



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REGULADOR DE CARGA PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO
AUTÓNOMO”**

Que para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería Eléctrica

Presenta

Ing. Jorge Alejandro García García

G21073008

No. CVU 941785

Director de Tesis

Dr. Pedro Martín García Vite

No. CVU 227310

Co-director de Tesis

MC. Aaron Gonzales Rodríguez

Cd. Madero, Tamaulipas

Junio-2024

Ciudad Madero, Tamaulipas, **27/mayo/2024**

OFICIO No.: U.073/2024
ASUNTO: Autorización de impresión de tesis

C. JORGE ALEJANDRO GARCÍA GARCÍA
No. DE CONTROL G21073008
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REGULADOR DE CARGA PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO”

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

| | | |
|--------------------|-------|--------------------------------|
| PRESIDENTE: | DR. | PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE |
| SECRETARIO: | MTRO | AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ |
| VOCAL: | MTRO. | RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ |
| SUPLENTE: | DR. | JOSÉ GENARO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ |
| DIRECTOR DE TESIS: | DR. | PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE |
| CO-DIRECTOR: | MTRO | AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ |

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

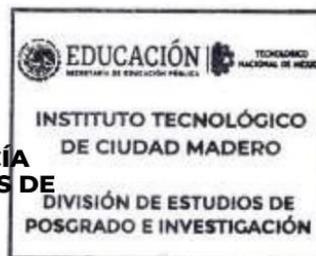
ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

“Por mi patria y por mi bien”®



MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p.- Archivo

MACG/RCG



Av. 1º de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos C.P. 89440 Cd. Madero, Tam.
Tel. 01 (833) 357 48 20, ext. 3110, e-mail: depi_cdmadero@tecnm.mx
tecnm.mx | cdmadero.tecnm.mx



Agradecimientos

A la División de Estudios de Posgrado e Investigación del ITCM, por otorgarme la oportunidad de realizar la Maestría en Ingeniería Eléctrica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo y estímulo económico.

A todo el cuerpo docente de la Maestría en Ingeniería Eléctrica, por compartir todos sus conocimientos para el curso de las materias, así como, la realización de mi proyecto de tesis.

A mi asesor, el Doctor Pedro Martín García Vite por todo el apoyo, consejos y guía para la realización de mi proyecto de tesis, así como, su aceptación bajo su dirección.

Diseño y construcción de un regulador de carga para un sistema fotovoltaico autónomo.

Presenta: Ing. Jorge Alejandro García García

Director de Tesis: Dr. Pedro Martín García Vite

Co-Asesor: MC. Aaron González Rodríguez

Programa: Maestría en Ingeniería Eléctrica

Resumen

La generación de energía eléctrica a través de una fuente sustentable es uno de los temas de la actualidad que impulsa el desarrollo de técnicas de generación eléctrica. Es así como aparecen los sistemas fotovoltaicos, estos se dividen en dos categorías; sistemas fotovoltaicos autónomos y sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos son diseñados para aplicaciones industriales, domésticas, agrícolas y ubicaciones remotas en general. Su principal objetivo es el proveer de una fuente de energía eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red son diseñados para crear centrales eléctricas fotovoltaicas, su principal objetivo es generar energía eléctrica de corriente alterna a partir de la captación de energía solar, para distribuirla en los sistemas de transmisión de energía eléctrica.

Estos sistemas están conformados por: un arreglo de paneles fotovoltaicos, regulador de carga, inversor y sistema de acumulación. Basado en la revisión del estado del arte, se implementa un convertidor estático de potencia de 3 fases con un algoritmo de extracción de máxima potencia del arreglo fotovoltaico, potenciado por un microcontrolador ARM Cortex-M4 de 32 bits.

La realización de proyecto promueve la investigación y desarrollo de nuevas técnicas de generación de energía eléctrica en el país, así como generar el antecedente de un posible regulador de carga de origen mexicano en el mercado.

Design and construction of a charge regulator for an off-grid photovoltaic system

Presents: Ing. Jorge Alejandro García García

Director: Pedro Martin Garcia Vite

Co-Asesor: MC. Aaron González Rodríguez

Abstract

The generation of electrical energy through a sustainable source is one of the current issues that drives the development of electrical generation techniques. This is how photovoltaic systems appear, these are divided into two categories; Autonomous photovoltaic systems and photovoltaic systems connected to the network.

Autonomous photovoltaic systems are designed for industrial applications, domestic, agricultural and remote locations in general. Its main objective is to provide a source of electrical energy.

Grid-connected photovoltaic systems are designed to create photovoltaic power plants, their main purpose is to generate alternating current electricity from solar energy collection, to distribute it in the power transmission systems.

These systems are made up of: an arrangement of photovoltaic panels, a charge regulator, an inverter and a storage system. Based on the review of the state of the art, a 3-phase static power converter is implemented with a maximum power extraction algorithm from the photovoltaic array, powered by a 32-bit ARM Cortex-M4 microcontroller.

Contenido

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1.- ANTECEDENTES | 2 |
| 1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.3.- JUSTIFICACIÓN..... | 3 |
| 1.4.- OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.4.1.- <i>Objetivo General</i> | 4 |
| 1.4.2.- <i>Objetivos específicos</i> | 4 |
| 1.5.- HIPÓTESIS | 4 |
| 1.6.- ALCANCES Y LIMITACIONES..... | 6 |
| 1.6.1.- <i>Alcances</i> | 6 |
| 1.6.2.- <i>Limitaciones</i> | 6 |
| CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1.- SISTEMAS FOTOVOLTAICOS | 8 |
| 2.2.- SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS | 9 |
| 2.3.- COMPONENTES FOTOVOLTAICOS EN SISTEMAS AUTÓNOMOS | 10 |
| 2.3.1.- <i>Sistema de acumulación de energía</i> | 10 |
| 2.3.2.- <i>Reguladores de carga</i> | 15 |
| 2.4.- MODULO FOTOVOLTAICO | 20 |
| 2.4.1.- <i>Modelado del módulo fotovoltaico</i> | 21 |
| 2.4.2.- <i>Curva característica de un panel pv</i> | 22 |
| 2.4.3.- <i>Efectos de la irradiancia y la temperatura</i> | 23 |
| 2.5.- CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE POTENCIA | 24 |
| 2.5.1.- <i>Convertidor reductor Buck</i> | 24 |
| 2.5.2.- <i>Modo de conducción continua</i> | 26 |
| CAPÍTULO 3 DESARROLLO DEL PROYECTO | 27 |
| 3.1.- DIMENSIONAMIENTO DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO DE POTENCIA | 28 |
| 3.2.- DISEÑO DE SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO DE POTENCIA | 31 |
| 3.2.1.- <i>Algoritmo P&O en SIMULINK</i> | 31 |
| 3.2.2.- <i>Convertidor Buck de 3 fases en paralelo</i> | 32 |

| | |
|--|----|
| 3.3.- PROGRAMACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA TARJETA STM32 NÚCLEO BOARD | 33 |
| 3.3.1.- Configuración de pines y periféricos | 34 |
| 3.3.1.- Descripción del firmware | 43 |
| 3.4.- DISEÑO ELECTRÓNICO DEL REGULADOR DE CARGA | 47 |
| 3.4.1.- Diseño etapa convertidor estático de potencia | 48 |
| 3.4.2.- Diseño etapa sistema de acumulación | 49 |
| 3.4.3.- Diseño etapa microcontrolador | 50 |
| 3.4.4.- Adquisición de variables de voltaje..... | 52 |
| 3.4.5.- Adquisición de variables de corriente..... | 53 |
| 3.4.5.- Comunicación RS-485..... | 54 |
| 3.4.6.- Diseño de circuito impreso..... | 55 |
| CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS | 59 |
| 4.1.- RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE CONVERTIDOR ESTÁTICO DE POTENCIA | 60 |
| 4.2.- RESULTADOS DE PRUEBAS DE EXTRACCIÓN DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA CON ARREGLO FOTOVOLTAICO..... | 64 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES | 68 |
| 5.1.- RECOMENDACIONES GENERALES PARA TRABAJOS FUTUROS..... | 69 |
| 5.1.1.- Revisión de componentes implementados | 69 |
| 5.1.2.- Revisión de firmware y algoritmo de extracción de máxima potencia | 70 |
| 5.1.3.- Revisión del diseño esquemático y de la tarjeta de circuito impreso..... | 71 |
| 5.2.- CONCLUSIÓN GENERAL..... | 71 |
| BIBLIOGRAFÍA. | 73 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 1.1 TOPOLOGÍA REGULADOR DE CARGA ETAPA CONVERTIDOR DE POTENCIA..... | 5 |
| FIGURA 1.2 TOPOLOGÍA REGULADOR DE CARGA ETAPA SISTEMA DE ACUMULACIÓN Y CARGAS. | 5 |
| FIGURA 1.3 TOPOLOGÍA REGULADOR DE CARGA ETAPA MICROCONTROLADOR. | 5 |
| FIGURA 2.1 TOPOLOGÍA DE REGULADOR AUTÓNOMO..... | 9 |
| FIGURA 2.2 BATERÍAS EN SERIE Y PARALELO..... | 10 |
| FIGURA 2.3 TIPOS DE BATERÍAS..... | 11 |
| FIGURA 2.4 VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD Y MODELO TEÓRICO CON EL RÉGIMEN DE CORRIENTE Y LA..... | 12 |
| FIGURA 2.5 VARIACIÓN DEL VOLTAJE EN LA DESCARGA DE UNA BATERÍA EN FUNCIÓN DEL RÉGIMEN DE CORRIENTE DE DESCARGA Y DE LA TEMPERATURA..... | 13 |
| FIGURA 2.6 VARIACIÓN DEL VOLTAJE EN LA CARGA DE UNA BATERÍA EN FUNCIÓN DEL RÉGIMEN DE CORRIENTE DE DESCARGA Y DE LA TEMPERATURA..... | 13 |
| FIGURA 2.7 ESQUEMA BÁSICO DE OPERACIÓN DE LOS REGULADORES SERIE Y PARALELO..... | 19 |
| FIGURA 2.8 MODELO DE UN SOLO DIODO DE LA CÉLULA PV IDEAL Y CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN DISPOSITIVO PV PRÁCTICO, INCLUYENDO LAS RESISTENCIAS SERIE Y PARALELO..... | 21 |
| FIGURA 2.9 CURVA CARACTERÍSTICA DE UN PANEL PV..... | 22 |
| FIGURA 2.10 EFECTO DE LA IRRADIANCIA EN UN PANEL PV..... | 23 |
| FIGURA 2.11 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN UN PANEL PV AL INCREMENTO DE LA IRRADIANCIA..... | 23 |
| FIGURA 2.12 TOPOLOGÍA CONVERTIDOR BUCK..... | 24 |
| FIGURA 2.13 OPERACIÓN DE CONVERTIDOR BUCK..... | 25 |
| FIGURA 2.14 OPERACIÓN MODO CONTINUO..... | 26 |
| FIGURA 3.1 CONVERTIDOR BUCK..... | 31 |
| FIGURA 3.2 RESUMEN DE ALGORITMO P&O..... | 32 |
| FIGURA 3.3 TOPOLOGÍA BUCK DE 3 FASES..... | 33 |
| FIGURA 3.4 CONFIGURACIÓN DE PINES..... | 35 |
| FIGURA 3.5 CONFIGURACIÓN DE RELOJ..... | 36 |
| FIGURA 3.6 CONFIGURACIÓN GPIO..... | 37 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.7 CONFIGURACIÓN GPIO SELECCIONADA | 37 |
| FIGURA 3.8 CONFIGURACIÓN ADICIONAL GPIO..... | 38 |
| FIGURA 3.9 CONFIGURACIÓN TIMER..... | 38 |
| FIGURA 3.10 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS TIMER | 39 |
| FIGURA 3.11 CONFIGURACIÓN I2C | 40 |
| FIGURA 3.12 CONFIGURACIÓN PIN COMO ADC..... | 41 |
| FIGURA 3.13 CONFIGURACIÓN ALTERNATIVA DE ADC..... | 41 |
| FIGURA 3.14 CONFIGURACIÓN PARÁMETROS ADC..... | 42 |
| FIGURA 3.15 CONFIGURACIÓN DMA DE ADC..... | 42 |
| FIGURA 3.16 ALGORITMO MPPT | 44 |
| FIGURA 3.17 CONTROL POR VOLTAJE..... | 45 |
| FIGURA 3.18 SUBROUTINA DE SENSORES..... | 46 |
| FIGURA 3.19 SUBROUTINA DE OBTENCIÓN DE VARIABLES..... | 47 |
| FIGURA 3.20 DISEÑO ESQUEMÁTICO DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO DE POTENCIA | 48 |
| FIGURA 3.21 DISEÑO ESQUEMÁTICO DE PUERTOS | 49 |
| FIGURA 3.22 DISEÑO ESQUEMÁTICO DE DRIVERS | 50 |
| FIGURA 3.23 DISEÑO ESQUEMÁTICO DEL MICROCONTROLADOR | 51 |
| FIGURA 3.24 DISEÑO ESQUEMÁTICO DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN AISLADAS..... | 52 |
| FIGURA 3.25 DISEÑO ESQUEMÁTICO SENSOR DE VOLTAJE..... | 53 |
| FIGURA 3.26 DISEÑO ESQUEMÁTICO SENSOR DE CORRIENTE..... | 54 |
| FIGURA 3.27 DISEÑO ESQUEMÁTICO CONVERSOR TTL A RS-485 | 55 |
| FIGURA 3.28 LAYOUT DEL REGULADOR DE CARGA | 56 |
| FIGURA 3.29 PCB REGULADOR DE CARGA | 57 |
| FIGURA 3.30 PROTOTIPO DEL REGULADOR DE CARGA..... | 58 |
| FIGURA 4.1 CORRIENTE EN INDUCTOR..... | 61 |
| FIGURA 4.2 TOPOLOGÍA BUCK DE 3 FASES | 61 |
| FIGURA 4.3 VOLTAJE EN CAPACITORES | 62 |
| FIGURA 4.4 CORRIENTE EN INDUCTORES | 62 |
| FIGURA 4.5 ESTADO DE CARGA DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN | 63 |
| FIGURA 4.6 EXTRACCIÓN DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA Y VARIACIÓN DEL CICLO DE TRABAJO..... | 63 |
| FIGURA 4.7 TOPOLOGÍA SISTEMA FV AUTÓNOMO..... | 64 |
| FIGURA 4.8 SEÑAL DE CONTROL..... | 65 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 4.9 COMPARACIÓN DE SEÑAL DE CONTROL Y CORRIENTE EN INDUCTOR A..... | 66 |
| FIGURA 4.10 REGISTRO DE POTENCIA DE ENTRADA..... | 66 |
| FIGURA 4.11 COMPARACIÓN DE SEÑALES EN INDUCTORES B Y C | 67 |
| FIGURA5. 1 TABLA COMPARATIVA DE ALGORITMOS | 70 |

Capítulo 1 Introducción

En este capítulo se plantea el contexto del origen, generación y la necesidad existente sobre el desarrollo de fuentes de alimentación eléctrica renovables. Se plantea una solución basada en sistemas fotovoltaicos autónomos, impulsada por electrónica de potencia y técnicas de obtención de potencia en arreglos fotovoltaicos.

1.1.- Antecedentes

La generación de energía eléctrica a través de una fuente sustentable es uno de los temas de la actualidad que impulsa el desarrollo de técnicas de generación eléctrica tales como la generación solar, geotérmica, eólica y mareomotriz. Es así como aparecen los sistemas fotovoltaicos, estos se dividen en dos categorías; sistemas fotovoltaicos autónomos y sistemas fotovoltaicos conectados a la red.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red son diseñados para crear centrales eléctricas fotovoltaicas y generación en edificaciones, su principal objetivo es generar energía eléctrica de corriente alterna a partir de la captación de energía solar, para distribuirla en los sistemas de transmisión de energía eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos son diseñados para aplicaciones industriales, domesticas, agrícolas y ubicaciones remotas en general. Su principal objetivo es el proveer de una fuente de energía eléctrica ya sea continua o alterna a sistemas eléctricos que pueden o no ser inherentes a una fuente de energía eléctrica centralizada.

Los componentes básicos que conforman un sistema fotovoltaico autónomo son:

- Generador fotovoltaico (panel o arreglo de paneles solares)
- Regulador de carga
- Inversor
- Sistema de acumulación

El componente principal del sistema fotovoltaico autónomo es el regulador de carga, sus principales funciones son:

- Obtener el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico
- Administrar energía eléctrica apropiada y proteger al sistema de acumulación de energía
- Proporcionar funciones de control de consumo de cargas
- Proporcionar información del estado del sistema a los usuarios u operarios

1.2.- Planteamiento del problema

Debido a la necesidad de migrar la generación de energía eléctrica a fuentes limpias y renovables, además de la permanente necesidad de la utilización de la energía eléctrica para el desarrollo de la industria y la mejora de la calidad humana, se deben generar soluciones que se apoyen en el desarrollo tecnológico para crear sistemas que reemplacen parcial o totalmente los sistemas de generación de energía eléctrica que consumen recursos y generan contaminación.

Por lo anterior, surge la necesidad de crear sistemas eficientes y con prestaciones que sean competitivos con la demanda de las aplicaciones que requieren energía eléctrica y las soluciones existentes. Como resultado de esto y del estudio realizado de las opciones de reguladores de carga de sistemas fotovoltaicos autónomos existentes, se pretende diseñar e implementar un controlador de carga competitivo e innovador que sirva como punto de partida para diseño y análisis de futuras topologías de sistemas fotovoltaicos autónomos.

1.3.- Justificación

Con la implementación de este proyecto se obtendrá un prototipo de regulador de carga para un sistema fotovoltaico autónomo el cual implementa hardware competitivo, un firmware avanzado y flexible que será enfocado a ser un instrumento de laboratorio que proporcionará datos experimentales para futuras versiones de reguladores de carga y topologías.

El proyecto antes mencionado apoya la investigación y desarrollo de nuevas técnicas de generación de energía eléctrica en el país, así como generar el antecedente de un posible regulador de carga mexicano que compita con los dispositivos diseñados por fabricantes internacionales.

1.4.- Objetivos

1.4.1.- Objetivo General

Diseñar e implementar un regulador de carga para un sistema fotovoltaico autónomo a nivel laboratorio para generar un instrumento de laboratorio y funcional.

1.4.2.- Objetivos específicos

- Analizar y dimensionar los componentes y semiconductores.
- Diseñar y simular los convertidores CC-CC.
- Diseñar y programar la interface de usuario.
- Diseñar y simular el firmware del microcontrolador.
- Integrar el sistema completo al regulador de carga.

1.5.- Hipótesis

Mediante la implementación de un regulador de carga con un microcontrolador de 32 bits se logra una flexibilidad en ejecución de código, control, muestreo y recopilación de datos del funcionamiento del sistema regulador. Así mismo, la alta velocidad de ejecución de instrucciones, plantea una robustez ante la ejecución del antecedente del algoritmo de conversión de potencia.

Se pretende la implantación de un sistema avanzado de administración de carga del sistema de acumulación de energía, así como, un control y protección contra sobre carga, sobre descarga y temperatura.

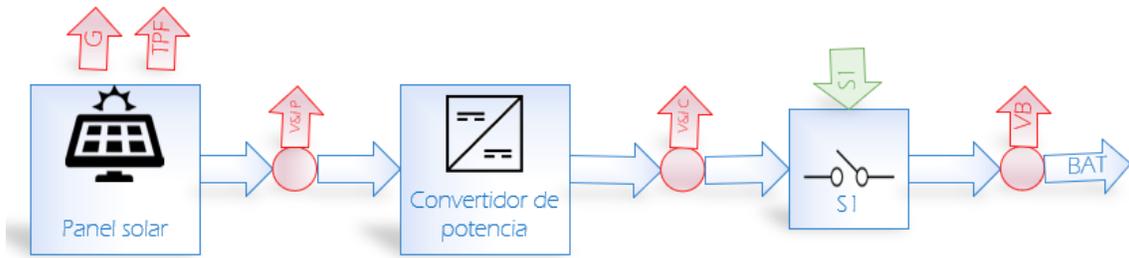


Figura 1.1 Topología Regulador de carga etapa convertidor de potencia.

