámetros iniciales y de todos los bloques que lo integran, así como la salida final obtenida hacia la carga, en la figura 5.3 se presenta la manera en que se interconectaron las baterías con el algoritmo de decisión.

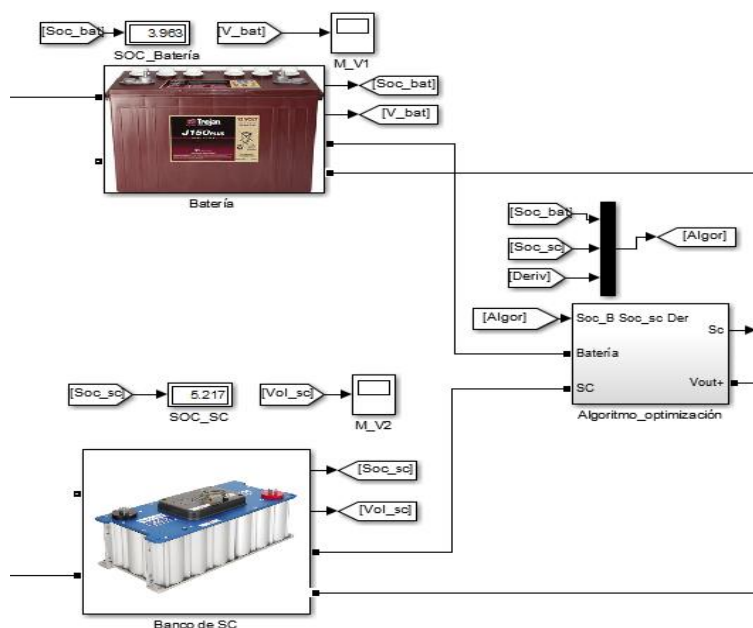


Figura 5.3. Etapa de entrega de la energía.

En la figura 5.3 se observan los elementos que interactúan para esta etapa, los primeros en intervenir son los acumuladores y en seguida los medidores del estado de carga de ambos, el bloque del centro contiene el algoritmo de decisión, los estados de carga de los bancos de energía se conectan al bloque de decisión, y por último está la señal de entrada de la derivada, en donde se calcula la derivada de la corriente, en la figura 5.4 se muestra la salida de la derivada y la salida de la corriente del inversor, que es la que se toma en cuenta para obtener la rapidez de cambio de esa corriente.

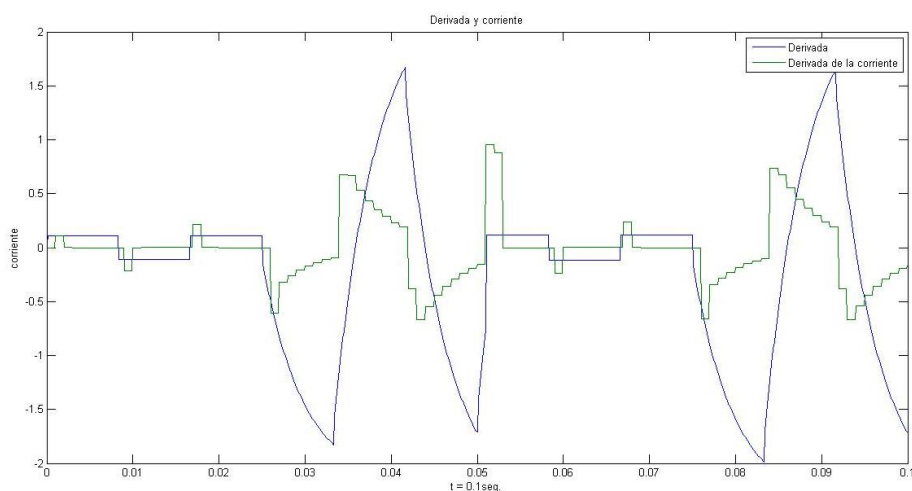


Figura 5.4. Corriente y derivada.

En la figura 5.4 se observan dos señales, una de color azul y otra de color verde, la señal que está en color azul representa la corriente de salida del inversor que cae sobre las cargas resistivas y inductivas que se conectaron, la señal de color verde el resultado de derivar la corriente de salida del inversor, se puede observar que la derivada cabía respecto a la corriente y cuando se hace un cambio de carga.

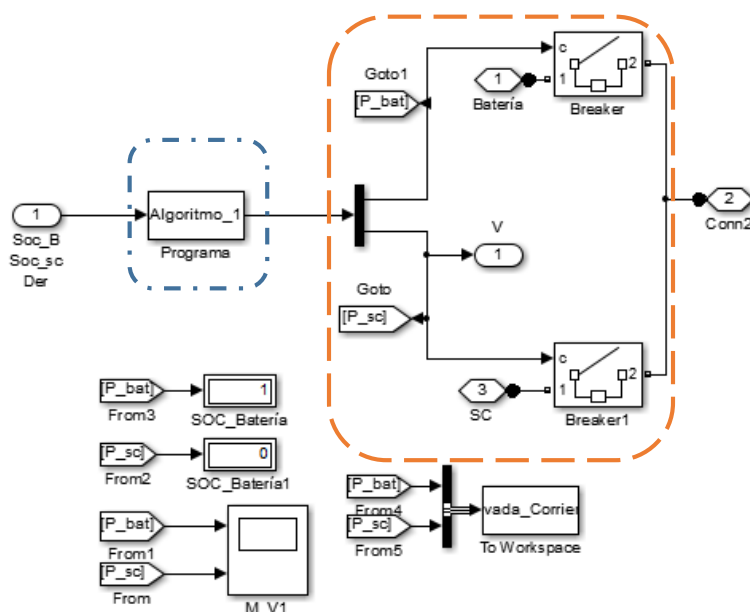


Figura 5.5. Bloque de algoritmo de decisión y cambio de carga.

En la figura 5.5 se observan los bloques que interactúan con el algoritmo de decisión, en el bloque de color azul se encuentra al algoritmo que se diseñó para el sistema, se encuentra dentro de un bloque llamado función *s* de MATLAB este bloque acciona dependiendo de la decisión que tome, dos interruptores marcados con un círculo naranja, también se muestran instrumentos de monitoreo en donde se observa en el transcurso de la simulación el cambio entre batería y supercapacitor indicando con “1” si esta encendido o “0” si está apagado.

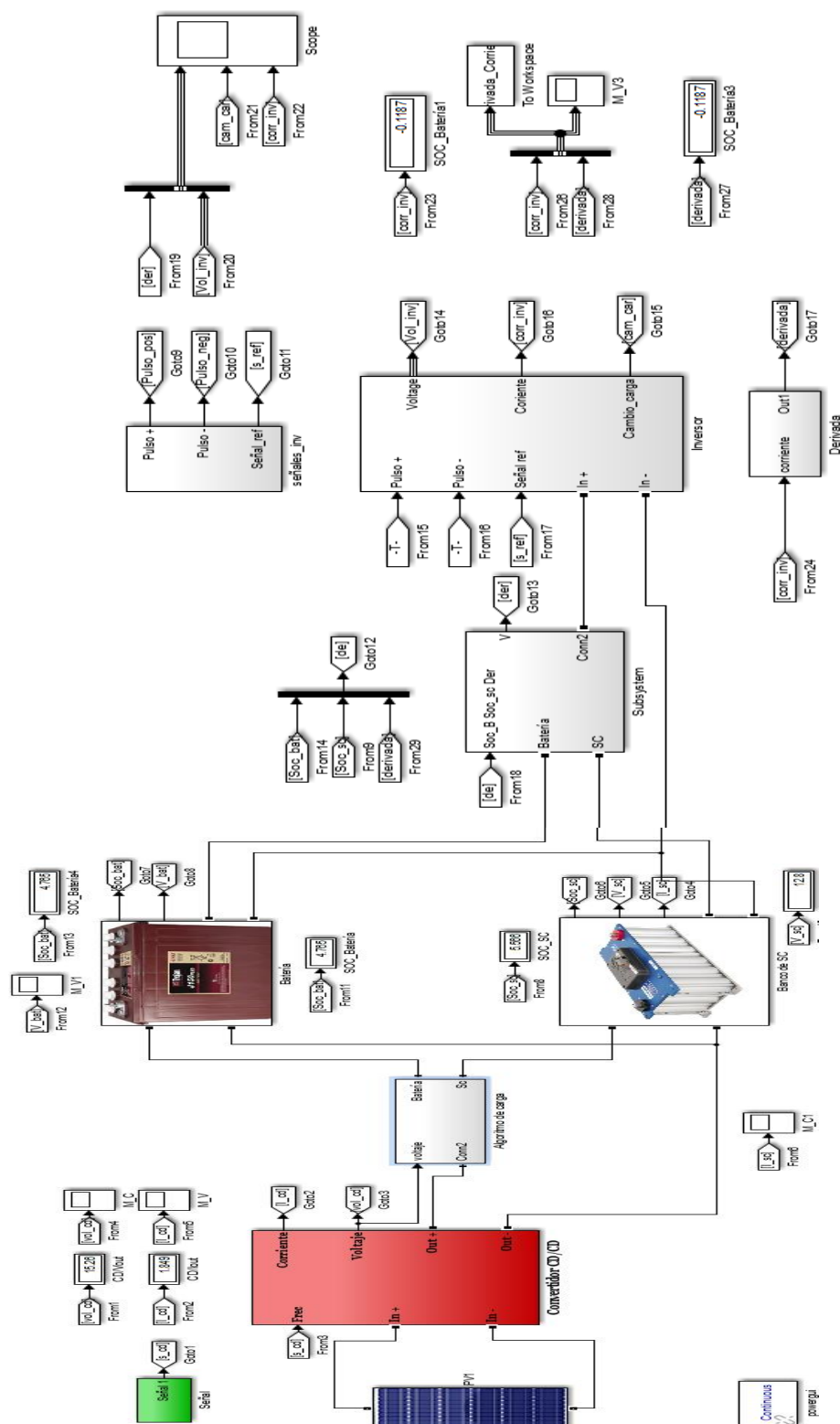


Figura 5.6. Diagrama general del sistema.

