

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC



**División de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial
Posgrado en Eficiencia Energética y Energías Renovables**

**Análisis, diseño y construcción de un convertidor de C.C. con
características adecuadas al proceso de electrólisis a partir de
energía fotovoltaica.**

Tesis que para obtener el grado de
Maestro en Eficiencia Energética y Energías Renovables

PRESENTA:

Ing. José Luis Morales Loyda

DIRECTOR DE TESIS:

M en C. José Carlos A. Aguilar Anastacio

Ecatepec de Morelos, Estado de México, diciembre de 2017

Agradecimientos

Al CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), por haber otorgado una beca en mis estudios de maestría y poder realizar este proyecto de investigación de manera teórica y práctica.

A los profesores de la Academia de la Maestría de Eficiencia Energética y Energías Renovables, por darme la Oportunidad de adquirir nuevos conocimientos.

A mis Padres por el fruto de sus desvelos, esfuerzos, ejemplo de trabajo, tenacidad y todo el apoyo recibido de ellos su aporte invaluable, siempre han sido mi refugio y Esperanza en esta vida.

A mi Madre (+) gracias por tus enseñanzas, el buen ejemplo y el animarme siempre a ser mejor.

A mis hermanos por ser pacientes, comprensivos y así poder alcanzar mis metas con su apoyo.

A mi asesor y director de tesis al M. en C. José Carlos A. Aguilar Anastacio por toda la conducción y ser mi aliado en mi proyecto que en todo momento he recibido consejos, orientaciones y en su caso correcciones en desviaciones que incurrí en el proyecto.

A todos mis amigos que palabras de aliento siempre me han dado y su apoyo solidario.

Resumen

Los problemas con respecto a los combustibles y sus consecuencias son una realidad, por un lado altos costos en la producción de los mismos y por otro altos índices de contaminación que se genera por la combustión en los diferentes procesos de generación de energía eléctrica, en este sentido se propone una alternativa de generación eléctrica con el aprovechamiento de la energía fotovoltaica para su aplicación en la producción química, donde algunas sustancias utilizadas como materia prima se obtienen a partir del proceso de electrólisis, tal efecto requiere altos niveles de potencial eléctrico en la producción a gran escala, que se refleja en elevados costos por concepto de facturación de energía para dicho sector.

En esta tesis se propone analizar, diseñar y construir un convertidor de C.C. a C.C. como regulador de potencial eléctrico para el suministro en el proceso de electrólisis. Como fuente de entrada se aprovechará el recurso solar a través de un arreglo fotovoltaico. La regulación del potencial eléctrico se llevará a cabo con la implementación de la técnica de modulación de ancho de pulso (MAP).

Los resultados obtenidos demostrarán el comportamiento del convertidor reductor a las condiciones críticas del proceso de electrólisis y las variaciones ambientales que afectan al sistema fotovoltaico como fuente de entrada. Se demuestra que el uso de la energía solar puede ser opción para su aprovechamiento dentro del sector industrial, obteniendo un principal beneficio como la reducción de costos por concepto del consumo eléctrico.

Con éste proyecto se busca impulsar el uso de energías limpias dentro del sector de la industria química, para mitigar la contaminación atmosférica a consecuencia de la producción de energía eléctrica con recursos fósiles en el país.

Abstract

The problems with regard to fuels and their consequences are a reality, on the other hand the highest costs in the production of the same and in the other hand, the highest rates of pollution that are generated by the combustion in the different processes of generation of electrical energy, in This sense proposes an alternative of electric generation with the use of photovoltaic energy for its application in chemical production, where some substances used as raw material are obtained from the electrolysis process, this effect requires high levels of electrical potential in the Large-scale production, which is reflected in high energy billing costs for this sector.

In this thesis, proposed to analyze and design a C.C. to C.C. converter as an electric potential regulator for the supply in the electrolysis process. As an input source, the solar resource will be used through a photovoltaic array, the regulation of the electric potential will be performed according to the demand of electric current during the process, implementing pulse width modulation (PWM).

The results obtained will demonstrate the performance of the reducing converter to the critical conditions of the electrolysis process and the environmental variations that affect the photovoltaic system as input source. It will be demonstrated that the use of solar energy can be an option for its use within the chemical industry, obtaining a main benefit such as the reduction of costs due to electricity consumption.

This project searches to promote the use of clean energies within the chemical industry sector to mitigate the atmospheric pollution due to the production of electrical energy with fossil resources in the country.

Agradecimientos	I.
Resumen.	II.
Abstract.	III.
Indice General	IV.
Lista de figuras	V.
Lista de tablas	VI.

Índice General.

CAPITULO I	1.
1.1. Introducción	2.
1.2. Planteamiento del problema	3.
1.3. Propuesta	3.
1.4. Objetivo General	4.
1.5. Objetivos Particulares	4.
1.6. Metodología	5.
 CAPITULO II	 6.
Marco Teórico	
2.1. Energía Solar.	7.
2.2. La radiación solar.	8.
2.3. Radiación Difusa, Directa y Reflejada.	8.
2.4. Energía Solar en México.	9.
2.5. Principio de la celda fotovoltaica.	10.
2.6. Funcionamiento básico de una celda solar.	10.
2.7. Sistema fotovoltaico.	11.
2.8. Identificación de las características de PV.	11.
2.9. Análisis FODA de la energía fotovoltaica respecto a las demás energías primarias.	12.
2.10. Cálculos de la radiación solar en la tierra.	13.
2.11. Principio de funcionamiento de una celda electrolítica.	14.
2.12. Elementos principales de una celda electroquímica.	15.
2.13. Circuito de reducción de voltaje.	17.
2.14. Modo de conducción continua.	17.
2.15. Modo de conducción discontinua.	17.
 CAPITULO III	 18.
Análisis del arreglo fotovoltaico y modelado del convertidor de reducción.	
3.1. Análisis de una celda unitaria.	19.
3.2. Corriente a corto circuito.	21.
3.3. Corriente de saturación inversa.	21.
3.4. Corriente a circuito abierto.	22.
3.5. Dimensionamiento del arreglo fotovoltaico.	23.
3.6. Potencia del arreglo.	24.
3.7. Circuito reductor en modo continuo (abierto – cerrado).	25.
3.8. Circuito reductor en modo continuo (cerrado – abierto).	27.
3.9. Corriente en la carga de alimentación.	28.
3.10. Rizo en el voltaje de salida.	29.
3.11. Modelado del circuito en el intervalo $(0 - t_{ON})$.	31.
3.12. Modelado del circuito en el intervalo $(t_{ON} - T)$.	32.

CAPITULO IV	35.
Desarrollo de circuito reductor del voltaje.	36.
4.1. Diseño y desarrollo del circuito reductor del voltaje.	37.
4.2. Resultados del circuito reductor de voltaje.	39.
4.3. Circuito convertidor reductor en conexión con el arreglo fotovoltaico.	42.
4.4. Graficas del comportamiento del circuito reductor de C.C.en modo (t_o-t_{on}).	44.
4.5. Graficas del comportamiento del circuito reductor de C.C.en modo ($t_{on}-T$).	45.
4.6. Resultados de la simulación Matlab para casos de la iradiacion optim y critica.	47.
Conclusiones.	49.
Referencias	50.

Lista de figuras

Figura 2.1. Radiación Global horizontal del Mundo.

Figura 2.2. Celda para tomar un módulo y arreglo fotovoltaico

Figura 2.3. Grafico de Incidencia de irradiación durante un año.

Figura 2.4. Irradiación solar en la Republica Mexicana.

Figura 2.5. Esquema de un proceso electrolítico conforme a la producción de una sustancia.

Figura 2.6. Circuito equivalente resistivo de la celda electroquímica.

Figura 2.7. Diagrama principal de un convertidor de voltaje de reducción.

Figura 3.1. Celda fotovoltaica.

Figura 3.2. Circuito equivalente de una celda fotovoltaica.

Figura 3.3. Gráfico del comportamiento de una celda fotovoltaica.

Figura 3.4. Módulo fotovoltaico.

Figura 3.5. Módulo fotovoltaico con 60 celdas fotovoltaicas.

Figura 3.6. Arreglo fotovoltaico de cuatro módulos.

Figura 3.7. Diagrama de un circuito reductor.

Figura 3.8. Conmutación del interruptor S1.

Figura 3.9. Diagrama con S1 cerrado y diodo bloqueado.

Figura 3.10. Diagrama con S1 abierto y diodo en conducción.

Figura 3.11. Rizado de la corriente Ilen la inductancia L y la carga R .

Figura 3.12. Rizado generado producto de la inductancia L y la carga R .

Figura 3.13. Circuito reductor en conducción.

Figura 3.14. Comportamiento de las corrientes cuando S se abre o transistor en corte.

Figura 4.1. Circuito principal del convertidor reductor de voltaje.

Figura 4.2. Circuito convertidor reductor de voltaje.

Figura 4.3. Circuito físico del convertidor reductor de voltaje en C.C.

Figura 4.4. Gráfico de salida del convertidor reductor con carga de 0.77Ω , a 500 mV/Div y una base de tiempo de $40 \mu\text{s/Div}$.

Figura 4.5. Gráfico de salida del convertidor C.C. con una carga de $R= 2.2 \Omega$, a 500 mV/Div y una base de tiempo de $40 \mu\text{s/Div}$.

Figura 4.6. Gráfico de salida del convertidor C.C. con una carga $R= 4.7 \Omega$, a 500 mV/Div y una base de tiempo de $40 \mu\text{s/Div}$.

Figura 4.7. Gráfico de salida del convertidor C.C. con una carga de $R= 20 \Omega$, a 500 mV/Div y una base de tiempo $40 \mu\text{s/Div}$.

Figura 4.8. Gráfico de salida del convertidor C.C. con una carga de $R=50 \Omega$, a 500 mV/Div y una base de tiempo de $40 \mu\text{s/Div}$.

Figura 4.9. Circuito del sistema fotovoltaico y reductor de voltaje en C.C.

Figura 4.10. Comportamiento del circuito reductor de voltaje con carga diferente de prueba.

Figura 4.11. Comportamiento del circuito reductor de voltaje en carga variable con R de 50Ω a 300Ω .

Figura 4.12. Circuito de prueba de incidencia solar en simulink.

Figura 4.13. Gráfica de corriente-voltaje para 60 celdas con 1000 W/m^2 .

Figura 4.14. Gráfico de corriente voltaje-para 60 celdas con 500 W/m^2 .

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Casos de éxito de implementación de la tecnología fotovoltaica en México.

Tabla 2.2. FODA de la energía fotovoltaica.

Tabla 2.3. Ejemplos de ácidos fuertes, ácidos débiles, base fuerte y base débil.

Tabla 4.1. Características eléctricas del convertidor reductor.

Tabla 4.2. Datos de salida del convertidor reductor de C.C.

Tabla 4.3. Características eléctricas del sistema fotovoltaico.

Tabla 4.4. Características eléctricas del sistema de reducción de voltaje.

CAPITULO I

Introducción

En este capítulo se menciona la problemática a resolver, la propuesta de solución, el objetivo principal y los objetivos particulares de este trabajo, se da a conocer la metodología para llevar a cabo la solución de la problemática propuesta.

1.1. Introducción

Enfocar la investigación a las Energías Limpias o Renovables establece ya una nueva alternativa de solución, sin embargo, no es algo nuevo, a principios del siglo XX los primeros investigadores se aventuraron en el estudio de nuevas fuentes de energía para mitigar las problemáticas ocasionadas por el uso de combustibles fósiles, como la contaminación y el efecto invernadero. El petróleo ha entrado en un nivel de baja producción y de difícil obtención en nuestro país ya que, si bien se han descubierto nuevos yacimientos, estos se encuentran en aguas profundas por lo que su extracción involucra una mayor inversión de capital en la aplicación de nuevas tecnologías.

En este escenario una de las problemáticas que se ha visto en la industria del sector químico es su alto consumo eléctrico durante el proceso de obtención de materiales, algunos se producen únicamente a través del proceso de electrólisis, que consiste en un intercambio iónico entre sustancias acuosas por reacciones oxido-reducción, a partir de disoluciones propuestas dando como resultado un tercer y cuarto elemento como materia prima para la generación de nuevos productos. Se tiene la hipótesis de un comportamiento resistivo variante en el tiempo por efecto de la migración de electrones de la sustancia, lo que significa variaciones de corriente durante el proceso.

La implementación del arreglo fotovoltaico para el aprovechamiento del recurso solar y conversión en energía eléctrica depende directamente de la irradiancia solar, la cual se ha calculado bajo modelos matemáticos y comprobado experimentalmente empleando un arreglo de celdas fotovoltaico monocristalino, así mismo se recurre al diseño de un convertidor reductor con características eléctricas adecuadas para soportar la potencia de entrada dado por el arreglo fotovoltaico y las condiciones eléctricas de salida para llevar a cabo el proceso de electrolisis, de manera experimental se comprueba el comportamiento del proceso en diferentes condiciones de carga.

Se propone una metodología en dos etapas, la primera consiste en el análisis y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para proporcionar una salida de 30 Volts a 32 Amperes con una potencia de 960 Watts, como fuente principal. La segunda etapa consiste en el análisis diseño y construcción del circuito convertidor de voltaje de C.C a C.C. conocido como convertidor reductor a condiciones de operación de 7 Volts de salida con una corriente promedio de 27 Amperes.

La contribución de este trabajo es resolver un problema real e implementar en el sector solar, el aprovechamiento del recurso para la generación de energía eléctrica en la producción de materia prima a través de electrólisis, se plantea como una alternativa en la disminución de costos por facturación del servicio eléctrico, así como el diseño de un sistema de regulación de potencial eléctrico considerando las características específicas de producción por electrólisis.

1.2. Problema

Un problema que se ha registrado en los últimos años en el sector productivo, particularmente en la industria química, es el alto consumo eléctrico para realizar actividades de producción de sustancias que son reutilizadas como materia prima en la, en la obtención de productos finales a través del proceso electroquímico o por *electrolisis*. Este proceso se lleva a cabo en depósitos con dimensiones de 40cm x 40cm x30cm a un volumen aproximado de 0.048 m³ de reacción química. Las características eléctricas promedio necesarias para realizar el proceso electroquímico son de 7 Volts a 27 Amperes en C.C.; lo que representa una potencia de 189 W/hr, si la demanda de potencia se desarrolla en un horario laboral de 8 hrs por día, se prevé un consumo de potencia a la semana de 7.56 kW/hr, lo que representa un consumo mensual de 30.24 kW/hr, por lo tanto anualmente se tiene un consumo aproximado para un solo depósito de 362.88 kW/hr. Si la producción por electrólisis se realiza en una cantidad de 15 depósitos, caso particular de producción en algunas compañías, entonces su consumo promedio de energía eléctrica anual alcanzará los 5.45 MW al año, lo que refleja un mayor consumo eléctrico, mayores costos por facturación por dicho concepto y con la premura de incrementos en las tarifas hasta un 40% para dicho sector industrial. Además del impacto en la emisión de contaminantes que implica en la producción eléctrica requerida.

En la actualidad, el proceso electroquímico se lleva a cabo a través del tratamiento de la corriente alterna (C.A), con técnicas de rectificación filtrado y regulación en alimentación bifásica o trifásica, donde los dispositivos eléctricos implementados tienden a ser de mayor dimensión y robustos para la disipación de potencia durante su funcionamiento lo que implica mayores pérdidas de potencia y por lo tanto un mayor gasto de energía en la producción por electrolisis.

1.3. Propuesta

El campo de la electrónica de potencia y el aprovechamiento de las fuentes renovables ofrecen soluciones para reducir el consumo eléctrico proveniente de los centros de generación y mitigar la generación de CO₂, por lo que se estudian circuitos específicos de regulación de voltaje a corriente constante para su implementación en la industria. Se propone realizar un análisis y diseñar un convertidor reductor de voltaje con las características eléctricas que demanda el proceso de electrólisis para obtener su viabilidad en la construcción, previamente se realiza un estudio del comportamiento de proceso electroquímico para conocer las características eléctricas de consumo. Se plantea el uso del recurso solar como fuente principal para su conversión en energía eléctrica a través de un arreglo fotovoltaico. Como contribución a la diversificación de energías renovables y sustentabilidad en los medios de producción eléctrica. Con la energía eléctrica obtenida a través del arreglo fotovoltaico, se utilizará como fuente de entrada al circuito convertidor reductor para la regulación de un voltaje promedio de 7 Volts a una corriente de 27 Amperes de salida por depósito, con la característica de mantener una corriente constante desde la fuente de entrada a la carga final (proceso electroquímico).

1.4. Objetivo General

Analizar y diseñar un convertidor reductor de C.C. a C.C. con parámetros de potencia de salida establecidos para la producción por electrolisis, con el aprovechamiento del recurso solar para su conversión en energía eléctrica como fuente principal.

1.5. Objetivos Particulares

- Estudio de incidencia solar en la zona para el aprovechamiento del recurso.
- Análisis y dimensionamiento del arreglo fotovoltaico considerando las variaciones de incidencia solar.
- Análisis del convertidor reductor de C.C. a C.C. con características eléctricas adecuadas al proceso de electrólisis.
- Diseño y construcción del convertidor reductor de C.C. a C.C.
- Integración del arreglo fotovoltaico y el convertidor reductor de C.C. a C.C.

1.6. Metodología

La metodología del proyecto de esta tesis se desarrolla en dos etapas, la primera consiste en el análisis y dimensionamiento de un sistema fotovoltaico para una generación máxima de 30 Volts a 32 Amperes equivalente a una potencia de 960 Watts, se realiza la simulación en MATLAB del arreglo fotovoltaico para obtener un registro del comportamiento del voltaje generado en función de la variación de la incidencia solar en la localidad en estudio, con lo cual se puede dar validez del aprovechamiento solar y la generación de energía eléctrica como fuente principal para el proceso electroquímico.

La segunda etapa consiste en el análisis y diseño de un circuito convertidor de voltaje de C.C. a C.C. en reducción a condiciones de operación de 7 Volts de salida con una corriente promedio de 10 Amperes, se replicará este mismo circuito en dos módulos para realizar una conexión en paralelo para obtener un voltaje de 7 Volts a 30 Amperes con una generación de potencia de 210 Watts para alimentar un depósito de electrolisis con dimensiones de 40 cm x 40 cm x 30 cm a un volumen de 0.048 m³ de reacción química, se empleará la técnica de variación de voltaje por modulación de ancho de pulso (MAP) a frecuencia constante. La validación del circuito convertidor de reducción se lleva a cabo con simulación en Multisim de National Instruments.