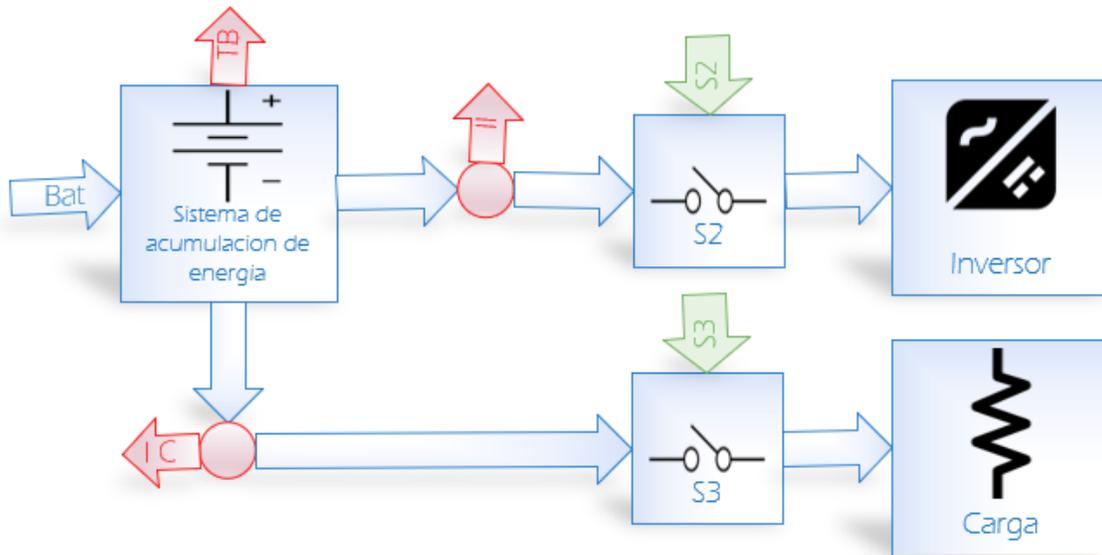


Figura 1.2 Topología Regulador de carga etapa sistema de acumulación y cargas.

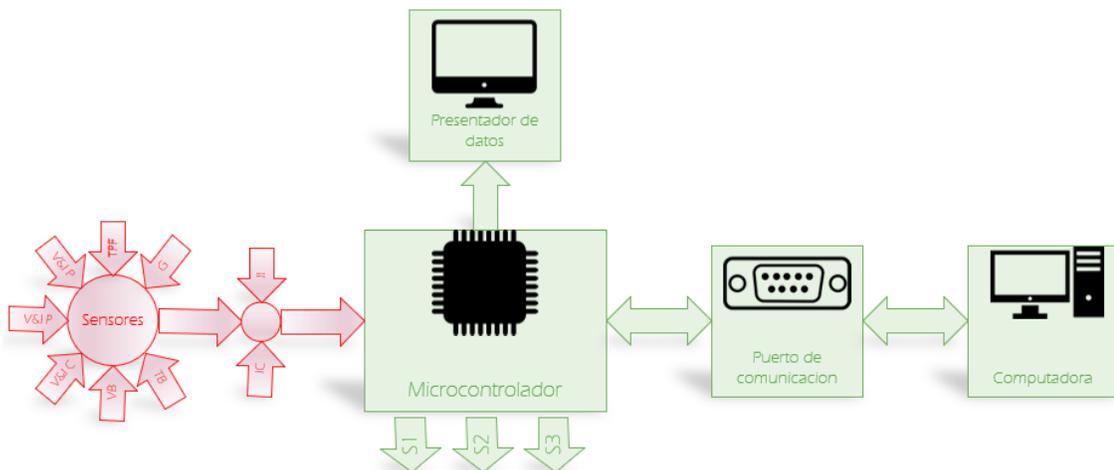


Figura 1.3 Topología regulador de carga etapa microcontrolador.

1.6.- Alcances y Limitaciones

1.6.1.- Alcances

- Diseño del convertidor estático de potencia de potencia.
- Obtención de Punto de máximo punto de potencia de arreglo fotovoltaico.
- Implementación de interface de operación del regulador de carga.
- Diseño y construcción de un regulador de carga para sistema fotovoltaico autónomo a nivel laboratorio.

1.6.2.- Limitaciones

- El regulador de carga solo aceptará máximo una potencia de entrada de 100 watts.
- El regulador de carga solo aceptara un máximo de voltaje en lazo abierto de 30 volts.
- El sistema de acumulación será máximo de 12 volts.
- El voltaje de sistema será máximo de 12 volts.
- El puerto de comunicación solo usara estándar RS-485 con el protocolo diseñado.

Capítulo 2 Marco teórico

En este capítulo se describen los fundamentos matemáticos, eléctricos y electrónicos teóricos principales utilizados para el desarrollo e implementación del regulador de carga.

2.1.- Sistemas fotovoltaicos

La tecnología solar fotovoltaica (FV) consiste en la conversión directa de la radiación del Sol en electricidad. Esta conversión se realiza a través de la célula solar, unidad básica en la que se produce el efecto fotovoltaico.

La energía solar fotovoltaica está indicada para un amplio abanico de aplicaciones donde se necesite generar electricidad, bien sea para satisfacer las necesidades energéticas de aquellos que no disponen de la red eléctrica (sistemas fotovoltaicos autónomos) o bien para generar energía a la red eléctrica (sistemas conectados a la red).

Se puede realizar una primera clasificación de los sistemas fotovoltaicos en función de si están o no conectados a la red eléctrica convencional:

- Sistemas fotovoltaicos autónomos son aquellos que están aislados de la red eléctrica.
- Sistemas fotovoltaicos conectados a la red son aquellos que están directamente conectados a la red eléctrica.

En general, un sistema fotovoltaico estará formado por:

- Un generador fotovoltaico.
- Una batería de acumulación.
- Un regulador de carga.
- Un inversor.
- El consumo.

2.2.- Sistemas fotovoltaicos autónomos

La energía eléctrica producida a partir de la conversión fotovoltaica se utiliza para cubrir una determinada demanda eléctrica en lugares remotos aislados de la red eléctrica, donde resultan competitivos con los sistemas convencionales, tanto en términos económicos como de fiabilidad de suministro.

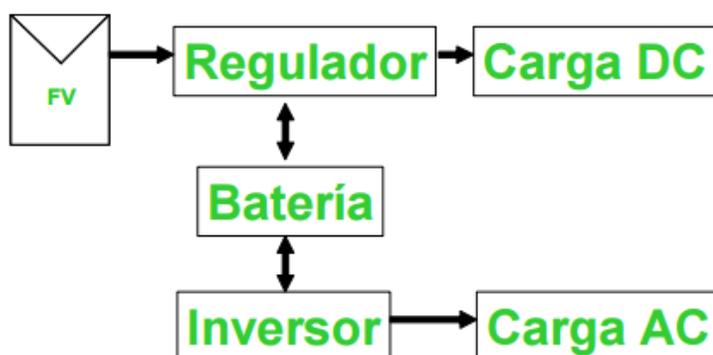


Figura 2.4 Topología de regulador autónomo.

Las posibles configuraciones de los sistemas fotovoltaicos autónomos pueden abarcar desde sistemas simples, tales como un generador FV operando un consumo DC, hasta sistemas con almacenamiento y con consumos en DC o en DC+AC. La incorporación de un inversor en el sistema fotovoltaico para posibilitar la utilización de consumos en corriente alterna tiene como efecto una disminución del rendimiento de operación del sistema a potencias muy inferiores a la potencia nominal del inversor, debido a la curva de rendimiento típica de inversores autónomos. Por ejemplo, en un sistema fotovoltaico autónomo en el que todos los consumos sean en corriente alterna con un inversor de 1 kW de potencia nominal, el encendido de una única lámpara de bajo consumo de 18 W de potencia haría operar al inversor a muy bajo rendimiento. Esta es la razón del diseño de sistemas con consumos en DC, normalmente la iluminación, y en AC para el resto de los consumos. Se puede realizar una clasificación de los sistemas FV autónomos en función de su aplicación como:

- Sistemas de electrificación
- Sistemas profesionales
- Sistemas agrícolas

2.3.- Componentes fotovoltaicos en sistemas autónomos

Los componentes básicos de una instalación fotovoltaica son:

- Generador fotovoltaico
- Regulador de carga
- Inversor
- Sistema de baterías de acumulación

2.3.1.- Sistema de acumulación de energía

En los sistemas fotovoltaicos las baterías o acumuladores fotovoltaicos se utilizan principalmente como sistema de almacenamiento energético, debido al desplazamiento temporal que puede existir entre los periodos de generación (durante el día) y los periodos de consumo (p.e. durante la noche), permitiendo la operación de las cargas cuando el generador FV por sí mismo no puede generar la potencia suficiente para abastecer el consumo.

Las baterías suelen estar formadas por elementos de dos voltios que conectados en serie proporcionan tensiones de trabajo de 12 V, 24 V, 48 V, etc. . La capacidad (Ah) de un grupo de baterías conectadas en es igual a la capacidad de cada uno de los elementos que lo componen. Si se conectan baterías en paralelo se suma la capacidad de sus elementos. La capacidad necesaria de las baterías en un sistema FV se calcula en función a los consumos y al número de días de autonomía del sistema.

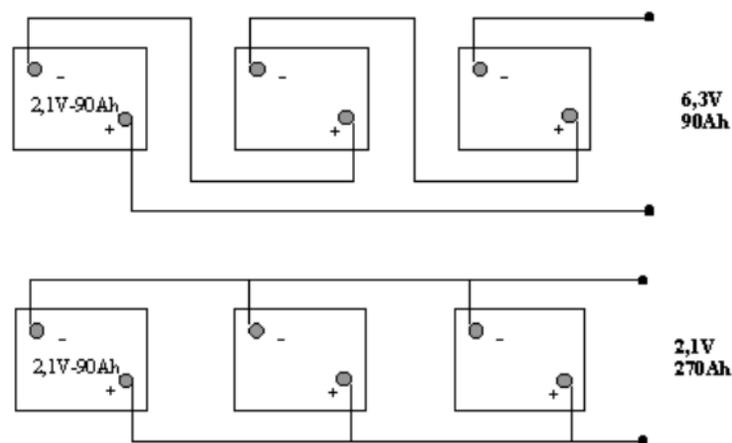


Figura 2.5 Baterías en serie y paralelo.

2.3.1.1.- Tipos de baterías

En general las baterías se clasifican en primarias, que no pueden ser recargadas y no se utilizan en sistemas FV, y secundarias que pueden ser recargadas. El tipo de baterías más utilizadas en aplicaciones FV son las de plomo-ácido, debido principalmente a su coste comparado con otros tipos.

| Tipo | Precio | Ciclado profundo | Mantenimiento |
|---------------------------------|--------|------------------|---------------|
| <i>Plomo-ácido</i> | | | |
| Plomo-Antimonio | Bajo | Bueno | Alto |
| Plomo-Calcio abiertas | Bajo | Pobre | Medio |
| Plomo-Calcio selladas | Bajo | Pobre | Bajo |
| Híbridas (Antimonio/calcio) | Medio | Bueno | Medio |
| <i>Electrolito inmobilizado</i> | | | |
| Gel | Medio | Muy bueno | Bajo |

Figura 2.6 Tipos de baterías.

2.3.1.2.- Características de operación

El régimen de carga o descarga define la intensidad de la corriente eléctrica utilizada en el proceso. Este régimen se expresa en forma normalizada en relación a la capacidad en amperios-hora. Por ejemplo, la descarga completa de una batería de 100 Ah, con una corriente de 20 A dura 5 h lo que indica un régimen de I(C5).

Cuanto menor es la temperatura menor es la capacidad, pues mayor es la viscosidad del ácido y más lentos los procesos de difusión iónica. La resistividad del electrolito aumenta de forma significativa al disminuir la temperatura. Para temperaturas por debajo de 0°C, dependiendo del régimen y de la profundidad de descarga, el electrolito puede llegar a congelarse. Los efectos de la temperatura son tanto más acusados cuanto mayor es la intensidad de la descarga.

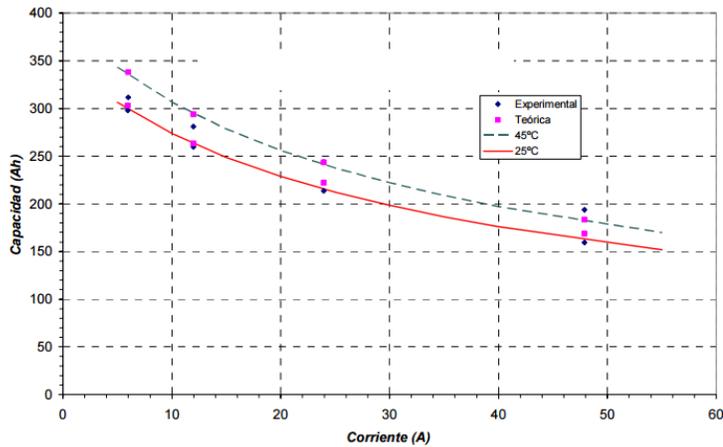


Figura 2.7 Variación de la capacidad y modelo teórico con el régimen de corriente y la temperatura, para una determinada batería de plomo-ácido.

2.3.1.3.- Capacidad de batería

La capacidad es una medida del poder de la batería para almacenar o suministrar energía eléctrica, y se expresa comúnmente en amperios-hora (Ah).

La capacidad se especifica a un determinado régimen de descarga, depende de múltiples factores de diseño y operacionales. Entre los factores de diseño se incluyen la cantidad de material activo, el número, diseño y dimensiones de las placas, y la densidad del electrolito. Entre los factores operacionales se incluyen: el régimen de descarga, la profundidad de descarga, los voltajes de corte y rearme, la temperatura de operación y el ciclado.

Las bajas temperaturas disminuyen la capacidad disponible de las baterías. A bajas temperaturas, durante la descarga, el electrolito no penetra tan profundamente en el material activo de las placas y los voltajes de corte se alcanzan antes. Por el contrario, las temperaturas elevadas aumentan la capacidad, sin embargo, reducen significativamente su tiempo de vida. La mayoría de los fabricantes recomiendan utilizar las baterías entre 20 y 30°C.

2.3.1.4.- Tensión de batería

El voltaje de la batería también puede ser utilizado para estimar el estado de carga previa corrección de la temperatura.

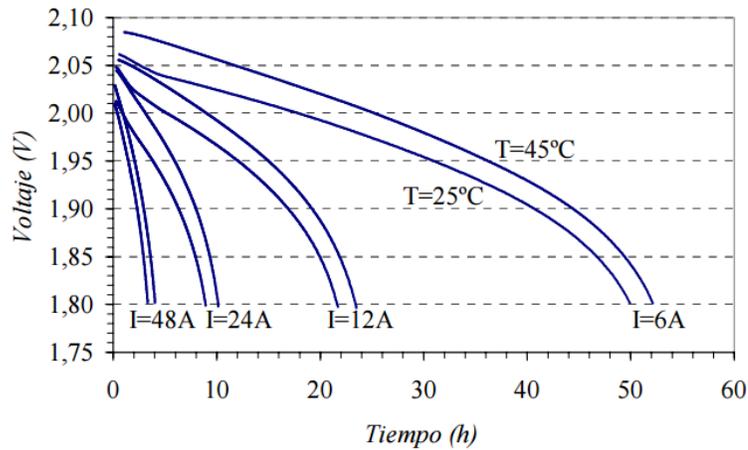


Figura 2.8 Variación del voltaje en la descarga de una batería en función del régimen de corriente de descarga y de la temperatura.

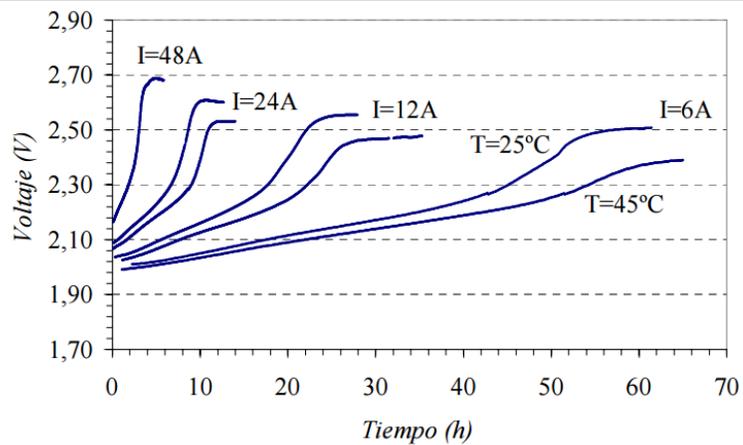


Figura 2.9 Variación del voltaje en la carga de una batería en función del régimen de corriente de descarga y de la temperatura.

2.3.1.5.- Profundidad de descarga (DOD)

La profundidad de descarga (DOD) de una batería se define como el porcentaje de la capacidad que ha sido “extraída” de la batería comparada con la capacidad a plena carga. Por definición el SOC y la DOD suman el 100%. Dos parámetros que se pueden utilizar comúnmente son la DOD disponible y promedio diario.

Conviene señalar que en baterías de Pb-a cuanto menor sea la profundidad de descarga, mayor será la vida útil del acumulador. Una descarga completa de la batería puede ser perjudicial dado que puede afectar a su capacidad de aceptar la recarga.

La profundidad de descarga disponible es el máximo porcentaje de la capacidad a plena carga que es permitido utilizar. La DOD disponible es el límite máximo de descarga, generalmente dictada por el voltaje de corte y el régimen de descarga. En sistemas fotovoltaicos autónomos, el voltaje de desconexión de la carga indica el límite de DOD disponible a un determinado régimen de descarga.

2.3.1.6.- Carga de la batería

Los métodos utilizados para la carga de la batería en sistemas fotovoltaicos varían considerablemente. Generalmente se distinguen tres tipos de carga:

- Carga normal, es la porción de carga realizada a cualquier régimen que no causa que el voltaje sobrepase el voltaje de gaseo (generalmente ocurre entre el 80 y 90% del estado de carga).
- Carga de flotación. Una vez que la batería está casi plenamente cargada, la mayor parte de la materia activa ha sido convertida a su forma original, y generalmente se requiere una limitación en la sobrecarga. Las cargas de flotación se suelen a bajos regímenes de carga.
- Carga de equalización. Es una carga utilizada periódicamente para mantener la consistencia entre las diferentes células individuales que forman una batería.

Generalmente consiste en una carga a corriente limitada hasta voltajes mayores que los voltajes normales de final de carga o flotación.

2.3.2.- Reguladores de carga

La misión primordial de un regulador de carga en un sistema fotovoltaico autónomo con baterías es realizar un proceso óptimo de carga de la batería, permitiendo la carga completa, pero evitando la sobrecarga y la sobre descarga. La estrategia de control del regulador de carga determina el proceso de carga de una batería y es responsable en última instancia tanto de la capacidad del sistema de satisfacer los consumos como de la vida útil de la batería. Además de la vigilancia y control del estado de carga de la batería con el objeto de maximizar su vida útil, el regulador de carga puede disponer de funciones adicionales como compensación por temperatura de batería, alarmas, monitorización y visualizadores.

Un regulador funciona habitualmente por control de la tensión, directamente relacionada con el estado de carga, medida en los terminales de la batería. Es recomendable que esta medida se realice por el método de cuatro puntas para descontar las caídas de tensión en los cables, fusibles u otros elementos situados entre el regulador y la batería. En función del método específico de control utilizado, puede ser de varios tipos, aunque los dos métodos básicos son el regulador serie y el regulador paralelo. El regulador serie, cuando detecta que la batería está completamente cargada, pone en circuito abierto el generador FV. El regulador paralelo deriva la corriente del generador FV a través de un dispositivo disipador situado en paralelo entre el generador fotovoltaico y la batería.

Las principales funciones de los reguladores son:

- Prevenir la sobrecarga de la batería. Limitar la energía suministrada a la batería por el generador FV cuando la batería está plenamente cargada.
- Prevenir la sobre descarga de la batería. Desconectar los consumos de la batería cuando el estado de carga de la batería es muy bajo.