En la figura 5.6 se muestra el diagrama del sistema completo, se puede ver como todos los elementos fueron conectados entre sí para lograr un funcionamiento óptimo. En la figura 5.7 se observa el voltaje de salida final con todos los elementos actuando.

Para poder observar de manera más clara el funcionamiento, se utilizaron dos tipos de carga de diferentes valores, estas fueron adaptadas de tal manera que a lo largo de la simulación se intercambiaran entre ellas y así poder ver el momento en que ocurre un cambio de carga y observar la respuesta del sistema ante este cambio.

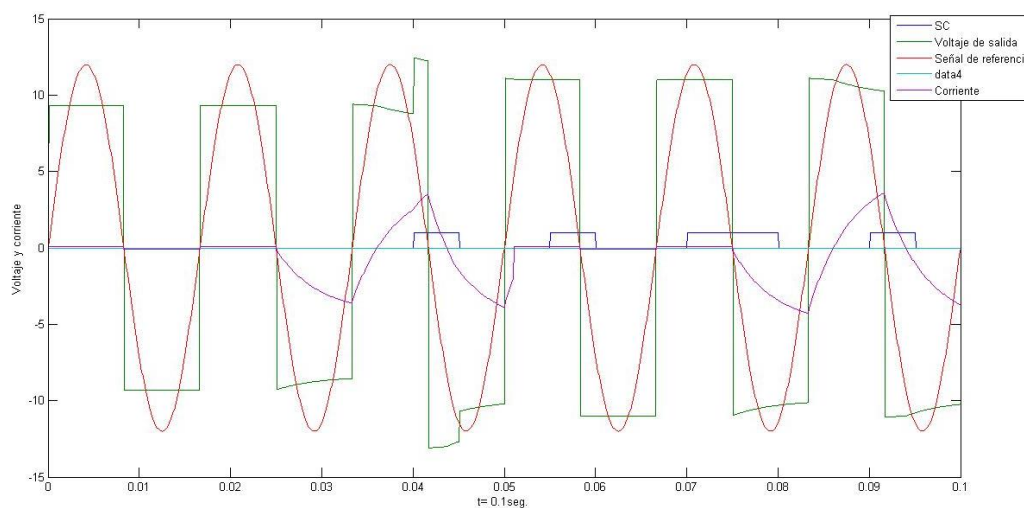


Figura 5.7. Señales de salida final.

En la figura 5.7 se puede observar las diferentes señales, una es la señal de referencia que es una señal seno, la señal de color verde es la salida del sistema, la señal de color azul representa los instantes en los que el supercapacitor cambia con la batería y la señal lila es la corriente de salida del inversor. Se observa que en la señal de voltaje sufre un salto, esto se debe a que en ese instante de tiempo el SC cambia con la batería mientras la corriente se hace menor para después regresar a la batería.

5.2 Comparación de Sistemas de Almacenamiento de Energía

Ahora se comparan dos diferentes sistemas de almacenamiento de energía, uno, alimentado en su totalidad con una batería, lo que indica que no necesita ningún bloque de decisión el segundo, es el sistema propuesto en este trabajo el cual incluye una batería y un módulo de supercapacitores y algoritmo de decisión entre la batería y el supercapacitor. De esta manera es posible observar la respuesta de uno contra el otro.

Se utilizaron las mismas condiciones iniciales en ambos sistemas tanto en la batería como en el supercapacitor y los mismos tipos de carga para que se pudiera realizar una comparación más exacta entre ambas.

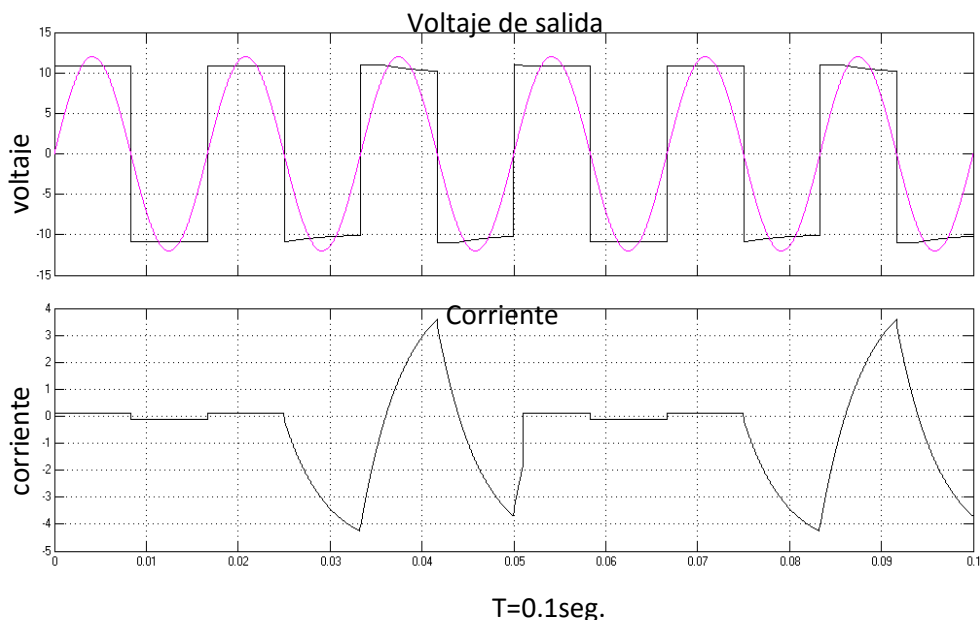


Figura 5.8. Salida del SAE solo con batería

En la figura 5.8 se observan dos gráficas, en la gráfica superior se observan las señales de salida de voltaje y la señal de referencia del SAE solo alimentado únicamente con batería, en la gráfica inferior se observa la corriente de salida, cuando se realiza el cambio de carga la señal de voltaje sufre una caída de voltaje debido a que el cambio de una carga a otra es más grande. Esto nos dice que cuando una carga le exige mucha corriente a la batería esta esta trabaja de manera forzada provocando que el voltaje caiga de manera abrupta.

En la figura 5.9 se muestran las mismas salidas de voltaje y corriente pero en esta ocasión para el sistema de almacenamiento propuesto, este ya incluye los supercapacitores y además el algoritmo de decisión, para este sistema se utilizó el mismo arreglo de cargas, una carga R y una carga RL.

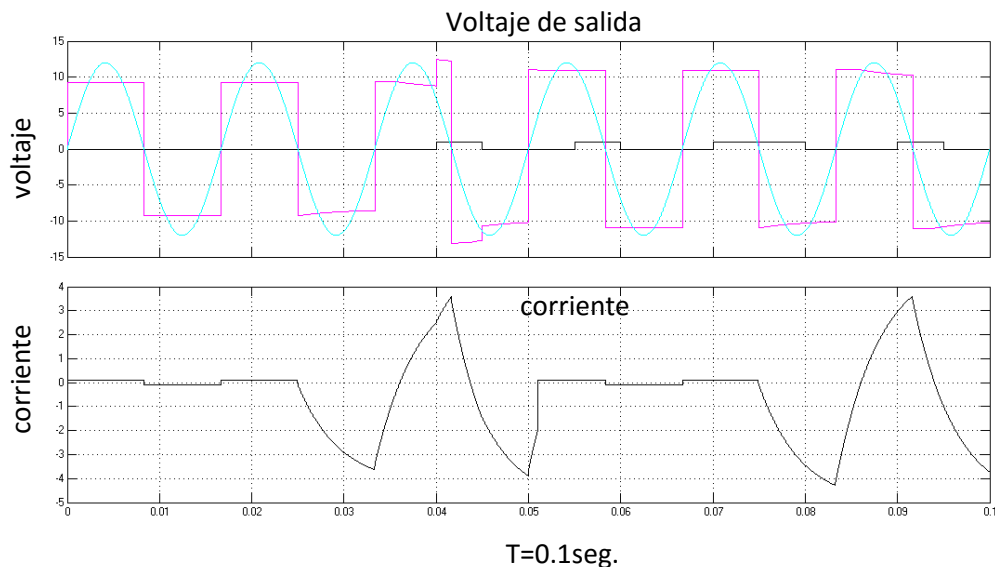


Figura 5.9. Salida del SAE con Batería y SC

En la figura 5.9 se observan dos gráficas, en la gráfica superior se observan las señales de salida de voltaje y la señal de referencia del SAE solo alimentado con la batería, en la gráfica inferior se observa la corriente de salida, además se observa una gráfica en color negro, esta gráfica indica los instantes en los que se activa el supercapacitor.

Cuando se realiza el cambio de carga, la señal de voltaje sufre una caída debido a que el cambio de una carga a otra es más grande, pero en esta ocasión se observa un escalón en la señal, eso representa que, cuando el voltaje comienza a decrecer por el cambio de carga, el algoritmo de decisión identifica que hay un pico de corriente entonces activa el supercapacitor y ahora aumenta el voltaje mientras la corriente disminuye, cuando el supercapacitor ya no es necesario el algoritmo cierra la compuerta y se queda solo la batería, esto sucede así hasta que la corriente incrementa de nuevo. Esto nos dice, que cuando una carga le exige mucha corriente al sistema, el supercapacitor puede alimentar esos picos de corriente.

5.3 Prueba del Algoritmo con Diferentes Valores de Cargas

Ahora para observar el funcionamiento del algoritmo, se simula el mismo sistema pero variando el valor de las cargas, esto se hace con el motivo de ver el comportamiento del algoritmo en diferentes circunstancias.

En la figura 5.10 se observa el primer cambio en las cargas, las cargas siguen siendo R al inicio y RL después.

