



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

---

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN GESTOR DE  
ENERGÍA PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO  
INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA**

---

**TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN MECATRÓNICA**

**PRESENTA  
ING. MARLON BRANDO ALPUCHE JAVIER**

**DIRECTOR  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC**

**ASESORES  
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA  
DR. HOMERO TORAL CRUZ  
DRA. DANIELLA ESPERANZA PACHECO CATALÁN  
DR. MANUEL ISRAEL FLOTA BAÑUELOS**



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, FEBRERO DE 2017



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ  
DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA Y APROBADA COMO  
REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN MECATRÓNICA**

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

  
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC

ASESOR:

  
DR. VÍCTOR MANUEL SÁNCHEZ HUERTA

ASESOR:

  
DR. HOMERO TORAL CRUZ

ASESOR:

  
DRA. DANIELLA ESPERANZA PACHECO CATALÁN



  
DR. MANUEL ISRAEL FLOTA BAÑUELOS

QUINTANA ROO, MÉXICO, FEBRERO DE 2017.

---

## *AGRADECIMIENTO*

---

A mi director de tesis, Dr. Freddy Ignacio Chan Puc, por su amistad, apoyo, confianza y sobre todo por su paciencia para conmigo durante el desarrollo y termino de este trabajo de tesis.

A los miembros del comité de revisión de este trabajo, al Dr. Víctor Manuel Sánchez Huerta, Dr. Homero Toral Cruz, Dra. Daniella Esperanza Pacheco Catalán y al Dr. Manuel Israel Flota Bañuelos por haber enriquecido este trabajo con sus acertadas observaciones y comentarios. Además les agradezco por haber sido mis profesores durante este posgrado.

Al Dr. José Hernández Rodríguez, M.E.S. Roberto Acosta Olea, M.C. Emmanuel Torres Montalvo, M.C. Juan Carlos Ávila Reveles, Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool, Dr. Javier Vázquez Castillo, Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar, Dr. Fernando Flores Murrieta, Dr. Jaime Silverio Ortegón Aguilar, por haber compartido sus conocimientos y experiencias profesionales en el salón de clases.

A mis amigos y compañeros de la maestría, Jesús Álvarez, Javier Rivas, Raúl García, Omar Pérez, Carlos Cedano, Cesar Iuit, Víctor Arcos, Noel Pat, David Rivas y Gilmer Pat, por su amistad y compañerismo durante estos dos años de desvelos, trabajo en equipo y de los mejores momentos compartidos.

Al personal de la DCI por su amistad, amabilidad y actitud de servicio, porque siempre me apoyaron cuando más lo he necesitado en especial aprecio a Neidy, Rosy, Cathy, Marisol, Lourdes y Felipe.

A todas las personas que estuvieron presentes de una u otra forma ofreciéndome su apoyo incondicionalmente para lograr mí objetivo deseado.

**!!! MUCHAS GRACIAS !!!**

---

*A Mi Familia*

---

*Este trabajo de tesis la dedico primeramente a Dios por acompañarme siempre y guiarme por los senderos del conocimiento y que siempre me ha bendecido en cada instante de mi vida, gracias Señor*

Con todo mi amor, admiración y respeto:

A mi madre, María Santa Javier García quien es mi pilar fundamental en todos los acontecimientos de mi vida; apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mi esposa Melanie, mi amor incondicional, por comprenderme y darme esa fuerza para seguir adelante.

Gracias en verdad amor por todas y cada una de esas palabras de aliento que me han motivado a seguir adelante.

A mis hermosos hijos, Marlon y Eduardo por su motivación y esas sonrisas que me motivaron a nunca vencerme.

A mis hermanos Jesús Alberto, Ángel Zeus, Mauricio Geovanny y Lluvia de Abril Alpuche Javier porque siempre estuvieron conmigo en los momentos más difíciles apoyándome y por todo ese cariño de hermanos que me han demostrado siempre.

**iii GRACIAS FAMILIA !!!**

# **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN GESTOR DE ENERGÍA PARA UN SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA**

Ing. Marlon Brando Alpuche Javier

## **RESUMEN**

Las redes eléctricas son fundamentales para el desarrollo industrial y la calidad de vida de cada país. El avance tecnológico implica la necesidad del uso de energía eléctrica, sin embargo, el compromiso ambiental obliga el uso de fuentes de energía renovable, es por ellos que las redes eléctricas tradicionales se enfrentan a grandes desafíos, como el abastecimiento de energía eléctrica para todos los usuarios, la confiabilidad, la reducción de contaminantes hacia la atmosfera entre otros. Es necesario el desarrollo de generación de energía distribuida que permita la implementación de fuentes limpias y con ello combatir los retos actuales de las redes que nos acontecen.