Se realiza la integración de las etapas, arreglo fotovoltaico y convertidor de reducción como sistema de generación de voltaje a partir de fuente de energía fotovoltaica y regulación de voltaje para aplicaciones de proceso de electrólisis. Como parte final se realiza la experimentación considerando al proceso de electrólisis como una carga puramente resistiva para su comprobación.

CAPITULO II

Marco Teórico

En este capítulo se realiza una descripción de la energía solar en la Republica Mexicana, la radiación directa y difusa, los principios de funcionamiento de una celda solar, de los sistemas fotovoltaicos, de electrólisis y los tipos de reductores de voltaje de C.C. a C.C.

2.1. Energía Solar

De todos los tipos de energía renovable la de mayor trascendencia es la energía solar, su emisión tiene que ver con la radiación electromagnética emitida por el sol, considerada como fuente primaria para el hombre, se relaciona con el estado de ánimo de las personas, sin ella muchos seres vivos simplemente no existiríamos, la tecnología solar permanentemente se está innovando ya que se investigan nuevas tecnologías continuamente, su aplicación en materiales, eficiencia de conversión, costos de fabricación así como sus dimensiones son cada vez más adaptables a todo tipo de superficies, de igual forma ya existen elementos fijos o semifijos con seguimiento y orientación automática para aprovechar al máximo el recurso solar, la tecnología fotovoltaica es de las más limpias en su operación y mantenimiento.

La principal fuente de energía que ilumina y calienta la tierra es el sol, factor principal para dar lugar al origen de la vida. Se comporta como un potente reactor nuclear de fusión que produce anualmente energía en forma de radiación electromagnética de $5,4 \times 10^{24}$ J, la radiación electromagnética se mide en pequeños espacios de tiempo comparados con el sol. Tal cantidad de energía corresponden a 4.500 veces la que se consume en el mundo en el mismo periodo, lo que da idea de su magnitud y aprovechamiento mediante el diseño, operación, mantenimiento y posibles cambios de tecnologías en la instalación de captadores de radiación, propias para cada región del planeta, tiene su limitante de captación o aprovechamiento solar dadas por la altitud y longitud terrestre.

La Distancia del sol a la tierra es aproximadamente de 150 millones de kilómetros, la radiación de origen llega a nuestra atmosfera considerablemente debilitada de 1.367 vatios por metro cuadrado, misma que puede ser aprovechada. Tal valor es afectado por la atenuación de la capa atmosférica y sus componentes, es posible obtener sobre la superficie terrestre aproximadamente 1000 W/m^2 (1kW/m^2). (Salbidegoita, 2008).

La cantidad de energía solar aprovechable en nuestro país está en el rango de los 4.0 a los 4.9 kWh/m^2 (B., 2008) cómo se observa en el mapa en la figura 2.1. Estos datos se deben de tomar como referencia para el recurso que está disponible todo el año y verificar que se pueda atender la demanda en las fuentes de consumo, los datos dan certeza o incertidumbre y en algún caso hacer ajuste o correcciones de los factores que alteren los resultados esperados.

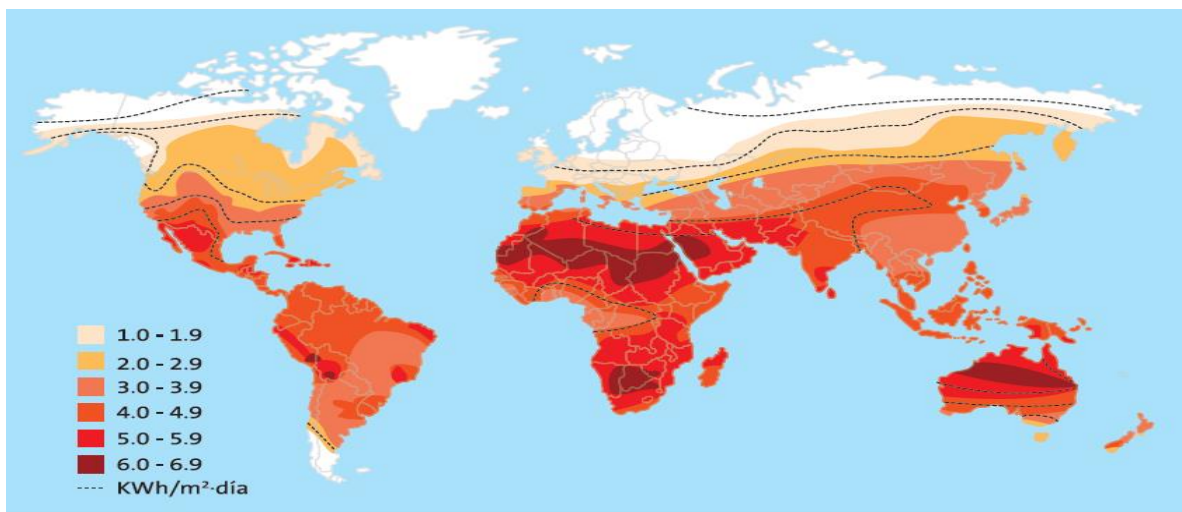


Figura 2.1. Radiación Global Horizontal del Mundo. Fuente: Garcia V. Octavio, Pilatowosky F. Isaac 1ª. Edicion, Cd. De Mexico, UNAM, Instituto de Energias Renovables 2017.

2.2. La radiación solar

La salida del sol emite radiación solar que va desde ondas de longitud corta de alta energía, como son rayos gamma, hasta la radiación de longitud larga de baja energía, como ondas de radio. En medio de estos rangos están los rayos X, la luz visible y el calor (radiación infrarroja). En tanto que el sol libera numerosas formas de energía, la mayoría de estas (alrededor del 40% es radiación infrarroja (calor) y luz visible (alrededor del 60%). (Gilbert, 2012).

La transformación de radiación solar en electricidad se denomina energía solar fotovoltaica, se lleva a cabo con elementos semiconductores que integran los paneles solares, dicha tecnología no es nueva, pero sí de innovación constante en los materiales semiconductores buscando la mayor eficiencia y tecnologías que ayudan a distribuir corrientes, voltajes e intensidad de la misma.

2.3. Radiación Difusa, Directa y Reflejada

La radiación que emite el sol como directa llega a la superficie de la tierra sin haber sufrido cambios en la dirección, mientras que la difusa es aquella sin ninguna orientación determinada, como ocurre en días nublados o por los efectos de la contaminación. La radiación reflejada es aquella que cambia su trayectoria al chocar con partículas atmosféricas, por lo que la suma de cada una de la radiación se llama **radiación global**.

De acuerdo a lo anterior, la radiación total procedente del sol que incide sobre la superficie terrestre está formada por:

1 Radiación directa (**B**): Directamente del Sol a la tierra sin ningún obstáculo.

2 Radiación difusa (**D**): Originada por los efectos de dispersión de los componentes de la atmósfera, incluida las nubes.

3 Radiación reflejada (**R**): Radiación incidente que vuelve a la superficie después de ser reflejada en el suelo. El cociente entre la radiación reflejada y la porción de ésta que vuelve a incidir se denomina albedo (Salbidegoita, 2008).

La radiación global **G**, o total que llega a la superficie terrestre, se expresa como la suma de tres componentes:

$$\mathbf{G = B + D + R} \quad (1)$$

La nubosidad que a diario se tiene en la zona y las condiciones climatológicas determinan datos de lectura que se pueden consultar en el servicio meteorológico nacional, cuenta con predicciones de al menos una semana en tiempo real. Un 20% de nubes al día no afecta la radiación, señalan a simple vista la diferencia entre un día claro y nublado entre ambos existe infinidad de grados intermedios que se pueden aprovechar. En términos generales, con menos del 20% de nubes en un día se considera claro o despejado; entre un 20 y 40% se dice que es un día semi-claro; entre un 40 y 80 % el día es semi-cubierto; con más de 80% de nubosidad, se dice que el día está completamente cubierto o cerrado, en los días con nubosidad cerrada la insolación es muy baja por lo que las condiciones climatológicas son altamente desfavorables para el aprovechamiento de la radiación solar (Caso, 1999).

2.4. Energía Solar en México

La transformación de la radiación solar en calor se denomina energía solar térmica, que consiste en transformar la radiación de calor, que puede aprovecharse para producir agua caliente destinada para el consumo doméstico (calentamiento de piscinas, agua caliente sanitaria, calefacción, refrigeración por absorción), el calor también puede utilizarse para producir energía mecánica mediante un ciclo termodinámico y a través de un alternador generar energía eléctrica, (Pedro, 2010). En años recientes se tienen casos prácticos de éxito con la aplicación de tecnología fotovoltaica en México (SENER, 2011), algunos se mencionan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Casos de éxitos de implementación de la tecnología fotovoltaica en México.

Sector.	Lugar y Año.	Modalidad y Desarrollador	Potencia. (kWh).	Observaciones
Industrial.	Aguascalientes. (2011).	Autoabastecimiento Autoabastecimiento Renovable, S. A. de C.V.	3800	Se otorgó el permiso para el uso de los miembros de la sociedad de autoabastecimiento
Comercial	Aguascalientes. (2009).	Autoabastecimiento Wal-Mart de México Aleo solar, AG, G3 Serv. Ambientales	174	En operación para el suministro del 20% de la demanda anual requerida.
Comercial.	Distrito Federal. (2006).	Autoabastecimiento the Green Corner	30.6	En operación; para caracterizar su operación y evaluar su desempeño e interacción con la red.
Otros	Distrito Federal. (2009).	Autoabastecimiento Universidad Autónoma Metropolitana, Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)	60	En operación; para caracterizar su operación, fomentar recursos humanos, sensibilizar a la comunidad universitaria.
Otros.	Nuevo León. (2002).	Prueba piloto: IIE, e Iniciativa Privada.	1	En operación para autoabastecimiento de instalaciones municipales.
Residencial.	Tijuana, Guadalajara, Región Laguna. (2008)	Autoabastecimiento	10-20	Bajo el esquema de medición neta. (10 sistemas de 1 a 2 kWp cada uno)
Residencial.	Mexicali, Baja California. (2006)	Autoabastecimiento Gobierno del Edo. CFE IIE.	220	En operación, Primer vecindario solar en México 220 casas con sistema de 1 kWp cada una); para evaluar el desempeño técnico, beneficio económico al usuario y al sistema eléctrico.
Residencial.	La Paz, Baja California. (2006).	Prueba piloto Usuario DAC; IIE, CFE e Iniciativa Privada.	6	En operación; Reclassificación de una tarifa de alto consumo DAC a una más baja.

2.5. Principio de la celda fotovoltaica

El descubrimiento del efecto fotovoltaico fue a cargo del científico francés Alexandre Edmond Becquerel (el padre de Antoine Henri Becquerel, después de quien se nombra la unidad de la actividad de material radiactivo) descubrió el efecto fotoeléctrico mientras realizaba experimentos electroquímicos. Colocó dos electrodos revestidos de platino en un recipiente con un electrolito y determinó la corriente que fluye entre ellos.

En 1950, el co-inventor del transistor, premio Nobel americano William B. Shockley (1910-1989) presentó una explicación del funcionamiento de la unión p-n, y los fundamentos teóricos de las células solares usadas hoy en día. Sobre esta base, Daryl Chapin, Calvin Fuller y Gerald Pearson en los Laboratorios Bell desarrollaron la primera célula solar de silicio con un área de 2 cm² y una eficiencia de 6%, la presentaron al público el 25 de abril de 1954. La Nueva York Times publicó en su primera página al día siguiente y prometió a sus lectores "El cumplimiento de uno de los mayores deseos de la humanidad el uso de la ilimitada energía del sol".

Básicamente, al igual que el fotodiodo, se compone de una unión p-n. Este es dopado asimétricamente, en el fondo está la base **p** y en la parte superior el emisor **n**, fuertemente dopado. Los términos base y emisor provienen del transistor bipolar y han sido tomados para las células solares. Si la luz penetra en la célula, entonces cada fotón absorbido genera un par electrón-hueco. Las partículas se separan del campo de la zona de carga de espacio se desplazan a los contactos a través de la base hasta el contacto posterior e inferior. Se trata de pequeñas tiras de metal que transportan electrones generados al carril de colector de corriente (barra colectora). Si una carga está conectada a los dos polos de la célula solar, entonces esto puede extraer la energía eléctrica generada. (Konrad, 2014).

2.6. Funcionamiento básico de una celda solar

Una celda solar es un dispositivo que convierte la radiación solar en electricidad por medio de las propiedades electrónicas del material conocido como semi-conductor, el funcionamiento de estos dispositivos se basa en el efecto fotovoltaico, las celdas solares son esencialmente diodos de unión p-n, con áreas muy grandes donde existe un fuerte campo eléctrico interno a través de la unión. La radiación incidente es absorbida por el semi-conductor, lo que crea un exceso de pares electrón-hueco en ambas regiones de la unión, los electrones en exceso creados en la región **p** pueden difundirse a la unión y descender por la barrera de potencial hasta el lado **n**, de la misma forma los electrones de la región **n** pueden difundirse hasta la unión y pasar la barrera para entrar a la región **p**, el efecto de esto es colocar una carga positiva neta al lado **p** y una carga negativa neta al lado **n**, por la presencia del campo eléctrico interno de la unión que separa los portadores de carga creados por el efecto de la incidencia de radiación sobre el diodo, en la figura 2.2, se ejemplifica el diagrama de la celda y el conjunto de módulos para formar un arreglo fotovoltaico (SENER, 2011).

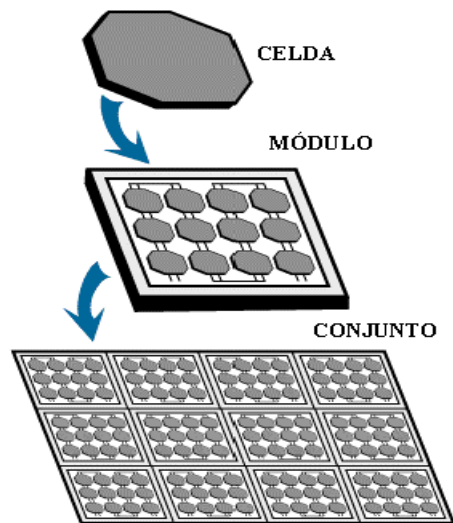


Figura 2.2. Celda para formar un módulo y arreglo fotovoltaico.

2.7. Sistema fotovoltaico (PV)

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de celdas de pequeñas dimensiones interconectadas para formar un módulo en diferentes capacidades de potencia, al mismo tiempo se emplean para formar arreglos serie-paralelo para incrementar la generación de voltaje o corriente, a la interconexión de módulos se llama sistema fotovoltaico (PV).

2.8. Identificación de las características de PV

Los sistemas de celdas fotovoltaicas se fabrican con materiales de silicio mono-cristalino, poli-cristalino, amorfo y orgánicas, estas últimas alcanzando desarrollos importantes, mismos que ayudan a convertir la energía solar en energía eléctrica, constituyendo el sílice el material semiconductor que mayormente se emplea en estos sistemas por su abundancia en la tierra y fácil de obtener, se están investigando nuevas formas de captación de la radiación solar, con otros materiales aunque están en fase de experimentación. Existen distintos tipos de placa en función de los materiales de fabricación y gran variedad de características (conductividad, eficiencia de conversión eléctrica de referencia, potencia máxima.). Entre ellas, la absorbancia y transmitancia son fundamentales para una buena captación de la constante solar (G), ya que influyen en el balance global de energía. Uno de los factores importantes que se deben de cuidar es la temperatura de operación, para evitar reducciones de eficiencia de conversión eléctrica (Salbidegoita, 2008).

2.9. Análisis FODA de la energía fotovoltaica, con respecto a las demás energías primarias

El análisis FODA, es una herramienta para ir reconociendo las debilidades y fortalezas de un sistema, en este caso se aplica a la energía fotovoltaica, para conocer nuestro recurso buscar la certeza del suministro en el proceso productivo por ello se enuncia las ventajas y desventajas de este recurso, ello no limita su desarrollo y por el contrario para recabar información sobre casos muy similares ya con éxito probado y no solo experimentales, se actualiza periódicamente y forma parte de una mejora continua, la tecnología puede cambiar en muchos aspectos y todo cambio deberá incluirse.

A continuación, se presenta un diagrama FODA en la tabla 2.2, de la energía fotovoltaica para su comprensión.

Tabla 2.2. FODA de la energía fotovoltaica.

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Bajo costo de mantenimiento. ❖ Tecnología consolidada. ➤ Recurso solar disponible todo el año. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Costos de recuperación a varios años. ❖ Bajo rendimiento.
<ul style="list-style-type: none"> ➤ No genera ruido. ❖ No requiere de agua. ➤ Uso de instalación disponible. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Fallas de la incidencia solar. ❖ Faltas de espacio reducidos.
AMENAZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> ➤ La economía de la sociedad es un obstáculo que impide que se adquiera esto. ❖ Falta de conocimiento de este tipo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> ☐ Renovación de tecnología. ☐ Acceso a fondos nacionales. ❖ Fondo de Energía Renovables.
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inhibición de la implementación de energías renovables. ❖ Políticas cambiantes o sin cumplir. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Se ahorra energía. ❖ Deducción Fiscal acelerada.

Fuente: Sociedad y Ambiente, año 3, Vol.1, num 6, noviembre de 2014 - febrero de 2015, ISSN:2007-6576, p.p. 72-88.

2.10. Cálculos de la irradiación solar en la tierra

Para el cálculo de la densidad de radiación en la tierra en función del día año, se utiliza la siguiente expresión:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \quad (2)$$

Donde:

G_{on} : Radiación incidente en la superficie de la tierra

G_{sc} : Constante solar energía del Sol por unidad de área perpendicular a la superficie de la dirección de propagación antes de penetrar la atmosfera

$$G_{sc} = 1367 \frac{W}{m^2} \quad (3)$$

n = día del año.