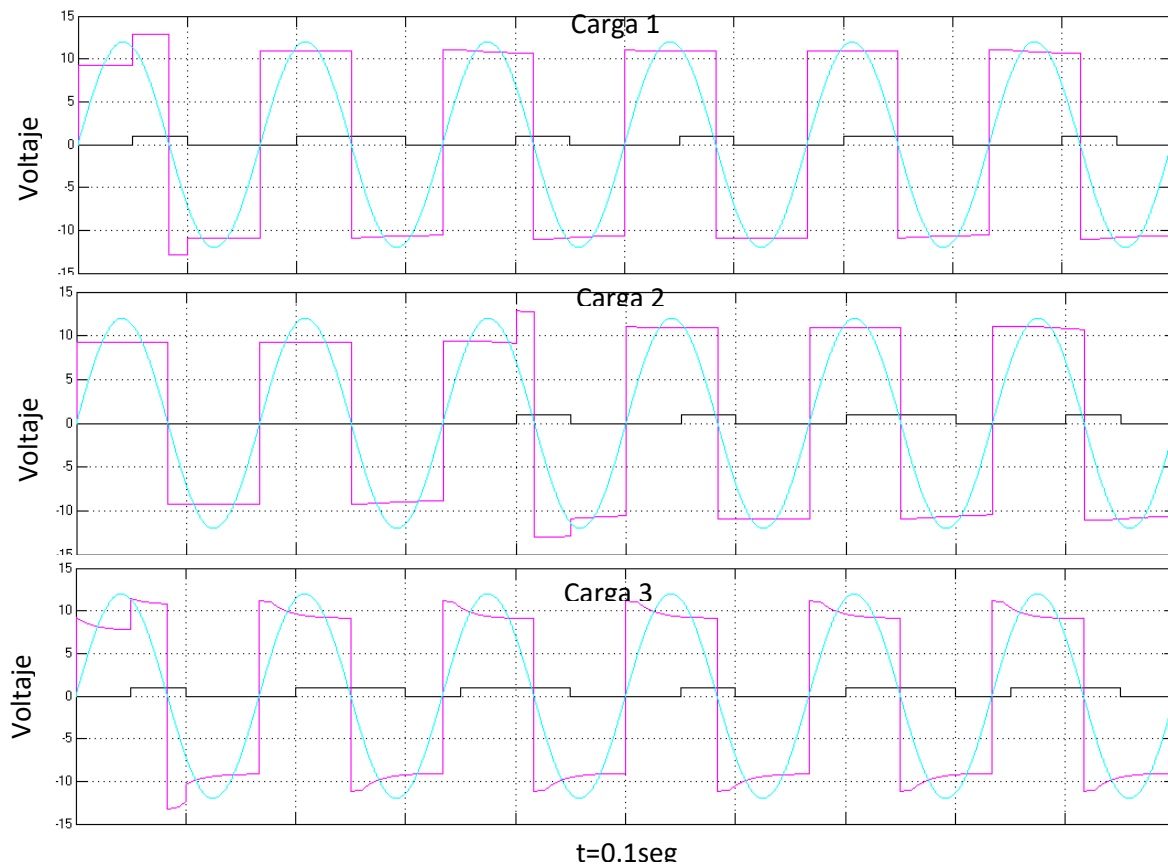


Figura 5.10. Salidas de voltaje con tres cargas distintas.

Se observa que las señales de salida son diferentes, pero que en los tres casos el supercapacitor se activa conforme a la corriente. En el primer caso (carga 1) se utilizó en el primer instante de tiempo una carga resistiva de un valor pequeño para que la corriente aumentara y al hacer el cambio de carga, cambio a una carga RL. En el segundo caso la primera carga fue de un valor grande para que los que exigiera corriente fuera la carga RL. Para el tercer caso solo se utilizó una carga inductiva.

5.3.1 Prueba del Algoritmo con Diferentes Valores de “X”

Ahora se pone a prueba el algoritmo de decisión pero en esta ocasión cambiando el valor de “x” que es el parámetro que se propone y con el que se compara la derivada.

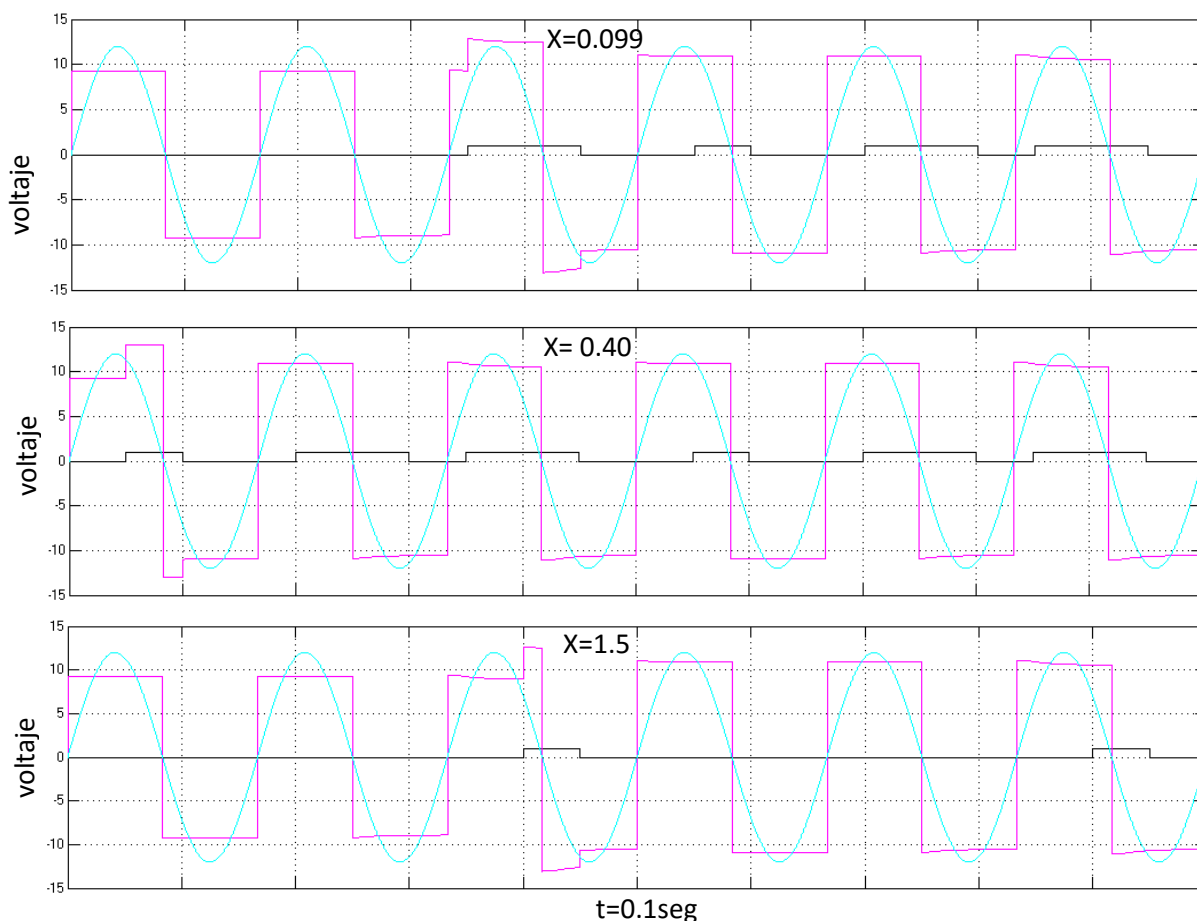


Figura 5.11. Salida del inversor en voltaje variando X.

La figura 5.11 nos muestra 3 gráficas las cuales funcionan con los mismos parámetros de voltaje y de corriente, la única condición que la hace diferente es al valor de “x”, con esto se muestra el funcionamiento del algoritmo con diferentes valores. Para la primera gráfica se aplicó un valor de $x=0.099$, para el segundo caso se utilizó un valor de $x=0.040$, y para el último caso se utilizó un valor de $x=1.5$. En los tres casos el funcionamiento del algoritmo respondió favorablemente ante el cambio de la variable “x”.

5.4 Conclusiones

Como conclusión sobre la primera etapa se puede decir que el análisis del flujo es importante para poder calcular la potencia generada por un panel y poder dimensionarlo a la a la potencia que lo necesitemos además se pudo determinar qué meses son los que generan menos radiación solar.

En cuanto al sistema de almacenamiento de energía que se diseñó, se pueden concluir varios aspectos como por ejemplo, que la topología del convertidor de corriente directa (buck-boost) seleccionada para este sistema fue la adecuada, la forma de trabajar de este convertidor fue la que resolvía la problemática que presentan los módulos solares al cargar los bancos de energía además de que si se lleva a la implementación, esta tipología emplea menos componentes que otros diseños. Sin embargo estos convertidores presentan problemas a la salida y eso podría causar inestabilidad en el sistema además de que, la inclusión de un control es medular ya que estos convertidores funcionan mejor a lazo cerrado.

Por otra parte, Cuando se tiene un sistema en donde actúan dos bancos de energía es muy importante saber identificar cuando y en qué momento va a actuar cada uno, por ello se empleó una etapa que pudiera decidir esa disyuntiva.

Respecto al algoritmo se puede decir que la manera en que se abordó el problema sirvió para obtener las alternaciones que se buscaban con la batería y el supercapacitor, sin embargo es importante saber que parámetros son necesarios y que otro no para poder hacer más óptimo el sistema, para esta ocasión se tomaron los estados de carga y la derivada, pero se podrían incluir más parámetros como el estado de carga en corriente.

Entonces podemos concluir que el sistema general propuesto fue óptimo bajo los parámetros que se propusieron, más sin embargo se podrían incluir más parámetros para hacer al sistema más eficiente.