Este trabajo de investigación se desarrolla en los esquemas de las redes inteligentes (Micro Smart Grid), cuyo propósito principal es optimizar el uso de la energía eléctrica en los sistemas fotovoltaicos (SFV) interconectado a la red eléctrica mediante inversores. Para llevar a cabo dicha optimización y hacer más eficiente el uso de la energía, se deberá desarrollar e implementar un gestor de energía que determina las reconfiguraciones de los elementos que conforman la micro-red eléctrica.

Se propone un gestor de energía basado en un microcontrolador. El gestor de energía tiene como objetivo principal reconfigurar tanto a los módulos fotovoltaicos (MFV) así como las cargas conectadas bajo ciertas condiciones de consumo de energía eléctrica. Primeramente, el gestor tomará decisiones ante fallas, corregirá desbalance de cargas, podrá reconfigurar y reconectar cargas de manera inteligente. Otro punto importante que el gestor de energía debe analizar las redes eléctricas y por medio del algoritmo de reconfiguración, optimizar y hacer más eficiente el uso de la energía

Se desarrollaron varias pruebas experimentales, afin de caracterizar tanto al inversor, las reconfiguraciones de fuentes y la reconfiguración de cargas.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>vi</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 ENERGÍAS RENOVABLES.....	3
1.3 ENERGÍA SOLAR.....	4
1.4 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	5
1.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (SFV) .....	5
1.6 INVERSORES .....	7
1.7 INTERFAZ CON LA RED ELÉCTRICA.....	7
1.8 SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED (SFVI) .....	8
1.9 SISTEMAS SMART GRID.....	10
1.10 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.11 JUSTIFICACIÓN.....	12
1.12 OBJETIVO GENERAL .....	13
1.13 OBJETIVOS PARTICULARES .....	13
1.14 ALCANCES DE LA TESIS.....	13
1.15 METODOLOGÍA.....	13
<b>CAPÍTULO II. ANÁLISIS Y DISEÑO DEL GESTOR.....</b>	<b>15</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA .....	15
2.2 INVERSOR CON INTERCONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA.....	16
2.3 EL GESTOR DE ENERGÍA .....	17

2.4	LEYES DE OPERACIÓN DEL GESTOR .....	18
2.5	ANÁLISIS LÓGICO DEL GESTOR .....	18
2.6	CONFIGURACIÓN DE LOS MFV .....	19
2.7	CONFIGURACIÓN DE LOS INVERSORES.....	21
2.8	CONFIGURACIÓN DE LAS CARGAS CONECTADAS.....	23
2.9	ANÁLISIS DEL CIRCUITO DEL GESTOR DE ENERGÍA.....	25
2.10	CONSTRUCCIÓN DEL GESTOR DE ENERGÍA.....	26
2.11	DISEÑO DE LAS PLACAS DE PCB DEL GESTOR DE ENERGÍA Y DEL CONTROL EN ULTIBOARD..	28
2.12	PROGRAMACIÓN DEL PIC USANDO LOS CRITERIOS DE OPERACIÓN DEL GESTOR.....	31
2.13	PRUEBAS DE CONTROL AL PCB DEL GESTOR USANDO EL PIC .....	34
2.14	PRUEBAS AL SENSOR DE CORRIENTE.....	36
2.15	PRUEBAS CON EL ARDUINO UNO.....	37

### **CAPÍTULO III. ALGORITMO DEL GESTOR DE ENERGÍA..... 39**

3.1	DIAGRAMA DE FLUJO DEL GESTOR.....	39
3.2	INICIO DEL PROGRAMA (START).....	41
3.3	CONFIGURACIÓN INICIAL Y VARIABLES .....	41
3.4	FALLAS EN LOS INVERSORES .....	42
3.5	CONMUTACIÓN DE LOS MFV .....	43
3.6	CALCULO DE DESBALANCE DE CORRIENTE .....	44
3.7	COMPARACIÓN DE LAS CORRIENTES DE CADA FASE .....	45
3.8	CONMUTACIÓN DE CARGAS NO CRITICAS.....	46
3.9	TIEMPO DE RECUPERACIÓN.....	47
3.10	DESCONEXIÓN DE CARGAS NO CRÍTICAS.....	48
3.11	CALCULO DE DESBALANCE DE VOLTAJE.....	49
3.12	COMPARACIÓN DE LOS VOLTAJES DE CADA FASE .....	50