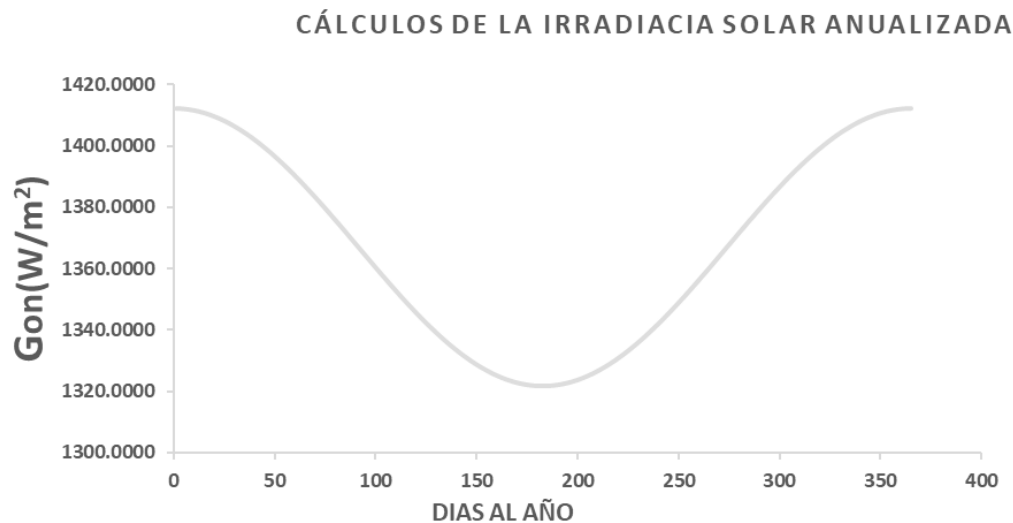


Figura 2.3. Grafico de Incidencia de irradiación durante un año.

El siguiente mapa de irradiancia solar de la República Mexicana es a partir de datos acumulados de un año, gran parte del recurso solar está en el continente americano, África, Oceanía y algunas regiones de Europa, México se encuentra en el rango de los 4.7- 5.8, mayormente en la parte norte esto es los estados de Coahuila, Chihuahua, Sonora, Baja California Norte, Baja California Sur, Durango, Zacatecas y los siguientes dos rangos que van desde los 4.0 y al 3.0 comprendiendo los Estados como Nuevo León, Tamaulipas, Tabasco, Campeche, etc. sin embargo, hay radiación que cumple en los demás estados para ser considerada optima-ideal ver figura 2.4.

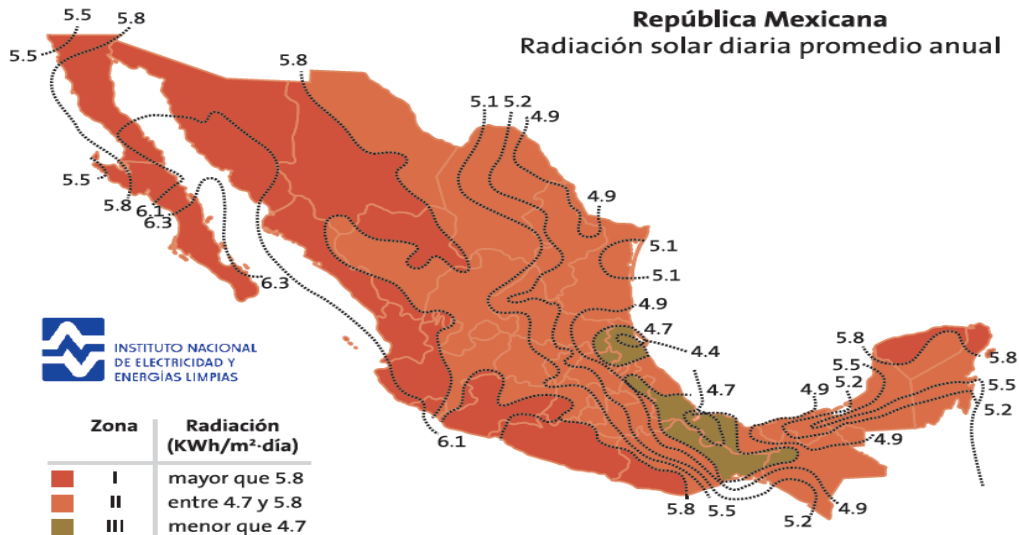


Figura 2.4. Irradiación solar en la República Mexicana /Fuente: Garcia V. Octavio, Pilatowosky F. Isaac 1ª. Edición, Cd. De Mexico, UNAM, Instituto de Energías Renovables 2017.

2.11. Principio de funcionamiento de una celda electrolítica

El proceso de electrólisis depende de una fuerza electromotriz óptima (f_{em}), la reacción se lleve a cabo al aplicar una diferencia de potencial entre dos electrodos sumergidos en un electrólito, los iones cargados positivamente (cationes) se desplazan hacia el electrodo negativo (cátodo), la fuerza electromotriz de un circuito electroquímico por así convenir se considera positiva cuando los cationes se trasladan por la solución, del electrodo izquierdo al derecho y en este mismo sentido los electrones por la parte externa del circuito. Si el circuito está abierto no hay tal reacción, considerando la reacción no es espontánea, al contacto con los electrodos los iones donan o reciben electrones produciendo una reacción electroquímica, la electro-conductividad de las soluciones se realiza por la disociación del electrólito en iones, partículas con carga eléctrica. Los fenómenos que se efectúan en la interface electrodo- electrólito bajo la acción de una corriente eléctrica aplicada al sistema, se le llama electrólisis, estas pueden darse en temperaturas altas o en temperaturas bajas y en medio ácido o medio básico.

Los procesos electrolíticos se realizan en dos electrodos: un ánodo y un cátodo, los electrólitos que se consideran son electrólitos fuertes dado que los electrólitos fuertes son en su mayoría ácidos, base y sales, ya que tiene un alto grado de disociación, incluso en concentraciones muy bajas, existen también los electrólitos débiles pero en este caso se han descartado por el planteamiento del problema se trabaja con electrólitos fuertes por ello se ha considerado en esta trabajo de investigación que se dé casi en su totalidad. (Olguin Q. Saul, 1988). Los electrodos son superficies en las cuales tiene lugar las semi-reacciones de oxidación y reducción. Por lo general los procesos que transcurren en ambos electrodos influyen los índices de electrólisis el proceso ocurre con un voltaje en corriente continua, para este caso la corriente es considerada monofásica, por los usos industriales o las cantidades a requerir como producto o materia prima.

2.12. Elementos principales de una celda electroquímica

El ánodo es positiva marcado por el signo que posee el circuito externo, por el conductor circulan los electrones y por la disolución iones, por lo tanto, los elementos donde ocurre la reducción-oxidación, gana o pierde electrones, a continuación, se describen los elementos principales que constituyen la celda electrolítica en particular para este objeto de investigación, Ánodo y Cátodo Medio electrolito: Sustancia capaz de producir una reacción de reducción-oxidación en este caso dos sustancias A y B, siendo B la disolución más fuerte considerándola como un ácido fuerte donde se está llevando a cabo la reacción de reducción y en A la otra reacción de disolución que sería la reacción de oxidación. Electrolito: Es una sustancia que produce iones en disolución, Fuente de Voltaje: Fuente de voltaje externa en corriente continua y el equipo que los contiene que es una cuba electrolítica. Malla porosa o pared porosa, es la malla donde se separan las disoluciones hacia el cátodo y ánodo van a fluir los electrones hacia la disolución contraria para mantener el equilibrio de la solución a efectos de que la migración sea conducida y manteniendo el tamaño de partícula o masa del elemento a capturar en el cátodo, considérese el medio de ambas disoluciones como isoterma, esto es a temperatura constante, en este proceso no se busca generar energía eléctrica como es el caso de la celda galvánica ver figura 2.5.

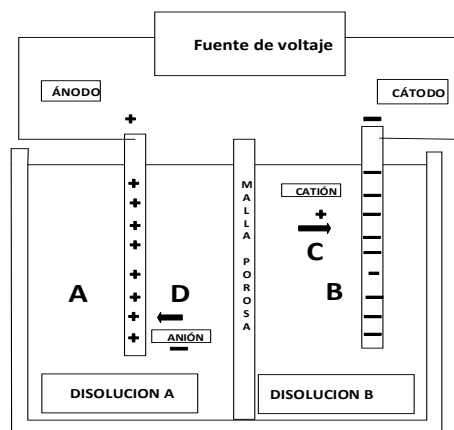


Figura 2.5. Esquema de un proceso electrolítico conforme a la producción de una sustancia.

Bajo este principio se obtiene sustancias importantes para ser utilizadas en algunos procesos industriales para la creación de nuevos productos, dicha sustancia tiene diferentes aplicaciones en la manufactura, como el tratamiento catódico de piezas de acero, fabricación de soldadura, fundente en la industria metalúrgica, elaboración de circuitos impresos, etc. El proceso de electrólisis se lleva a cabo con la expresión de la ecuación (4).



De manera general se plantea la reacción de electrolisis, donde: A y B son los reactivos que participan en la reacción para dar origen a nuevos productos C y D, que se obtiene a partir de la reacción oxido reducción (redox), para el caso de investigación, por lo cual la reacción debe cumplir el principio de la 1ª. Ley de Faraday que dice lo siguiente " La cantidad de sustancia producida por electrolisis es proporcional a la cantidad de electricidad usada" y aplicando la 2ª

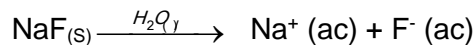
Ley que dice “Para una determinada cantidad de electricidad (carga eléctrica) la masa de un material elementalmente alterado en un electrodo es directamente proporcional al peso equivalente del elemento, conjuntándose esas leyes y haciendo esto que los reactivos se transforman o desplacen cuantitativamente en productos y así se complementa la reacción. La reacción se realiza en un solo sentido esto es irreversible. (S.Zumdahl, 2007).

La siguiente tabla ejemplifica algunos de los ácidos fuertes, ácidos débiles, bases fuertes, bases débiles que pueden reaccionar para los fines deseados tabla 2.3. (Chang, 2002).

Tabla 2.3. Ejemplos de ácidos fuertes, ácidos débiles, base fuerte y base débil.

Ácido Fuerte	Ácido débil	Base Fuerte	Base débil
HCl _(ac)	CH ₃ COOH _(ac)	NaOH _(AC)	NH _{3(ac)}
H ₂ SO _{4(ac)}	H ₃ PO _{4(ac)}	KOH	CH _{3-NH₂}
HNO _{3(ac)}	HF _(ac)	Ca(OH) _{2(ac)}	H ₃ BO ₃
H ₂ CrO _{4(ac)}	H ₃ PO _{3(ac)}	LiOH _(ac)	H ₂ CO ₃

Para ejemplificar una disolución de ácidos o bases que contienen un ion común se presenta la siguiente reacción que se disocia completamente en sus iones, aquí tenemos una disolución que contiene ácido fluorhídrico HF, como ácido débil y su sal fluoruro de sodio (NaF), cuando una sal se disuelve en agua se disocia completamente en sus iones (es un electrolito fuerte) (S.Zumdahl, 2007).



Como parte del funcionamiento de la celda electroquímica experimentalmente se presenta la siguiente figura que representa el circuito equivalente del funcionamiento de la misma que hace el circuito resistivo, donde la fuente proporcionara la electricidad al sistema el ánodo, cátodo y la malla porosa ofrecen la resistencia en paralelo y la disolución en serie al ánodo y cátodo donde ocurre la migración de iones, establecimiento óhmico al sistema, ver figura 2.6, circuito equivalente de la celda electroquímica propuesta.

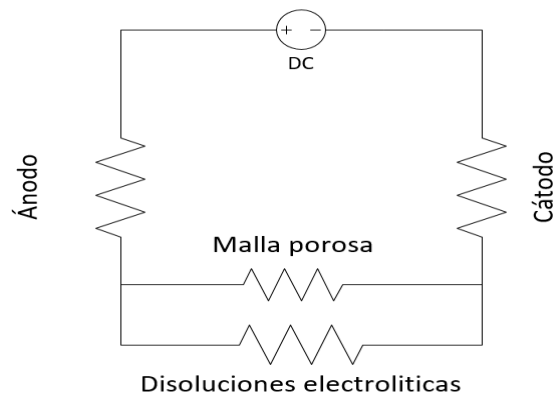


Figura 2.6. Circuito equivalente resistivo de la celda electroquímica propuesta.

2.13. Circuito de reducción de voltaje

Los circuitos que tienen la función de reducir un voltaje de mayor amplitud a una amplitud de menor nivel sin alterar la corriente de entrada y salida, se le llaman convertidores de reducción de voltaje de corriente continua (C.C.). Normalmente, la tensión continua de entrada cambia a una tensión rectangular, esta se eleva o se disminuye, según se necesite, se rectifica y filtra para obtener la tensión de salida deseada.

Los convertidores de potencia C.C./C.C. son dispositivos de electrónica de potencia utilizados en aquellas aplicaciones donde se necesita un voltaje o corriente de salida menor que el voltaje o corriente de entrada, para lograr esta función se controlan los tiempos de conmutación con interruptores internos, como se puede observar en la figura 2.7, el convertidor reductor tiene dos modos de operación, modo de conducción continua (MCC) y modo de conducción discontinua (MCD).

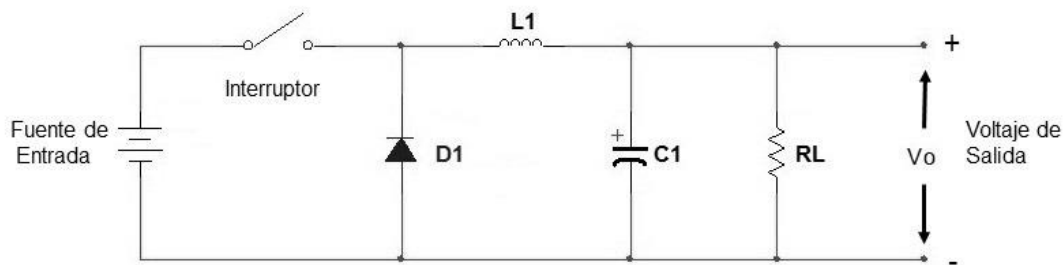


Figura 2.7. Diagrama principal de un convertidor de voltaje de reducción.

2.14. Modo de conducción continua (MCC)

Los convertidores de C.C.-C.C., son aquellas donde su voltaje de salida se fija en una magnitud deseada, aunque fluctúe el voltaje de entrada y la carga de salida, los convertidores de modo de conmutación utilizan uno o más interruptores para transformar un nivel a otro, en un convertidor con un voltaje de entrada dado, el voltaje medio de salida se ajusta mediante el control de tiempos de encendido y apagado ($t_{enc.}$ y $t_{apag.}$) a través de un interruptor. Son fuentes de poder reguladas, tradicionalmente, por leyes de conmutación de alta frecuencia, tales como modulación de ancho de pulso (PWM Pulse Width Modulation) o control de estructura variable que genera un régimen deslizante sobre una superficie de conmutación.

2.15. Modo de conducción discontinua (MCD)

Las fuentes de conversión en este modo tienen la característica de mantener constante la fuente de entrada y el voltaje de salida se ajusta por medio de la modulación de ancho de pulso a un valor diferente, a medida que la carga tiende a variar en un intervalo considerable, un ejemplo se tiene en los autos eléctricos. (Mohan Ned, Underlan M. Tore, 2009)

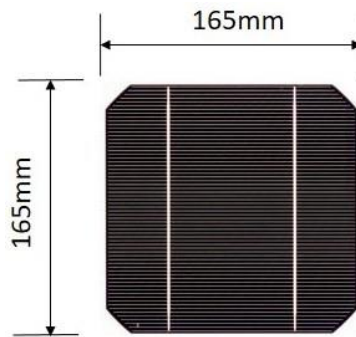
CAPITULO III

Análisis del arreglo fotovoltaico y desarrollo del análisis matemático del convertidor de reducción

En este capítulo se realiza el dimensionamiento del arreglo fotovoltaico como fuente de entrada al convertidor reductor, considerando las características de potencia suficientes para el proceso de electrólisis, se lleva a cabo el desarrollo del análisis matemático del convertidor reductor de voltaje considerando al proceso electroquímico como un sistema resistivo.

3.1. Análisis de celda fotovoltaica

El dimensionamiento del arreglo fotovoltaico utilizado como fuente principal para el proceso electroquímico, inicia a partir de las características de una celda fotovoltaica, figura 3.1. Parte principal en la construcción de un módulo fotovoltaico, los módulos fotovoltaicos contienen celdas de dimensiones que pueden variar de 51 mm a 160 mm por lado, se pueden formar desde de 36 hasta 60 celdas por módulo.



. **Figura 3.1.** Celda fotovoltaica.

El Cálculo del arreglo fotovoltaico inicia a partir del análisis fundamental de una celda cuyo modelo se representa en la figura 3.2. El circuito muestra una celda solar que produce una corriente (I_{sc}) directamente proporcional a la incidencia solar, el diodo (**D**) representa la construcción del semiconductor **NP** formado dentro de la estructura cristalina de la celda, la resistencia en paralelo (R_p) es la oposición a la corriente en el semiconductor, la resistencia en serie (R_s) se crea en las uniones de los materiales semiconductores y los conductores eléctricos, voltaje (V_d) se tiene en los extremos del diodo también se conoce como voltaje de circuito abierto (V_{oc}).

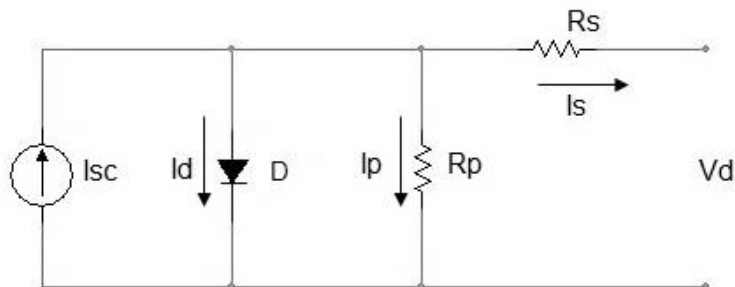


Figura 3.2. Circuito equivalente de una Celda fotovoltaica.

La ecuación matemática que describe el comportamiento de la celda fotovoltaica, está dada por la ecuación de Kirchhoff de corrientes y la ecuación de diodo:

$$I_{sc} - I_d - I_p - I_s = 0 \tag{3.1}$$

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{K \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Donde:

I_p = Corriente de la resistencia en paralelo

I_d = Corriente de diodo

I_{sc} = Corriente proporcional a la incidencia solar

I_o = Corriente de saturación inversa, con un valor de 2.56×10^{-10}

I_s = Corriente de la resistencia en serie

Despejando y sustituyendo la ecuación del diodo, se tiene la corriente que demanda la carga eléctrica para una celda fotovoltaica:

$$I_L = I_{sc} - I_o \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{K \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_d + I_s R_s}{R_p} \quad (3.3)$$

Donde:

V_d = Voltaje generado en la celda de 0.5 a 0.6 volts

K = Constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)

q = Carga del electrón (-1.602×10^{-19} C)

T = Temperatura ambiente en Kelvin a 25°C , (298.15K)

$R_p \approx 200$ a 300Ω (Valor aproximado en la resistencia equivalente en paralelo)

$R_s \approx 0.02$ a 0.005Ω (Valor aproximado en los conductores que conectan a cada celda)

I_L = Corriente de carga

El comportamiento de la corriente y voltaje de la celda fotovoltaica se muestra en la curva característica de la figura 3.3. Donde se tienen valores máximos en la corriente I_{sc} y voltaje V_{oc} , dados por la celda fotovoltaica, los valores I_{MPP} y V_{MPP} , son las coordenadas para el punto de potencia máxima de una celda (P_{MPP}) (Chen, 2011).