- Proporcionar funciones de control del consumo. Conectar y desconectar automáticamente los consumos en un momento determinado (p.e. conectar una lámpara desde la puesta hasta la salida del Sol). Establecer un control de consumos prioritarios.
- Proporcionar información del estado del sistema a los usuarios u operarios, mostrando o indicando información como el voltaje y corriente de la batería, estado de carga, alarmas, etc...
- Servir como mecanismo de control para la conexión de otros generadores auxiliares de energía.
- Servir como centro de cableado proporcionando un punto de conexión para otros componentes en el sistema, incluyendo el generador FV, la batería y las cargas o consumos.

2.3.2.1.- Tensiones de regulación

Los niveles de tensión a los cuales el regulador realiza el control o los cortes se denominan puntos de regulación. Para los reguladores con regulación de sobrecarga y sobre descarga se utilizan cuatro valores de tensión de regulación.

2.3.2.2.- Tensión corte de sobrecarga, vsc

Que es la máxima tensión que el controlador permite que alcance la batería. Cuando el regulador detecta que la tensión de batería alcanza el valor de V_{sc} desconecta el generador o comienza a regular (limitar) la cantidad de corriente que éste suministra a la batería.

2.3.2.3.- Tensión de rearme de carga, vrc

Que es una tensión de histéresis para reconectar el generador para cargar la batería. En los reguladores ON/OFF, una vez que se desconecta el generador FV a V_{sc} el voltaje de la batería comienza a decrecer.

2.3.2.4.- Tensión de corte de sobredescarga, vsd

Que es el valor mínimo de tensión antes de desconectar el consumo. En algunos diseños específicos se puede establecer una jerarquía de prioridades en la desconexión de los consumos críticos. Los valores típicos utilizados para Vsd están entre 11,0 y 11,5 V, que se corresponden con un 75-90% de profundidad de descarga para la mayoría de las baterías de plomo-ácido de 12 V nominales

2.3.2.5.- Tensión de rearme de descarga, vrd

Que es el valor de tensión que reconecta el consumo a la batería. Los valores típicos están en torno a 12,5-13,0 V para baterías de plomo-ácido de 12 V nominales. La mayoría de los reguladores permiten el ajuste de estos voltajes mediante potenciómetros con el objeto de adecuar los niveles de corte en función del tipo de batería utilizado. El acceso a estos ajustes no debe ser accesible para el usuario

2.3.2.6.- Compensación con la temperatura

Debido a la alta dependencia de las reacciones químicas y el gaseo de la batería con la temperatura, algunos reguladores corrigen las tensiones de sobrecarga con la temperatura para incluir la dependencia de la tensión final de carga de las baterías con la temperatura. Las temperaturas bajas reducen la reacción, la capacidad y aumentan el valor del voltaje de gaseo. Las temperaturas elevadas aceleran la reacción, aumentan la corrosión y reducen el valor del voltaje de gaseo.

El valor recomendado de esta corrección suele variar entre -0,002 y -0,005 V/°C para baterías de plomo-ácido. Por ejemplo, una batería cuyo voltaje final de carga sea 14,5 V a 25°C ha de corregirse a 14,8 V a 15°C y a 14,2 a 35°C. El voltaje de corte por sobre descarga no se corrige con la temperatura

2.3.2.7.- Reguladores serie y paralelo

El principio de operación del regulador serie es un interruptor que se coloca en serie entre el generador fotovoltaico y la batería. Actúa desconectando el generador del acumulador cuando la tensión en carga alcanza cierto valor, evitando así la sobrecarga.

Dentro de los reguladores serie se pueden encontrar variadas técnicas de control:

- Control serie simple (On/Off), como el explicado anteriormente, en el cual el regulador de carga corta el consumo si la tensión de batería desciende de un determinado valor, y pone en circuito abierto el generador FV si la tensión batería supera la tensión de sobrecarga.
- Control serie, dos estados, con un algoritmo similar al anterior, excepto que la regulación del voltaje final de carga ocurre a dos voltajes: inicialmente un elevado de ecualización y después un voltaje de flotación, lo que permite un periódico de la batería. Lo mismo ocurre con la corriente de carga, inicialmente se carga a corriente y posteriormente se reduce.
- Control serie lineal, en el que se aplica un voltaje constante a medida que la batería se aproxima a V_{sc} utilizando un elemento de control serie que actúa resistencia variable que disipa el excedente energético que no se usa para la de la batería.
- Control por modulación PWM, en el que se aplican pulsos de corriente a frecuencia variable (p.e. 20 kHz) de modo que la batería recibe un voltaje de constante del generador.
- Control multietapa, generalmente utilizado en grandes sistemas en los que el generador FV completo se divide en varios sub-generadores que se conectan desconectan gradualmente para decrecer la corriente de carga cuando la está de plena carga.

El regulador paralelo funciona por disipación de exceso de energía través de un transistor o MOSFET colocado en paralelo con el generador y el sistema de baterías. Cuando la tensión del acumulador está por encima de un valor preestablecido, el dispositivo limita la corriente que llega al acumulador, consecuentemente la tensión se mantiene en un valor equivalente a

carga de mantenimiento o flotación, la cual permite una carga completa baterías y un mejor aprovechamiento de la energía de los módulos.

Dentro de los reguladores paralelo, conceptualmente se pueden diferenciar entre:

- Control paralelo (On/Off), en el que se desconecta el generador cuando se alcanza V_{sc} . Normalmente se utilizan en sistemas con corrientes inferiores a 20 A por problemas de disipación de calor. El autoconsumo de estos es menor que el de los reguladores serie con relés.
- Control paralelo lineal (diodo Zener), en el que se utiliza un elemento de control para mantener la batería en V_{sc} cuando se aproxima a plena carga. Se instala en paralelo con la batería un diodo Zener con un voltaje de polarización inversa igual a V_{sc} . Cuando la batería alcanza V_{sc} , el diodo conduce, desviando tanta corriente como sea necesario para mantener al sistema en carga flotante.
- Control PWM paralelo, con dispositivos de alta frecuencia en los que se varía el tiempo de conmutación para controlar la corriente que, de carga a la batería, manteniéndola a V_{sc} (o a valores muy próximos), reduciéndose los problemas de disipación de calor.

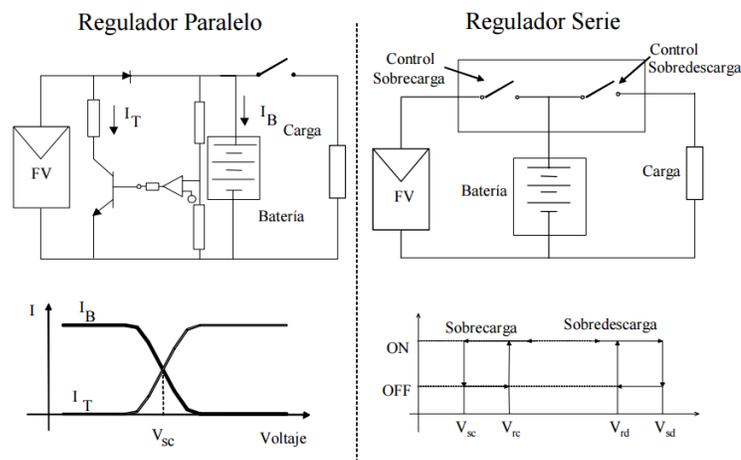


Figura 2.10 Esquema básico de operación de los reguladores serie y paralelo.

2.4.- Modulo fotovoltaico

El elemento básico de un SFV es la celda solar, esta convierte de manera directa la luz solar en corriente directa. Una célula solar típica consiste en una unión PN formada de un material semiconductor similar a un diodo. El material semiconductor más utilizado en las células solares es el silicio. Cada material proporciona diferentes eficiencias y costos. Hay varios tipos de materiales para las células solares:

- Silicio monocristalino(c-Si)

Es el material celular ampliamente disponible. Su eficacia es limitada, la eficiencia más alta de la célula solar de silicio es alrededor del 23%, en algunos otros materiales semiconductores hasta el 30%, teniendo en cuenta que es dependiente de la longitud de onda y el material semiconductor.

- Células policristalinas

También se llama poli silicio, en este caso el silicio es fundido en lingotes, formando múltiples cristales. Estas células tienen la eficiencia de conversión ligeramente inferior en comparación con las células de cristal individuales o Monocristalinas.

- Películas delgadas

Las células solares de película delgada (TFSC), también llamadas células fotovoltaicas de película delgada (TFPV), es una célula solar hecha por materiales de película delgada con unos pocos μm o menos de grosor. Las células solares de película delgada generalmente son:

1. El silicio amorfo (a-Si) y otra de silicio de película delgada (TF-Si). La eficiencia de células solares amorfas es típicamente entre 10 y 13%. Su vida útil es más corta que el tiempo de vida de las células cristalinas.
2. Teluro de cadmio (CdTe), es un compuesto cristalino formado a partir de cadmio y telurio y su eficiencia es de alrededor de 15%.
3. Cobre Indio Galio Selenio (CIS o CIGS). Su eficiencia es de alrededor de 16,71%.

Para obtener mayor potencia, las células se conectan en circuitos serie y paralelo, dando como resultado un módulo fotovoltaico, al conectar las células en serie la corriente es la misma, pero el voltaje aumenta proporcionalmente al número de células. Mediante la adición de células en paralelo, la tensión es igual a la tensión de cada célula y la corriente aumenta con el número de células en paralelo.

2.4.1.- Modelado del módulo fotovoltaico

el más usado con frecuencia se basa en el circuito electrónico equivalente de una celda solar, mediante un diodo ideal de unión PN, un factor de ajuste de curva, una fuente de corriente ideal y resistencias en serie y paralelo.

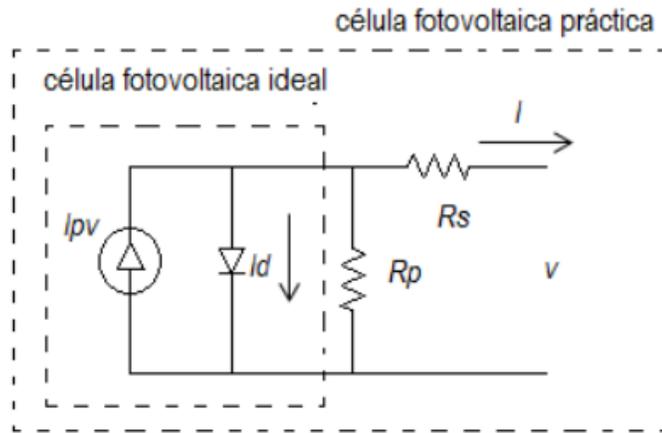


Figura 2.11 Modelo de un solo diodo de la célula PV ideal y circuito equivalente de un dispositivo PV práctico, incluyendo las resistencias serie y paralelo.

$$I = I_{pv} - I_o \left[e^{\left(\frac{V + R_s I}{v t_a} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

Donde, I_{pv} es la corriente fotogenerada, I_o es la corriente de saturación del diodo y $v t = N s k T / q$ es el voltaje térmico del módulo con $N s$ número de células conectadas en serie.

I Corriente en los bornes del panel.

V Voltaje en los bornes del panel.

R_s Resistencia equivalente en serie.

R_p Resistencia equivalente en paralelo.

a Factor de idealidad del diodo.

N_s Número de células conectadas en serie.

v_t Voltaje térmico del diodo (kT/q).

K Constante de Boltzman ($1.3806503 \text{ e-}23 \text{ J/ } ^\circ\text{K}$).

q Carga del electrón ($1.60217646 \text{ e-}19 \text{ C}$) Voltaje térmico del diodo (kT/q).

2.4.2.- Curva característica de un panel pv

un panel PV que tiene un comportamiento no lineal bajo condiciones de temperatura e irradiancia constantes. La curva característica de un panel PV se obtiene al conectar una resistencia de carga variable en las terminales del panel, obteniendo un par de valores de voltaje y corriente asociados al valor de la carga. Existe un único punto de operación llamado MPP en el cual la potencia generada es máxima. El MPP a su vez corresponde al producto de un voltaje VMPP y una corriente IMPP. La potencia entregada por la celda en este punto será la considerada como potencia nominal Pmax.

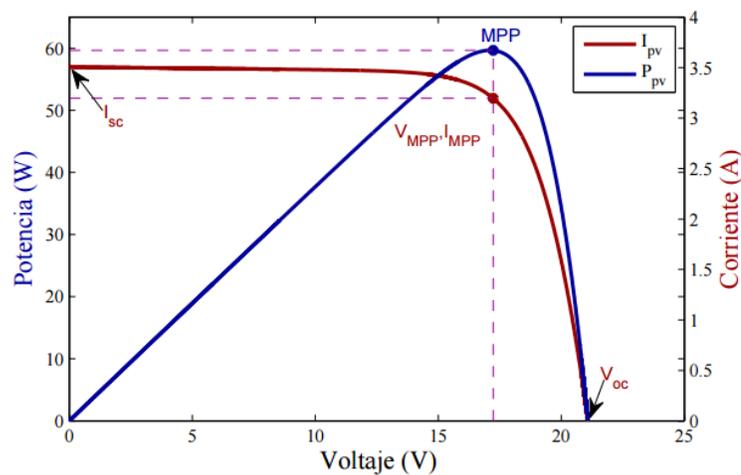


Figura 2.12 Curva característica de un panel PV.

2.4.3.- Efectos de la irradiancia y la temperatura.

El voltaje y la corriente generados en una celda dependen directamente de la iluminación recibida. El cambio de la corriente de corto circuito I_{sc} de la célula es directamente proporcional. se puede ver que el voltaje de circuito abierto V_{oc} tiene una variación poco significativa con respecto al cambio de la irradiancia.

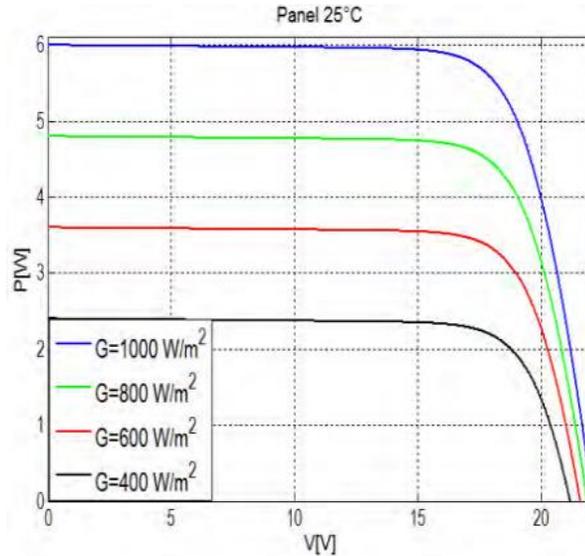


Figura 2.13 Efecto de la irradiancia en un panel PV.

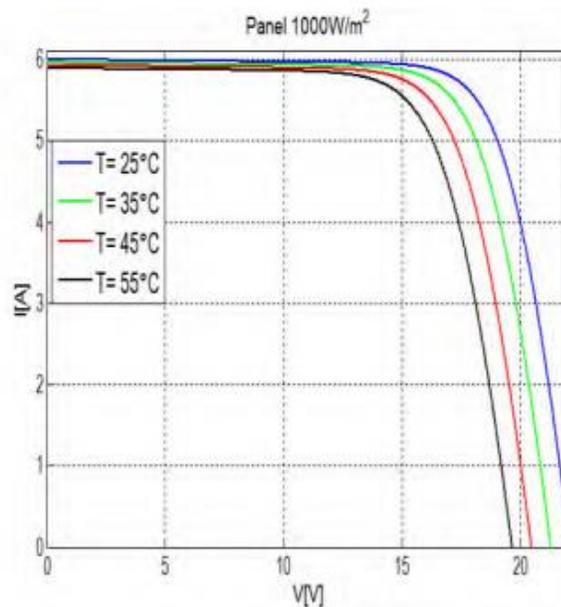


Figura 2.14 Efecto de la temperatura en un panel PV al incremento de la irradiancia.

2.5.- Convertidores estáticos de potencia

2.5.1.- Convertidor reductor Buck

Como implica su nombre, un convertidor reductor produce un voltaje medio de salida más bajo que el voltaje CC de entrada V_d . Su aplicación principal es en fuentes de energía de CC regulada y el control de velocidad de motores de CC. El voltaje medio de salida se calcula en términos de la relación de trabajo del interruptor:

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{enc}} V_d dt + \int_{t_{enc}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{enc}}{T_s} V_d = D V_d$$

Al variar la relación de trabajo t_{enc}/T_s del interruptor, se controla V_o . Otra observación importante es que el voltaje medio de salida V_o varía linealmente con el voltaje de control, como es el caso en amplificadores lineales.

En las aplicaciones reales, el circuito antecedente tiene dos desventajas: 1) En la práctica, la carga sería inductiva. Incluso con una carga resistiva, siempre habría cierta inductancia de dispersión. Esto significa que el interruptor tendría que absorber (o disipar) la energía inductiva y por lo mismo podría quedar destruido. 2) El voltaje de salida fluctúa entre cero y V_d , lo que no es aceptable en la mayoría de las aplicaciones. El problema de la energía inductiva almacenada se supera mediante un diodo, las fluctuaciones del voltaje de salida disminuyen mucho cuando se usa un filtro pasa bajas, que consiste en un inductor y un condensador.

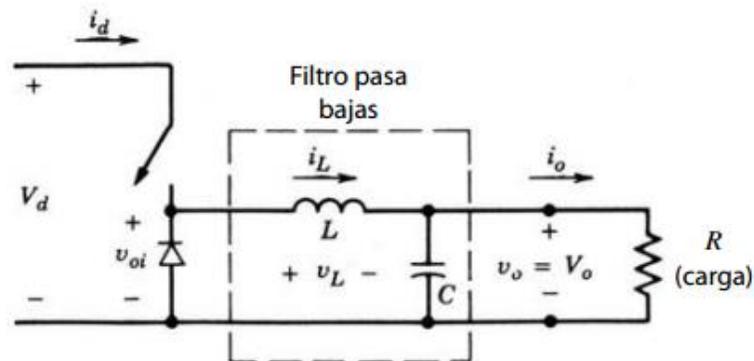


Figura 2.15 Topología convertidor Buck.

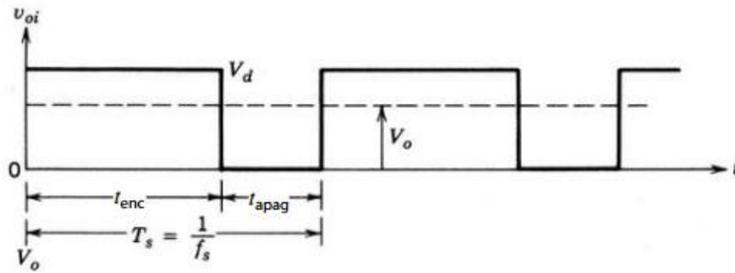


Figura 2.16 Operación de convertidor Buck.

La frecuencia de ángulo f_c de este filtro pasa bajas se selecciona de modo que sea mucho más baja que la frecuencia de conmutación, para eliminar esencialmente la ondulación o rizo de la frecuencia de conmutación en el voltaje de salida.

Durante el intervalo en que el interruptor está encendido, se vuelve de polarización inversa, y la entrada proporciona energía tanto hacia la carga como hacia el inductor. Durante el intervalo en que el interruptor está apagado, la corriente del inductor fluye a través del diodo, y transfiere una parte de su energía almacenada a la carga.

2.5.2.- Modo de conducción continua.

El modo de operación de conducción continua donde la corriente del inductor fluye en forma continua [$i_L(t) > 0$]. Cuando el interruptor está encendido para una duración de tiempo t_{enc} , el interruptor conduce corriente y el diodo se vuelve de polarización inversa. Esto resulta en un voltaje positivo $v_L = V_d = V_o$ a través del inductor. Este voltaje causa un aumento lineal en la corriente del inductor i_L .