Referencias bibliográficas

- [1] Guerrero, E., Romero, F., Barrero, M., Milanés & E. González. (2009). Aplicación de Sistemas de Almacenamiento de Energía con Supercondensadores en Plantas de Generación Fotovoltaica. *Sistemas Eléctricos y Electrónicos de Potencia (PE&ES)*.
- [2] Guerrero, E., Romero, F., Barrero, M., Milanés, M & González, E. (2009). Overview of Medium Scale Energy Storage Systems. *IEEE Conference on Compatibility and Power Electronics*.
- [3] Cultura, A. B. & Salameh, Z. M. (2008, july). Performance Evaluation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Applications. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. pp.1-7.
- [4] Lisheng, S. & Crow, M. (2008, July). Comparison of Ultracapacitor Electric Circuit Models. *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. pp.1-6.
- [5] Bilbao, P. A. J. (2013, noviembre). Dimencionamiento Óptimo de Sistemas de Almacenamiento Para Centrales Eólicas. Universidad de Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [6] Mírez, J. Sistema de Almacenamiento de Energía. (2012, noviembre 17). XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XIX- SPES) Puno. p.12.
- [7] Marei, M.I., Samborsky, S.J., Lambert, S.B. & Salama, M.M.A. (2006, september). On the Characterization of Ultracapacitor Banks Used for HEVs. *IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion*. pp1-6.

- [8] Gil,I. (2010, Julio). Diseño de un Sistema de Almacenamiento de Energía Híbrido basado en Baterías y Supercapacitores para su Integración en Microredes Eléctricas. Sevilla: Escuela Técnica Superior de ingenieros Departamento de Energía Electronica.
- [9] Gimeno, F., Seguí,S. & Orts,S. (2002). Convertidores electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones de diseño. España: Departamento Publicaciones Universidad Politécnica de Valencia.
- [10] Rsahid, M.H. (1993). Electrónica de Potencia, Circuitos dispositivos y aplicaciones. Florida: Prentice Hall Hispanoamericana.Tercera Edición. pp.190–225.
- [11] Wilson. J. I. B. (1982). La energía Solar. Edimburgo: Universidad de Horiot Watt. pp.12–44.
- [12] González, R. (2013, febrero 26). Sistemas inteligentes de la gestión de la energía. Ingeteam Power Technology. Madrid. p.6.
- [13] Astudillo, A. A. Estrategias de control para mitigar los efectos de grandes variaciones de radiación solar en plantas fotovoltaicas de gran escala en SEP. Santiago: Universidad de Chile.
- [14] Giraldo, C. M. (2011, Septiembre 6). Estrategia de gestión de un sistema de producción de energía solar fotovoltaica con almacenamiento para autoconsumo y conexión a la red eléctrica. España: Universidad de Zaragoza.
- [15] Hart, D. (2001). Electrónica de Potencia. Prentice Hall Hispanoamericana. Primera Edición. pp. 226–279.
- [16] Campos, D. Experiencias en teoría de control convertidores CD/CD. *Facultad de ciencias (UASLP). México: San Luis Potosí.* pp.9.
- [17] Vargas, J.A. *Diseño de un convertidor cc/cc bidireccional controlado analógicamente.* Universidad Carlos III Madrid. Primera edición. pp59-79.

- [18] Ramírez, H.A. (2004). *Estudio sobre baterías*. Desarrollo de un cargador-descargador de baterías basado en una topología buck/boost bidireccional en corriente para ser utilizado en un UPS(5-23). México, Zacatecas: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- [19] Ramírez, H.A. (2004). *Métodos de carga*. Desarrollo de un cargador-descargador de baterías basado en una topología buck/boost bidireccional en corriente para ser utilizado en un UPS(24-30). México, Zacatecas: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- [20] Ramírez, H.A. (2004). *Desarrollo del convertidor CD/CD*. Desarrollo de un cargador-descargador de baterías basado en una topología buck/boost bidireccional en corriente para ser utilizado en un UPS(32-42). México, Zacatecas: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- [21] Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Madrid: Pearson.Quinta Edicion. pp.72–86.
- [22] Aguilar, J.D., Perez, P.J.,De La Casa, J. & Rus, C. (2007). Cálculo de la energía generada por un sistema Fotovoltaico conectado a red: aplicación docente. Universidad de Jaén. pp.10.

Apéndice A Tablas y graficas de radiación solar

Las tablas A1 a A12 fueron obtenidas por medio de las ecuaciones mencionadas en el capítulo II y con el código que se realizó en Matlab, con ello se pudo obtener los datos con que se llenaron las tablas y poder sacar las gráficas de la radiación solar.

Tabla A1 Análisis del flujo solar para el mes de Enero.

Día 17/Enero															
	Delta(t)	w_{ci}	$\cos \theta_i$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{\text{aerosoles}}$	τ_{directa}^0	$E_{\text{horizontal}}^0$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{directo}}$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{difuso}}$	$E_{\text{horizontal}}^F$	W
0	8.31	-82.55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	9.31	-67.55	0.221	3.52	0.994	0.983	0.83	0.77	0.75	0.42	300.28	128.43	65.30	193.74	193.74
1	10.31	-52.55	0.421	1.85	0.995	0.985	0.85	0.85	0.85	0.55	572.01	317.09	96.87	413.96	413.96
1	11.31	-37.55	0.584	1.33	0.996	0.986	0.86	0.89	0.88	0.60	793.83	481.24	118.78	600.02	600.02
1	12.31	-22.55	0.699	1.11	0.996	0.987	0.87	0.90	0.90	0.63	950.77	600.23	133.20	733.44	733.44
1.49	13.8	-0.195	0.767	1.01	0.996	0.987	0.87	0.91	0.91	0.64	1042.57	670.60	141.34	811.95	1209.81
0.5	14.3	7.3045	0.759	1.02	0.996	0.987	0.87	0.91	0.91	0.64	1032.78	663.05	140.49	803.55	401.77
1	15.3	22.305	0.701	1.11	0.996	0.987	0.87	0.90	0.90	0.63	952.68	601.70	133.36	735.07	735.07
1	16.3	37.305	0.586	1.32	0.996	0.986	0.86	0.89	0.88	0.60	796.82	483.54	119.04	602.59	602.59
1	17.3	52.305	0.424	1.83	0.995	0.985	0.85	0.86	0.85	0.55	575.96	319.94	97.28	417.23	417.23
1	18.3	67.305	0.224	3.47	0.994	0.983	0.83	0.77	0.75	0.43	305.04	131.54	65.93	197.47	197.47
0	19.3	82.305	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A2 Análisis del flujo solar para el mes de Febrero.

Día 15/Febrero															
	Delta(t)	w_{ci}	$\cos \theta_i$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{\text{aerosoles}}$	τ_{directa}^0	$E_{\text{horizontal}}^0$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{directo}}$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{difuso}}$	$E_{\text{horizontal}}^F$	W
0	8.05	-85.39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	9.05	-70.39	0.23	3.32	0.995	0.982	0.837	0.780	0.76	0.441	318.78	140.51	67.74	208.25	208.25
1	10.05	-55.39	0.44	1.73	0.996	0.985	0.857	0.866	0.86	0.565	609.42	344.313	100.7	445.05	445.05
1	11.05	-40.39	0.62	1.24	0.996	0.986	0.866	0.897	0.89	0.616	851.63	524.811	124.2	649.00	649.00
1	12.05	-25.39	0.75	1.02	0.996	0.987	0.872	0.911	0.91	0.642	1028.8	660.017	140.2	800.17	800.17
1.69	13.742	-0.019	0.84	0.92	0.997	0.987	0.875	0.919	0.91	0.655	1149.2	753.029	150.5	903.57	1528.4
0.68	14.43	10.30	0.83	0.93	0.997	0.987	0.874	0.918	0.91	0.653	1129.1	737.334	148.9	886.19	610.1
1	15.43	25.30	0.75	1.02	0.996	0.987	0.872	0.911	0.91	0.642	1029.1	660.264	140.2	800.42	800.42
1	16.43	40.30	0.62	1.24	0.996	0.986	0.866	0.897	0.89	0.616	852.18	525.317	124.2	649.52	649.52
1	17.43	55.30	0.44	1.73	0.996	0.985	0.857	0.866	0.86	0.565	610.23	344.929	100.8	445.74	445.74
1	18.43	70.30	0.23	3.31	0.995	0.982	0.837	0.781	0.76	0.441	319.6	141.032	67.86	208.88	208.88
0	19.43	85.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A3 Análisis del flujo solar para el mes de Marzo.

Día 16/Marzo															
	Delta(t)	w_{ci}	$\cos_{\theta_i}$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{aerosoles}$	$\tau_F^{directa}$	$E_{horizontal}^0$	$E_{horizontal}^{directo}$	$E_{horizontal}^{difuso}$	$E_{horizontal}^F$	W
0	7.59	-89.29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8.59	-74.29	0.24	3.24	0.995	0.9829	0.8256	0.7858	0.7717	0.44053	326.4	143.78856	69.3923	213.18	213.181
1	9.59	-59.29	0.46	1.69	0.996	0.9856	0.8457	0.8708	0.8668	0.5638	625.6	352.71352	103.697	456.41	456.41
1	10.59	-44.29	0.66	1.18	0.996	0.9868	0.856	0.9017	0.9006	0.61502	897.6	552.03779	131.314	683.35	683.351
1	11.59	-29.29	0.81	0.96	0.997	0.9875	0.8619	0.9164	0.9164	0.64104	1101.6	706.16776	150.264	856.43	856.432
1	12.59	-14.29	0.9	0.87	0.997	0.9878	0.865	0.9233	0.9237	0.65362	1224	800.02529	161.11	961.14	961.136
0.945	13.53	-0.126	0.93	0.84	0.997	0.9879	0.8659	0.9252	0.9258	0.65726	1264.8	831.30875	164.727	996.04	940.755
0.945	14.48	14.04	0.9	0.87	0.997	0.9879	0.865	0.9233	0.9238	0.65375	1224	800.19291	161.047	961.24	907.891
1	15.48	29.04	0.81	0.96	0.997	0.9875	0.862	0.9165	0.9165	0.64125	1101.6	706.40384	150.175	856.58	856.578
1	16.48	44.04	0.66	1.18	0.996	0.9869	0.8561	0.9021	0.901	0.6157	897.6	552.64852	131.082	683.73	683.73
1	17.48	59.04	0.47	1.66	0.996	0.9856	0.846	0.8716	0.8676	0.5651	639.2	361.20955	105.636	466.85	466.846
1	18.48	74.04	0.24	3.24	0.995	0.983	0.8261	0.7884	0.7746	0.44396	326.4	144.90889	68.9666	213.88	213.876
0	19.48	89.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A4 Análisis del flujo solar para el mes de Abril.