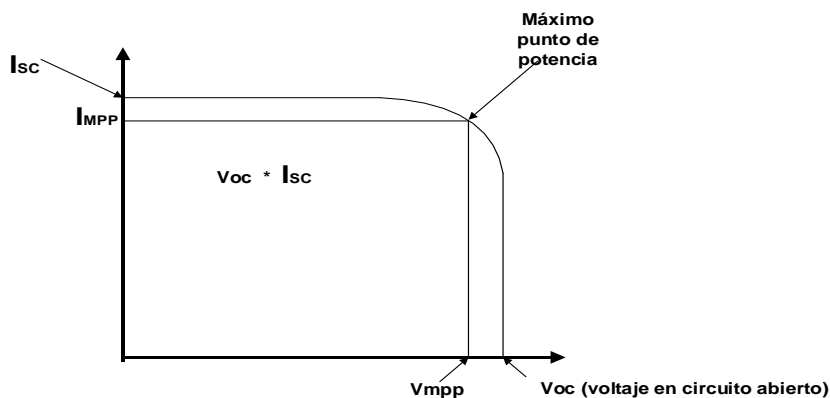


Figura 3.3. Gráfica del comportamiento de una Celda fotovoltaica.

3.2. Corriente de corto circuito (I_{sc})

La corriente de corto circuito se registra provocando la unión de las terminales de la celda, su valor depende del área superficial y de la irradiancia solar, el valor típico de la irradiancia en la celda fotovoltaica bajo condiciones nominales de medición es de 1000 W/m^2 a temperatura de 25°C .

La expresión matemática conocida internacionalmente es:

$$I_{sc} = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) EQ(\lambda) [1 - R(\lambda)] d\lambda \quad (\text{T. Mark V. 2003}) \quad (3.4)$$

Donde:

$F(\lambda)$ = Frecuencia de distribución en la luz espectral

$R(\lambda)$ = La luz reflejada en la longitud de onda

EQ = Eficiencia cuántica interna

(λ) = Factor dependiente de la irradiancia de saturación

3.3. Corriente de saturación inversa (I_o).

La corriente de saturación inversa existe cuando se tiene el voltaje máximo de circuito abierto sin demanda de corriente. Depende directamente del material para la construcción de la celda en este caso el silicio.

$$I_o = Aqn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n \times N_A} + \frac{D_p}{L_p \times N_D} \right) \quad (3.5)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \times T_p} \quad (3.6)$$

$$L_N = \sqrt{D_N \times T_N} \quad (3.7)$$

Dónde:

A = Área de la celda

$n_i = N_o \cdot e^{\frac{-\Delta WG}{2KT}} = 1.06 \times 10^{10} / \text{cm}^2$ Concentración de cargas intrínsecas ($\Delta WG = 1.12 \text{ eV}_{\text{silicio}}$)

D_N = Constante de difusión del electrón = $35 \text{ cm}^2 / \text{seg}$. (Valores típicos de D_N se encuentran entre 50 y $500 \mu\text{m}$)

D_p = Constante de difusión de los huecos

T_N = Tiempo de recombinación de la carga eléctrica

L_p = Longitud de difusión de electrones o agujeros del material P

L_n = Longitud de difusión de electrones o agujeros del material N

N_A = Concentración de receptores

N_D = Concentración de electrones libres en equilibrio térmico

N_o = Número de electrones de silicio = $3 \times 10^{19} \text{ cm}^3$

3.4. Voltaje de circuito abierto. (V_{oc}).

Es el voltaje máximo que genera una celda fotovoltaica, se tiene cuando no existe carga conectada entre sus terminales en condiciones nominales de funcionamiento.

Se propone una corriente generada por cada celda fotovoltaica de $I_o = 0.03125 \text{ A/cm}^2$, un área = 256 cm^2 con valores nominales entonces se tiene:

$$V_{oc} = \left[\frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \right) \right] \quad (3.8)$$

$$V_{oc} = \left[\frac{(1.381 \times 10^{-23})(298.15)}{1.602 \times 10^{-19}} \ln \left(\frac{8}{2.56 \times 10^{-10}} + 1 \right) \right]$$

$$V_{oc} = 0.6210 \text{ Volts}$$

Para la corriente de corto circuito, es necesario que V_d sea igual a cero, de la ecuación 3.1, se obtiene:

$$I_L = I_{sc} - I_o \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad (3.9)$$

$I_L = I_{sc} = 8 \text{ A}$, corriente a máxima incidencia solar a una temperatura ambiente de 25°C

3.5. Dimensionamiento del arreglo fotovoltaico

El proceso electroquímico en condiciones nominales requiere una corriente de 27 Amperes a 7 Volts.

Con los datos de $I_{sc} = 8$ Amp y $V_{oc} = 0.6210$ Volts por celda, se propone un arreglo de 60 celdas, de 10 columnas por 6 renglones para formar un módulo fotovoltaico como se muestra en la figura 3.4, con dimensiones de celda de 160mm por cada lado.

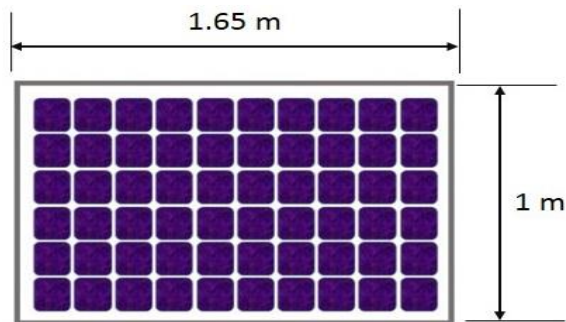


Figura 3.4. Modulo fotovoltaico

Sí se considera todas las celdas conectadas en serie como se observa en la figura 3.5, se tiene un voltaje por módulo en circuito abierto:

$$V_{oc \text{ por módulo}} = V_{oc} (N_{\text{celdas}}) \quad (3.10)$$

$V_{oc \text{ por módulo}} = (0.6210 \text{ Volts}) 60 = 37.20$ volts, con una corriente de 8 Amperes en circuito cerrado.

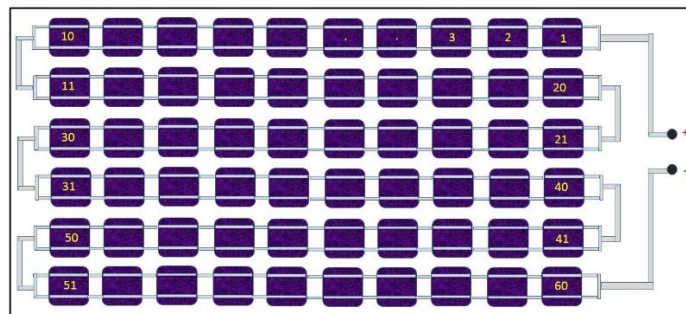


Figura 3.5. Modulo fotovoltaico con 60 celdas fotovoltaicas

Para obtener 27 Amperes es necesario colocar cuatro módulos de las mismas características en paralelo ver figura 3.6, con lo que se tienen un valor de 32 Amperes a un voltaje máximo de 37.20

Volts, valor que no afecta al proceso electroquímico, además se requiere un valor superior a 27 Amperes dado que la incidencia solar varía con el tiempo.

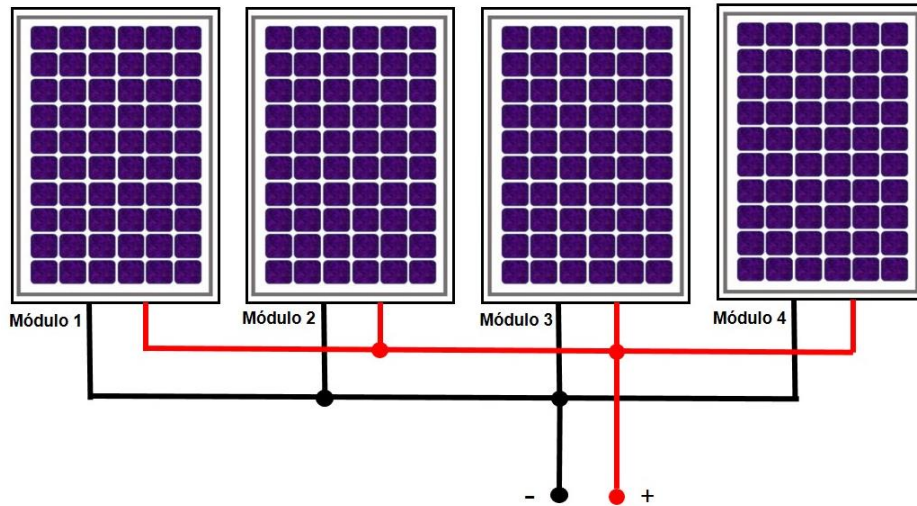


Figura 3.6. Arreglo fotovoltaico de cuatro módulos.

3.6. Potencia del arreglo fotovoltaico

Potencia por módulo.

$$P = I_{sc} (V_{oc}) = 8A (37.20V) = 297.6 \text{ Watts}$$

Potencia del arreglo fotovoltaico

$$P = I_L V_{oc} = 32 \text{ Amp} (37.20V) = 1190.4 \text{ Watts}$$

El análisis del arreglo fotovoltaico se realiza con una incidencia solar de 1000 W/m^2 .

Para el análisis, dimensionamiento de las celdas y paneles solares se hace el planteamiento con ecuaciones que nos permiten calcular el voltaje, la corriente y potencia, para más adelante se comprobara de manera experimental lo aquí planteado y analizado. Leyes como Ohm y Kirchhoff auxilian hacer los cálculos, así como el manejo y selección de los semiconductores y conductores de manera lógica para reforzar la hipótesis y objetivos de los requerimientos de energía para el proceso electroquímico con las características el cual opera.

Las condiciones ideales de radiación, temperatura, nubosidad, no afectan la generación de energía eléctrica para esta zona en base a los datos calculados, por lo que el área de dimensionado por panel se van estructurando e integrando de tal forma que las combinaciones de serie-paralelo van manteniendo la corriente y elevando el voltaje, como ya se ha alcanzado el ideal energético de electricidad la siguiente etapa será hacer el diseño de circuito reductor que nos permita mantener la corriente mediante un convertidor corriente continua-corriente continua (C.C.-C.C.).

3.7. Circuito reductor en modo continuo (abierto – cerrado)

El análisis del circuito reductor de voltaje se realiza a partir del diagrama mostrado en la figura 3.7, El circuito se compone por la fuente de entrada V_F , dado por el arreglo fotovoltaico conectado al circuito, S1 es un interruptor que simula el comportamiento de un transistor de potencia en el modo de troceado, el comportamiento del voltaje en la carga dependerá directamente del tiempo de conmutación del interruptor S1, ver figura 3.8. Los componentes L1, C1 y D1 son los elementos que en conjunto son parte del circuito reductor de voltaje, R1 (Proceso Electroquímico) en este caso es la carga o elemento final por el cual se realiza el análisis, se pretende mantener un voltaje menor a la entrada a una corriente máxima o igual a la de la fuente de entrada.

El análisis se realiza en dos etapas.

Etapa 1, cuando el tiempo $t=0$, S1 realiza la transición de abierto a cerrado ($0 - t_{ON}$).

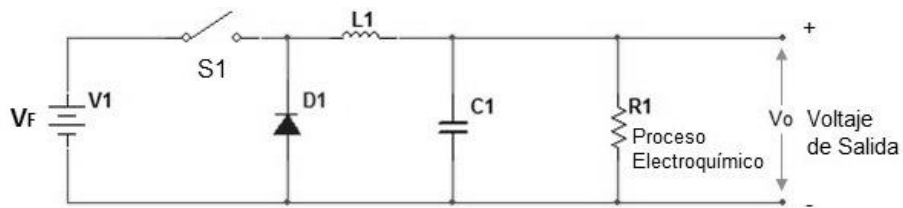


Figura 3.7. Diagrama del circuito reductor.

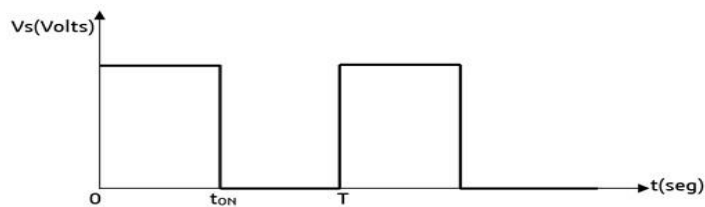


Figura 3.8. Conmutación del interruptor S1.

El interruptor S1 se mantiene cerrado en el intervalo de ($0 - t_{ON}$), la corriente suministrada por la fuente V_F fluye por el circuito equivalente que se muestra en la figura 3.9, el diodo D1 se polariza en inversa por lo tanto en el diodo no fluye corriente, solo se tiene en la malla externa formada por V_F , L1, C1 y R1.

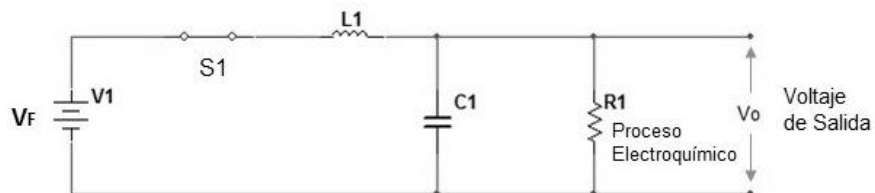


Figura 3.9. Diagrama con S1 cerrado y diodo bloqueado.

Se considera que el proceso electroquímico se comporta como una carga puramente resistiva a un valor mínimo.

Aplicando la ecuación de Kirchhoff de tensiones.

Se considera:

$$V_F > V_O; I_F = I_O$$

Obteniendo la ecuación de malla del circuito de la figura 3.10.

$$-V_F + V_L + V_o = 0 \quad (3.11)$$

$$V_L = V_F - V_o \quad (3.12)$$

Donde:

V_L voltaje de la bobina

V_F voltaje de la fuente de entrada

V_o es el voltaje a la salida del circuito

El voltaje de Salida (V_o) es el voltaje de alimentación a la carga final denotada como resistencia al efecto electroquímico, al mismo tiempo es el voltaje que se encuentra en paralelo al capacitor, la función principal de éste es la aproximación lineal del voltaje de salida.

Sí el voltaje de la bobina es:

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (3.13)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.2), tenemos:

$$L \frac{di}{dt} = V_F - V_o \quad (3.14)$$

$$L \frac{i_{Máx} - i_{Mín}}{t_{ON} - 0} = V_F - V_o \quad (3.15)$$

Despejando a $i_{Máx}$ se tiene:

$$i_{L,Máx} = \frac{V_F - V_o}{L} t_{ON} + i_{L,Mín} \quad (3.16)$$

$i_{L,Mín}$, se obtiene en el tiempo $t=0$, la corriente es máxima cuando se ha llegado al tiempo t_{ON} , y depende directamente de la inductancia de la bobina, sí L es mínima la corriente tiende a ser mayor con V_F y V_o constantes en la ecuación.

3.8. Circuito reductor en modo continuo (cerrado – abierto)

Etapa 2, En esta etapa el interruptor S1 se mantiene abierto en el tiempo de t_{ON} a T, ver figura 17., el circuito equivalente se muestra en la figura 3.10.

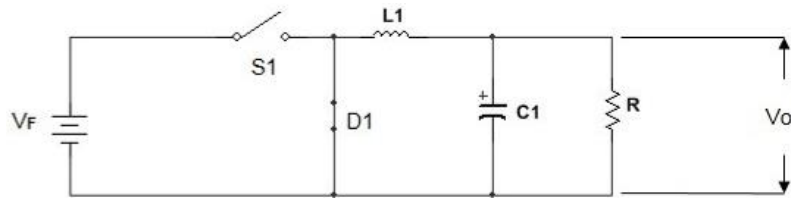


Figura 3.10. Diagrama con S1 abierto y diodo en conducción.

Sí se desprecia la caída de tensión en el diodo y sabiendo que la bobina almacena energía para ser liberada en forma de corriente eléctrica a través del circuito tenemos la ecuación de malla:

$$V_L + V_o = 0 \quad (3.17)$$

Sustituyendo

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad ; \text{ En la ecuación (3.17) tenemos:}$$

$$L \frac{di}{dt} + V_o = 0 \quad (3.18)$$

La corriente en esta etapa disminuye de un punto máximo a un punto mínimo, ver figura 3.11.

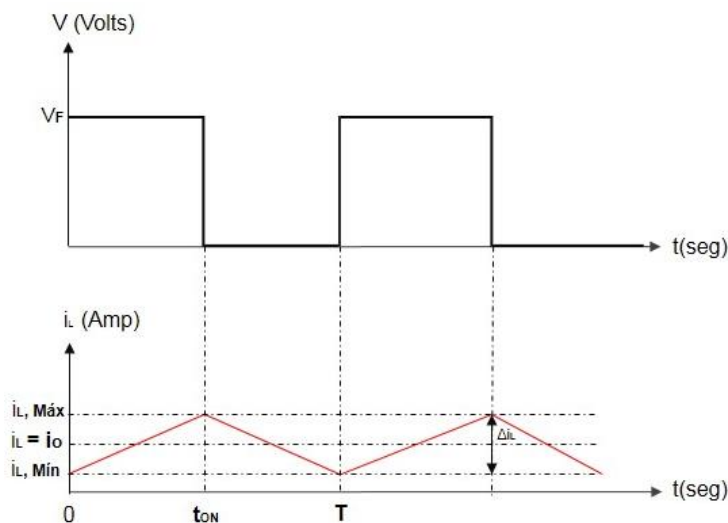


Figura 3.11. Rizado de la corriente i_L en la inductancia L.