Cuando el interruptor está apagado, debido al almacenamiento de energía inductiva, i_L continúa fluyendo. Esta corriente fluye ahora a través del diodo, y $v_L = -V_o$. Como en la operación de estado permanente la forma de onda se debe repetir de un periodo al otro, la integral del voltaje del inductor v_L a lo largo de un periodo debe ser cero, donde $T_s = t_{enc} + t_{apag}$:

$$\int_0^{T_s} v_L dt = \int_0^{t_{enc}} v_L dt + \int_{t_{enc}}^{T_s} v_L dt = 0$$

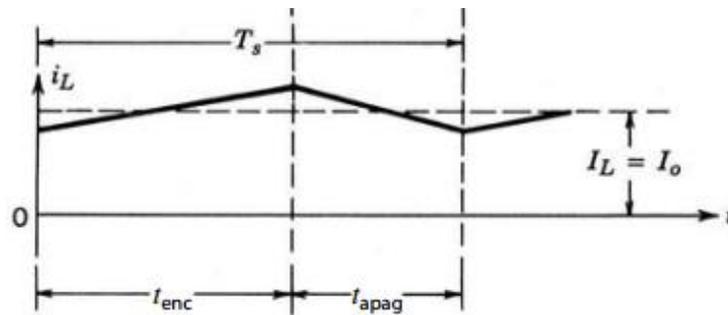


Figura 2.17 Operación modo continuo.

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{t_{enc}}{T_s} = D$$

Por esta razón, la salida de voltaje varía en este modo en forma lineal con la relación de trabajo del interruptor para un voltaje de entrada dado. No depende de ningún otro parámetro del circuito. Por ende, el convertidor reductor en el modo de conducción continua equivale a un transformador de CC donde la relación de vueltas de este transformador equivalente se controla continuamente en forma electrónica en un rango de 0-1 mediante el control de la relación de trabajo del interruptor.

Capítulo 3 Desarrollo del proyecto

En este capítulo se presenta el análisis y consideración de alcances para el dimensionamiento del convertidor estático de potencia, así como, las herramientas utilizadas para la simulación y el diseño del controlador de carga.

3.1.- Dimensionamiento del convertidor estático de potencia

El diseño del convertidor Buck está basado en los requerimientos máximos que admite el sistema regulador:

Tabla 3.1 Parámetros máximos del sistema

| Parámetro | Valor |
|--------------------------------|--------------|
| Potencia máxima de entrada | 100W |
| Voltaje en lazo abierto | 32V |
| Voltaje sistema de acumulación | 12V |
| Voltaje del sistema | 12V |
| Potencia máxima de salida | 100W |

Se considera un arreglo de dos paneles solares en serie con los siguientes parámetros, conectados a la entrada del convertidor estático de potencia. Se opta por la implementación de dos paneles solares para las pruebas de campo, así como para la simulación del sistema, debido a que en condiciones reales de funcionamiento permite una mayor flexibilidad de funcionamiento ante las perturbaciones ambientales existentes en la experimentación en campo.

Tabla 3.2 Parámetros arreglo fotovoltaico

| Parámetro | Valor |
|---------------------------------------|----------------------|
| Voltaje en punto de máxima potencia | 18V |
| Voltaje en circuito abierto | 21.6V |
| Corriente en punto de máxima potencia | 5.56A |
| Corriente en corto circuito | 6.26 |
| Irradiancia | 1000W/m ² |

Para definir los parámetros del convertidor estático de potencia en simulación y para su posterior funcionamiento en la implementación, es necesario tomar en cuenta las fórmulas que caracterizan el funcionamiento del convertido Buck. Se define una frecuencia de conmutación de 20 KHz para la señal de control de los interruptores, un capacitor de entrada de 100uF para compensación de variaciones de diferencia de potencia en el arreglo de paneles.

Definimos el voltaje de salida del convertidor con la siguiente ecuación

$$V_o = V_{in} \times D$$

Donde:

Vo= Voltaje de salida
 Vin= Voltaje de entrada
 D= Ciclo de trabajo

Se desea un voltaje de salida de aproximadamente de 15 volts para un sistema de acumulación de 12V. La selección del inductor se define con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{V_o(1 - D)}{\Delta iL * F}$$

Donde:

L= Inductor
 Vo= Voltaje de salida
 D= Ciclo de trabajo necesario para obtener 15 volts
 ΔiL = Riso de corriente= 15A*0.2
 F = Frecuencia de conmutación

Se considera un riso de corriente máximo de 20% y este valor está considerado para trabajar en la máxima potencia provista por el arreglo fotovoltaico el cual es de 200W. El valor del capacitor es determinado por la siguiente formula:

$$C = \frac{\Delta iL * D}{8 * F * \Delta Vc}$$

Donde:

C= Capacitor
 ΔiL = Riso de corriente
 F= Frecuencia de conmutación
 ΔVc = Riso de voltaje

Resultando los siguientes parámetros propuestos para realizar la simulación del convertidor estático de potencia en MatLab/Simulink.

Tabla 3.3 Parámetros convertidor Buck

| Parámetro | Valor |
|--------------------|-------|
| Frecuencia | 20KHz |
| Voltaje de entrada | 43.2V |

| | |
|----------------------|--------------|
| Capacitor de entrada | 100uF |
| Inductor | 120uH 67mOhm |
| Capacitor de salida | 68uF |
| Batería | 12v 56Ah |

3.2.- Diseño de simulación del convertidor estático de potencia

Se implemento en simulación el convertidor Buck mostrado en la Figura 6, Está conformado con las siguientes etapas: (I) Arreglo fotovoltaico configurado con los parámetros de la Tabla 3, que consiste en dos paneles de 100W en serie para obtener un correcto funcionamiento del convertidor Buck y prever variaciones de irradiancia en el caso práctico, (II) Convertidor Buck el cual está conformado con los parámetros de la Tabla 4, (III) Bloque de código con algoritmo de extracción de máxima potencia del arreglo foto voltaico conectado a la entrada, el cual varia con la impedancia conformada por la resistencia interna de la batería, la impedancia característica del convertidor y la irradiancia, (IV) Carga, la cual está conformada por el sistema de acumulación.

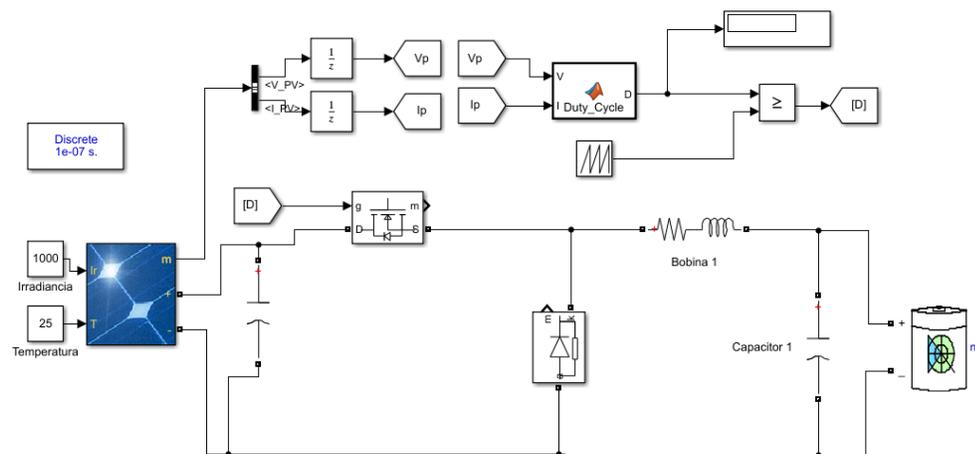


Figura 3.18 Convertidor Buck

3.2.1.- Algoritmo P&O en SIMULINK

Se diseñó un bloque de código en la simulación que contiene en una versión del algoritmo P&O clásico para la extracción de máxima potencia del arreglo fotovoltaico.

El diagrama de flujo de funcionamiento del algoritmo de perturbación y observación se puede consultar en la siguiente figura. Para el correcto funcionamiento del algoritmo es necesario tomar en cuenta la potencia generada por el panel, la diferencia de potencial aplicada por el panel, los incrementos de la potencia y diferencia de potencial con respecto a los valores censados en la iteración anterior.

En la siguiente figura se muestra un resumen de las líneas de código que representan el algoritmo para la extracción de la máxima potencia del arreglo fotovoltaico

```
33
34 -     dV=Vavr-Vold;
35 -     dP=Pavr-Pold;
36 -     if dP ~= 0
37 -         if dP < 0
38 -             if dV < 0
39 -                 D=Dold-DelD;
40 -             else
41 -                 D=Dold+DelD;
42 -             end
43 -         else
44 -             if dV < 0
45 -                 D=Dold+DelD;
46 -             else
47 -                 D=Dold+DelD;
48 -             end
49 -         end
50
51     else
52 -         D = Dold;
53     end
54     end
55
```

Figura 3.19 Resumen de algoritmo P&O

El código completo de este bloque puede ser consultado en el apéndice.

3.2.2.- Convertidor Buck de 3 fases en paralelo

Al manejar dos paneles de 100W en la entrada y obtener el punto de máxima potencia del arreglo fotovoltaico, nos resulta una corriente de 15.38A, lo que nos indica un inductor de grandes dimensiones, por esta razón, se recurre a la técnica de utilizar 3 convertidores Buck en paralelo para dividir la corriente total del sistema. Esto beneficia en la implementación, dado que, los inductores, los diodos y los mosfets reducen su costo al ser de menor capacidad de corriente.

Esta técnica es fácilmente aplicable, dado que los convertidores Buck individuales son accionados por la misma señal de control, además de, los componentes deben de ser de la misma nomenclatura para así evitar un posible desbalance de carga

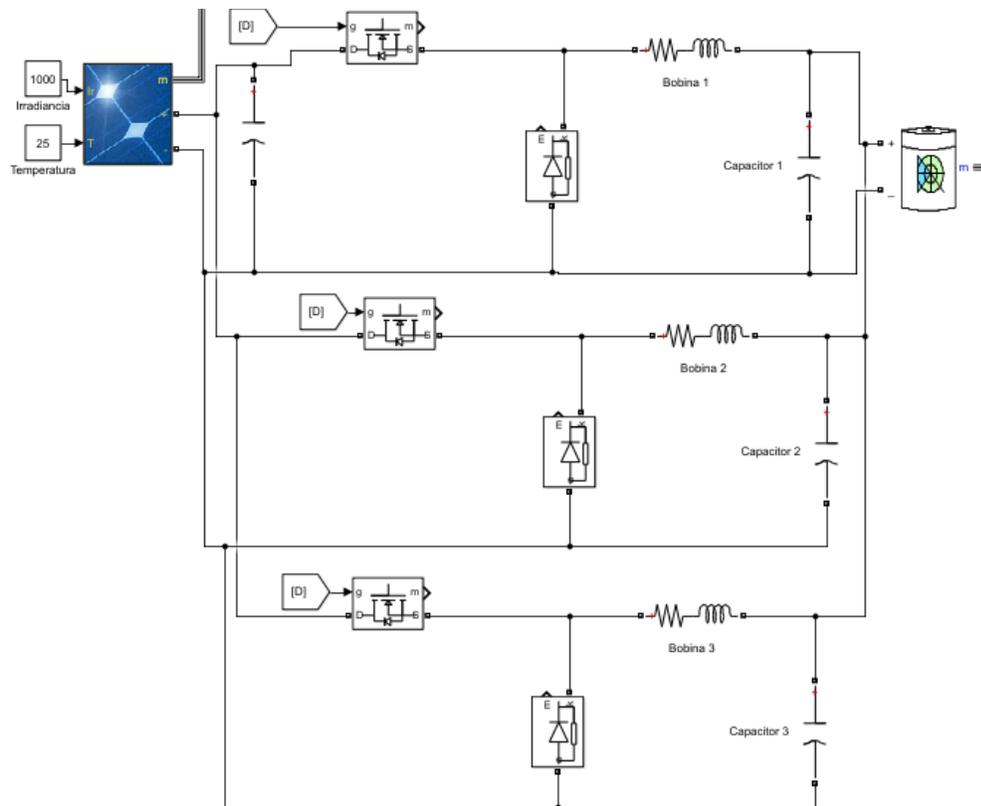


Figura 3.20 Topología Buck de 3 fases

3.3.- Programación y configuración de la tarjeta STM32 núcleo board

El microcontrolador designado para impulsar el regulador de carga es el STM32 F401RE del fabricante de ST Microelectronics. El cual ofrece las siguientes características en una tarjeta de desarrollo STM32 núcleo board a bajo costo:

- Procesador de 32 bits Córtex M4 corriendo a 84MHz.
- 512Kb de memoria Flash y 96Kb de memoria SRAM.
- ADC de resolución ajustable de hasta 12 bits con capacidad de multiplexación de 16 canales.
- Capacidad de hasta 16 accesos directo a la memoria-periféricos.
- Hasta 11 timers de 16 bits o 32 bits.
- Hasta 81 puertos I/O generales con capacidad de interrupción
- Hasta 12 Interfaces de comunicación

3.3.1.- Configuración de pines y periféricos

El IDE seleccionado para el desarrollo del firmware en C, del regulador de carga es STMCUBE IDE del fabricante ST microelectronics, el cual cuenta con las siguientes ventajas:

- Configuración de pines a través de interface grafica
- Flexibilidad de configuración de periféricos
- Generación automática de configuración de periféricos
- Menú de navegación para ubicación de instrucciones, definiciones y rutinas de código
- Depuración, monitoreo de estado de variables y periféricos en tiempo real

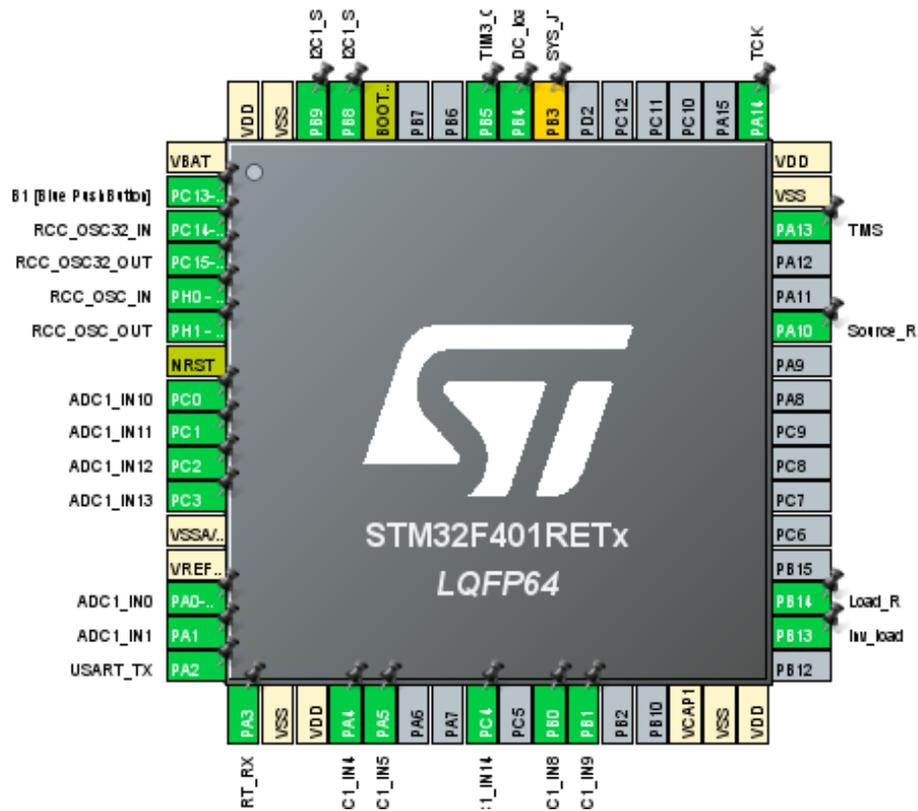


Figura 3.21 Configuración de pines

Reloj de periféricos

Todos los periféricos embebidos en el microcontrolador están sincronizados con el funcionamiento de las señales de reloj aplicadas de manera interna y externa en los puertos designados para la conexión de dispositivos osciladores de precisión. Para el correcto funcionamiento del regulador de carga. La siguiente imagen muestra la configuración de los relojes configurados en la implementación de este proyecto

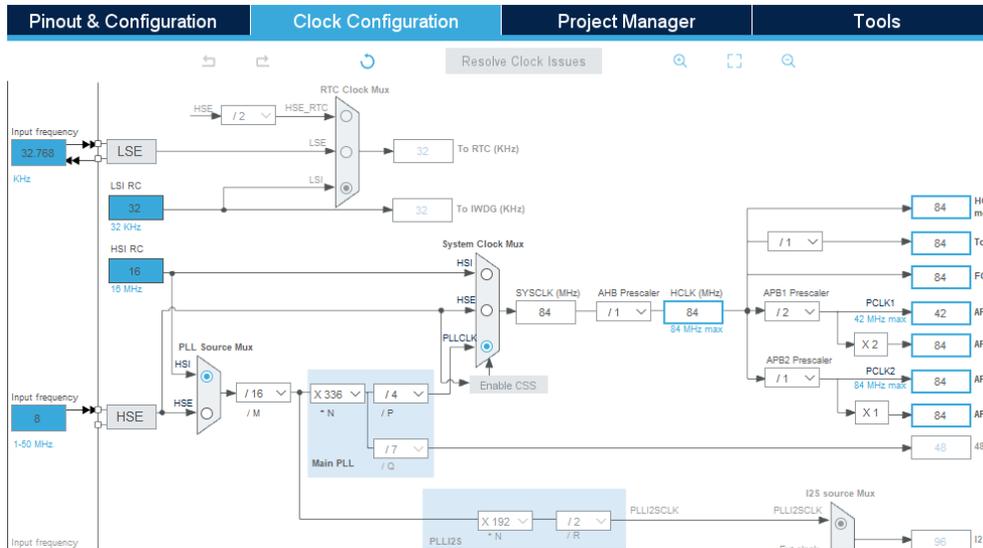


Figura 3.22 Configuración de reloj

El microcontrolador permite la conexión de cristales osciladores desde 1-50MHz, además de poseer un oscilador interno ajustado a 16MHz. La tarjeta de desarrollo STM32 núcleo board contempla en su diseño la implementación de dicho cristal oscilador, aunque este no está provisto de fábrica. El microcontrolador cuenta con un circuito de monitoreo de la señal de reloj, si detecta un mal funcionamiento de esta señal, el microcontrolador cambia la fuente externa por la fuente interna de oscilación.

Pines GPIO

Los pines de propósito general son implementados para el control de activación de cargas, configuración de administración de carga al sistema de acumulación o envió directo de potencia a las cargas.

El IDE SMT CUBE facilita la configuración de los pines y periféricos del microcontrolador, a través de la interface de configuración grafica. Para configurar los pines GPIO como salidas digitales son necesarios los siguientes pasos:

1. Seleccionar con el cursor el pin.
2. Seleccionar la opción de GPIO_Output

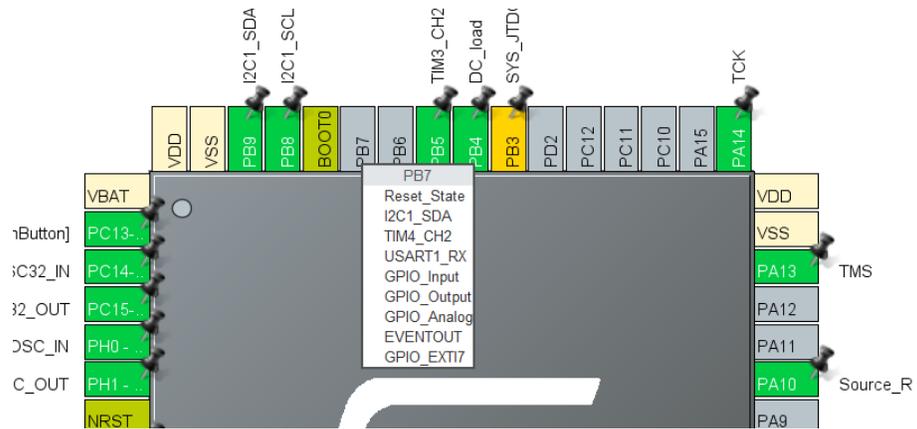


Figura 3.23 Configuración GPIO

- Una vez seleccionado, el pin mostrara una etiqueta con la configuración seleccionada.