Día 15/Abril															
	Delta(t)	w_{ci}	$\cos_{\theta_i}$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{aerosoles}$	$\tau_F^{directa}$	$E_{horizontal}^0$	$E_{horizontal}^{directo}$	$E_{horizontal}^{difuso}$	$E_{horizontal}^F$	W
0	7.53	-87.325	0.09691	8.034	0.9926	0.978	0.797	0.5946	0.554	0.22957	131.8	30.25729	38.58635	68.843642	0
1	8.53	-72.325	0.33652	2.314	0.995	0.984	0.836	0.833	0.825	0.5061	457.667	231.62579	85.89573	317.52153	317.52
1	9.53	-57.325	0.55682	1.398	0.9958	0.986	0.851	0.8872	0.885	0.5903	757.275	447.02055	117.8968	564.91732	564.92
1	10.53	-42.325	0.74283	1.048	0.9961	0.987	0.859	0.9103	0.91	0.6299	1010.25	636.35866	142.0783	778.43691	778.44
1	11.53	-27.325	0.88184	0.883	0.9964	0.988	0.864	0.9218	0.922	0.65077	1199.3	780.47019	159.1562	939.62643	939.63
1	12.53	-12.325	0.9644	0.807	0.9965	0.988	0.867	0.9273	0.928	0.66102	1311.58	866.98205	168.9487	1035.9308	1035.9
1.21	13.74	5.825	0.98108	0.794	0.9965	0.988	0.867	0.9283	0.929	0.66297	1334.27	884.57421	170.8839	1055.4582	1277.1
1.22	14.96	24.125	0.90444	0.861	0.9964	0.988	0.865	0.9234	0.924	0.6537	1230.04	804.07186	161.8673	965.93915	1178.4
1	15.96	39.125	0.7768	1.002	0.9962	0.987	0.861	0.9134	0.913	0.6355	1056.45	671.37029	146.3295	817.69982	817.7
1	16.96	54.125	0.59986	1.298	0.9959	0.987	0.853	0.8936	0.892	0.60113	815.81	490.4048	123.6538	614.05862	614.06
1	17.96	69.125	0.38567	2.019	0.9952	0.985	0.84	0.8496	0.843	0.53079	524.511	278.40668	93.51972	371.9264	371.93
1	18.96	84.125	0.14884	5.231	0.9935	0.981	0.811	0.6959	0.67	0.3311	202.422	67.021058	51.45251	118.47357	118.47
0	19.96	99.125	-0.0945	-8.24	0	0	0	1.7005	0	0	-128.51	0	-48.834	-48.83398	0

Tabla A5 Análisis del flujo solar para el mes de Mayo.

Día 15/Mayo															
	Delta(t)	w_{cl}	$\cos_{\theta_i}$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{\text{aerosoles}}$	τ_{directa}^0	$E_{\text{horizontal}}^0$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{directo}}$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{difuso}}$	$E_{\text{horizontal}}^F$	W
0	6.8614	-103.61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	7.8614	-88.612	0.127	6.145	0.993	0.9798	0.8056	0.6603	0.6289	0.2931	172.31	50.4966	46.29	96.7864	96.786
1	8.8614	-73.612	0.358	2.178	0.995	0.9846	0.8376	0.8406	0.8333	0.5175	486.2	251.593	89.151	340.744	340.74
1	9.8614	-58.612	0.571	1.363	0.996	0.9863	0.8516	0.8894	0.8873	0.5942	776.7	461.493	119.78	581.27	581.27
1	10.861	-43.612	0.753	1.034	0.996	0.9873	0.8598	0.9113	0.911	0.632	1024.1	647.197	143.22	790.412	790.41
1	11.861	-28.612	0.891	0.874	0.997	0.9878	0.8646	0.9225	0.9229	0.6522	1211.4	790.022	160.11	950.127	950.13
1	12.861	-13.612	0.975	0.799	0.997	0.9881	0.8672	0.928	0.9287	0.6624	1325.7	878.223	170.05	1048.28	1048.3
0.45	13.311	-6.872	0.994	0.784	0.997	0.9882	0.8678	0.9291	0.9299	0.6647	1351.2	898.091	172.17	1070.26	480.87
1.45	14.76	14.8675	0.97	0.803	0.997	0.9881	0.8671	0.9277	0.9284	0.6619	1319.2	873.233	169.47	1042.7	1511.2
1	15.76	29.8675	0.881	0.884	0.997	0.9878	0.8643	0.9218	0.9222	0.651	1198.3	780.051	158.93	938.984	938.98
1	16.76	44.8675	0.739	1.053	0.996	0.9872	0.8592	0.91	0.9095	0.6295	1005.4	632.965	141.54	774.508	774.51
1	17.76	59.8675	0.554	1.405	0.996	0.9862	0.8508	0.8868	0.8844	0.5899	753.85	444.685	117.48	562.167	562.17
1	18.76	74.8675	0.339	2.299	0.995	0.9844	0.8359	0.8338	0.8257	0.5074	460.5	233.662	86.197	319.859	319.86
0	19.76	89.8675	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A6 Análisis del flujo solar para el mes de Junio.

Día 11/Junio															
	Delta(t)	w_{cl}	$\cos_{\theta_i}$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{\text{aerosoles}}$	τ_{directa}^0	$E_{\text{horizontal}}^0$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{directo}}$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{difuso}}$	$E_{\text{horizontal}}^F$	W
0	6.85	-98.56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	7.85	-83.56	0.225	3.46	0.995	0.983	0.811	0.774	0.758	0.4185	306	128.07	67.6141	195.68	195.682
1	8.85	-68.56	0.445	1.75	0.996	0.985	0.832	0.8655	0.860	0.5474	605.2	331.26	104.096	435.36	435.359
1	9.85	-53.56	0.644	1.20	0.996	0.987	0.843	0.8995	0.898	0.6026	875.84	527.78	132.263	660.04	660.042
1	10.85	-38.56	0.8078	0.96	0.997	0.988	0.85	0.9162	0.916	0.6318	1098.61	694.14	153.697	847.84	847.839
1	11.85	-23.56	0.924	0.84	0.997	0.988	0.854	0.9248	0.925	0.6476	1256.64	813.8	168.281	982.08	982.076
1	12.85	-8.561	0.987	0.78	0.997	0.988	0.856	0.9287	0.929	0.6549	1342.32	879.03	176.049	1055.1	1055.08
0.57	13.415	-0.086	0.997	0.78	0.997	0.988	0.856	0.9293	0.930	0.656	1355.92	889.49	177.245	1066.7	602.703
1.57	14.98	23.389	0.926	0.84	0.997	0.988	0.854	0.9249	0.925	0.6478	1259.36	815.83	168.542	984.37	1540.54
1	15.98	38.389	0.809	0.96	0.997	0.988	0.85	0.9163	0.916	0.632	1100.24	695.32	153.868	849.19	849.192
1	16.98	53.389	0.646	1.20	0.996	0.987	0.843	0.8998	0.898	0.6031	878.56	529.89	132.495	662.38	662.384
1	17.98	68.389	0.448	1.73	0.996	0.985	0.832	0.8662	0.861	0.5484	609.28	334.16	104.547	438.7	438.704
1	18.98	83.389	0.227	3.43	0.995	0.983	0.811	0.7755	0.76	0.4205	308.72	129.81	67.9864	197.79	197.795
0	19.98	98.389	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A7 Análisis del flujo solar para el mes de Julio.

Día 17/Julio															
	Delta(t)	w_{ci}	$\cos_{\theta_i}$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{\text{aerosoles}}$	t_{directa}^0	$E_{\text{horizontal}}^0$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{directo}}$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{difuso}}$	$E_{\text{horizontal}}^F$	W
0	7.07	-97.712	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8.07	-82.712	0.229	3.4	0.9946	0.9827	0.8114	0.7769	0.762	0.4333	311.44	134.95	67.06684	202.015	202.015
1	9.07	-67.712	0.452	1.723	0.9957	0.9855	0.8324	0.8671	0.863	0.55717	614.72	342.51	103.4415	445.947	445.947
1	10.07	-52.712	0.651	1.196	0.9962	0.9868	0.8434	0.9004	0.899	0.60895	885.36	539.14	131.5631	670.704	670.704
1	11.07	-37.712	0.8151	0.955	0.9965	0.9875	0.8502	0.9168	0.917	0.63579	1108.5	704.8	153.4204	858.218	858.218
1	12.07	-22.712	0.9309	0.836	0.9967	0.9879	0.8541	0.9252	0.926	0.6499	1266	822.79	168.4283	991.22	991.22
1.51	13.583	-0.017	0.999	0.779	0.9968	0.9882	0.8562	0.9294	0.93	0.65599	1358.6	891.25	177.6064	1068.86	1617.19
0.51	14.09	7.588	0.991	0.786	0.9968	0.9881	0.8559	0.9289	0.93	0.65384	1347.8	881.22	177.2851	1058.51	536.662
1	15.09	22.588	0.931	0.836	0.9967	0.9879	0.8541	0.9252	0.926	0.64535	1266.2	817.11	170.6376	987.751	987.751
1	16.09	37.588	0.816	0.954	0.9965	0.9875	0.8502	0.9168	0.917	0.62797	1109.8	696.9	156.8885	853.784	853.784
1	17.09	52.588	0.653	1.192	0.9962	0.9868	0.8435	0.9006	0.899	0.59653	888.08	529.77	136.1579	665.928	665.928
1	18.09	67.588	0.453	1.719	0.9957	0.9855	0.8324	0.8673	0.863	0.53648	616.08	330.51	108.5159	439.028	439.028
1	19.09	82.588	0.231	3.371	0.9946	0.9827	0.8116	0.7783	0.763	0.42413	314.16	133.24	68.74814	201.992	201.992
0	20.09	97.588	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A8 Análisis del flujo solar para el mes de Agosto.