3.13	CONMUTACIÓN DE LOS INVERSORES .....	51
3.14	TIEMPO DE SINCRONÍA CON LA RED ELÉCTRICA.....	52
3.15	FIN DEL PROGRAMA .....	53
<b>CAPÍTULO IV. PRUEBAS EXPERIMENTALES.....</b>		<b>54</b>
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL INVERSOR INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA.....	54
4.2	PRUEBAS DE VOLTAJE DE ENTRADA AL INVERSOR.....	54
4.3	PRUEBAS DE CORRIENTE SUMINISTRADA POR EL INVERSOR .....	56
4.4	PRUEBAS DE LA ETAPA DE GENERACIÓN.....	58
4.5	PRUEBAS DE LA ETAPA DE CARGAS.....	62
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>69</b>



# LISTA DE FIGURAS

---

## CAPITULO I

*Fig. 1.1 Clasificación de las fuentes de energía*

*Fig. 1.2 Arreglos fotovoltaicos*

*Fig. 1.3 Elementos de un SFV*

*Fig. 1.4 Conversión de la corriente de entrada CD a CA.*

*Fig. 1.5 Diagrama a bloques de un sistema fotovoltaico interconectado*

*Fig. 1.6 Esquema de un sistema interconectado a la red*

*Fig. 1.7 Esquema de un inversor central*

*Fig. 1.8 Esquema de los inversores modulares*

## CAPITULO II

*Fig. 2.1 componentes para un SFVI*

*Fig. 2.2 Inversor Smart Grid 250GT*

*Fig. 2.3 Interruptor de transferencia*

*Fig. 2.4 Interruptor de transferencia para los MFV*

*Fig. 2.5 Combinaciones de las condiciones lógicas del interruptor de transferencia para los MFV*

*Fig. 2.6 Interruptor de transferencia para los inversores*

*Fig. 2.7 Combinaciones de las condiciones lógicas del interruptor de transferencia para los inversores*

*Fig. 2.8 Interruptores de transferencia para las cargas NO críticas*

*Fig. 2.9 Combinaciones de las condiciones lógicas del interruptor de transferencia para las cargas*

*Fig. 2.10 Circuito del gestor de energía*

*Fig. 2.11 Diseño del gestor de energía*

*Fig. 2.12 Placa terminada del gestor de energía*

*Fig. 2.13 Diseño del microcontrolador PIC*

*Fig. 2.14 Circuito del PIC terminado*

*Fig. 2.15 Código de PicBasic*

*Fig. 2.16 Conexiones eléctricas mediante cables eléctricos*

*Fig. 2.17 Pruebas a la tarjeta del Gestor usando el circuito de control PIC*

*Fig. 2.18 Indicadores de los interruptores de transferencia*

*Fig. 2.19 Sensor de corriente ACS712*

*Fig. 2.20 Conexión del sensor a una fuente de voltaje*

*Fig. 2.21 Arduino Uno*

### **CAPITULO III**

*Fig. 3.1 Diagrama de flujo del gestor*

*Fig.3.2 Inicio del programa*

*Fig.3.3 Variables declaradas*

*Fig.3.4 Fallas de inversores*

*Fig.3.5 Conmutación de los MFV*

*Fig.3.6 Operaciones básicas para la corriente*

*Fig.3.7 Calculo de desbalance de corriente*

*Fig.3.8 Reconexión de la carga RI*

*Fig.3.9 Tiempo de recuperación*

*Fig.3.10 Desconexión de cargas por desbalance de corriente*

*Fig.3.11 Operaciones básicas para el voltaje*

*Fig.3.12 Calculo de desbalance de voltaje*

*Fig.3.13 Reconexión de los inversores a la red eléctrica*

*Fig.3.14 Reconfiguración de los inversores a la red eléctrica*

*Fig.3.15 Fin del programa*

### **CAPITULO IV**

*Fig. 4.1 Señales de corriente y voltaje de entrada del inversor*

*Fig. 4.2 Señales de corriente de salida del inversor*

*Fig. 4.3 Modo inicial de operación*

*Fig. 4.4 Tiempo de sincronización del inversor*

*Fig. 4.5 Corrientes de entrada y salida del inversor sincronizado con la red.*

*Fig. 4.6 Condición de reconfiguración ante la falla de un inversor.*

*Fig. 4.7 Reconfiguración de dos fuentes a un inversor.*

*Fig. 4.8 Corrientes de entradas al inversor.*

*Fig. 4.9 Reconfiguración de cargas.*

*Fig. 4.10 Voltaje y corriente de salida del inversor sincronizado con la red.*

*Fig. 4.11 Corriente de salida del inversor en condiciones iniciales*

*Fig. 4.12 Corriente de salida del inversor ante la desconexión de algunas cargas no-lineales*