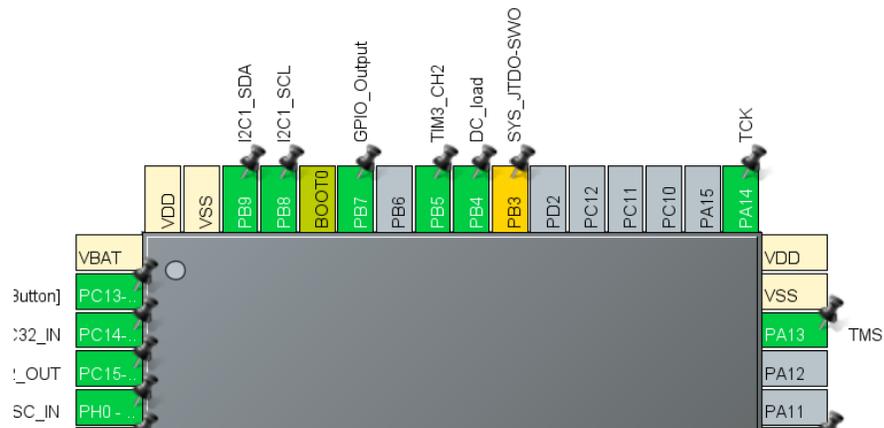


Figura 3.24 Configuración GPIO seleccionada

- En la ventana GPIO mode configuration, se pueden configurar parámetros adicionales como el estado inicial, funcionamiento push-pull u open drain, Velocidad de funcionamiento y uso de etiqueta.

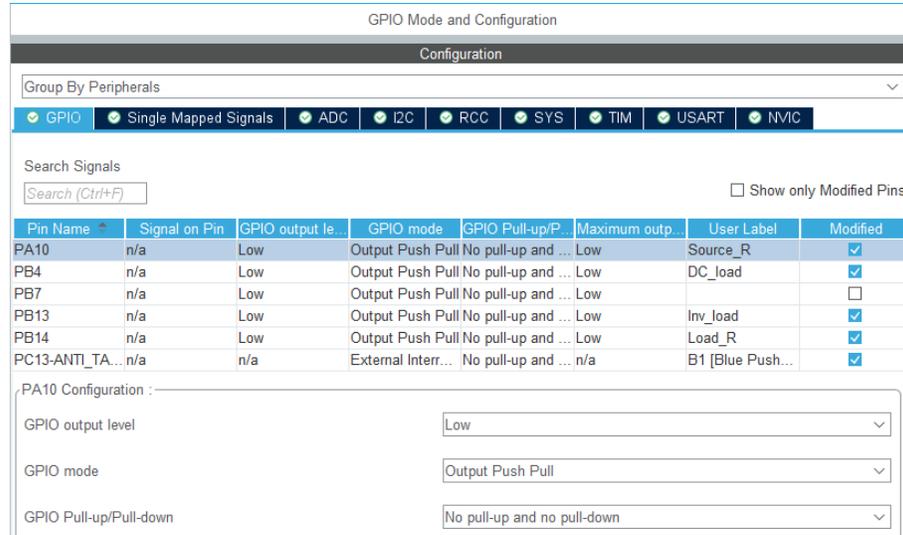


Figura 3.25 Configuración adicional GPIO

Timers

Configuramos un timer con resolución de 16 bits para la generación de la modulación PWM, la cual es requerida como señal de control para los interruptores controlados de los convertidores estáticos de potencia. Para la configuración del timer, tenemos en cuenta la frecuencia de conmutación que hemos seleccionado en la etapa de simulación, la cual es de 20KHz.

Para la configuración del timer es necesario aplicar las siguientes configuraciones:

1. En la sección de Timers, activamos el timer 3 en su canal 2,
2. seleccionamos como fuente de señal de reloj, la señal de reloj interna

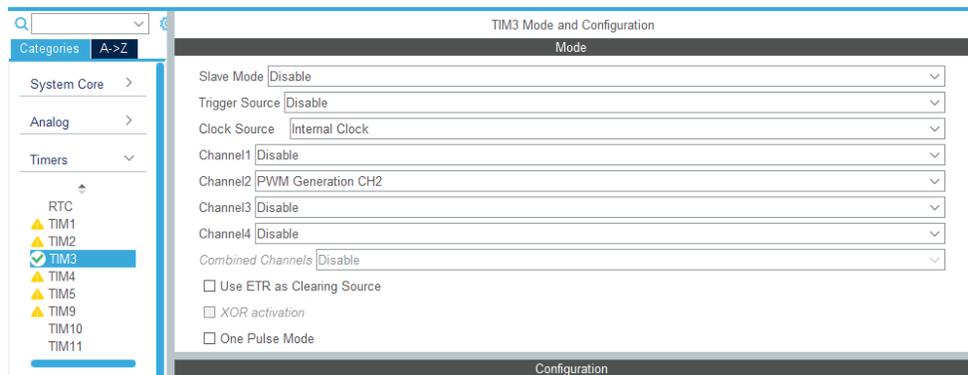


Figura 3.26 Configuración timer

3. En la ventana de configuración del timer definimos el prescalador aplicado a la señal de reloj del timer 3, para obtener la frecuencia de acumulación del timer

- Definimos el valor de acumulación que define el periodo de nuestra señal de reloj y que a su vez define nuestro valor máximo que podemos asignarle a nuestra señal de control como ciclo de trabajo.

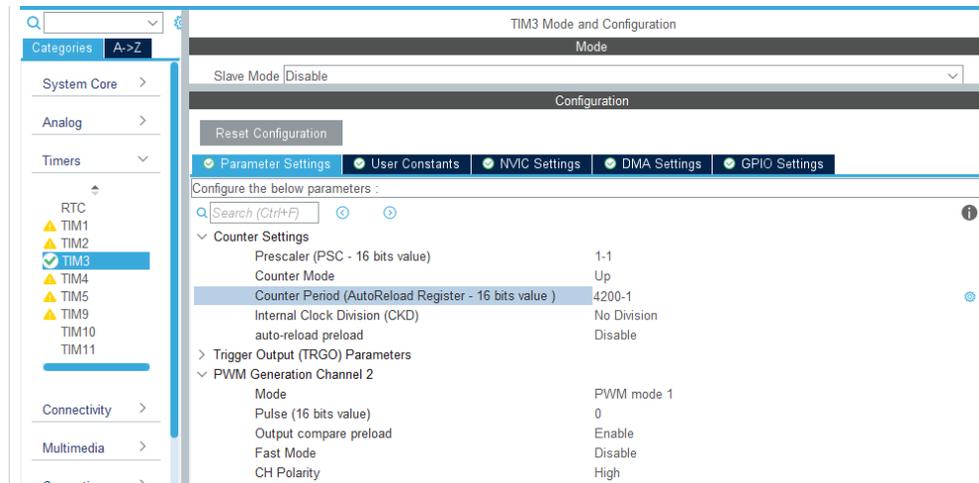


Figura 3.27 Configuración de parámetros timer

La relación de estas configuraciones estas basadas en la modificación de los registros del timer. Estos valores son calculados por las siguientes formulas:

$$TIM\ CLOCK = \frac{APB\ TIMCLOCK}{PRESCALAR}$$

$$FREQUENCY = \frac{TIM\ CLOCK}{ARR}$$

$$DUTY\ \% = \frac{CCR\ X}{ARR} * 100$$

Donde:

TIM CLOCK= Frecuencia de oscilación del timer

APB TIM CLOCK= Frecuencia de oscilación del bus donde se encuentra el periférico

PRESCALAR= Divisor deseado

FREQUENCY=Frecuencia ajustada del timer 3

ARR= Valor deseado de acumulación

DUTY= Ciclo de trabajo deseado

Comunicación I2C

El diseño del regulador de carga implementa un presentador de datos el cual es una pantalla de cristal líquido alfanumérico de 4*20 con retroiluminación LED. El estándar de comunicación con este presentador de datos es I2C por las ventajas que ofrece con una correcta velocidad en transmisión de datos con el empleo de solo dos pines de comunicación (SCL y SDA). Para configurar el estándar de comunicaciones necesitamos las siguientes configuraciones:

1. Configuramos el modo operación del puerto I2C
2. Definimos la frecuencia de funcionamiento del canal de comunicación
3. Definimos el largo de la trama de 7 bits
4. Definimos la dirección del esclavo

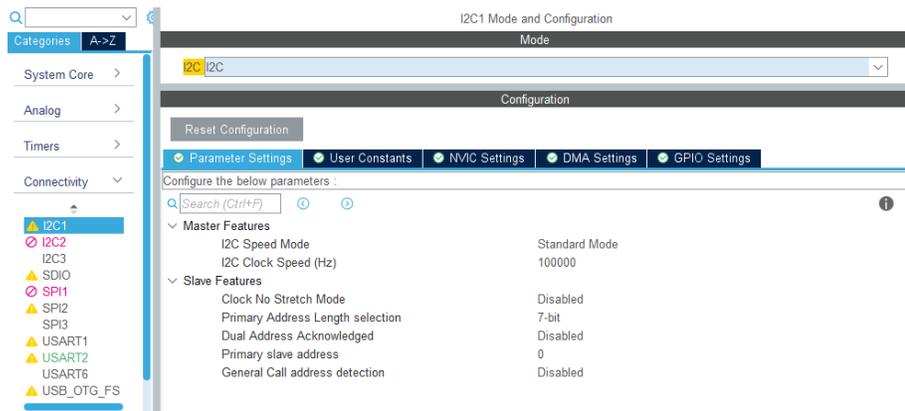


Figura 3.28 Configuración I2C

Convertidor analógico a digital

La adquisición de los datos de voltajes y corrientes de los diferentes sensores implementados en el regulador de carga serán a través de los canales de conversión de analógico a digital. Estos canales requieren de ciertas configuraciones para una correcta operación, además de tomar en cuenta el tiempo de adquisición, la resolución y el valor de referencia máximo el cual pueda sensar. Para configurar un pin como entrada de conversión analógica a digital se requieren los siguientes pasos:

1. Seleccionar el pin a utilizar como canal ADC

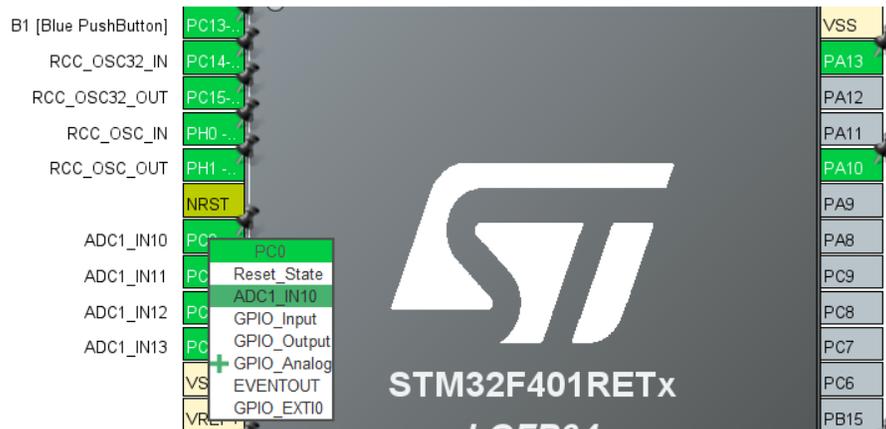


Figura 3.29 Configuración pin como ADC

- De igual manera se pueden seleccionar los canales a implementar desde la ventana de configuración del periférico, como se muestra en la siguiente imagen, para hacerlo de esta manera se debe de tomar en cuenta la hoja de datos del dispositivo.

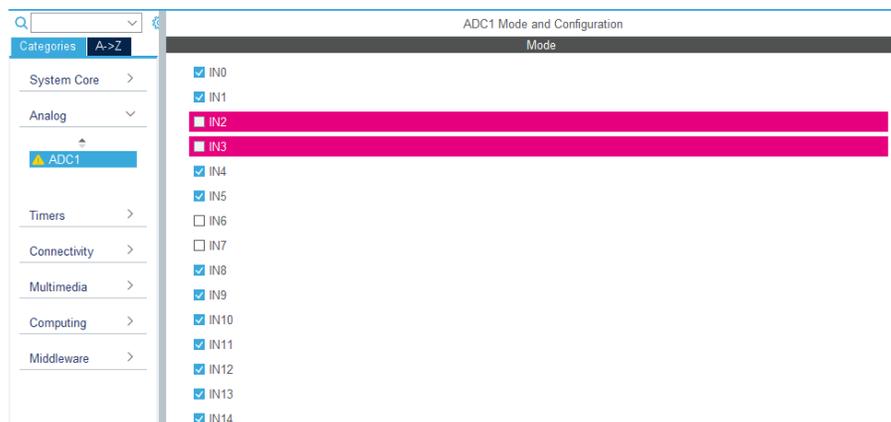


Figura 3.30 Configuración alternativa de ADC

- La configuración recomendada para la implementación del regulador de carga se muestra en la siguiente figura, la cual configura el modo de funcionamiento del periférico, el prescalador para obtener la frecuencia de adquisición de los datos, la resolución del valor por canal.
- Activar el acceso continuo con la función DMA ya que nos permite un intercambio de información más eficiente entre el CPU y la memoria
- La siguiente imagen muestra la configuración por canal, la cual nos permite la configuración de la cantidad de muestras por conversión realizara por canal

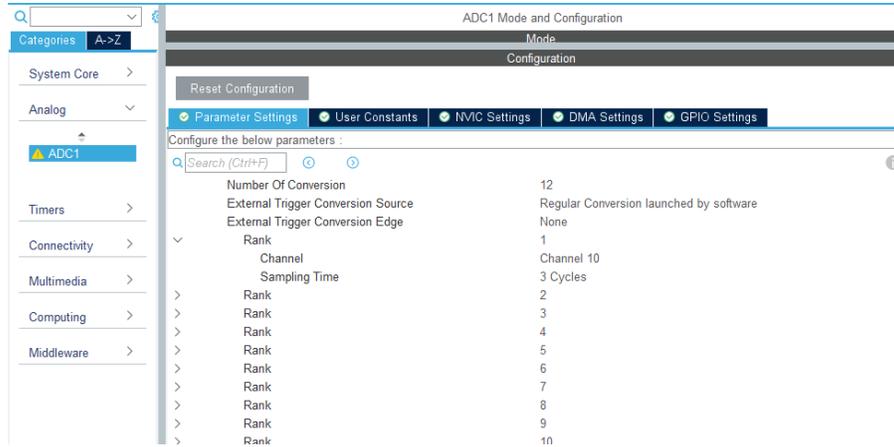


Figura 3.31 Configuración parámetros ADC

- Configurar el acceso directo DMA, el cual nos permite un mejor control y manejo del periférico ADC.

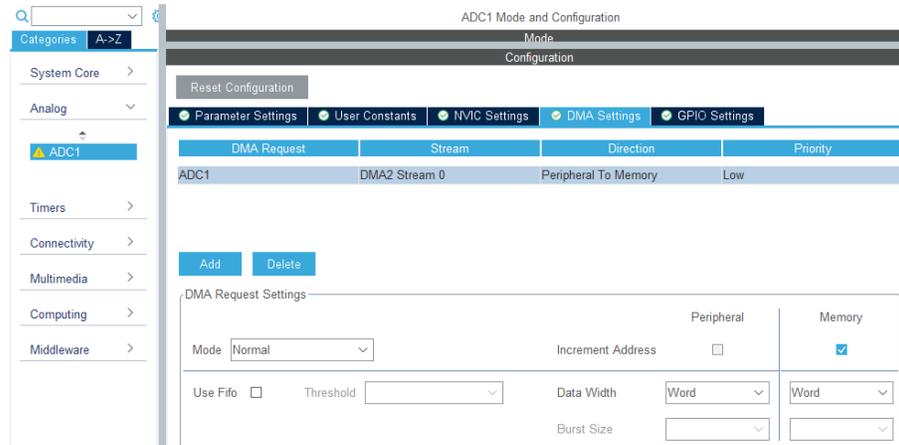


Figura 3.32 Configuración DMA de ADC

3.3.1.- Descripción del firmware

El IDE STM32 CUBE admite programación en C y en C++, el firmware del regulador de carga está programado en C debido a la amplia aceptación y compatibilidad para migrar el firmware a otros entornos de programación. El ciclo principal de ejecución del firmware es el algoritmo P&O encargado de obtener el punto de máxima potencia del arreglo fotovoltaico.

El firmware cuenta con la capacidad de administrar la potencia extraída del arreglo fotovoltaico al banco de baterías o directamente a las cargas conectadas a los puertos del inversor y de la carga en DC.

Para administrar la potencia al sistema de acumulación es necesario que el funcionamiento del regulador de carga sea el extraer la máxima potencia del arreglo fotovoltaico, para así, lograr una correcta eficiencia de funcionamiento. En este modo de funcionamiento se toma en cuenta el voltaje del sistema de acumulación de energía para determinar en qué etapa de carga está el banco de baterías además de la corriente administrada para proteger el sistema de acumulación, tomando en cuenta las especificaciones de operación del fabricante del sistema de acumulación. Estos datos son adquiridos en todo momento para proteger de daños al banco de baterías de casos de sobre carga y sobre descarga.

Este ciclo principal de funcionamiento tiene la capacidad de determinar el estado de carga del sistema de acumulación para definir la administración de la potencia obtenida, en el caso de que el sistema de acumulación este en etapa de carga optimo, se ejecuta el ciclo de funcionamiento secundario y se modifica la conexión eléctrica de la potencia a los puertos de cargas.

El principio de funcionamiento del ciclo secundario tiene como objetivo alimentar los dispositivos conectados en los puertos de cargas. Esto es logrado con un controlador proporcional de voltaje, debido a que la demanda de variable de corriente por parte de las cargas conectadas y al implementar una fuente de corriente como alimentación, nos da como resultado un ajuste constante del ciclo de trabajo, tomando en cuenta como variable principal el voltaje

administrado en los puertos de cargas para así lograr el correcto funcionamiento de los dispositivos conectados.

Algoritmo MPPT

La siguiente figura muestra el ciclo de trabajo principal el cual consta del algoritmo de rastreo de punto de máxima potencia.

```
Leer_sensores();
Porcentaje=Duty/4200;
Porcentaje=Porcentaje*100;
Probar_MPPT();
Potencia=V_panel*I_panel;
Delta_p=Potencia-Pp_1;
Delta_v=V_panel-Vp_1;
/*Algoritmo MPPT*/
if (Delta_p>0)
/* Duty=42=1% */
{
    if(Delta_v>0)
    {
        Duty=Duty-Delta_d;
    }
    else
    {
        Duty=Duty+Delta_d;
    }
}
else
{
    if(Delta_v>0)
    {
        Duty=Duty+Delta_d;
    }
    else
    {
        Duty=Duty-Delta_d;
    }
}
```

Figura 3.33 Algoritmo MPPT

Para ejecutar el algoritmo MPPT se requiere adquirir los valores de las variables de diferencia de potencial y potencia actuales, para ser comparadas con los valores adquiridos en la iteración anterior. Posterior a esto, ejecutamos una decisión en función del diferencial de potencia y diferencial de voltaje en la iteración actual para ajustar la variable del ciclo de trabajo la cual acerca el punto de operación al punto de máxima potencia.

Para finalizar la ejecución del algoritmo, se respalda el valor de potencia y diferencia de potencial actual para su comparación en la siguiente iteración, y actualizamos el valor del registro CCR2 para aplicar el nuevo valor del ciclo de trabajo calculado.