Día 16/Agosto															
	Delta(t)	w_{ci}	$\cos_{\theta_i}$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{\text{aerosoles}}$	t_{directa}^0	$E_{\text{horizontal}}^0$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{directo}}$	$E_{\text{horizontal}}^{\text{difuso}}$	$E_{\text{horizontal}}^F$	W
0	7.269	-94.86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8.269	-79.86	0.237	3.29	0.9946	0.9828	0.825	0.7825	0.768	0.4362	322.32	140.59	69.0588	209.645	209.645
1	9.269	-64.86	0.466	1.67	0.9957	0.9856	0.8456	0.8702	0.866	0.563	633.76	356.78	105.253	462.032	462.032
1	10.27	-49.86	0.668	1.17	0.9963	0.9869	0.8563	0.9024	0.901	0.6163	908.48	559.91	132.458	692.364	692.364
1	11.27	-34.86	0.83	0.94	0.9965	0.9876	0.8626	0.918	0.918	0.6439	1129.1	727.05	152.768	879.819	879.819
1	12.27	-19.86	0.941	0.83	0.9967	0.988	0.8662	0.9258	0.927	0.6585	1279.1	842.25	165.994	1008.25	1008.25
1.31	13.58	-0.197	0.995	0.78	0.9968	0.9882	0.8678	0.9291	0.93	0.6648	1353.2	899.54	172.389	1071.93	1405.41
1.32	14.9	19.603	0.941	0.83	0.9967	0.988	0.8662	0.9259	0.927	0.6586	1279.8	842.79	166.048	1008.84	1331.67
1	15.9	34.603	0.832	0.94	0.9965	0.9876	0.8627	0.9181	0.918	0.6442	1131.5	728.95	152.977	881.926	881.926
1	16.9	49.603	0.671	1.16	0.9963	0.9869	0.8564	0.9027	0.902	0.6169	912.56	562.92	132.862	695.785	695.785
1	17.9	64.603	0.47	1.66	0.9958	0.9856	0.8458	0.8711	0.867	0.5643	639.2	360.71	105.827	466.536	466.536
1	18.9	79.603	0.241	3.23	0.9947	0.9829	0.8255	0.7852	0.771	0.4397	327.76	144.13	69.7797	213.909	213.909
0	19.9	94.603	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A9 Análisis del flujo solar para el mes de Septiembre.

Día 15/Septiembre															
	Delta(t)	w_{ci}	$\cos_{\theta_i}$	m^*	τ_{ozono}^o	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{aerosoles}$	$t_p^{directa}$	$E_{horizontal}^o$	$E_{horizontal}^{directo}$	$E_{horizontal}^{difuso}$	$E_{horizontal}^E$	W
0	7.438	-90.89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8.438	-75.89	0.24	3.217	0.9947	0.982	0.825	0.78	0.771	0.4406	329.12	145.024	69.9564	214.9	214.9
1	9.438	-60.89	0.47	1.649	0.9958	0.985	0.846	0.87	0.867	0.5650	641.92	362.705	106.101	468.8	468.8
1	10.438	-45.89	0.67	1.162	0.9963	0.986	0.856	0.90	0.901	0.6167	911.2	561.96	132.711	694.6	694.6
1	11.438	-30.89	0.82	0.946	0.9965	0.987	0.862	0.91	0.917	0.6429	1119.2	719.637	151.864	871.5	871.5
1	12.438	-15.89	0.92	0.845	0.9967	0.987	0.865	0.92	0.925	0.6561	1252.5	821.823	163.68	985.5	985.5
1.05	13.485	-0.188	0.95	0.813	0.9967	0.988	0.866	0.92	0.927	0.6604	1301.5	859.562	167.944	1027.5	1075.8
1.06	14.54	15.63	0.92	0.844	0.9967	0.987	0.865	0.92	0.925	0.6561	1253.9	822.804	163.824	986.63	1040.9
1	15.54	30.63	0.82	0.943	0.9965	0.987	0.862	0.91	0.917	0.6432	1122	721.7	152.114	873.81	873.81
1	16.54	45.63	0.67	1.156	0.9963	0.986	0.856	0.90	0.902	0.6173	915.28	565.043	133.090	698.13	698.13
1	17.54	60.63	0.47	1.639	0.9958	0.985	0.846	0.87	0.868	0.5661	646	365.722	106.505	472.23	472.23
1	18.54	75.63	0.24	3.165	0.9947	0.983	0.826	0.78	0.774	0.4440	334.56	148.551	70.6835	219.23	219.23
0	19.54	90.63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A10 Análisis del flujo solar para el mes de Octubre.

Día 16/Octubre															
	Delta(t)	w_{ci}	$\cos_{\theta_i}$	m^*	τ_{ozono}^o	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{aerosoles}$	$t_p^{directa}$	$E_{horizontal}^o$	$E_{horizontal}^{directo}$	$E_{horizontal}^{difuso}$	$E_{horizontal}^E$	W
0	7.653	-86.677	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8.653	-71.677	0.23	3.299	0.9946	0.982	0.824	0.78	0.767	0.4353	320.96	139.705	68.8768	208.58	208.58
1	9.653	-56.677	0.45	1.711	0.9957	0.985	0.844	0.86	0.863	0.5591	618.8	345.991	103.667	449.65	449.65
1	10.653	-41.677	0.63	1.218	0.9962	0.986	0.855	0.89	0.897	0.6102	869.04	530.305	128.719	659.02	659.02
1	11.653	-26.677	0.77	1.004	0.9964	0.987	0.860	0.91	0.913	0.6355	1054	669.797	145.997	815.79	815.79
1	12.653	-11.677	0.85	0.910	0.9966	0.987	0.863	0.92	0.920	0.6476	1162.8	752.972	155.735	908.70	908.70
0.77	13.42	-0.1715	0.87	0.890	0.9966	0.987	0.864	0.92	0.921	0.6502	1189.4	773.362	158.116	931.47	714.44
0.77	14.19	11.378	0.85	0.909	0.9966	0.987	0.863	0.92	0.920	0.6477	1164.5	754.281	155.909	910.19	700.84
1	15.19	26.378	0.77	1.002	0.9965	0.987	0.860	0.91	0.913	0.6359	1056.7	671.965	146.207	818.17	818.17
1	16.19	41.378	0.64	1.212	0.9962	0.986	0.855	0.89	0.897	0.6108	873.12	533.332	129.119	662.45	662.45
1	17.19	56.378	0.45	1.696	0.9957	0.985	0.845	0.86	0.864	0.5605	624.24	349.882	104.256	454.13	454.13
1	18.19	71.378	0.24	3.244	0.9946	0.982	0.825	0.78	0.770	0.4389	326.4	143.241	69.6004	212.84	212.84
0	19.19	86.378	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A11 Análisis del flujo solar para el mes de Noviembre.

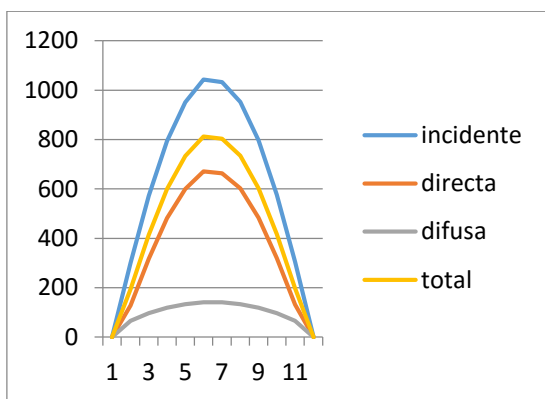
Día 15/Noviembre															
	Delta(t)	w_{gl}	$\cos \theta_i$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{aerosoles}$	$t_g^{directa}$	$E_{horizontal}^0$	$E_{horizontal}^{directo}$	$E_{horizontal}^{difuso}$	$E_{horizontal}^F$	W
0	7.957	-83.27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	8.957	-68.27	0.22	3.4915	0.9945	0.9826	0.8363	0.7725	0.757	0.4299	303.28	130.392	65.697	196.09	196.09
1	9.957	-53.27	0.42	1.8234	0.9956	0.9853	0.8558	0.8611	0.856	0.557	580.72	323.454	97.761	421.215	421.215
1	10.96	-38.27	0.59	1.3108	0.9961	0.9865	0.8654	0.8928	0.891	0.6088	807.84	491.832	120.08	611.915	611.915
1	11.96	-23.27	0.71	1.092	0.9963	0.9871	0.8706	0.9073	0.907	0.6339	969.68	614.689	134.9	749.586	749.586
1	12.96	-8.279	0.77	1.0034	0.9965	0.9874	0.873	0.9134	0.913	0.6448	1055.4	680.542	142.43	822.973	822.973
0.54	13.5	-0.209	0.78	0.9906	0.9965	0.9874	0.8733	0.9143	0.914	0.6464	1069	690.984	143.63	834.615	449.023
0.55	14.04	7.966	0.77	1.0021	0.9965	0.9874	0.873	0.9135	0.913	0.645	1056.7	681.568	142.56	824.126	449.148
1	15.04	22.966	0.71	1.089	0.9963	0.9871	0.8706	0.9076	0.907	0.6343	972.4	616.753	135.15	751.899	751.899
1	16.04	37.966	0.59	1.3042	0.9961	0.9865	0.8655	0.8933	0.891	0.6095	811.92	494.872	120.48	615.35	615.35
1	17.04	52.966	0.43	1.8107	0.9956	0.9853	0.856	0.8618	0.857	0.5581	584.8	326.373	98.202	424.575	424.575
1	18.04	67.966	0.228	3.415	0.9946	0.9827	0.837	0.7762	0.761	0.4348	310.08	134.82	66.599	201.419	201.419
0	19.04	82.966	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A12 Análisis del flujo solar para el mes de Diciembre.