Se tiene:

$$L \frac{i_{L,Mín} - i_{L,Máx}}{T - t_{ON}} + V_O = 0 \quad (3.19)$$

Despejando a $i_{L,Mín}$ se tiene:

$$i_{L,Mín} = -\frac{V_o}{L}(T - t_{ON}) + i_{L,Máx} \quad (3.20)$$

Sustituyendo $i_{L,Máx}$ de la ecuación (3.6) en la Ec (3.20) y despejando V_o

$$i_{L,Mín} = -\frac{V_o}{L}(T - t_{ON}) + \frac{V_F - V_o}{L} t_{ON} + i_{L,Mín} \quad (3.21)$$

$$V_o = \frac{V_F t_{ON}}{T} = DV_F \quad (3.22)$$

El voltaje de salida (V_o) depende directamente del ciclo de trabajo, es decir del porcentaje de la apertura y cierre del interruptor o del transistor de potencia utilizado. Donde $D = t_{ON} / T$, es el ciclo de trabajo de la onda cuadrada en la conmutación del interruptor S1.

3.9. Corriente en la carga de alimentación

La potencia en la fuente de entrada es igual a la potencia de salida y si las pérdidas de potencia son mínimas podemos decir que:

$$P_F = P_o$$

$$V_F I_F = V_o I_o$$

$$I_F = V_o I_o / V_F \quad (3.23)$$

Sustituyendo la ecuación (3.21) en la Ec. (3.22)

Tenemos que:

$$I_F = D V_F I_o / V_F \quad (3.24)$$

$$I_F = D I_o \quad (3.25)$$

Si la carga tiene un comportamiento puramente resistivo se tiene que $I_o = V_o / R_L = DV_F / R_L$

$$I_F = DI_o = D^2 V_F / R_L \quad (3.26)$$

La corriente que se demanda de la fuente, en este caso del arreglo fotovoltaico dependerá directamente del valor de la resistencia de carga es decir si R_L es un valor mínimo la corriente extraída del arreglo fotovoltaico será mayor, si R_L tomara valores mayores la corriente demandada del arreglo fotovoltaico tiende a ser mínima. Siempre que D y V_F se consideren constantes.

El arreglo fotovoltaico se encuentra en su máxima potencia de demanda cuando la resistencia de carga tiende a su valor mínimo.

3.10. Rizo del voltaje de salida

En el modo de conducción continua se presenta un rizado en el voltaje de salida (V_o) a consecuencia de las variaciones de corriente producidas en la bobina y la carga conectada. Para lograr que el voltaje de salida sea una corriente completamente lineal es necesario la colocación de capacitores como circuito de filtrado en paralelo con la carga.

Si la ondulación provocada por la inductancia L fluye a través del condensador y la componente media a través de la carga como se puede ver en la figura 3.12. Donde se muestra la ondulación generada en el voltaje de salida promedio (V_o).

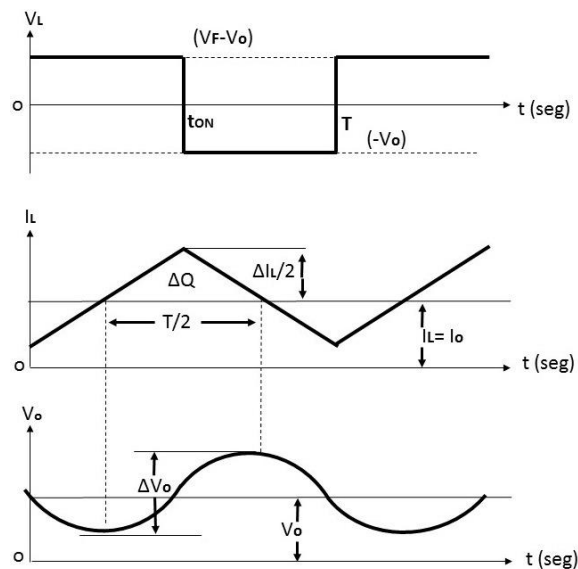


Figura 3.12. Rizo generado producto de la inductancia L y la carga R .

La diferencia de corriente ΔI_L se encuentra implícita en la diferencia de ΔQ expresión que se obtiene de la misma gráfica, por tanto, la ondulación de voltaje de pico a pico ΔV_o , como:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_L T}{2} = \frac{\Delta I_L T}{8C} \quad (3.27)$$

Durante el tiempo de t_{ON} a T se tiene que:

$$L \frac{di}{dt} + V_o = 0 \quad (3.28)$$

$$L \frac{\Delta i}{T - t_{ON}} = -V_o \quad (3.29)$$

$$\Delta I = -\frac{V_o(T - t_{ON})}{L} \quad (3.30)$$

Sustituyendo $V_o = V_F(t_{ON}/T)$ y sabiendo que $D = t_{ON}/T$, tenemos:

$$\Delta I = -\frac{V_F \left(\frac{t_{ON}}{T}\right)(T - t_{ON})}{L} = -\frac{V_F(t_{ON})(1 - D)}{L}; \text{ Entonces se tiene en función de } V_o \quad (3.31)$$

$$\Delta I = -\frac{V_o(D - 1)T}{L} = \frac{V_o T}{L}(1 - D) \quad (3.32)$$

Sustituyendo la ecuación (3.24) en la Ec (3.25)

$$\frac{8C\Delta V_o}{T} = \frac{V_o(1 - D)T}{L} \quad (3.33)$$

$$\Delta V_o = \frac{(1 - D)T^2 V_o}{8CL} = \frac{\pi^2}{2}(1 - D) \left(\frac{f_b}{f_c} \right) \quad (3.34)$$

La ecuación (3.26) muestra que la diferencia del rizado en el voltaje de salida tiende a disminuir cuando la capacitancia es mayor, por lo que se propone lo siguiente:

Sí la frecuencia de conmutación ésta dada por $f_c = 1/T$ y la frecuencia del filtro pasa bajos f_b en la salida se debe de cumplir que $f_b \ll f_c$, por lo tanto el voltaje de rizo es independiente de la potencia de la potencia de carga en la salida en el modo de conducción continua.

La frecuencia del filtro pasa bajos ésta dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}} \quad (3.35)$$

Se recomienda que el porcentaje de ondulación para las fuentes de reducción se mantenga en 1% con referencia al voltaje de salida (V_o).

3.11. Modelado del circuito en el intervalo ($t_0 - t_{ON}$)

Del circuito reductor aplicando análisis de nodos para obtener su comportamiento cuando es sometido a un escalón, equivalente al transistor en saturación en el intervalo de ($0 - t_{ON}$). Las corrientes que fluyen en cada elemento se muestran en la figura 3.13. Donde: i_L es la corriente en la bobina, i_C corriente en el capacitor e i_R es la corriente en la resistencia de carga (pila electrolítica).

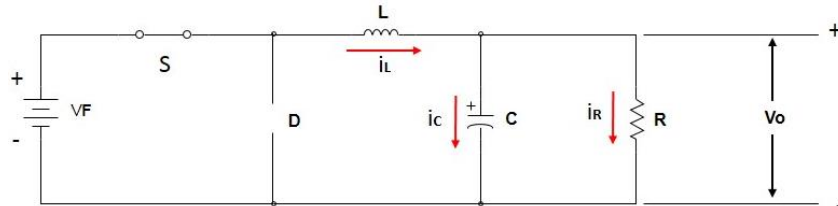


Figura 3.13. Circuito reductor en conducción

Aplicando la ley de corrientes en el circuito para encontrar la ecuación de nodo:

$$i_L = i_C + i_R \quad (3.36)$$

Calculando i_L

Aplicando la sumatoria de voltajes:

$$-V_F + V_L + V_o = 0 \quad (3.37)$$

Sí $V_L = L \frac{di}{dt}$ tenemos que:

$L \frac{di}{dt} = V_F - V_o$; aplicando cambio de variable de (t) a la variable compleja "s" en condiciones iniciales igual con cero tenemos:

$$i_L(s)LS = V_F - V_o; \text{ La corriente } i_L(s) \text{ es:} \quad (3.38)$$

$$i_L(s) = \frac{V_F - V_o}{LS} \quad (3.39)$$

Calculando i_R en la variable compleja "S"

$$i_R(s) = \frac{V_o}{R} \quad (3.39)$$

Calculando i_C

Sí la corriente en el capacitor ésta dada por:

$$i_C = C \frac{dV_o}{dt} \text{ Equivalente en su variable compleja S} \quad (3.40)$$

$$i_c(s) = V_o(s)CS \quad (3.41)$$

Sustituyendo en la ecuación de nodo Ec (3.28) las ecuaciones (3.30), (3.31) y (3.32):

$i_L(s) = i_c(s) + i_R(s)$; tenemos:

$$\frac{V_F - V_o(s)}{LS} = V_o(s)CS + \frac{V_o(s)}{R} \quad (3.42)$$

Despejando $V_o(s)$

$$V_o(s) = V_F \left(\frac{\frac{1}{LC}}{S^2 + \frac{1}{RC}S + \frac{1}{LC}} \right) \quad (3.43)$$

Sí $a=1$; $b = \frac{1}{RC}$ y $c = \frac{1}{LC}$; entonces la ecuación es igual a:

$$V_o(s) = V_F \left(\frac{c}{aS^2 + bS + c} \right) = V_F c \left(\frac{1}{(s_1 + m_1)(s_2 - m_2)} \right) \quad (3.44)$$

El voltaje de salida $V_o(s)$ es una ecuación de segundo orden en el intervalo de $(0 - t_{on})$ el comportamiento del circuito dependerá directamente de los valores de L, C, R y V_F .

La condición del voltaje de salida es un comportamiento sub amortiguado dado que tiende a disipar su respuesta a la señal de entrada en un tiempo reducido.

3.12. Modelado del circuito en el intervalo $(t_{on} - T)$

Para el intervalo de $(t_{on} - T)$ en el momento de abrir el interruptor (S), es decir de corte a saturación en el transistor de potencia, las corrientes en el circuito se comportan como se observa en la figura 3.14, en esta etapa tanto el capacitor y la inductancia descargan la energía almacenada a través de la resistencia de carga y los propios elementos activos.

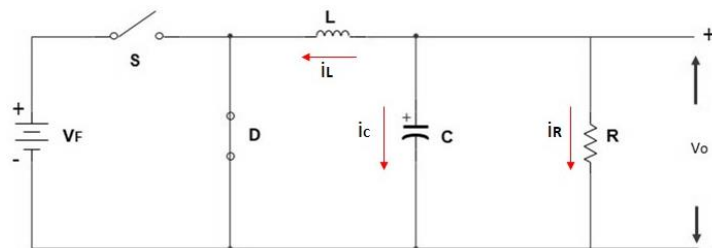


Figura 3.14. Comportamiento de las corrientes cuando S se abre o transistor en corte.

Obteniendo la ecuación de nodo del circuito, cuando el diodo conduce comportándose como un conductor con un voltaje de conducción aproximadamente cero.

$$i_L + i_C + i_R = 0 \quad (3.45)$$

Para cada corriente tenemos:

$$i_L = \frac{1}{L} \int V_o dt ; i_C = C \frac{dV_o}{dt} ; i_R = \frac{V_o}{R} \quad (3.46)$$

Sustituyendo en la ecuación de nodo Ec. (3.36) cada una de las corrientes:

$$\frac{1}{L} \int V_o dt + C \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R} = 0 \quad (3.47)$$

Las condiciones iniciales una vez que el interruptor es abierto el capacitor y la bobina permanecen con cierta cantidad de energía almacenada en forma de campo eléctrico y magnético por lo tanto las condiciones iniciales para el voltaje y la corriente son diferentes de cero.

De la Ec. (3.37) aplicando la segunda derivada para eliminar la integral en la bobina se tiene:

$$\frac{V_o}{L} + C \frac{d^2 V_o}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{dV_o}{dt} = 0; \quad (3.48)$$

Ordenando y dividiendo toda la ecuación entre C, tenemos una ecuación de segundo orden

$$\frac{d^2 V_o}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{LC} = 0 \quad (3.49)$$

Aplicando cambio de variable del tiempo (t) a la variable compleja (s) tenemos:

$$V_o(s)S^2 + \frac{1}{RC} V_o(s)S + \frac{1}{LC} V_o(s) = 0 \quad (3.50)$$

La Ec. (3.39) tiene la forma de

$$ax^2 + bx + c = 0; \text{ Donde: } a= 1; b= 1/ RC; c= 1/LC. \text{ Por formula general} \quad (3.51)$$

$$s_1 = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right)^2} \quad (3.52)$$

$$s_2 = -\frac{1}{2RC} - \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right)^2} \quad (3.53)$$

Sí $\alpha = \frac{1}{2RC}$ y $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$; Entonces las ecuaciones (3.40) y (3.41) equivalen a:

$$s_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega^2} \quad (3.54)$$

$$s_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega^2} \quad (3.55)$$

Donde: α es el coeficiente de amortiguamiento exponencial y ω se le llama frecuencia, la respuesta natural del voltaje en el circuito es:

$$v_o(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \text{ (Volts);} \quad (3.56)$$

Donde:

A_1 y A_2 se calculan en función de las condiciones iniciales dadas.

Los resultados de la simulación del modelo obtenido en la sección 3.11 y 3.12 se presentan en el capítulo 4 sección 4.4 y 4.5.

CAPÍTULO IV

Desarrollo del circuito reductor de voltaje y resultados

En este capítulo se muestra el proceso de diseño y montaje del circuito reductor de voltaje de C.C. a C.C. así como los resultados de la simulación de los modelos que describen el comportamiento del circuito.

4.1. Diseño del circuito reductor del voltaje

El diseño del módulo se realiza con las características mostradas en la tabla 4, una vez diseñado el circuito se replicar en tres módulos para su conexión en paralelo para cubrir la demanda eléctrica en el proceso electrolítico, el desarrollo del prototipo se lleva a cabo conociendo las características eléctricas de entrada y salida del reductor de voltaje en C.C. En la figura 4.1, se muestra el circuito principal del convertidor reductor de C.C a C.C.

Tabla 4.1. Características eléctricas del convertidor reductor

Características de Entrada	Características de Salida por módulo
Voltaje de Entrada: 30 Volts en CD	Voltaje de Salida: 7 Volts en CD
Corriente de Entrada: 35 Amperes	Corriente de Salida: 10 Amperes
Potencia de Entrada: 1.085 kW	Potencia de Salida: 70 Watts

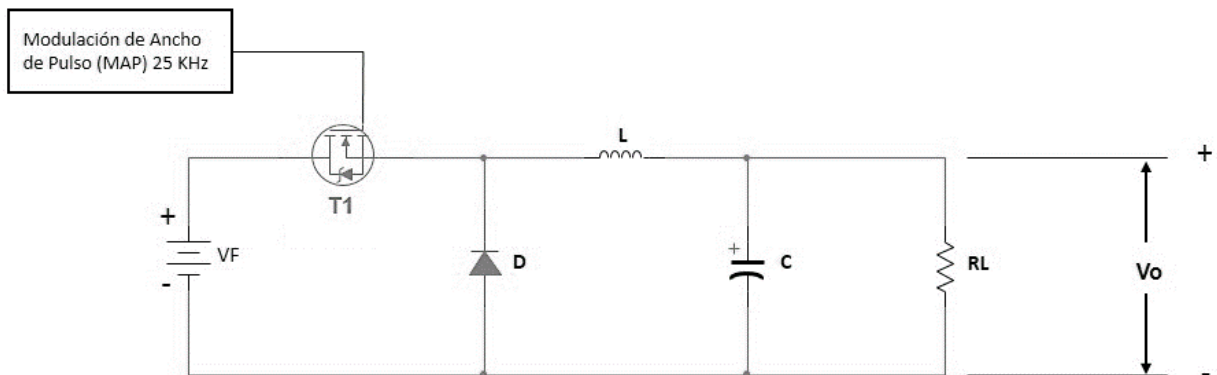


Figura 4.1. Circuito principal del convertidor reductor de voltaje.

El funcionamiento del circuito está basado en la técnica de modulación de ancho de pulso (MAP) donde se propone una onda cuadrada a una frecuencia de conmutación de 25 KHz, esta señal es suministrada al transistor de potencia (T1), su funcionamiento principal es la interrupción de la corriente en un tiempo aproximado de 20 μ seg por pulso, con la finalidad de reducir el voltaje de salida (V_o), con la manipulación del tiempo en nivel alto (t_{ON}) a frecuencia constante. Parte fundamental del circuito es la inductancia (L), por ser un elemento donde se lleva a cabo el almacenamiento de la energía en forma de campo magnético y disipada en la carga (R_L) en forma de corriente eléctrica.

El cálculo de la inductancia para el diseño del circuito se realiza de la siguiente forma: Con la frecuencia propuesta de 25 KHz, equivalente a un periodo (T) de 40 μ seg, se tiene un tiempo de activación del transistor y de la inductancia en $\Delta t = 20 \mu$ seg, que corresponde a un ciclo de trabajo del 50%.

De la ecuación (3.3) se despeja L, valor a calcular de la inductancia.

$$V_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i}{\Delta t}; \quad (4.1)$$

$$L = \frac{V_L \Delta t}{\Delta i} \quad (4.2)$$

Aplicando la ecuación de malla con T1 cerrado, despreciando la caída de voltaje en el transistor:

$$-V_F + V_L + V_o = 0 \quad (4.3)$$

$$V_L = 30 - 7 = 23 \text{ Volts}; \text{ caída de tensión en la inductancia}$$

Donde: V_F = Voltaje de entrada al convertidor, V_o = Voltaje de salida hacia la carga

De la ecuación (4.1) la diferencia de corriente

$$\Delta i = i_F - i_o \quad (4.4)$$

$$\Delta i = 30 - 10 = 20 \text{ Amp}; \text{ Corriente promedio}$$

Donde: i_F = Corriente de entrada al convertidor, i_o = corriente de salida hacia la carga

Por lo tanto, sustituyendo los datos en la ecuación (4.1) se tiene el valor de la inductancia

$$L = \frac{(23V)(28 \times 10^{-6} s)}{(20A)} = 32.20 \mu\text{H} \approx 32 \mu\text{H} \quad (4.5)$$

La bobina se construye a una inductancia de 32 μH con alambre magneto de calibre # 8AWG, para una corriente de 40 A a 60°C.

El valor capacitivo (**C**) se propone de 2200 μf a 50 Volts, para garantizar que el voltaje de salida sea completamente lineal y disminuir el rizado.

El diodo (**D**) tiene la función de permitir el flujo de la corriente producida por el efecto de la energía almacenada en la inductancia, cuando el transistor (T1) se encuentra en corte y se bloquea cuando T1, se encuentra en conducción. Se propone el diodo con matrícula 1N1186A, por sus características eléctricas de soporte: Corriente de 40 Amperes a 200V,

La conmutación en T1 se realiza con cuatro transistores de potencia tipo MOSFET IRFP064 para soportar una corriente de 70 A, cada uno y evitar el sobrecalentamiento que uno solo alcanzaría.