Control de voltaje

La siguiente figura muestra el ciclo de trabajo secundario, donde aplicamos un control proporcional en la variable del ciclo de trabajo para obtener el set point de 12V que necesitamos en los puertos destinados a las cargas.

```
/*-----!
Leer_sensores();
Porcentaje=Duty/4200;
Porcentaje=Porcentaje*100;
Probar_MPPTV2();
Potencia=V_panel*I_panel;
Delta_p=Potencia-Pp_1;
Delta_v=V_panel-Vp_1;

/*Control por voltaje*/
if (I_convertidor<=5)
{
    if (V_convertidor<=13.8)
    {
        Err=sp-V_convertidor;
        Err=Err*Gain_p;
        Duty=Duty+Err;
    }
}

if (Duty>=Duty_max)
{
    Duty=Duty_max;
}
if (Duty<=Duty_min)
{
    Duty=Duty_min;
}
TIM3->CCR2=Duty;
HAL_Delay(500);
```

Figura 3.34 Control por voltaje

El primer paso es adquirir los datos de las variables de voltaje y corriente; la variable principal para este ciclo es el voltaje que se entrega en convertidor estático de potencia, dado que este es el que está presente en los puertos de cargas, con la corriente calculamos la potencia entregada en los puertos para así limitar la potencia máxima que puede proporcionar el convertidor estático de potencia para así proteger los componentes electrónicos. Ejecutamos un lazo de control proporcional en el voltaje, calculando el error al comparar el voltaje del convertidor contra el voltaje del set point.

Aplicando una amplificación ante ese error, modificamos nuestra variable de salida para provocar una perturbación la cual tomaremos en cuenta en la próxima iteración.

Actualizamos el valor del registro CCR2 para aplicar el nuevo ciclo de trabajo.

Lectura de sensores

La adquisición de datos es fundamental para contar con los lazos de retroalimentación que los ciclos de control necesitan. Para lograr esto se implementó una subrutina que activa el ADC embebido en el microcontrolador. La siguiente figura muestra el código de ejecución de la subrutina de adquisición de datos en los canales con sensores conectados.

La subrutina parte definiendo variables de control para interrumpir la toma finita de muestras, además de, eliminar el contenido de las donde se depositarán los nuevos valores adquiridos. El ciclo de toma de muestras “For” activa el periférico ADC y le proporciona los argumentos de configuración, los cuales definen el periférico a utilizar, el arreglo de variables donde se van a almacenar los valores adquiridos y el número de canales a adquirir.

```
static void Leer_sensores(void)
{
    int muestra=0;
    int max=50;
    Limpiar_adc();

    for(muestra=1;muestra<=max;muestra++)
    {
        HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, _adc_value,12);
        HAL_ADC_ConvCpltCallback(&hadc1);
        HAL_ADC_Stop(&hadc1);
    }
    /*Calibracion de corriente*/
    /*Promedio variables corriente*/
    I_panel=I_panel/(max*2);
    I_panel=I_panel-2890;
    I_panel=I_panel*0.00261369;
    I_panel=I_panel*-1;
    I_panel=I_panel*0.6;

    I_carga=I_carga/(max*2);
    I_carga=I_carga-2877;
    I_carga=I_carga*0.0116279;

    I_inversor=I_inversor/(max*2);
    I_inversor=I_inversor-2885;
    I_inversor=I_inversor*0.0116279;

    I_convertidor=I_convertidor/(max*2);
    I_convertidor=I_convertidor-2893;
    I_convertidor=I_convertidor*0.0116279;
    I_convertidor=I_convertidor*-1;
}
```

Figura 3.35 Subrutina de sensores

El ciclo “For” está delimitado por la cantidad de muestras que requerimos, estas muestras se acumulan en la subrutina “**HAL_ADC_ConvCpltCallback**” la cual se encarga de manejar la bandera del ADC que indica que un ciclo de conversiones se ha realizado de una manera exitosa.

```

void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc)
{
    int contador=0;

    /*Corrientes*/

    I_panel=I_panel+adc_ipanel; /*0.014117647;
    I_carga=I_carga+adc_icarga;
    I_inversor=I_inversor+adc_iinversor;
    I_convertidor=I_convertidor+adc_iconvertidor;
    /*Voltajes*/

    V_panel=V_panel+adc_vpanel;
    V_bateria=V_bateria+adc_vbateria;
    V_convertidor=V_convertidor+adc_vconvertidor;
    //temperatura_interna=((VSENSE*adc_value[11]-V25)/Avg_slope)+25;
    temperatura_interna=temperatura_interna+(((VSENSE*adc_tempint-V25)/Avg_slope)+25);

}

```

Figura 3.36 Subrutina de obtención de variables

En el ciclo “For” acumulamos valor de cada canal entre iteraciones, después de este, se realiza un promedio de los valores adquiridos para evitar variaciones en las lecturas, debidas al ruido eléctrico implicado en las propiedades físicas de los semiconductores.

3.4.- Diseño electrónico del regulador de carga

Uno de los objetivos de la implementación del regulador de carga es generar un antecedente que apoya el desarrollo tecnológico en el país, el cual culmina en un prototipo a nivel laboratorio.

Este prototipo es creado en la herramienta de diseño electrónico industrial de Autodesk EAGLE, la cual facilita mucho el prototipado con las siguientes características:

- Diseño esquemático asistido
- Diseño e importación de librerías
- Exportación de Lista de materiales
- Diseño de PCB asistido
- Exportación de los archivos necesarios para el maquilado del PCB
- Visualización y seguimiento de líneas eléctricas

El diseño del PCB está basado en la topología de propuesta para el regulador de carga, la cual consta de 3 etapas:

1. Etapa de convertidor estático de potencia
2. Etapa del sistema de acumulación
3. Etapa del microcontrolador

3.4.1.- Diseño etapa convertidor estático de potencia

En esta etapa se considera el voltaje en circuito abierto proporcionado por el panel y la corriente de salida, dado que el voltaje de salida del convertidor estático de potencia es menor pero la corriente de salida es mayor, debido al ajuste de la potencia de entrada con respecto a la potencia de salida del convertidor estático de potencia

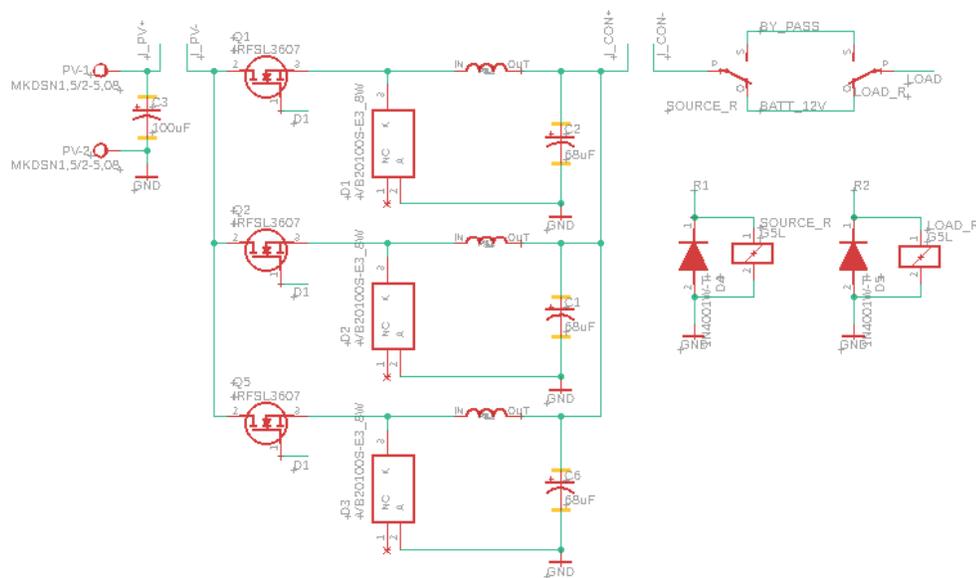


Figura 3.37 Diseño esquemático del convertidor estático de potencia

El diseño del convertidor estático de potencia es representado por 3 convertidores Buck en paralelo, el cual permite un manejo de una fracción de la potencia total de salida, esto permite una reducción en el tamaño, capacidad de manejo de potencia y coste de los semiconductores implementados. La conexión eléctrica de la potencia extraída del arreglo fotovoltaica es controlada por dos relevadores los cuales permiten la administración de la potencia al sistema de acumulación o en los puertos de cargas.

3.4.2.- Diseño etapa sistema de acumulación

La etapa del sistema de acumulación consta de puertos seleccionados para el sistema de acumulación, inversor y carga en CD. La conexión eléctrica del sistema de acumulación está diseñada con relevadores mecánicos, la conexión eléctrica en los puertos de carga está diseñados con mosfets los cuales están controlados de manera opto aislada por el microcontrolador

Power output

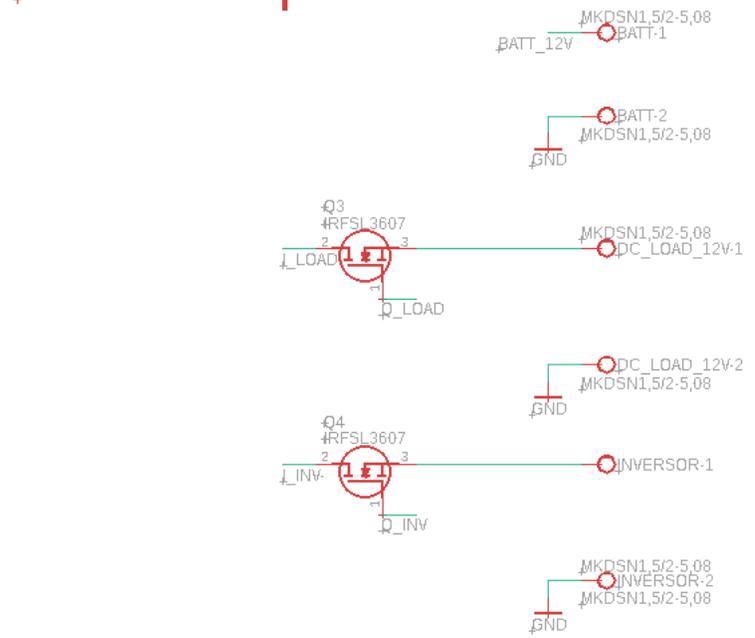


Figura 3.38 Diseño esquemático de puertos

El diseño de control por mosfets debe considerar el voltaje de referencia en su terminal drenadora para su correcta polarización, se recomienda la su implementación con un voltaje de polarización flotante.

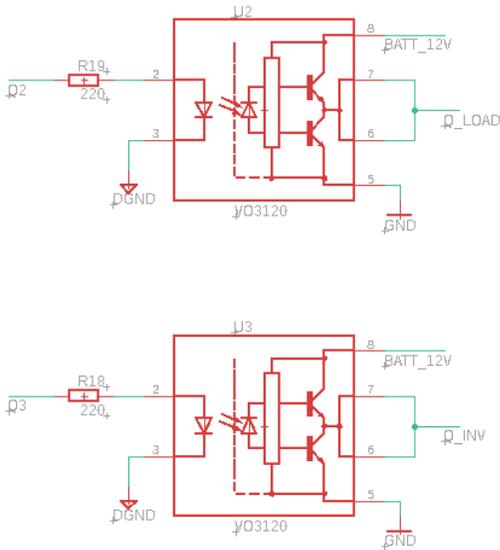
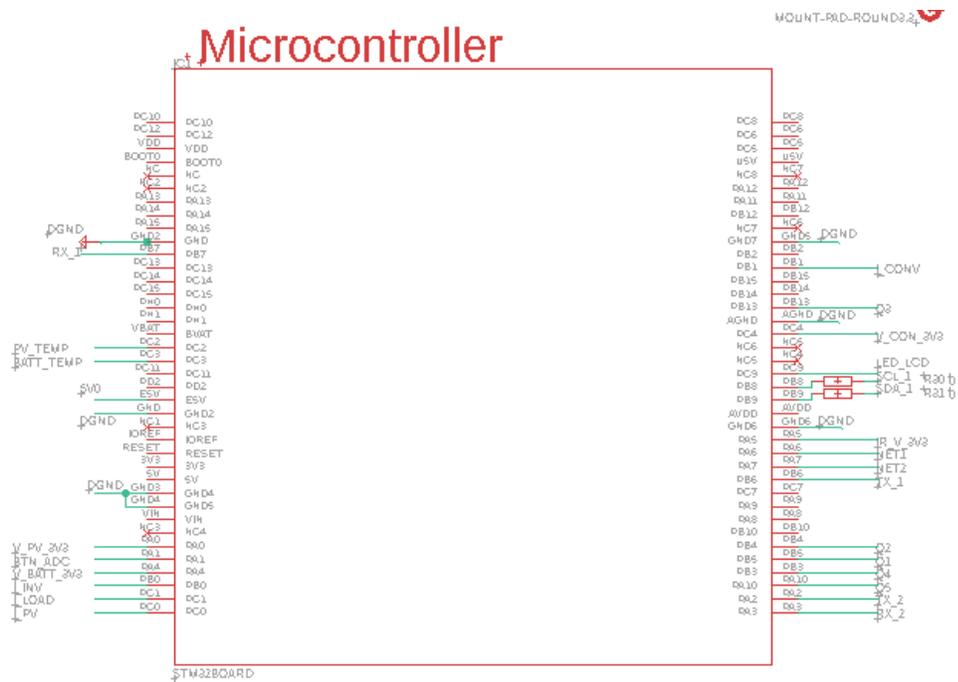


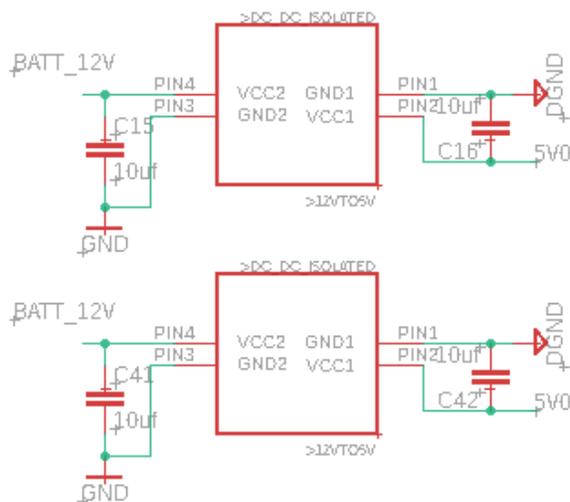
Figura 3.39 Diseño esquemático de drivers

Para aislar eléctricamente el control del convertidor estático de potencia, se implementaron optodrivres para MOSFETS e IGBT's VO3120 el cual puede manejar la tensión apropiada de 15 voltios para excitar los MOSFETS y proporcionar una corriente de gatillo de hasta 2 amperes.

3.4.3.- Diseño etapa microcontrolador

El microcontrolador es el dispositivo más importante del diseño del regulador de carga, es el encargado de adquirir los datos de las variables eléctricas de interés del sistema y retroalimentación para la ejecución del seguimiento de punto de máxima potencia, proporciona el canal de comunicación con una computadora, control de conexiones eléctricas de los diferentes puertos del regulador de carga, proporciona la interface de usuario en el presentador de datos embebido en el regulador de carga.





Isolated supply

Figura 3.41 Diseño esquemático de fuente de alimentación aisladas

3.4.4.- Adquisición de variables de voltaje

Se implemento el amplificador operacional opto aislado Adum4190 como sensor de voltaje el cual está configurado como seguidor de voltaje. El convertidor de analógico a digital del microcontrolador tiene como valor máximo de referencia 3.3V, el cual sirve de referencia para el diseño del acondicionador de señal.

Utilizando un divisor de tensión y un seguidor de voltaje opto aislado, se acondiciona la magnitud de la diferencia de potencia de interés.

Para el cálculo del voltaje de salida del acondicionador de la señal de voltaje, utilizamos la formula del voltaje en la resistencia de salida del divisor de tensión:

$$V_{out} = \frac{V_{in} * R_{sal}}{R_{ent} + R_{sal}}$$

Donde:

V_{out} = voltaje de salida no mayor a 3.3V, se calcula el valor de salida en 3V para evitar casos de saturación del canal

V_{in}= Voltaje de entrada o diferencia de potencial a medir

R_{ent}= Resistencia de entrada de la diferencia de potencia

R_{sal}= Resistencia de salida o diferencia de potencial medida por sensor

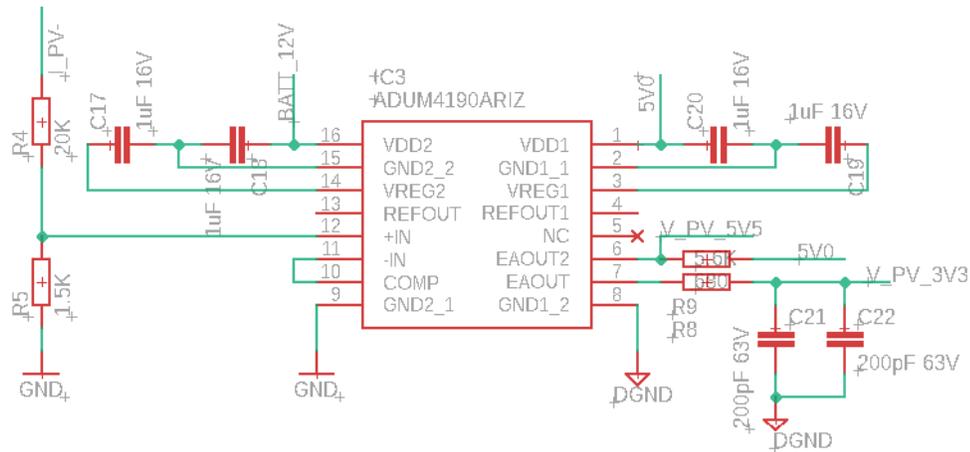


Figura 3.42 Diseño esquemático sensor de voltaje

3.4.5.- Adquisición de variables de corriente

Se implemento la adquisición de la variable de corriente mediante el sensor ACS712 en sus regiones de operación optimizadas para 5 y 20 Amperes. Estos sensores son de tipo invasivos, se implementó el circuito integrado en su encapsulado SOIC el cual es de montaje superficial.

El principio de funcionamiento de este sensor es proporcionar una diferencia de potencial proporcional al campo magnético generado por la corriente que lo atraviesa. La sensibilidad del sensor optimizado para 5 amperes tiene una sensibilidad de 185mV por Amper y el sensor optimizado para 20 amperes tiene una sensibilidad de 66mV por Amper. Cabe mencionar que el sensor mide corriente de manera bidireccional y no proporciona diferencia de potencial negativa ya que se alimenta con 5 voltios de corriente continua, lo cual indica que la salida del sensor tiene un valor ajustado cuando no tiene perturbaciones en su campo magnético la cual está dada por la siguiente formula:

$$V_{out} = \frac{VCC}{2}$$

Donde:

V_{out} = voltaje de salida del sensor sin perturbación

V_{cc} = Voltaje de alimentación del sensor el cual puede ir hasta los 8 voltios de corriente continua

La siguiente figura muestra el diagrama esquemático de la implementación del sensor ACS712, el cual se consideró con un divisor de tensión para obtener un valor máximo de salida de 3.3V en la escala de 20A y 3.3V en la escala de 5A.