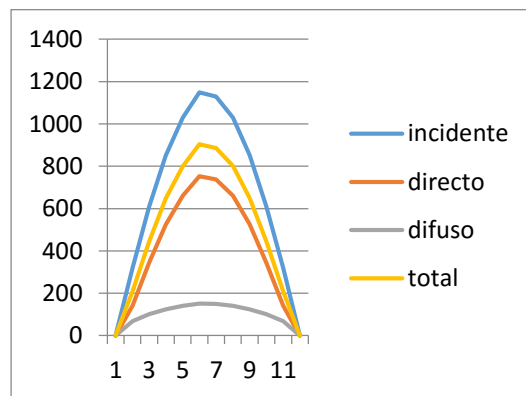
Día 10/Diciembre															
	Delta(t)	w_{gl}	$\cos \theta_i$	m^*	τ_{ozono}^0	τ_{gas}	τ_{H_2O}	τ_{R_i}	$\tau_{aerosoles}$	$t_g^{directa}$	$E_{horizontal}^0$	$E_{horizontal}^{directo}$	$E_{horizontal}^{difuso}$	$E_{horizontal}^F$	W
0	8.21	-78.17	0.051	0	0	0	0	0	0	0	68.816	0	26.15	26.1501	0
1	9.21	-63.17	0.265	3.775	2.939	0.994	0.983	0.8415	0.7998	0.7876	360.26	168.123	73.014	241.136	241.13
1	10.21	-48.17	0.452	2.210	1.721	0.995	0.985	0.8575	0.8672	0.8628	615.26	348.62	101.32	449.945	449.94
1	11.21	-33.17	0.6	1.665	1.296	0.996	0.986	0.8657	0.8937	0.8919	816.54	498.308	120.93	619.237	619.23
1	12.21	-18.17	0.699	1.431	1.114	0.996	0.987	0.87	0.9058	0.9051	950.36	599.915	133.17	733.087	733.08
1	13.21	-3.171	0.741	1.349	1.051	0.996	0.987	0.8717	0.9101	0.9097	1007.4	643.688	138.24	781.932	781.93
0.44	13.65	3.391	0.741	1.350	1.051	0.996	0.987	0.8716	0.9101	0.9097	1007.2	643.441	138.23	781.675	341.98
0.44	14.09	9.953	0.729	1.371	1.067	0.996	0.987	0.8712	0.909	0.9085	991.57	631.559	136.81	768.366	336.1
1	15.09	24.95	0.661	1.512	1.177	0.996	0.986	0.8684	0.9016	0.9004	898.96	560.696	128.54	689.237	689.2
1	16.09	39.95	0.539	1.854	1.444	0.996	0.986	0.8626	0.8843	0.8816	733.17	435.825	112.99	548.818	548.81
1	17.09	54.95	0.372	2.689	2.094	0.995	0.984	0.8517	0.8453	0.8386	505.64	269.305	89.81	359.115	359.11
1	18.09	69.95	0.171	5.86	4.566	0.994	0.981	0.8281	0.7237	0.7011	231.88	85.5294	55.613	141.143	141.14
0	19.09	84.95	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	-69.49	0	-26.408	-26.408	0

A.2 Gráficas de Radiación solar

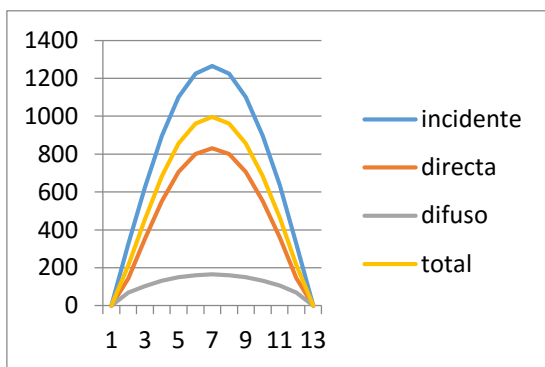
Estas gráficas también fueron obtenidas por medio del código realizado en MATLAB Incidente, directa, difusa y total para el medio día de cada mes del año.



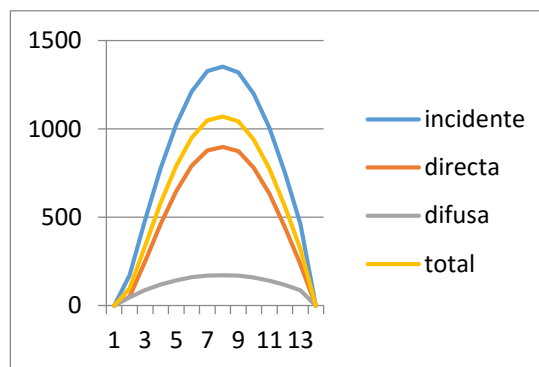
A1 Radiación solar día 17



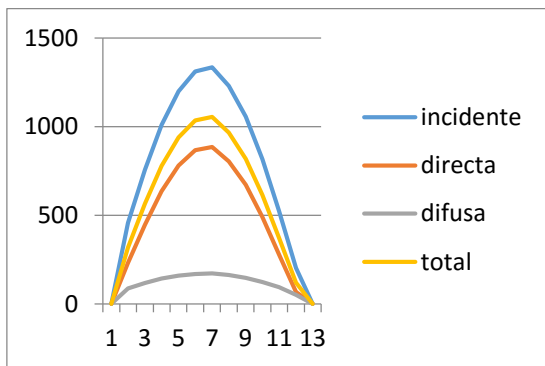
A2 Radiación solar para el día 46



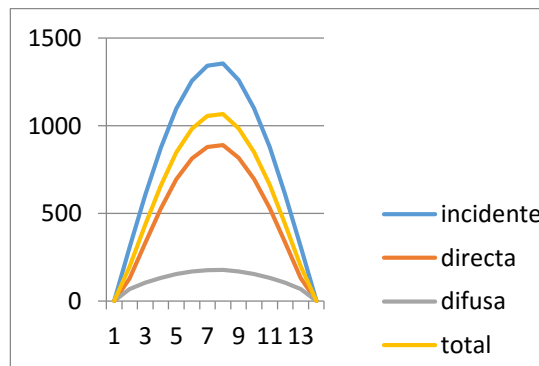
Radiación solar para el día 75



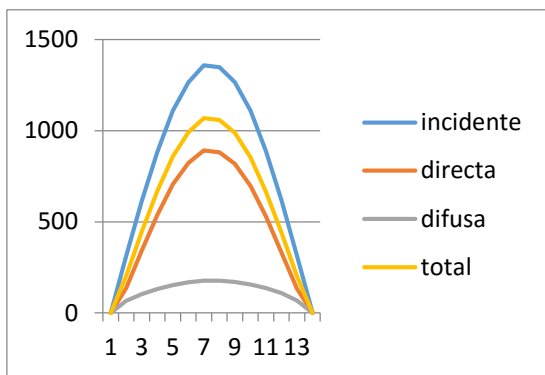
Radiación solar para el día 135



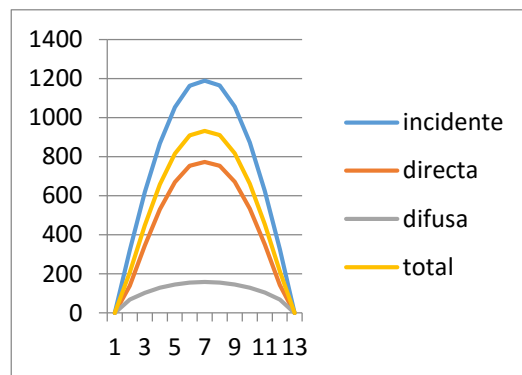
Radiación solar para el día 105



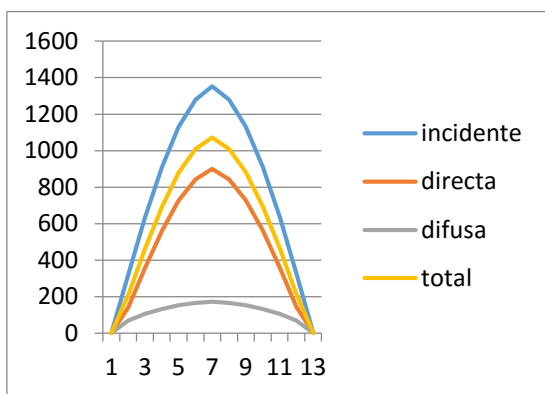
Radiación solar para el día 162



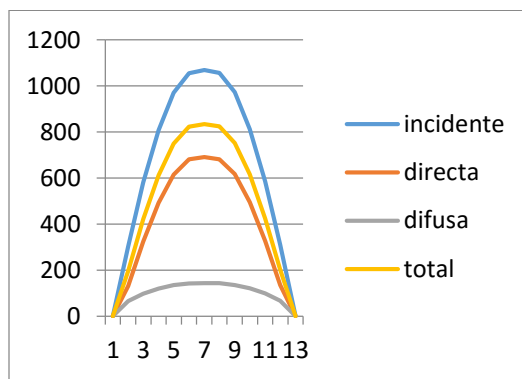
Radiación solar para el día 198



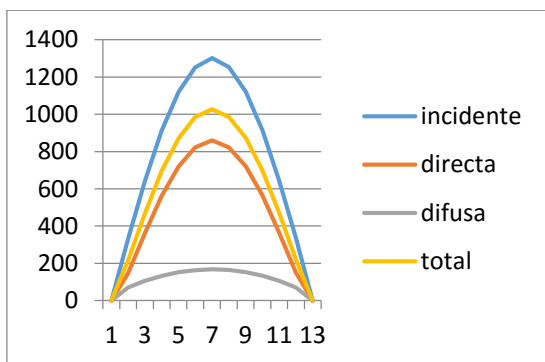
Radiación solar para el día 289



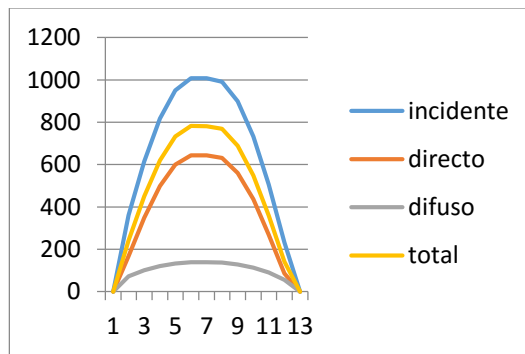
Radiación solar para el día 228



Radiación solar para el día 319



Radiación solar para el día 258



Radiación solar para el día 360

A.3 Ángulos de inclinación solar

Enero n=17

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{17 + 284}{365}\right) = -20.9169$$