El comportamiento de la celda electroquímica (R) se propone como una carga puramente resistiva, dado que las sustancias y los electrodos realizan la transferencia de electrones de un

punto a otro por lo que algunos elementos provocan que la resistencia tenga una variación durante el proceso.

El diseño del circuito se muestra en la figura 4.2, la regulación del voltaje a la salida (V_o) que alimenta al proceso electroquímico denotado por R, se realiza ajustando el ciclo de trabajo en la etapa de modulación de ancho de pulso (MAP). Los transistores Q_1 y Q_2 , tiene como función principal suministrar la corriente suficiente a los transistores de potencia Q_3 , Q_4 , Q_5 y Q_6 para lograr su saturación. La fuente V_F denota al arreglo fotovoltaico conectado como fuente de entrada al circuito reductor de voltaje en C.C.

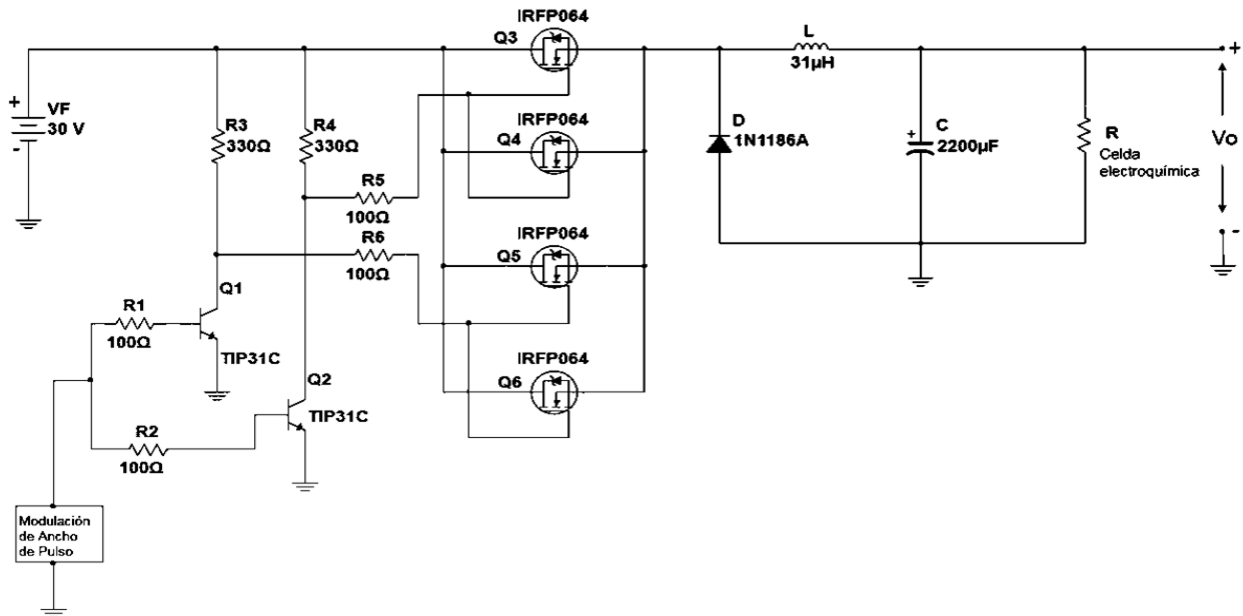


Figura 4.2. Circuito convertidor reductor de voltaje.

En la figura 4.3, se muestra el diseño físico del reductor de voltaje con cada una de sus etapas que lo componen equivalente al circuito de la figura 4.2.

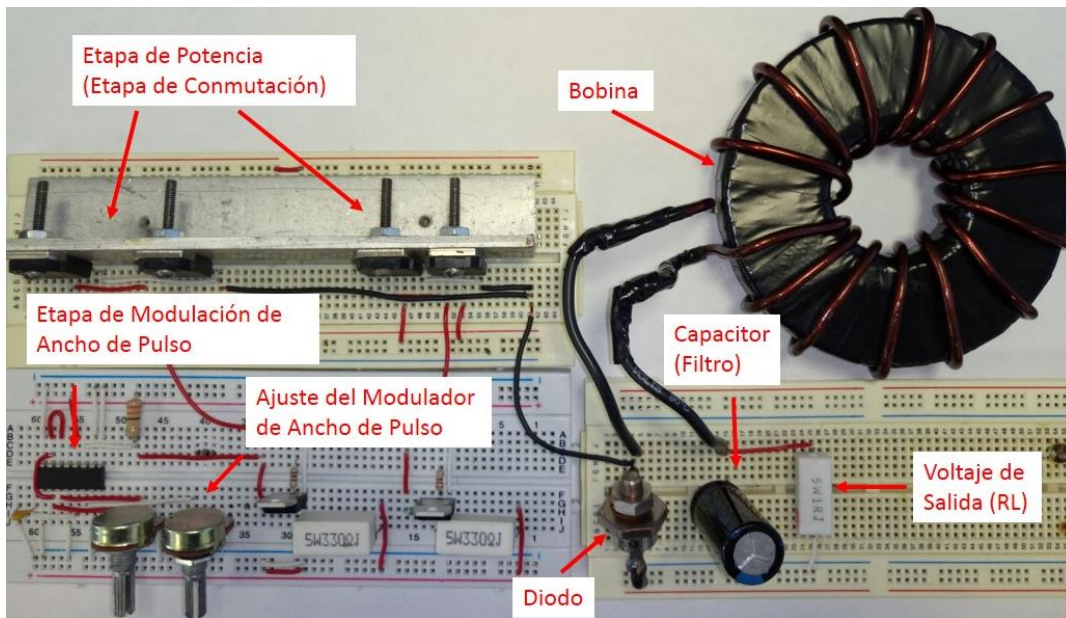


Figura 4.3. Circuito físico del convertidor reductor de voltaje en C.C.

4.2. Resultados del circuito reductor de voltaje

Los resultados del comportamiento del circuito reductor de C.C, se muestran en las figuras 4.4 a la 4.8. En conexión con el arreglo fotovoltaico como fuente de entrada con características eléctricas de 30 Volts a 32 Amperes, en cada una de las figuras muestran los graficos del comportamiento del circuito cuando se somete a distintos valores de carga, sí se asume que el proceso electroquímico tiende a variar en el tiempo, por lo tanto se proponen diferentes valores de resistencia en conexión a la salida del circuito convertidor donde se observa la grafica del voltaje resultante a valores mínimos de resistencia.

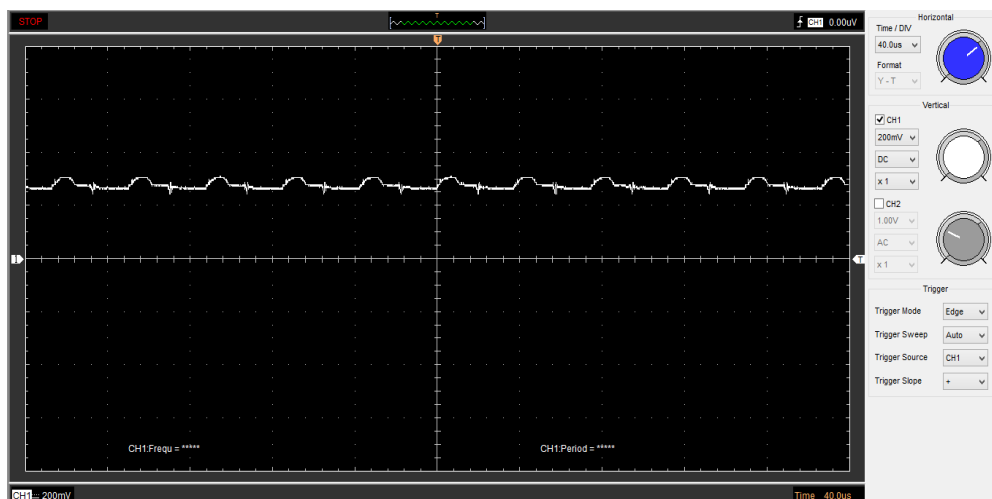


Figura 4.4. Gráfica de salida del convertidor reductor con una carga de 0.77Ω , a 500mV/Div y una base de tiempo de $40\ \mu\text{s/Div}$

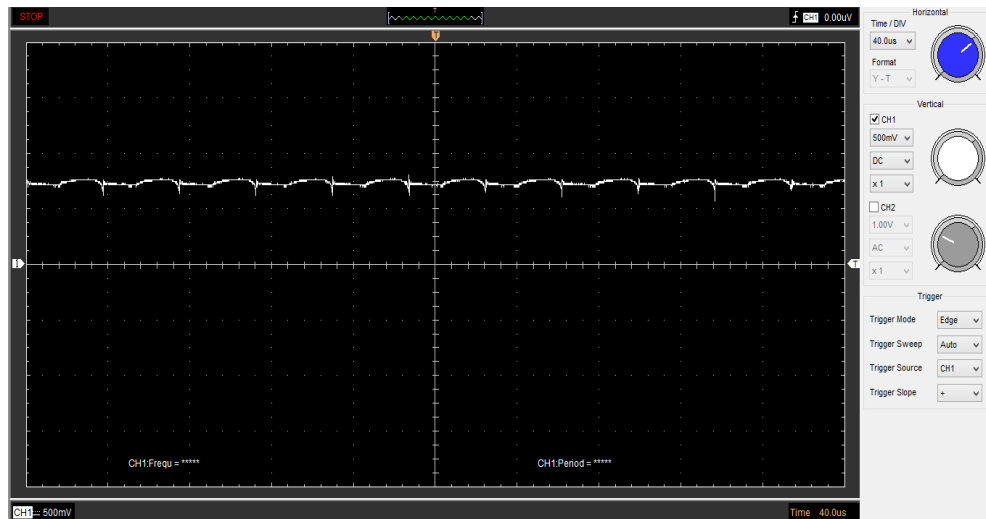


Figura 4.5. Gráfica de salida del convertidor reductor con una carga de 2.2Ω , a $500\text{mV}/\text{Div}$ y una base de tiempo de $40\mu\text{s}/\text{Div}$

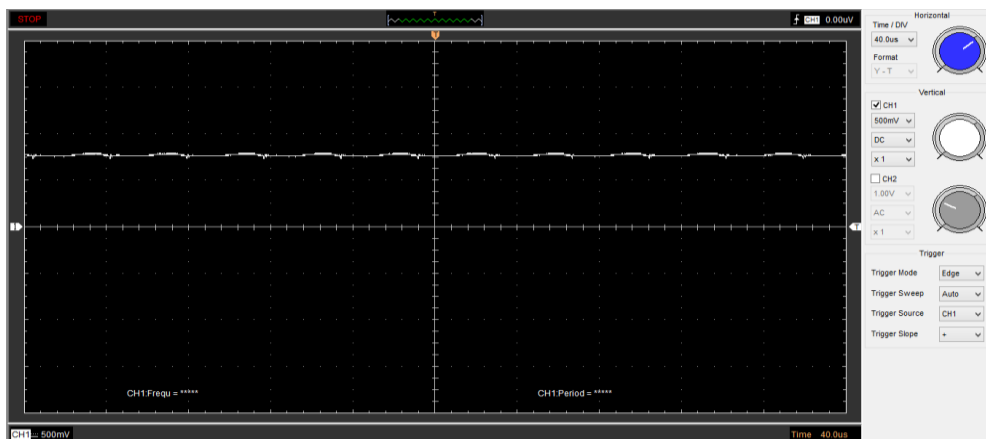


Figura 4.6. Gráfica de salida del convertidor reductor con una carga de 4.7Ω , a $500\text{mV}/\text{Div}$ y una base de tiempo de $40\mu\text{s}/\text{Div}$

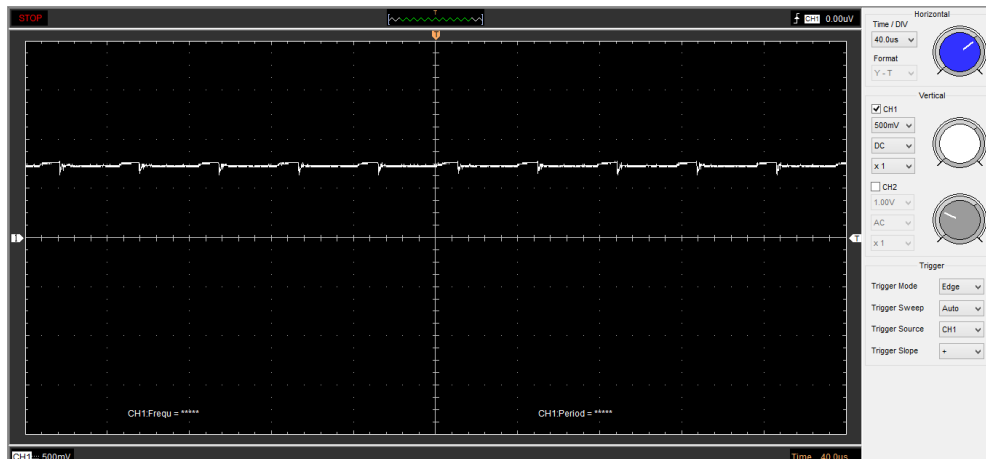


Figura 4.7. Gráfica de salida del convertidor reductor con una carga de 20Ω, a 500 mV/Div y una base de tiempo de 40μs/Div.

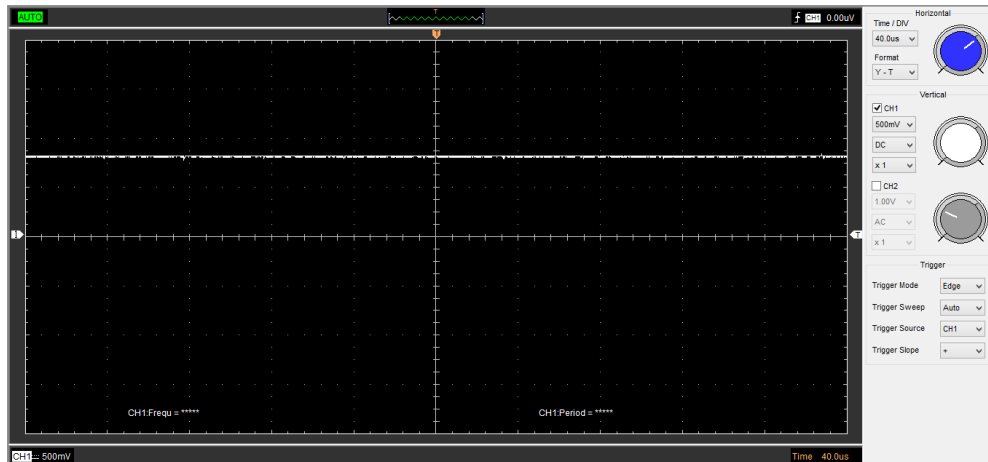


Figura 4.8. Gráfica de salida del convertidor C.C. con una carga de R= 300Ω, a 500mV/Div y una base de tiempo de 40μs/Div.

En el gráfico de la figura 4.4, se observa el comportamiento del voltaje a la salida con generación de picos por el efecto de rizado a consecuencia de una demanda de corriente de mayor orden a consecuencia de la baja resistencia propuesta $R= 0.77 \Omega$. En la figura 4.5 se observa la disminución de los picos a medida que la resistencia de carga se incrementa ligeramente a un valor de 2.2Ω . A medida que la resistencia de carga se incrementa como en los casos de las figuras 4.6 a la 4.7 respectivamente, se observar la tendencia a la disminución del voltaje de rizado o picos generados hasta mantener una línea continua en el intervalo de los 7 volts.

En la figura 4.8, se observa la grafica de comportamiento del voltaje a la salida del convertidor reductor cuando la resistencia de carga (Proceso electroquímico) tiene un comportamiento ascendente a partir de 20Ω a 300Ω , se observa la acción del capacitor donde se disipa el rizado a medida que se alcanza un valor de resistencia de 300Ω , el convertidor entrega una señal optima completamente lineal manteniendo un voltaje de siete volts aproximadamente, con un rizado de alta frecuencia de bajo nivel a consecuencia de la disminución de corriente por parte de la carga. En la Tabla 4.2, se muestran las magnitudes y datos característicos de las gráficas obtenidas en las figuras 4.4 a la 4.8.

Tabla 4.2. Datos de salida del convertidor reductor de C.C.

Resistencia de Carga Comportamiento del Proceso Electroquímico	Voltaje de Salida (Vo) (Volts)	Corriente de salida (Amperes)	Ciclo de Trabajo (D) (%)	Temperatura Transistores de Potencia (°C)			
				Q3	Q4	Q5	Q6
R = 0.77Ω	7.24	9.35	3.67	66.2	68.2	67.4	61.4
R = 2.2Ω	7.47	3.40	5.45	59.2	58.7	55.9	56.7
R = 4.7Ω	7.3	1.55	6.18	57	51.6	54.8	54.7
R = 20Ω	7.53	0.37	7.91	53	51.3	40.2	38.2
R = 300Ω	7.68	0.025	24	40.8	43.2	34.2	31

Se observa en la primera columna valores de cada una de las resistencias propuestas asimilando el comportamiento del proceso electroquímico, sí al inicio del proceso se tiene una resistencia mínima de 0.77Ω como valor crítico (próximo a corto), la gráfica de respuesta del convertidor se muestra en la figura 4.4, donde se puede apreciar una generación de rizo a consecuencia de la gran demanda de corriente en el orden de 9.35 Amperes manteniendo una amplitud de voltaje de 7.24 Volts a un ciclo de trabajo al 3.67% del MAP, con una frecuencia de conmutación de 25KHz en un tiempo de prueba de una hora. La temperatura de cada uno de los transistores de potencia muestra valores que no afectan el comportamiento de la etapa de potencia, según hoja del fabricante la temperatura máxima de funcionamiento es de 175°C para el transistor IRFP064.

A medida que la resistencia varía en el sentido ascendente, esto es sí el proceso electroquímico realiza la acción de extraer y depositar la sustancia en la rejilla, modificará su resistencia de la sustancia y los electrodos, en este caso las pruebas críticas para el circuito reductor de voltaje se presentan cuando la resistencia de carga son mínimos es decir en los tres valores de la primera columna, el comportamiento de la corriente y el rizo tienden a disminuir drásticamente después de la resistencia de 4.7Ω , puesto que la corriente se reduce a medida que la resistencia se incrementa manteniendo un promedio de 7 volts. Al mismo tiempo la temperatura disminuye por el efecto de la disminución de la corriente. En los últimos valores de resistencia de prueba $R = 20$ y 300Ω respectivamente de la Tabla 4.2, la corriente disminuye en el orden inferior a los 25 mA, manteniendo el convertidor reductor un voltaje promedio de 7.5 Volts y sus gráficas muestran un comportamiento completamente lineal ver figura 4.7 y 4.8.