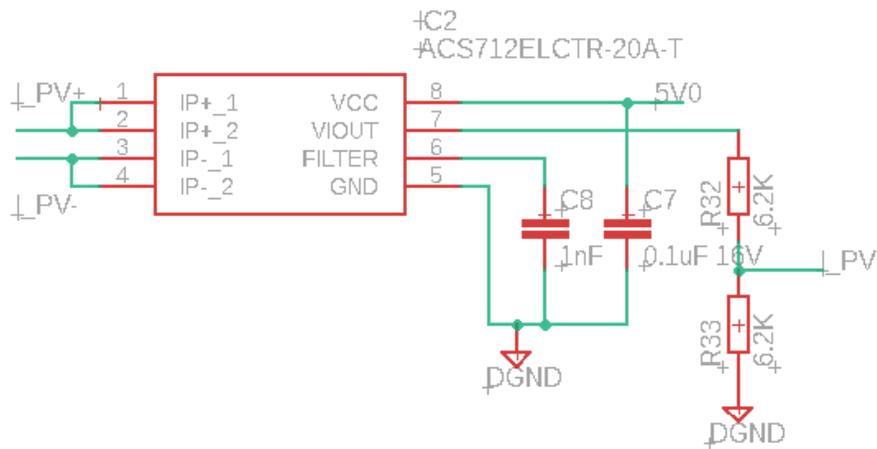


Figura 3.43 Diseño esquemático sensor de corriente

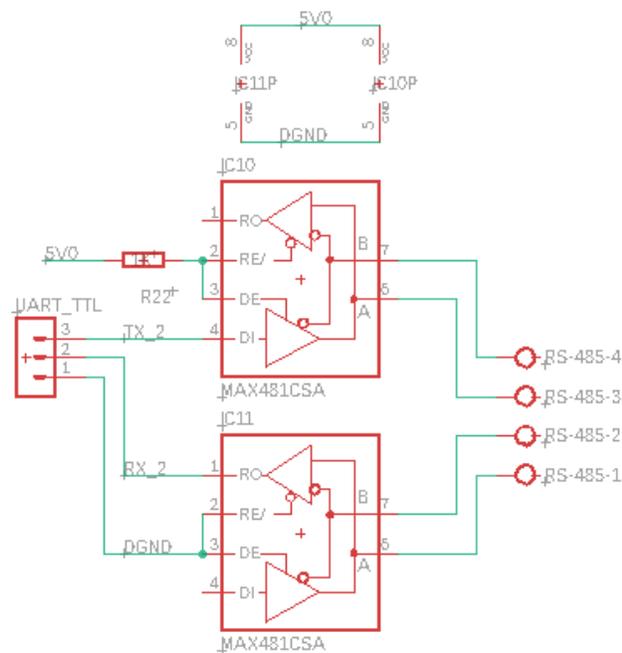
3.4.5.- Comunicación RS-485

El microcontrolador cuenta con diversos estándares de comunicación los cuales pueden ser implementados para comunicarse con periféricos de salida y con otros dispositivos. El regulador de carga implementa un canal de comunicación RS-485 con una PC a través de un adaptador RS-485 a USB 2.0.

El estándar de comunicación RS-485 es ampliamente utilizado en la industria ya que su principio de funcionamiento a base de lazo de corriente lo vuelve inmune a las señales parasitas y campos magnéticos, presentes en campo o en el medio ambiente. La principal desventaja de implementar este estándar es la velocidad de transmisión de datos la cual puede decaer en

función de la distancia entre emisor y receptor, además de la configuración del canal, ya sea direccional o bidireccional, la transmisión de datos.

La siguiente figura muestra el diagrama esquemático implementado en el regulador de carga, el cual permite una comunicación full dúplex para una mejor transmisión de datos.



Uart to rs-485

Figura 3.44 Diseño esquemático conversor TTL a RS-485

3.4.6.- Diseño de circuito impreso

Se integro toda la circuitería mostrada en la hipótesis de la arquitectura de regulador de carga, en una tarjeta de 10 centímetros por 10 centímetros con dos caras.

El diseño del regulador de carga se realizo en el software de diseño electrónico industrial Eagle en su herramienta de diseño de tarjetas de circuito impreso.

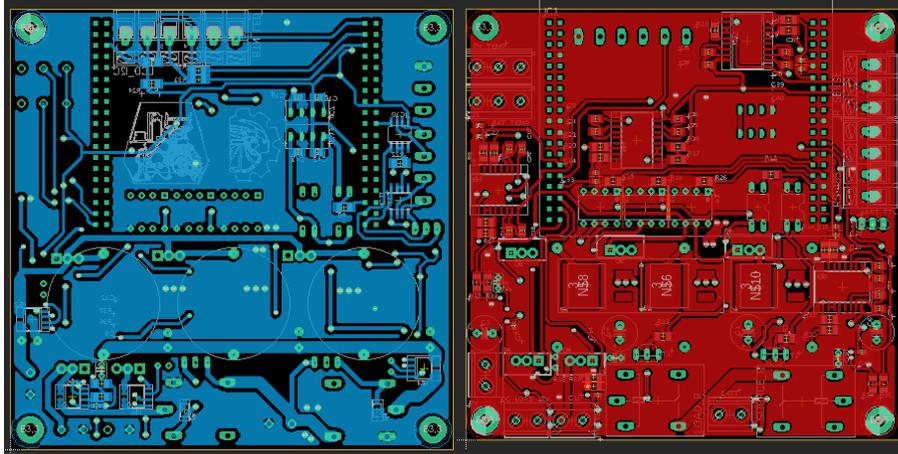


Figura 3.45 Layout del regulador de carga

Para el diseño de la tarjeta se deben de tomar en cuenta las reglas de diseño general para tarjetas de circuito impreso, además de las reglas de fabricación y limitaciones, proporcionadas por el fabricante. Para el diseño de la tarjeta, distribución de componentes e integrados, se deben considerar los parámetros:

- Aislar de planos de tierra de los circuitos digitales, analógicos y de potencia
- Aislar los componentes de potencia debido a las emisiones electromagnéticas producidas por la frecuencia de conmutación
- Dimensionar las pistas en función de la corriente que proporcionan
- Ordenar los conectores del regulador de carga en relación de entradas y salidas
- Dimensionar la separación o aislamiento eléctrico de las pistas en función de la diferencia de potencial que proporcionan

La manera más precisa de realizar un prototipo es fabricarlo de manera profesional, esto minimiza los riesgos de malas conexiones entre dispositivos, mejor implementación de dispositivos numerosos y complejos, proporciona una mejor presentación. La siguiente figura muestra la placa de circuitos impresa diseñada en EAGLE

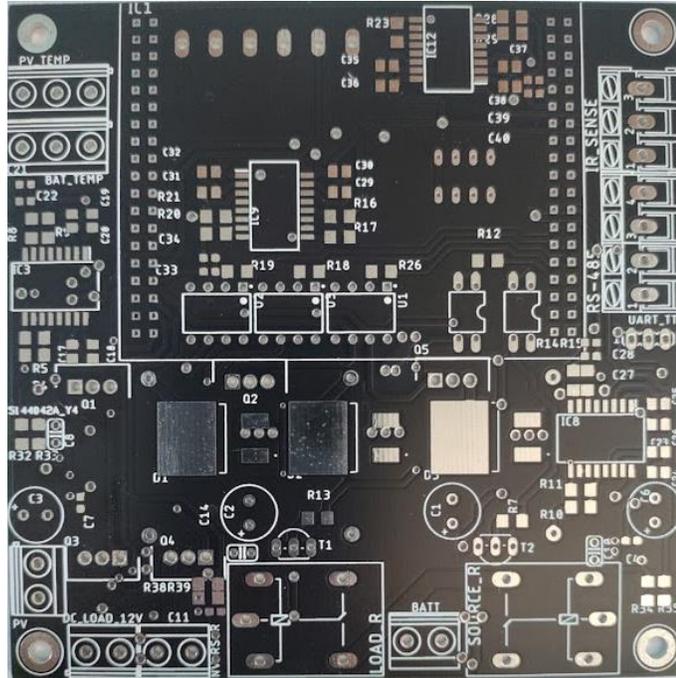


Figura 3.46 PCB regulador de carga

La siguiente figura muestra el prototipo del regulador de carga con todos sus componentes ensamblados y soldados. El software de diseño electrónico EAGLE cuenta con la opción de generación del esténcil para facilitar la soldadura con pasta para dispositivos de montaje superficial.

En esta etapa, generamos el prototipo del regulador de carga como una tarjeta de desarrollo y evaluación para pruebas en el laboratorio y evaluar los resultados esperados con la simulación en SIMULINK.

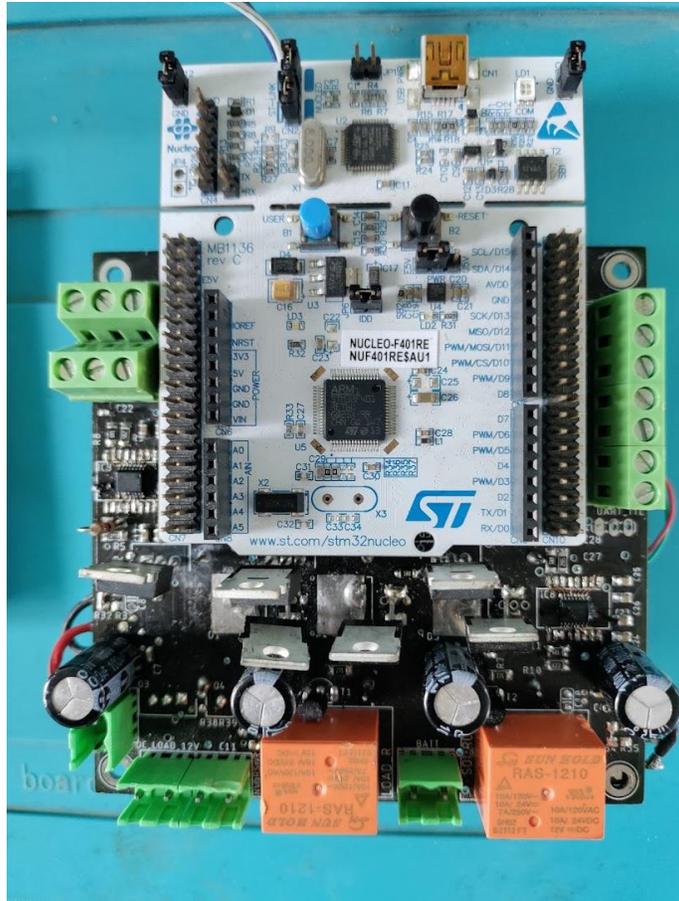


Figura 3.47 Prototipo del regulador de carga

Capítulo 4 Pruebas y resultados

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas en simulación con el convertidor estático de potencia y con el prototipo de regulador de carga implementado.

4.1.- Resultados de simulación de convertidor estático de potencia

En el capítulo anterior, en el subtema 3.2 se definieron los parámetros de simulación del convertidor estático de potencia; Se definieron en la tabla 2 los parámetros máximos del convertidor en función de las limitantes del proyecto, se definieron en la tabla 3 los parámetros del arreglo fotovoltaico a implementar y en la tabla 4 se definió los valores calculados para los elementos eléctricos y electrónicos del convertidor estático de potencia.

La siguiente imagen muestra la topología básica del convertidor Buck implementado en el estudio de obtención del punto de máxima potencia del arreglo fotovoltaico para el regulador de carga.

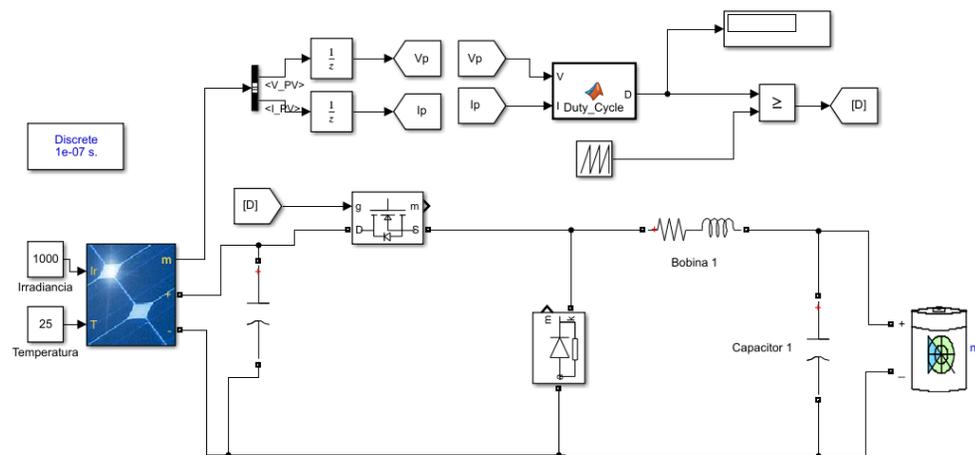


Figura 4.1 Topología convertidor Buck

Al manejar dos paneles de 100W en la entrada y obtener el punto de máxima potencia del arreglo fotovoltaico, nos resulta una corriente de 15.38A, lo que nos indica un inductor de grandes dimensiones.

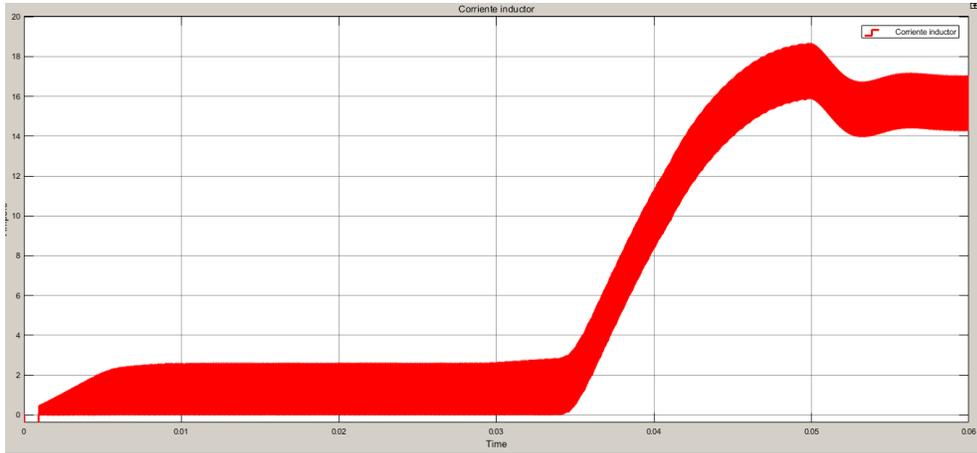


Figura 4.48 Corriente en inductor

Por esta razón, se recurre a la técnica de utilizar 3 convertidores Buck en paralelo para dividir la corriente total del sistema. Esto beneficia en la implementación, dado que, los inductores, los diodos y los mosfets reducen su costo al ser de menor capacidad de corriente.

Esta técnica es fácilmente aplicable, dado que los convertidores Buck individuales son accionados por la misma señal de control, además de, los componentes deben de ser de la misma nomenclatura para así evitar un posible desbalance de carga

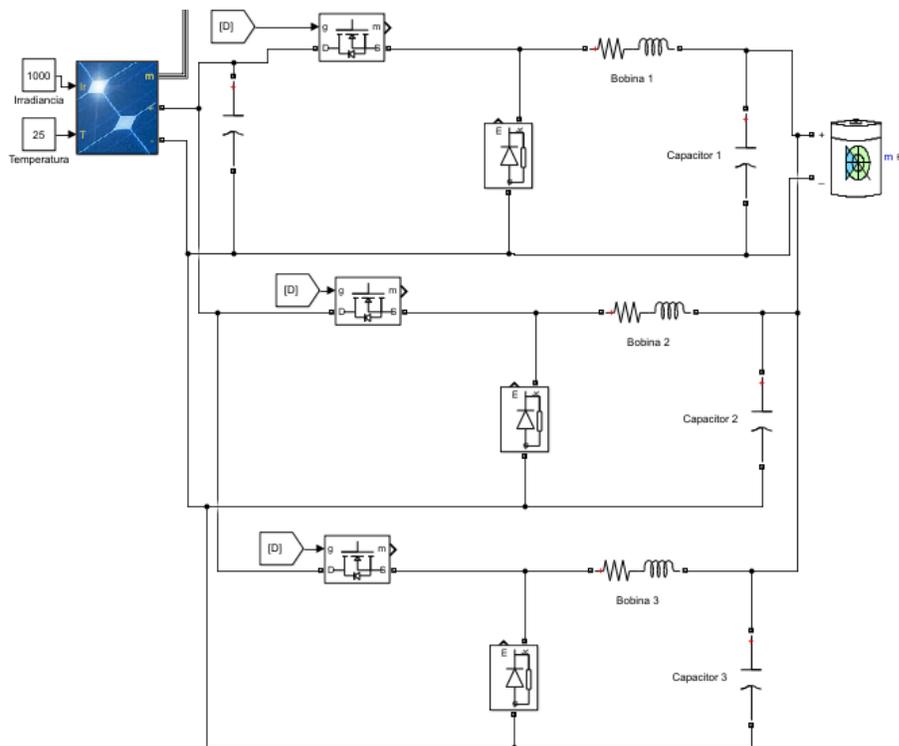


Figura 4.49 Topología Buck de 3 fases

Las señales mostradas en las Figura 4 y 5 contienen los resultados de voltajes y corrientes del convertidor propuesto, respectivamente, utilizando los parámetros de simulación mencionados.

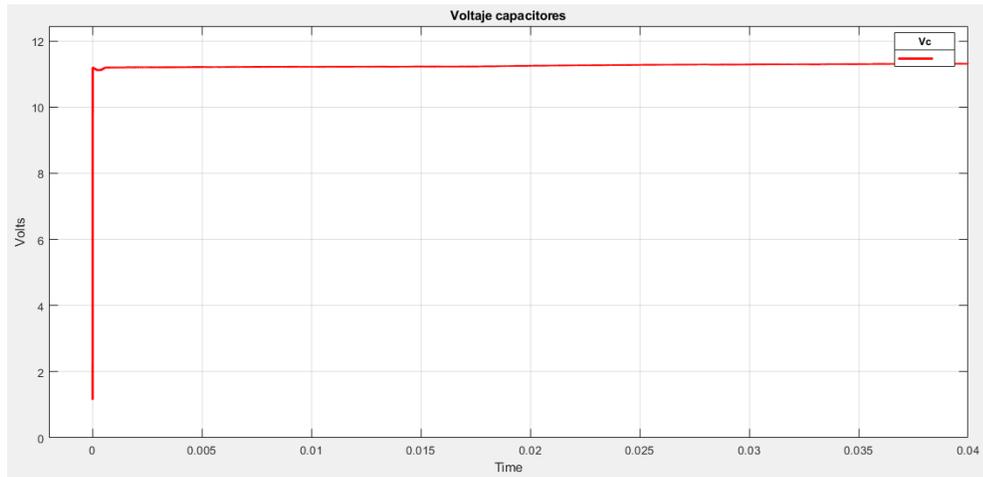


Figura 4.50 Voltaje en capacitores

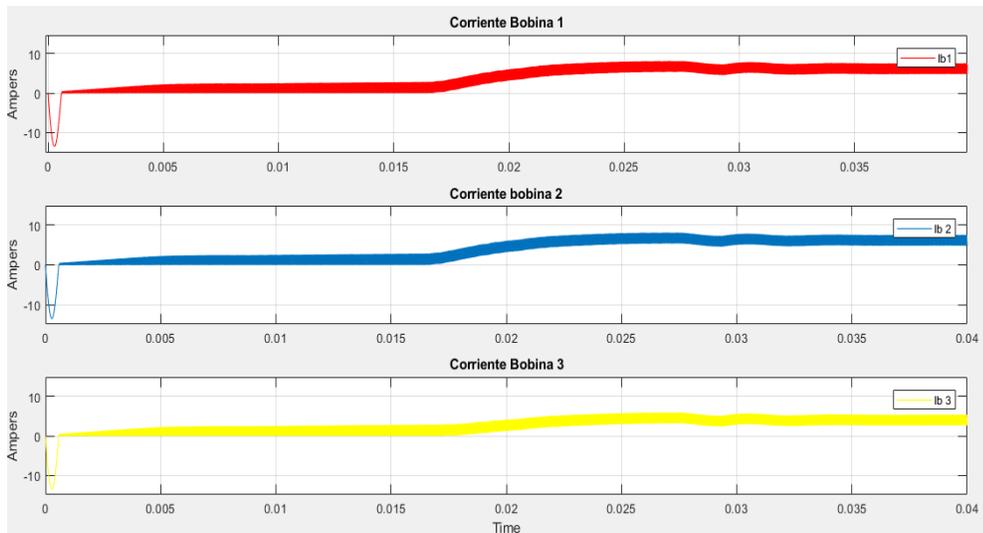


Figura 4.51 Corriente en inductores

El voltaje obtenido en los capacitores es igual al de la batería debido a que se tiene una conexión en paralelo entre estos elementos. Podemos constatar el correcto funcionamiento del proceso de administración de carga en el sistema de acumulación, a través de la propiedad Estado de carga(SOC) de la batería implementada en el modelo de Simulink.