Febrero n=46

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{46 + 284}{365}\right) = -13.2891$$

Marzo n=75

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{75 + 284}{365}\right) = -2.41$$

Abril n=105

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{105 + 284}{365}\right) = 9.41$$

Mayo n=135

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{135 + 284}{365}\right) = 18.7919$$

Junio n=162

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{162 + 284}{365}\right) = 23.0869$$

Julio n=198

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{198 + 284}{365}\right) = 21.1836$$

Agosto n=228

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{228 + 284}{365}\right) = 13.4549$$

Septiembre n=258

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{258 + 284}{365}\right) = 2.2168$$

Octubre n=289

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{289 + 284}{365}\right) = -23.0859$$

Noviembre n=319

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{319 + 284}{365}\right) = -19.1478$$

Diciembre n=344

$$\delta = 23.45^\circ \times \sin\left(360 \frac{344 + 284}{365}\right) = -23.0496$$

Tabla de parámetros a usar en MATLAB

Mes	B	T_c	δn	tc
Enero	-63.12	10.98	-20.9169	16.30
Febrero	-34.52	11.37	-13.2891	12.09
Marzo	-5.91	11.88	-2.41	-0.155
Abril	23.67	12.43	9.41	-11.70
Mayo	53.26	12.89	18.7919	-13.65
Junio	79.89	13.12	23.0869	-7.24
Julio	115.39	13.02	21.1836	2.57
Agosto	144.98	12.63	13.4549	3.11
Septiembre	174.57	12.10	2.2168	-2.629
Octubre	205.15	11.53	-23.0859	-6.59
Noviembre	234.73	11.08	-19.1478	-19.45
Diciembre	259.39	10.87	-23.0496	6.89

Apéndice B.1 Códigos realizados en MATLAB

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
t=str2double(get(handles.edit1,'string'));
tc=str2double(get(handles.edit17,'string'));
ai=str2double(get(handles.edit18,'string'));
w1=(t-2-12+(tc/-60));
w2=(15*w1)
w3=-98.2+105;
w4=w2+w3;           %calculamos los angulos temorales(wi)
n1=19.05*pi/180;
cos1=cos(n1);
n2=ai*pi/180;
cos2=cos(n2);
n3=w4*pi/180;
cos3=cos(n3);
cost=cos(n1)*cos(n2)*cos(n3);
n4=19.05*pi/180;
sen1=sin(n4);
n5=ai*pi/180;
sen2=sin(n5);
cosz=cos1*cos2*cos3+sen1*sen2;
masfr=1/cosz;
m2=masfr*exp(-2160/8631.56)
toz=1-(0.051*m2)/((1+44.634*m2)^0.683);
tg=exp(-0.0127*(m2^0.26));
th=1-(2.496*1.3*m2/(6.385*1.3*m2+((1+(49.03*1.3*m2))^0.683))); %
calculamos th20
tri=exp(-0.0903*(m2^0.84));
taer=exp(-0.0905*(m2^0.9));
tdir=0.9*(toz*tg*th*tri*taer);
eohoriz=1360*cosz;           %calculamos la densidad de
la radiacion incidente(E0horizontal)
edirecho=1360*tdir*cosz;           %calculamos la densidad
de radiacion solar directa
edifuso=(0.38*(1-tdir))*eohoriz           %calculamos la densidad de
la radiacion difusa
eehoriz=edirecho+edifuso;           %calculamos la densidad
de radiacion total en la superficie horizontal
r=num2str(w4);           %Convierte el resultado
numerico a string
r2=num2str(cosz);
r3=num2str(masfr);
r4=num2str(toz);
r5=num2str(m2);
r6=num2str(tg);
```

```
r7=num2str(th);
r8=num2str(tri);
r9=num2str(taer);
r10=num2str(tdir);
r11=num2str(eohoriz);
r12=num2str(edirecho);
r13=num2str(edifuso);
r14=num2str(eehoriz);
set(handles.edit3,'string',r);
set(handles.edit4,'string',r2);
set(handles.edit5,'string',r3);
set(handles.edit7,'string',r5);
set(handles.edit6,'string',r4);
set(handles.edit8,'string',r6);
set(handles.edit9,'string',r7);
set(handles.edit10,'string',r8);
set(handles.edit11,'string',r9);
set(handles.edit12,'string',r10);
set(handles.edit13,'string',r11);
set(handles.edit14,'string',r12);
set(handles.edit15,'string',r13);
set(handles.edit16,'string',r14);
```

Apéndice B.2 Algoritmos de decisión

```
sizes.NumDiscStates = 2;% Número de estados discretos igual a las
salidas
sizes.NumOutputs     = 2;% Número de salidas "x"
sizes.NumInputs      = 3;% Número de entradas "u"
sizes.DirFeedthrough = 1;% Dejar en 1
sizes.NumSampleTimes = 1;% al menos un muestreo es necesario

sys = simsizes(sizes);
%
% Inicializa las condiciones iniciales
%
x0 = [0];
%
% str debe ser una arreglo vacio
%
str = [];
%
% ininicializa el arreglo de tiempo de muestreo
ts = [0,1];
if t==0
    sampleTime = str2num(s_time);
    for j=1:1:1
        x(j)=j;
    end;
end %t==0
%x(1) es la salida de la funcion descriptiva
%
x(1)=0;
x(2)=0;
%
%Modelo mediante Sistemas Híbridos (Piecewise Affine)
%
%la salida x(2) sera la del sistema híbrido

if u(1)<4 && u(2)>4
    x(1)=0;
    x(2)=0;
else
    if u(1)>4 && u(2)<4
        x(1)=0;
        x(2)=0;
    else
        if u(1)<4 && u(2)<4
            x(1)=0;
            x(2)=0;
        else
```

```
        if u(3)>(0.5)
            x(2)=1;
            x(1)=0;
        else
            if u(3)<(0.5)
                x(1)=1;
                x(2)=0;
            else
                x(2)=1;
                x(1)=0;
            end
        end
    end
end
end
end
```

Apendice C Recomendaciones de uso de Supercapacitores

Para poder realizar una implementación de un sistema de almacenamiento incluyendo supercapacitores es importante conocer las características de funcionamiento de los supercapacitores y tener presente el uso o la aplicación que se le va dar al sistema ya que no en todas las circunstancias es conveniente incluir los SC.

Lo primero que se debe tomar en cuenta es la aplicación para la que se quiera diseñar el sistema de almacenamiento, esto se menciona por lo siguiente: si la aplicación para la cual vamos a ocupar el sistema de almacenamiento de energía es muy pequeña, en cuanto a potencia y corriente, entonces la inclusión de los supercapacitores no es la mejor opción, esto debido a que, para bajas potencias y corrientes pequeñas una batería podría cubrir a la perfección la exigencia de corriente de las cargas que se conecten al sistema puesto que como el sistema es pequeño las cargas serán pequeñas.

Sin embargo, cuando la aplicación que se le va a dar al sistema es de mayor potencia y por ende tienen una exigencia de corriente más elevada, entonces, la opción de incluir los supercapacitores al sistema de manera híbrida junto con una batería es acertada, en estos casos los supercapacitores pueden proporcionar un suministro más eficaz y junto con la batería proporcionan un suministro de energía constante, sin huecos de energía hacia la carga. Los supercapacitores podrían suministrar la energía en los primeros instantes de tiempo o en donde la exigencia de corriente sea mayor.

Para que lo dicho anteriormente suceda de manera eficiente se recomienda tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- En primer lugar la aplicación, para que los supercapacitores sean más funcionales, se recomienda que se empleen en sistemas de almacenamiento en donde se involucren cargas, de preferencia inductivas o resistivas muy grandes, para que los supercapacitores realicen su función y no se desperdicien al incluirlos.
- Después de que se tenga seleccionada la aplicación correcta, se tiene que dimensionar el tamaño y la cantidad de los supercapacitores, de esto dependerá la cantidad de energía que puedan aportar los SC.
- Después de esto hay que tomar en cuenta que los SC conectados entre ellos mismos ya sea en paralelo o en serie, dependiendo del voltaje que se necesite, sufren un desbalanceo de voltaje lo que provoque que al momento de cargarse o descargarse no lo hagan de manera equilibrada, lo cual puede llegar a deteriorar los SC.
- Se recomienda también incluir un algoritmo de decisión entre la batería y el SC, si esto no se incluye es difícil controlar la entrada del SC, esto podría generar una interrupción en la energía al cambiar a la batería.

También se recomienda tomar en cuenta que los supercapacitores solo podrían funcionar por la mañana o cuando la radiación solar lo permita ya que si se utiliza el SC por la noche, solo se podría utilizar una vez porque su descarga es muy rápida y no habría como recargarlo.