4.3. Circuito convertidor reductor en conexión con el arreglo fotovoltaico.

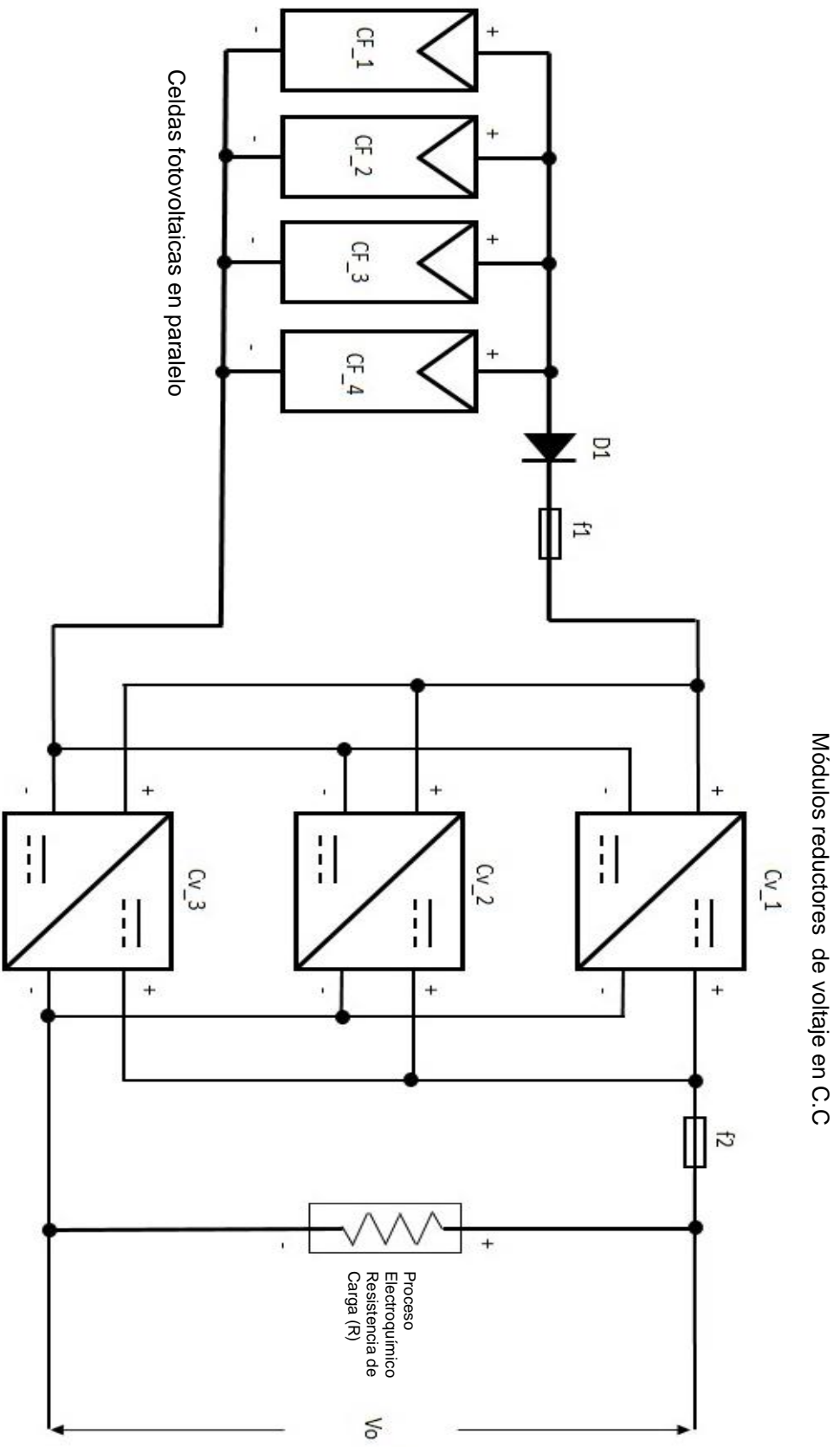
En la figura 4.9, se presenta el diagrama completo de conexión del sistema fotovoltaico que consta de cuatro módulos en conexión paralela (CF_1, CF_2, CF_3 y CF_4) para la producción de 30 volts de salida a 33.36 Amperes como máximo. El sistema tiene a su salida el diodo (D1) que permite bloquear las posibles corrientes hacia al propio sistema fotovoltaico, en conexión con el fusible (f1) que tiene la función de proteger al sistema fotovoltaico de posibles sobrecargas, (f2) es un fusible que protege a la fuente de reducción de voltaje contra posibles fallos en el proceso electrolítico (Carga resistiva). El sistema de reducción del voltaje consta de tres módulos en paralelo para mantener las condiciones eléctricas que demanda el proceso electroquímico. Las características eléctricas del sistema se presentan en la Tabla 4.3 y 4.4. La Tabla 4.3 muestra las características eléctricas de voltaje y corriente de cada panel y del arreglo fotovoltaico en paralelo. En la tabla 4.4, se muestran los datos característicos de los módulos de reducción de voltaje de forma individual y en paralelo para obtener la demanda eléctrica de corriente y voltaje en el proceso electroquímico en condiciones nominales.

Tabla 4.3. Características eléctricas del sistema fotovoltaico

Celda Fotovoltaica	Voltaje en (V_{oc}) (Volts)	Voltaje Optimo (Volts)	Corriente (I_{sc}) (Amp)	Corriente Optima (Amp)
CF_1	37.70	30	8.80	8.34
CF_2	37.70	30	8.80	8.34
CF_3	37.70	30	8.80	8.34
CF_4	37.70	30	8.80	8.34
Sistema fotovoltaico en paralelo	37.70	30	35.2	33.36

Tabla 4.4. Características eléctricas del sistema de reducción de voltaje

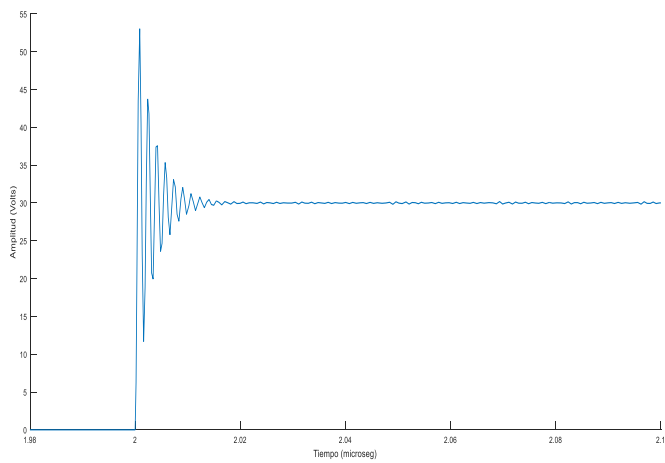
Módulo de reducción de voltaje	Voltaje de entrada (Volts)	Corriente máxima de entrada (Amp)	Voltaje de salida (Volts)	Corriente de salida (Amp)	Resistencia de carga mínima de prueba (Ω)
Cv_1	30	33.36	7	10	0.70
Cv_2	30	33.36	7	10	0.70
Cv_3	30	33.36	7	10	0.70
Sistema de reducción en paralelo	30	33.36	7	30	0.70



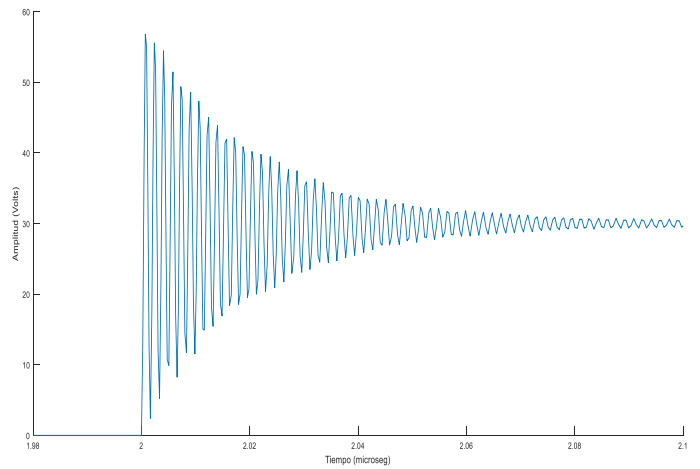
Módulos reductores de voltaje en C.C

Figura 4.9. Circuito del sistema fotovoltaico y el reductor de voltaje en C.C.

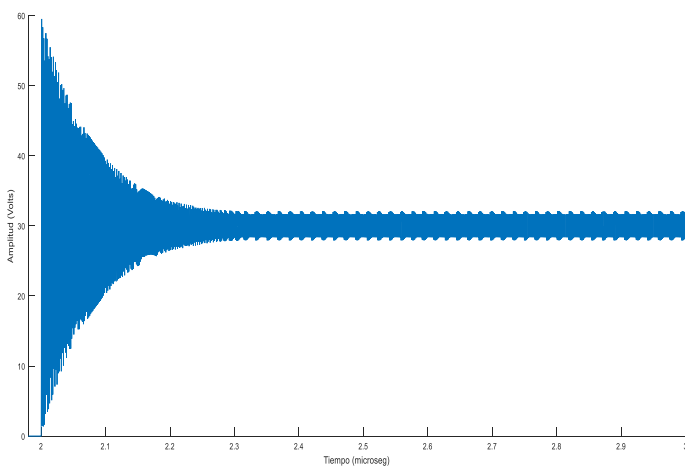
4.4. Gráficas del comportamiento del circuito reductor de C.C. en el modo (to - ton)



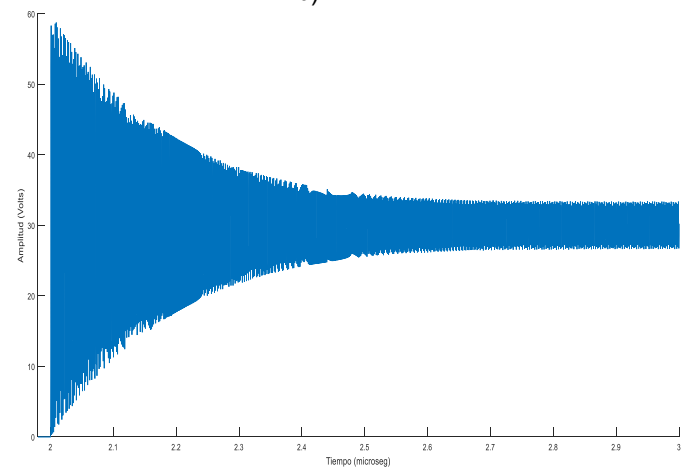
a) $R= 0.77 \Omega$



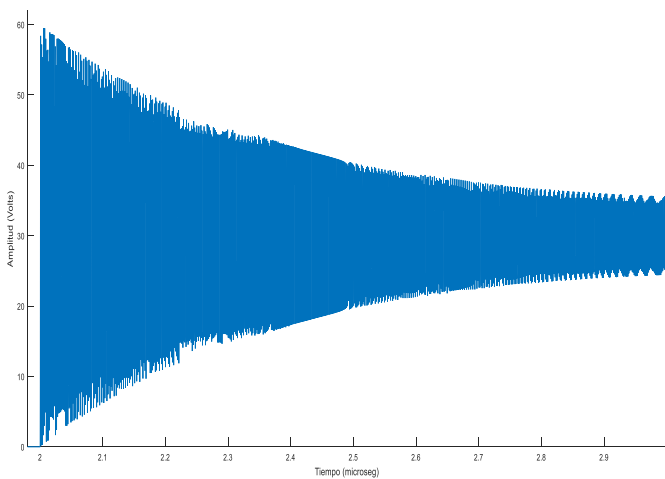
b) $R= 4.7 \Omega$



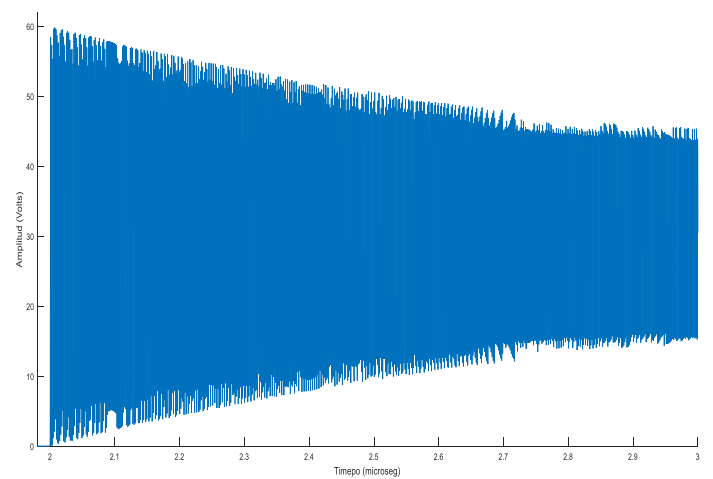
c) $R= 20 \Omega$



d) $R= 50 \Omega$



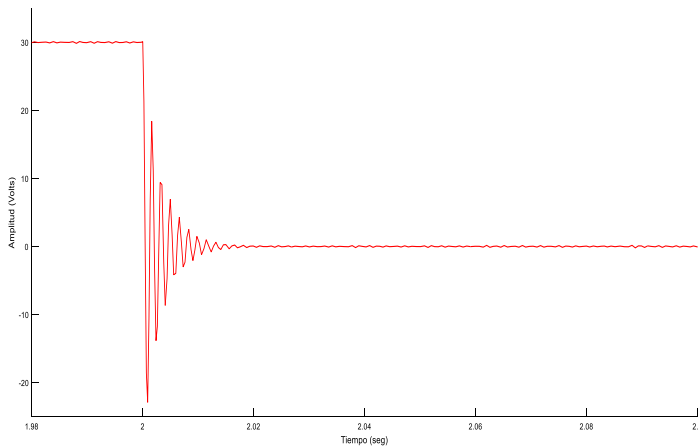
e) $R= 100 \Omega$



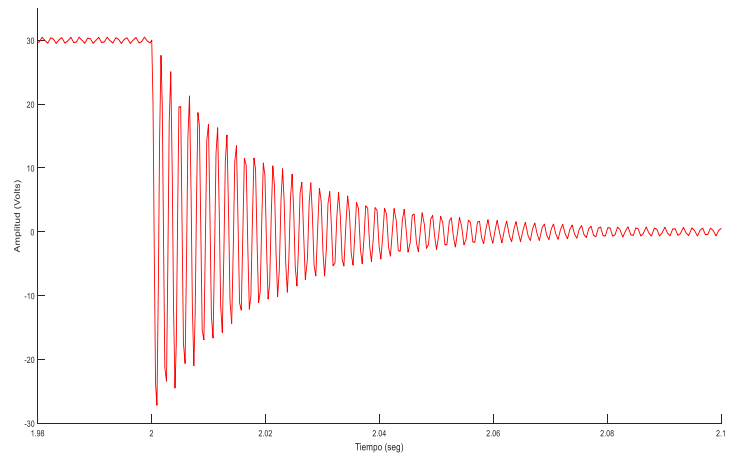
f) $R= 300 \Omega$

Figura 4.10. Comportamiento del circuito reductor de voltaje con carga diferentes de prueba.

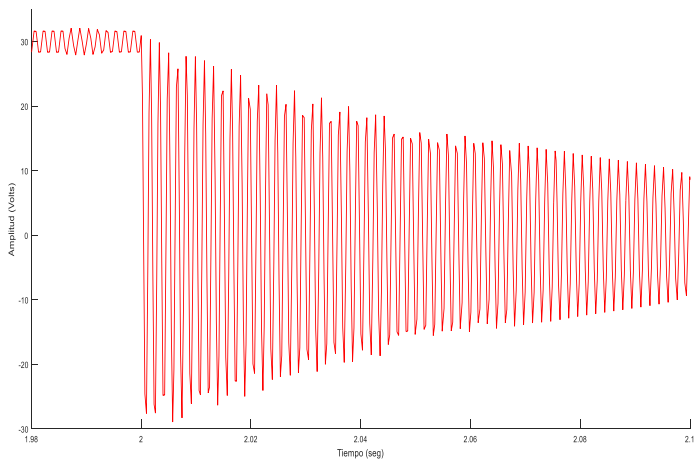
4.5. Gráficas del comportamiento del Circuito reductor de C.C. en el modo (ton - T)



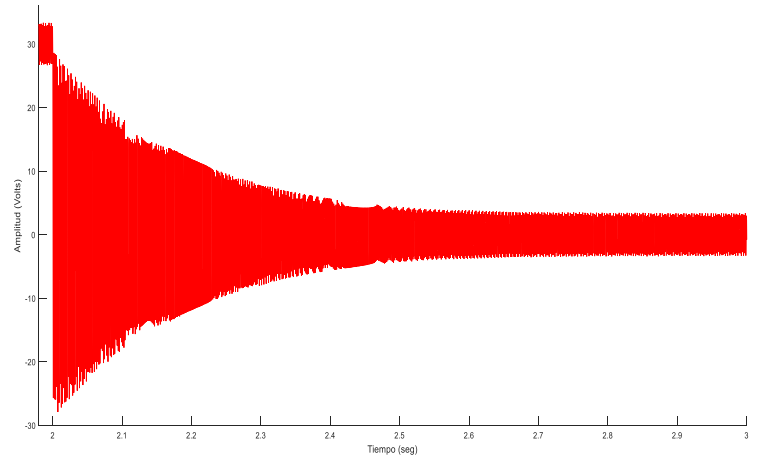
a) $R= 0.77 \Omega$



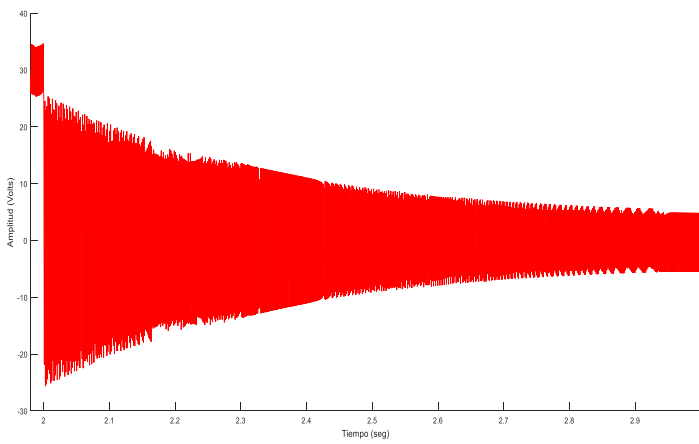
b) $R= 4.7 \Omega$



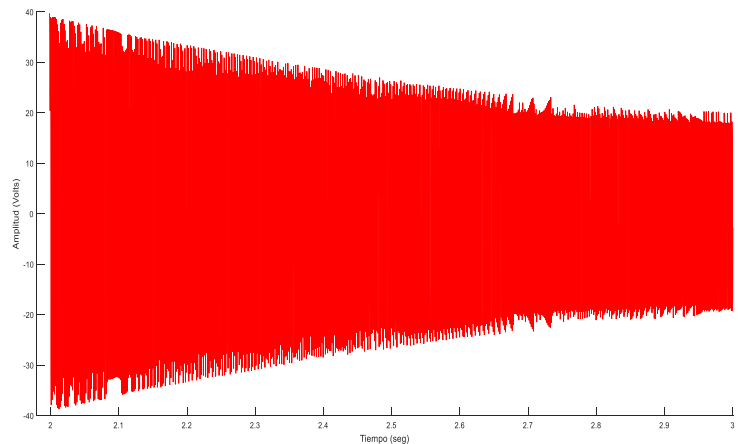
c) $R= 20 \Omega$



d) $R= 50 \Omega$



e) $R= 100 \Omega$



f) $R= 300 \Omega$

Figura 4.11. Comportamiento del circuito reductor de voltaje con carga variable con R de 50 Ω a 300 Ω .