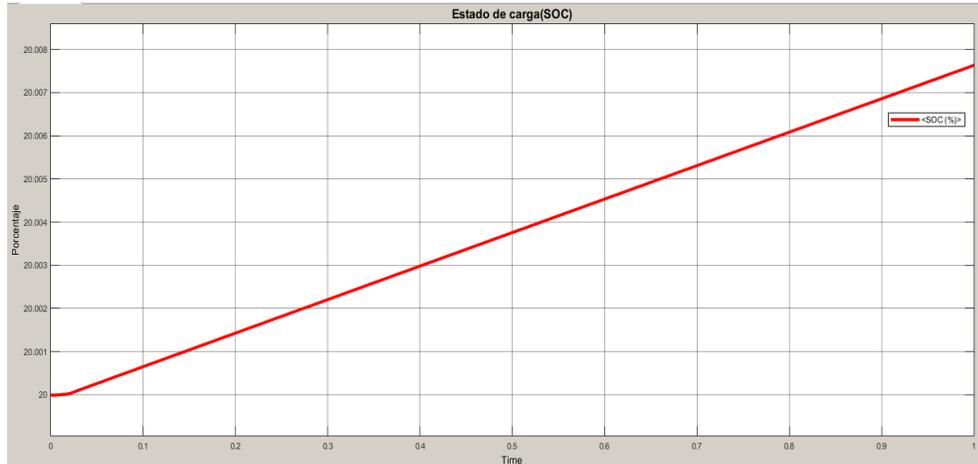


Figura 4.52 Estado de carga del sistema de acumulación

Comprobamos el funcionamiento del algoritmo de extracción de punto de máxima potencia del arreglo fotovoltaico, obteniendo los 200W totales del arreglo. En la figura 12 se muestra la variación de la potencia extraída del arreglo fotovoltaico, controlado mediante la variación del ciclo de trabajo de la señal de control.

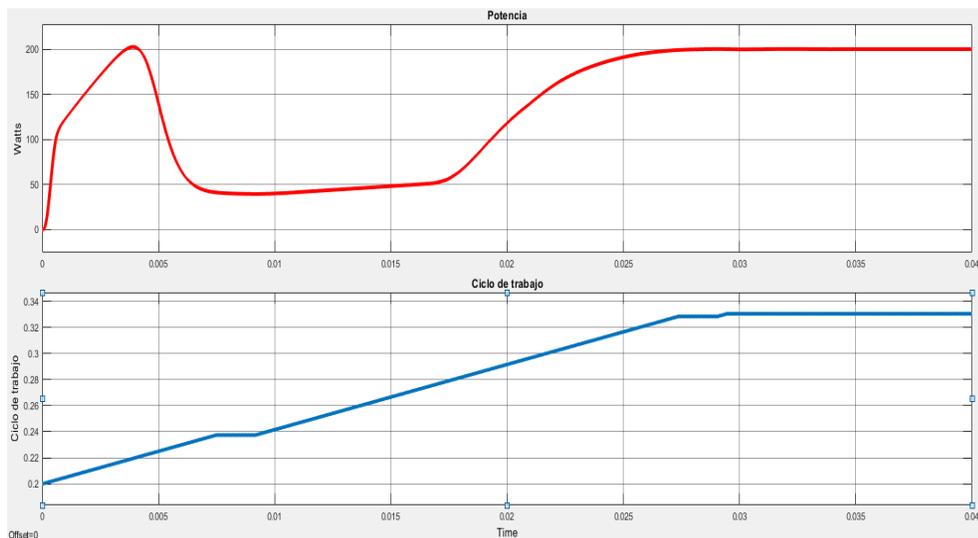


Figura 4.53 extracción del punto de máxima potencia y variación del ciclo de trabajo

4.2.- Resultados de pruebas de extracción de punto de máxima potencia con arreglo fotovoltaico

El regulador de carga es un dispositivo capaz de extraer la máxima potencia de un arreglo fotovoltaico y administrarla en el sistema de acumulación o directamente en los puertos de cargas que dispone el prototipo de regulador de carga.

Como se menciona en el capítulo 3, el firmware del microcontrolador cuenta con dos modos de operación básicos, el primero, es la extracción de máxima potencia del arreglo fotovoltaico y administrar la potencia obtenida en el sistema de acumulación. El ciclo de funcionamiento secundario se presenta en el caso de que la batería este en su etapa de carga final o voltaje flotante para el mantenimiento de la carga del sistema de acumulación, en este punto el regulador de carga detecta que el sistema de acumulación no admite gran parte de la potencia obtenida y para protección del mismo, se envía la potencia obtenida a los puertos de carga y se implementa un control sobre el voltaje de salida para asegurar el correcto funcionamiento de las cargas.

Se implemento la siguiente topología para la comprobación del funcionamiento del prototipo de regulador de carga con la característica de extracción de punto de máxima potencia del arreglo fotovoltaico.

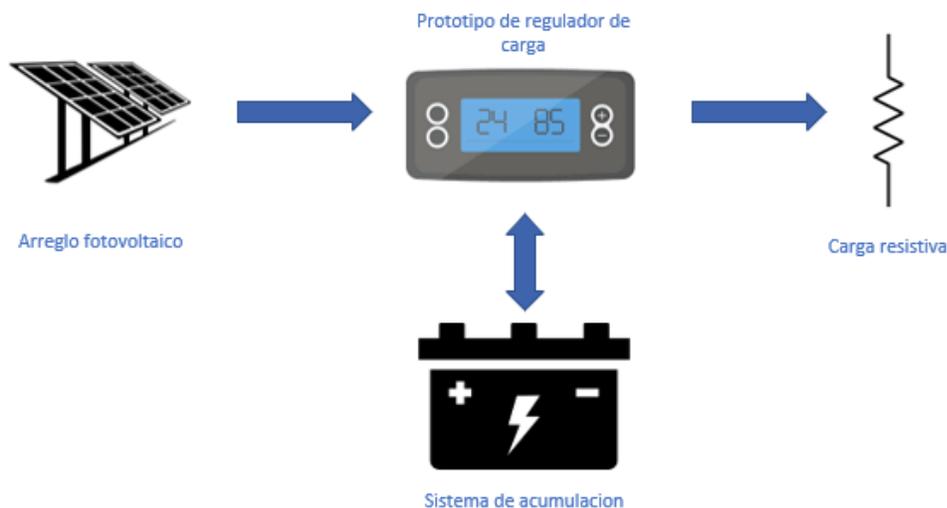


Figura 4.54 Topología sistema FV autónomo

Se comprueba el funcionamiento del algoritmo de extracción de máxima potencia del arreglo fotovoltaico bajo condiciones de irradiancia variable en campo, debido a esto la potencia que entrega el regulador de carga también tiende a variar.

Se toma como muestra el ajuste del ciclo de trabajo en función del algoritmo de perturbación y observación el cual se ajusta en función de la potencia extraída y la diferencia de potencial proporcionada por el panel.

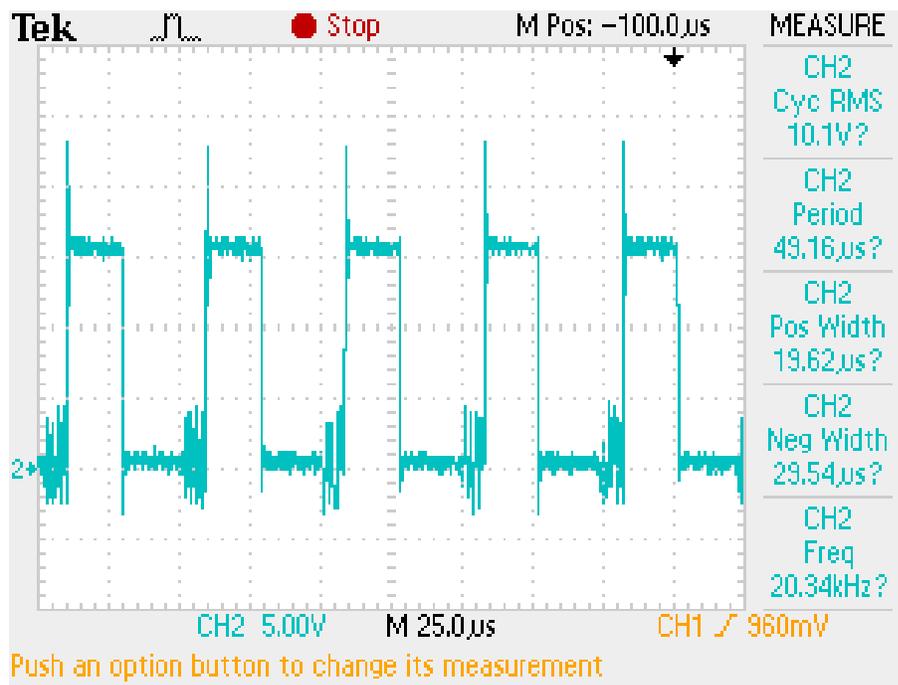


Figura 4.55 Señal de control

Al ajustar el ciclo de trabajo en función de estas dos variables podemos encontrar el punto de máxima potencia en el cual está trabajando el sistema fotovoltaico la cual depende de la irradiancia específica. La potencia obtenida puede ser enviada al sistema de acumulación o a los puertos de cargas en el prototipo del regulador de carga.

En la siguiente imagen se compara la relación que existe las formas de onda del ciclo de trabajo y la corriente en uno de los inductores, la cual se basa en el principio de funcionamiento del convertidor Buck la cual almacena energía en el instante de tiempo en el que el interruptor controlado esta activado y la libera en el instante de tiempo en el que el interruptor no controlado la descarga.

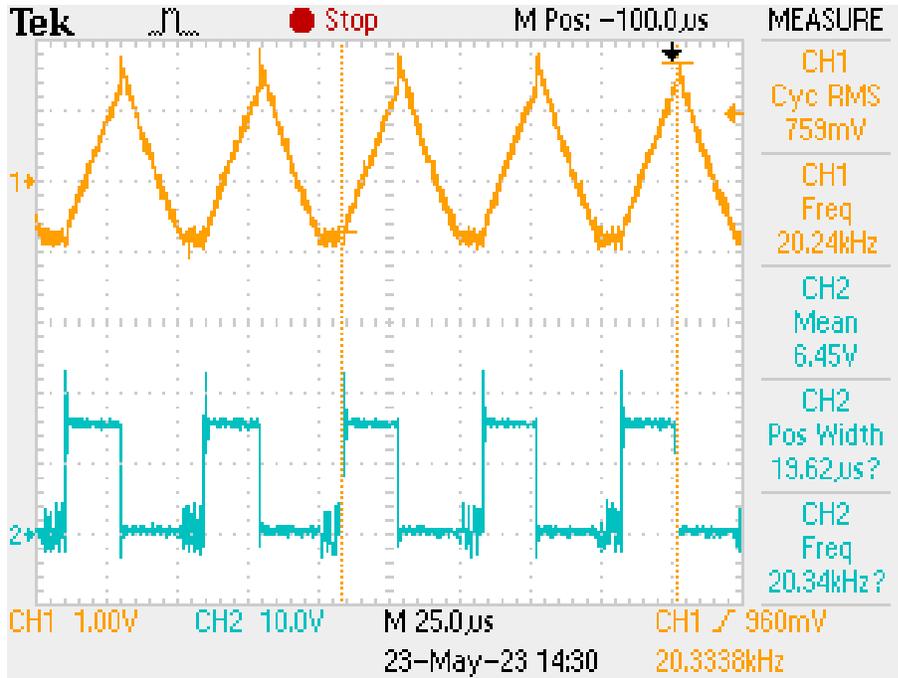


Figura 4.56 Comparación de señal de control y corriente en inductor A

Para comprobar el funcionamiento del prototipo de regulador de carga, enviamos la potencia del convertidor a una carga resistiva para calcular la potencia entrante y la potencia de salida. Tenemos como referencia de la potencia de entrada los valores adquiridos por un amperímetro y un voltímetro, como se muestra en la siguiente imagen, los cuales registran una potencia de entrada de 83.166W



Figura 4.57 Registro de potencia de entrada

Medimos la potencia de salida del regulador de carga la cual registra un voltaje de salida de 18.6V (Esto nos indica una ganancia en voltaje de 0.55), con una carga de 4.5Ohms lo cual no da una potencia de salida de 76.88W. Esto nos indica una eficiencia del 92.24% en la transferencia de potencia y conversión, Esta eficiencia está delimitada por las resistencias internas de los elementos involucrados en el convertidor estático de potencia, además de los elementos necesarios para protección de conexiones de polaridad en los puertos de entrada de potencia y salida de potencia

Para comprobar el funcionamiento del convertidor Buck de 3 fases medimos la corriente que atraviesa cada inductor de manera individual la cual está bajo las siguientes condiciones:

- Cada convertidor estático de potencia está controlado por la misma señal y mismo ciclo de trabajo
- Los dispositivos electrónicos que los componen son de la misma nomenclatura

En las siguientes imágenes se pueden observar las formas de onda de cada fase del convertidor Buck. Cada convertidor se encarga de manejar una parte de la corriente que consume la carga, esto nos permite dividir la corriente de salida entre el número de convertidores Buck implementados.

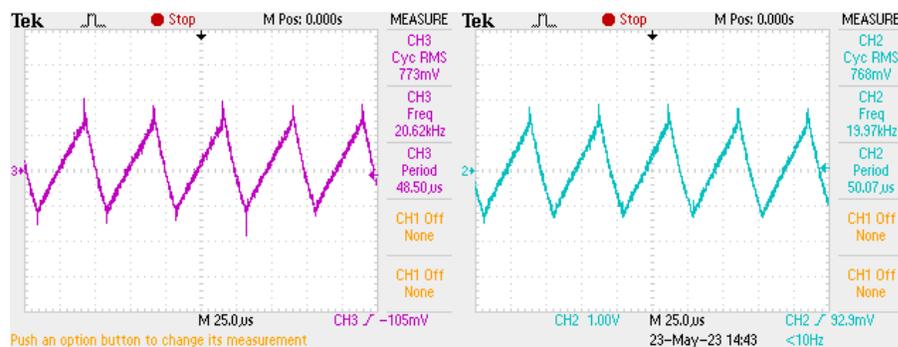


Figura 4.58 Comparación de señales en inductores B y C

Capítulo 5 Conclusión y recomendaciones

En este capítulo se mencionan las recomendaciones que se pueden realizarse en trabajos futuros, además se incluye una conclusión general del proyecto.

5.1.- Recomendaciones generales para trabajos futuros

Una vez realizadas las pruebas al prototipo de regulador de carga y ver la eficiencia, tiempo de respuesta y el diseño, se puede concluir que estos aspectos pueden ser mejorados en trabajos futuros y se hacen las siguientes sugerencias para asegurar obtener una mejor eficiencia.

5.1.1.- Revisión de componentes implementados

Se recomienda la revisión de los componentes involucrados en los convertidores estáticos de potencia. En la implementación del prototipo de regulador de carga se limitó a implementar componentes disponibles en el territorio mexicano.

Para implementaciones futuras, se recomienda la búsqueda de componentes eléctricos y semiconductores con características más competitivos:

- Inductores con resistencia de conductor mas baja, mayor eficiencia de disipación de calor, montaje superficial, mayor robustez ante variaciones de inductancia con respecto a la frecuencia de funcionamiento
- Mosfets de montaje superficial, adición de disipador de calor para cargas constantes y considerables, menor resistencia entre su terminal drain y source en el tiempo en que el interruptor está cerrado.
- Diodos con menor resistencia interna, menor caída de potencial en polarización directa.
- Sensores de corriente con una medición de corriente en su escala optimizada con mayor linealidad, menor incertidumbre.
- Sensores de voltaje con menor sensibilidad ante variaciones de voltaje de alimentación.

5.1.2.- Revisión de firmware y algoritmo de extracción de máxima potencia

El tiempo de obtención del punto de operación de máxima potencia puede ser fácilmente optimizable en dos aspectos básicos.

Se recomienda cambiar la ejecución del algoritmo de perturbación y observación del ciclo principal de funcionamiento a ejecución mediante las interrupciones del timer, para este método se necesita calcular un tiempo adecuado para que cada modificación de la variable manipulada sea censada de manera correcta por el sistema de adquisición de variables, este aspecto es muy importante para evitar que los valores de transición cuando se realiza una perturbación sean tomados en cuenta.

Se recomienda estudiar la posibilidad de implementar otro algoritmo, se sugiere el estudio de las siguientes técnicas de seguimiento de punto de máxima potencia en arreglos fotovoltaicos, con el fin de un tiempo de ejecución optimizado.

| Algoritmo | Complejidad de Implementación | Implementación Analógica o Digital | Velocidad de Convergencia | Sensores |
|-----------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| FOCV | Baja | Ambas | Media | V |
| FSCC | Baja | Ambas | Media | I |
| P&O | Baja | Ambas | Baja | V,I |
| IC | Media | Digital | Baja | V,I |
| RCC | Media | Analógica | Alta | Varía (V,I,G,T) |
| FL | Alta | Digital | Alta | Varía (V,I,G,T) |
| NN | Alta | Digital | Alta | V,I |

Figura5. 59 Tabla comparativa de algoritmos

5.1.3.- Revisión del diseño esquemático y de la tarjeta de circuito impreso

Se recomienda la revisión de los componentes antes mencionados y la consideración de agregar fuentes de alimentación flotantes para asegurar el correcto funcionamiento de los interruptores controlados. Esta implementación sugiere la implementación de convertidores aislados eléctricamente con respecto al voltaje del sistema y del voltaje generado por el convertidor estático de potencia.

Se recomienda el diseño de una placa de circuitos impresos más amplia para una mejor distribución de los componentes implementados y un manejo más eficiente de los cambios de temperatura provocados por el manejo de la potencia extraída del convertidor estático de potencia.

Para este propósito, se recomienda el seguimiento de las reglas generales de diseño de placas de circuito impreso y tomar en cuenta la corriente que maneja cada pista

5.2.- Conclusión general

El presente proyecto cumplió con los objetivos del capítulo 1 y además se generó un prototipo de regulador de carga el cual puede ser utilizado para desarrollar el primer regulador de carga para sistemas fotovoltaicos autónomos en México. Este prototipo ya cuenta con el convertidor estático de potencia para administrar 100W y operar con extracción de máxima potencia de arreglos fotovoltaicos. Este prototipo puede funcionar como punto de partida para la continuidad del desarrollo tecnológico sobre convertidores estáticos de potencia, prueba de algoritmos de extracción de máxima potencia, programación en C de funciones adicionales como dispositivo embebido además de la implementación de más periféricos del microcontrolador.

Sin embargo, podemos señalar que este antecedente requiere de más investigación y desarrollo para establecer un producto comercial.

Bibliografía.

- [1] Alonso Abella Miguel. Sistemas Fotovoltaicos. Introducción al diseño y dimensionado. Editorial SAPT de Publicaciones técnicas, 2001.
- [2] JP. Dunlop. Batteries and charge control in stand-alone photovoltaic systems. Sandia National Laboratories. 1997.
- [3] Mohan, Ned, Tore M. Undeland, and William P. Robbins. Electrónica de potencia: convertidores, aplicaciones y diseño, tercera edición. McGraw Hill 2009.
- [4] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20.
- [5] B. Subudhi and R. Pradhan, "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4.
- [6] E. D. Aranda, J. A. G. Galan, M. S. de Cardona, and J. M. A. Marquez, "Measuring the I-V curve of PV generators," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 3, no. 3, Sept 2009.
- [7] Geoff Walker. Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model. Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, 21(1), 2001
- [8] Mahesh Gowda, N.M Kiran, "Modelling of Buck DC-DC converter using Simulink", International Journal of innovative Research in Science, Engineering and Technology, July 2014, Vol 3.
- [9] ST Semiconductors, STM32F401RE Datasheet:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f401re.pdf>
- [10] ST Semiconductors, RM0368 Reference manual for peripherals setting:
https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0368-stm32f401xbc-and-stm32f401xde-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [11] ST Semiconductors, UM1725 Description of STM32F4 HAL and low-layer drivers:
https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1725-description-of-stm32f4-hal-and-lowlayer-drivers-stmicroelectronics.pdf
- [12] Analog devices, High stability isolated error amplifier datasheet:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adum4190.pdf>

[13] Allegro microsystems, Hall effect-based linear current sensor datasheet:

<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>