En la figura 4.10, se representa cada uno de los resultados del comportamiento del circuito reductor mostrado en la figura 4.1, su modelo matemático es desarrollado en el capítulo III de la sección 3.11, en el modo de ($t_o - t_{ON}$), cuando el transistor realiza la transición de abierto a cerrado. El modelo es sometido a simulación en simulink de Matlab a través de un escalón con amplitud de 30 Volts a los dos segundos. En la figura 4.10 a), se tiene la grafica de respuesta con una carga de prueba de 0.77Ω donde la respuesta tiende a realizar una oscilación de amplitud máxima con menos de 55 volts que se disipa rapidamente hasta el reposo, en esta condición el circuito tiende a ser estable a pesar de la gran demanda de corriente que absorbe la carga por ser un valor minimo. A medida que la carga se incrementa como es el caso de la figura 4.10 b) a un valor de 4.7Ω , la respuesta tiene a oscilar en el momento que se presenta el escalón, la amplitud que alcanza es superior al caso anterior sobrepasando los 55 volts la disipación ocurre en mayor tiempo disminuyendo la amplitud pero presentando un rizo de amplitud mínima una vez que se llega al reposo.

En las figuras 4.10 c) y d), se presenta la respuesta del sistema con valores de carga en el intervalo de 20 y 50 Ω al inicio del escalón la respuesta del sistema alcanza una amplitud de 60 volts pico, disminuyendo hasta un valor entre 5 y 7 volts de amplitud de rizo manteniéndose una vez que se llega al valor de referencia de 30 volts. Finalmente en los incisos e) y f) de la figura 4.10, se presenta cada una de las respuestas con valores de prueba de 100 y 300 Ω , donde se observar que la amplitud máxima que alcanza es ligeramente menor a los 60 Volts, incrementando la amplitud del rizo de 10 a más de 20 volts de amplitud después de la referencia, se puede apreciar que entre más se incrementa el valor de la carga el sistema tiende a generar mayor cantidad de rizo.

En la figura 4.11, se presentan las gráficas de respuesta del modelo del circuito reductor en el modo de ($t_{ON} - T$) dicho modelo fue desarrollado en el capítulo III, sección 3.12. Se introduce una señal de tipo escalón invertido con una amplitud inicial de 30 Volts, después de dos segundos la señal regresa a cero volts, asimilando el comportamiento de los transistores cuando se realiza la acción de saturación a corte a diferentes valores de carga resistiva, asimilando el comportamiento del proceso electroquímico.

En la figura 4.11 a), se muestra la respuesta con una carga de 0.77Ω presenta un comportamiento oscilante al realizar la transición con una amplitud que alcanza aproximadamente +/- 20 Volts disipándose a cero en un tiempo de 0.02 seg, en esta condición se tiene una demanda de corriente máxima. A medida que el valor de la carga se incrementa como en el caso de la figura 4.11 b) a un valor de 4.7Ω , se presenta una señal amortiguada con amplitud de -28 volts y tiende a disminuir en amplitud en un tiempo de 0.06 seg manteniendo el rizo en una amplitud minima de +/- 1 volt una vez estabilizada la respuesta.

Con el incremento de los valores de carga como en el caso de la figura c) y d), antes de iniciar la transición ya se presenta rizado de alta frecuencia en la señal de prueba, una vez que se realiza la transición la amplitud del rizo generado alcanza una amplitud del orden de los +/- 5Volts sin disipación. En las ultimas pruebas cuando la carga tiende a incrementarse a un valor de 100 y 300 Ω , se puede apreciar en las figura 4.11 e) y f), una vez que se realiza la trancision del escalón, el rizado se incrementa generando una señal oscilante de alta frecuencia sin disipación con una amplitud de +/- 20 volts. A pesar de la disminucion de la demanda de corriente por el efecto del incremento del valor de la carga, se presentan otros factores que provocan al sistema la generación de rizo de mayor amplitud por la presencia de ceros en la función de transferencia del sistema, esta condición se puede mencionar que es el caso extremo que el proceso electrolítico puede no alcanzar.

4.6. Resultados de la simulación Matlab para los casos de la irradiación óptima y crítica

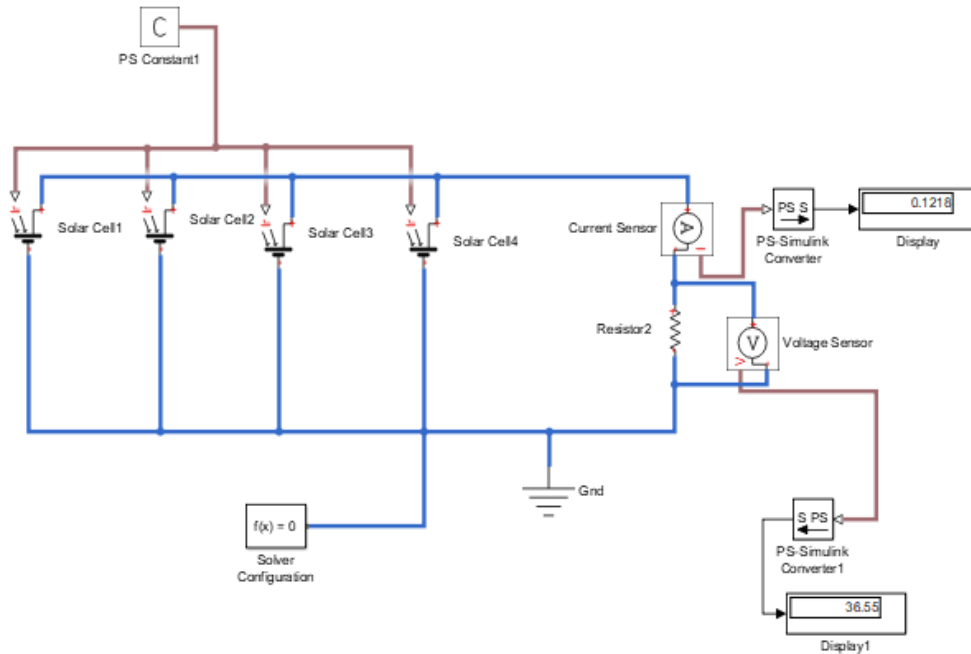


Figura 4.12. Circuito de prueba de incidencia solar en Simulink.

Se realiza la comprobación en simulación con Simulink de Matlab del comportamiento de la corriente y voltaje de un panel de acuerdo a la irradiación obtenida de 1000 W/m^2 a una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ en la zona de Ecatepec de Morelos, muestra un gráfico para 60 celdas mismas que integran un panel, en la figura 4.13, muestra el comportamiento de corriente de 8.5 A y voltaje $V_{oc} = 0.627 \text{ Volts}$, cálculos que se pueden comprobar en el capítulo III, sección 3.5.

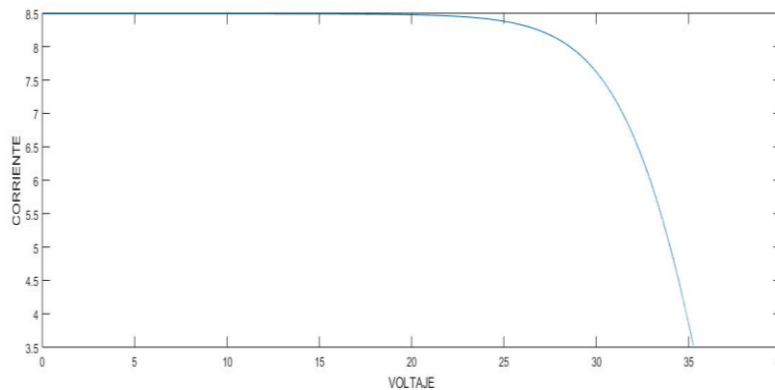


Figura 4.13. Gráfica de Corriente - Voltaje para 60 celdas con 1000 W/m^2 .

Los mismos datos de corriente y voltaje, fueron simulados con la irradiación de 500 W/m^2 para el mismo panel con la misma temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, como se muestra en la figura 4.14, la reducción de la incidencia no afecta el voltaje y la corriente para el sistema electrolítico propuesto, esta situación ocurre cuando se tiene nubosidad de un 80%, con inminente lluvia.

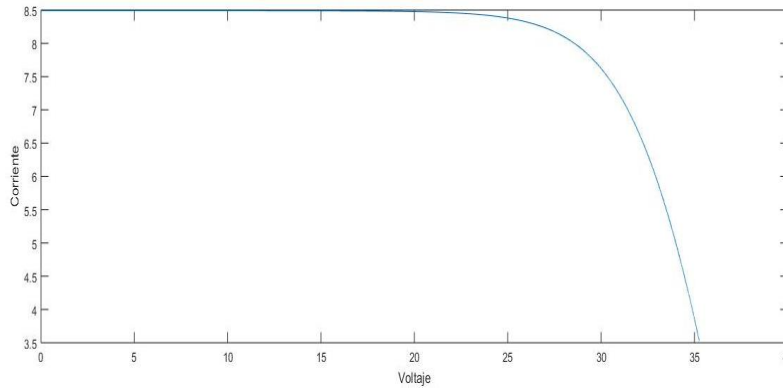


Figura 4.14. Gráfica de Corriente - Voltaje para 60 celdas con 500 W/m².

Tabla 4.5. Variación de Incidencia en el sistema fotovoltaico con una carga de 0.77Ω

R_L=0.77 Ω			
Potencia de incidencias	V_o (Volts)	I_o (Amp)	P_o (Watts)
400 W/m ²	22.55	29.29	660.4895
500W/m ²	22.55	29.29	660.4895
600 W/m ²	22.55	29.29	660.4895
700 W/m ²	22.55	29.29	660.4895
800 W/m ²	22.55	29.29	660.4895
1000 W/m ²	22.55	29.29	660.4895

Tabla 4.6. Variación de Incidencia en el sistema fotovoltaico con una carga de 4.7Ω

R_L=4.7 Ω			
Potencia de incidencias	V_o (Volts)	I_o (Amp)	P_o (Watts)
400 W/m ²	35.86	7.63	273.6118
500W/m ²	35.86	7.63	273.6118
600 W/m ²	35.86	7.63	273.6118
700 W/m ²	35.86	7.63	273.6118
800 W/m ²	35.86	7.63	273.6118
1000 W/m ²	35.86	7.63	273.6118

En la tabla 4.5 y 4.6 se presentan datos obtenidos de la simulación realizada en Simulink de Matlab, con valores de carga de 0.77 y 4.7 Ω, se proponen valores mínimos de carga resistiva para demandar una cantidad considerable de corriente al sistema fotovoltaico, con una variación de insidencia solar desde un valor inicial de 400 a 1000 W/m², podemos observar que en el caso de la carga de 0.77 Ω independientemente de la variación de la incidencia solar se mantiene la potencia de salida del arreglo fotovoltaico, en el mismo sentido con la resistencia de 4.7 Ω se muestra que al variar la incidencia la potencia de salida no cambia, se mantiene constantes el voltaje y la corriente en ambos casos. Las características eléctricas de los paneles utilizado en la simulación fueron calculados en la sección 3.5 del capítulo III. El diagrama del circuito utilizado para dicha simulación se presenta en la figura 4.12.

Conclusiones

El recurso solar es un tipo de energía que puede ser de utilidad a través de arreglos fotovoltaicos para la transformación en energía eléctrica y su aprovechamiento, dentro del sector industrial en la producción de materia prima o productos finales, proponiendo horarios de producción coincidente con la mayor incidencia del recurso solar durante el día, es importante mencionar que la energía solar no garantiza la producción eléctrica en un día completo, por esta razón la producción eléctrica para dicho recurso actualmente se considera una problemática por los altos costos de inversión en la adquisición de acumuladores o baterías para almacenar la producción de energía eléctrica.

Parte fundamental de este trabajo se presenta en el capítulo 4, donde se lleva a cabo el desarrollo del módulo de reducción de voltaje en C.C, con una entrada de potencia estimada de 500 Watts proveniente del sistema fotovoltaico y una salida de 70 Watts para realizar el proceso electrolítico. Se desarrollaron múltiples pruebas del módulo reductor de voltaje en conexión con diferentes cargas resistivas, con el propósito de obtener la mayor demanda de corriente a través del circuito reductor a un mínimo voltaje. La conclusión que se tiene es la posibilidad de obtener una corriente ligeramente superior al valor de 27 Amperes suficiente para la producción de materiales por el método de electrólisis, con la implementación de módulos similares en conexión paralela, ello dependerá de los materiales implementados en la reacción química como son los electrodos, sustancias acuosas y reacciones químicas durante el proceso. En general para obtener una mayor corriente de demanda esta dependerá del número de módulos de reducción de voltaje en conexión paralela y la capacidad del arreglo fotovoltaico.

Las gráficas de simulación del comportamiento del circuito, demuestran que la transición de los transistores de potencia desarrollan mayor voltaje de rizado cuando se incrementa el valor resistivo de la carga, lo que implica una etapa de filtrado capaz de reducir al mínimo el rizado para no afectar el voltaje producido y no dañar a los mismos transistores por elevación de voltaje en la conmutación. Puesto que las gráficas demuestran que a menor resistencia en la carga el voltaje de rizo es mínimo en la conmutación, no afectando a los transistores en el flujo máxima de corriente, ofreciendo mayores ventajas si éste se mantiene en una resistencia mínima durante el proceso electroquímico.

Recomendaciones del circuito:

Es recomendable realizar pruebas directas en campo aun con los resultados de validación positiva, con la finalidad de conocer el comportamiento del circuito reductor con otras variables que pudieran afectar como la temperatura, volumen de la sustancia, calibre de los electrodos, etc, para la mejora continua del sistema de reducción.

Se puede continuar en la investigación de este tipo de circuitos para el desarrollo de proyectos con el uso de fuentes renovables para la inclusión o implementación en la industria e instituciones encargadas para la eliminación de sustancias metálicas en la limpieza de aguas residuales.

Referencias

1. Olguín Q. Saúl, Montoya V. Feliciano, Fundamentos de electroquímica. Instituto Politécnico Nacional, 1988, México, D.F.
2. Chang Raymond, College W. Química Séptima Edición Mc Graw Hill, Barcelona España, 2007.
3. Garcia V Octavio Pilatowosky F. Isaac 1ª. Edicion Cd. De Mexico, UNAM, Instituto de Energias Renovables 2017.
4. Sociedad y Ambiente, año3, Vol.1, num 6, noviembre de 2014-Febrero de 2015, ISSN:2007-6576,p.p. 72-88.
5. Young C. Woo, Three-level single-ended primary converter for photovoltaic power conditioning systems, www.elsevier.com/locate/solener, December 2015.
6. Prabakaran N. Palanisamy, Analysis and integration of multinivel invertir configuration with boost converters in a photovoltaic system, www.elsevier.com/locate/enconman, October/2016.
7. Kaouane, Boukhelifa Akkila, Cheriti Ahmed Regulated output voltaje doble switch buck-boost converter for photovoltaic energy application, www.elsevier.com/locate/aej, July 2016.
8. Hafez A.A. Ahmed, Multi-level cascaded DC/DC converters for PV applications, www.elsevier.com/locate/aej, August 2015.
9. Tomas Perales Benito T., Instalación de Paneles solares térmicos. 3a. Edición Editorial, Alfa-Omega, 2008, Madrid.
10. Rufes M. Pedro, Energía Solar térmica, Técnicas para su aprovechamiento, Ediciones técnicas Marcombo 2001, Barcelona España.
11. Caso D. Armando, Energía, fuentes primarias utilización ecológica, Ediciones Defferis 1991, México D.F.
12. Programa de Fomento de Sistemas Fotovoltaicos en México, Situación Actual en México, SENER-CRE 2011.
13. Jutglar, L., Generación de energía solar fotovoltaica Barcelona: EDICIONES: Marcombo 2012.
14. Harper Enríquez, El ABC de las Energías renovables en los sistemas eléctricos LIMUSA 2012,
15. Almonte H., Coviello M. Lutz W., Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y el Caribe. Restricciones y Perspectivas, CEPAL NACIONES UNIDAS Santiago de Chile 2003.
16. Fuentes de Energía Renovables y No Renovables, Aplicaciones. Vega J., Ramírez S. Alfa Omega 2014.
17. Chen, C. Julian, Physics of solar energy, Ed. Wiley, 2011, pp.84-86.
18. Gilbert M. Masters Renewable and Efficient Electric Power Systems John Wiley and Sons Ltd 2004.
19. Mohan Ned, Underlan M. Tore, William P. Electrónica de potencia, convertidores, aplicaciones y diseño 3a. Edición Mc Graw Hill 2009.
20. Malvino Albert P. Principios de electrónica sexta edición Mc Graw Hill 2000.
21. S. Zumdahl Steven, A. Zumdahl S. Química 7ª Edición, Editorial Patria, 2007.
22. Mark Varta T., L. Castañer, Practical handbook of photovoltaics Fundamentals and Applications, 2003., El Servier.
23. Konrad Martens Photovoltaics Fudamentals Tecnologyand Practice (2014).