*Fig. 4.13 Corriente de salida del inversor ante la desconexión de algunas cargas no-lineales*

# LISTA DE TABLAS

---

## **CAPITULO II**

*Tabla 2.1. Placa de datos del MFV*

*Tabla 2.2 Condiciones de transferencia en parte de generación de energía.*

*Tabla 2.3 Condiciones de transferencia en parte de acondicionamiento.*

*Tabla 2.4 Condiciones de transferencia en parte de consumo de potencia*

*Tabla 2.5 Lista de materiales*

*Tabla 2.6. Especificaciones técnicas del Arduino*

## **CAPITULO IV**

*Tabla 4.1. Valores de las pruebas de voltaje y corriente a la entrada del inversor*

---

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 ANTECEDENTES

La energía eléctrica es uno de los principales recursos necesarios en el proceso de desarrollo tecnológico e industrial del ser humano. Como tal, es el elemento esencial para mejorar su desempeño y la calidad de vida del mismo. A consecuencia de lo anterior, del aumento poblacional y de la demanda generalizada por los diferentes sectores energéticos donde el uso de la energía eléctrica es cada vez mayor, surge la necesidad de considerar el análisis y estudio sobre el ahorro de energía eléctrica y la posibilidad de generar electricidad haciendo uso de los recursos renovables como es la energía solar.

La energía renovable tiene que ser regenerada naturalmente e indefinidamente en el tiempo; es por ello que la energía del sol responde a estos criterios en su abundancia en la tierra y su regeneración es prácticamente infinita. Se puede utilizar directamente como energía térmica o convertida en energía eléctrica por efecto fotovoltaico (FV).

Los sistemas fotovoltaicos, instalados en México, solo se podían encontrar en aplicaciones aisladas de la red eléctrica como proyectos de electrificación rural, comunicaciones, señalamientos, bombeo de agua y refrigeración. Sin embargo, con los avances tecnológicos así como las técnicas y aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos (SFV) a partir del año 2007 se cuenta con registros de aplicaciones conectadas a la red eléctrica, esto según la asociación de energía solar (ANES). Esta tendencia se ha mantenido en los años posteriores hasta en la actualidad.

El concepto Smart Grid o Red Eléctrica Inteligente (REI) consiste en la incorporación de “inteligencia” a la operación de las Redes Eléctricas a través del uso de nuevas tecnologías. Con esta “inteligencia” será factible la integración a la red eléctrica de los siguientes recursos:

- ✓ Generación Distribuida
- ✓ Fuentes de Generación Renovable
- ✓ Sistemas de Almacenamiento de Energía

Asimismo, permitirá la implantación de los mecanismos de control de la demanda y medición automática.

Las redes eléctricas se han adaptado a la modernización tecnológica para satisfacer las necesidades del usuario y de esta manera se vuelven más eficientes, con menores pérdidas de energía, mejor calidad de consumo, así como también la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. La implementación de las redes inteligentes facilitará de gran utilidad para realizar una gestión eficiente de sus consumos eléctricos en el caso de los consumidores, y por consiguiente el ahorro energético y económico. El sistema gestionara mejor la demanda y reducirá la dependencia de las plantas de generación convencionales mediante el uso de sistemas renovables, tales como son los sistemas fotovoltaicos y eólicos.

En este trabajo de tesis se enfocara en optimizar el uso de la energía eléctrica implementado sistemas fotovoltaicos y con interconexión a la red. Este sistema se basará en un gestor de energía el cual tendrá como función principal el manejo de potencia de todo el sistema. También se controlará las cargas no críticas del sistema.

El gestor de energía tiene como objetivo principal reconfigurar tanto a los nódulos fotovoltaicos (MFV) como las cargas conectadas bajo ciertas condiciones de generación y consumo de energía eléctrica. Primeramente el gestor tomará decisiones ante fallas, corregirá desbalance de cargas, podrá reconfigurar y reconectar cargas de manera inteligente. Otro punto importante que el gestor de energía debe analizar las redes eléctricas y por medio del algoritmo de reconfiguración, optimizar y hacer más eficiente el uso de la energía [1].

## 1.2 ENERGÍAS RENOVABLES

Los mercados energéticos tienen características que dependen de la naturaleza de los combustibles, de la organización industrial y de las políticas energéticas de cada país. Por lo tanto las energías renovables han tenido un crecimiento en las últimas décadas, que porcentualmente supera al de las fuentes convencionales.

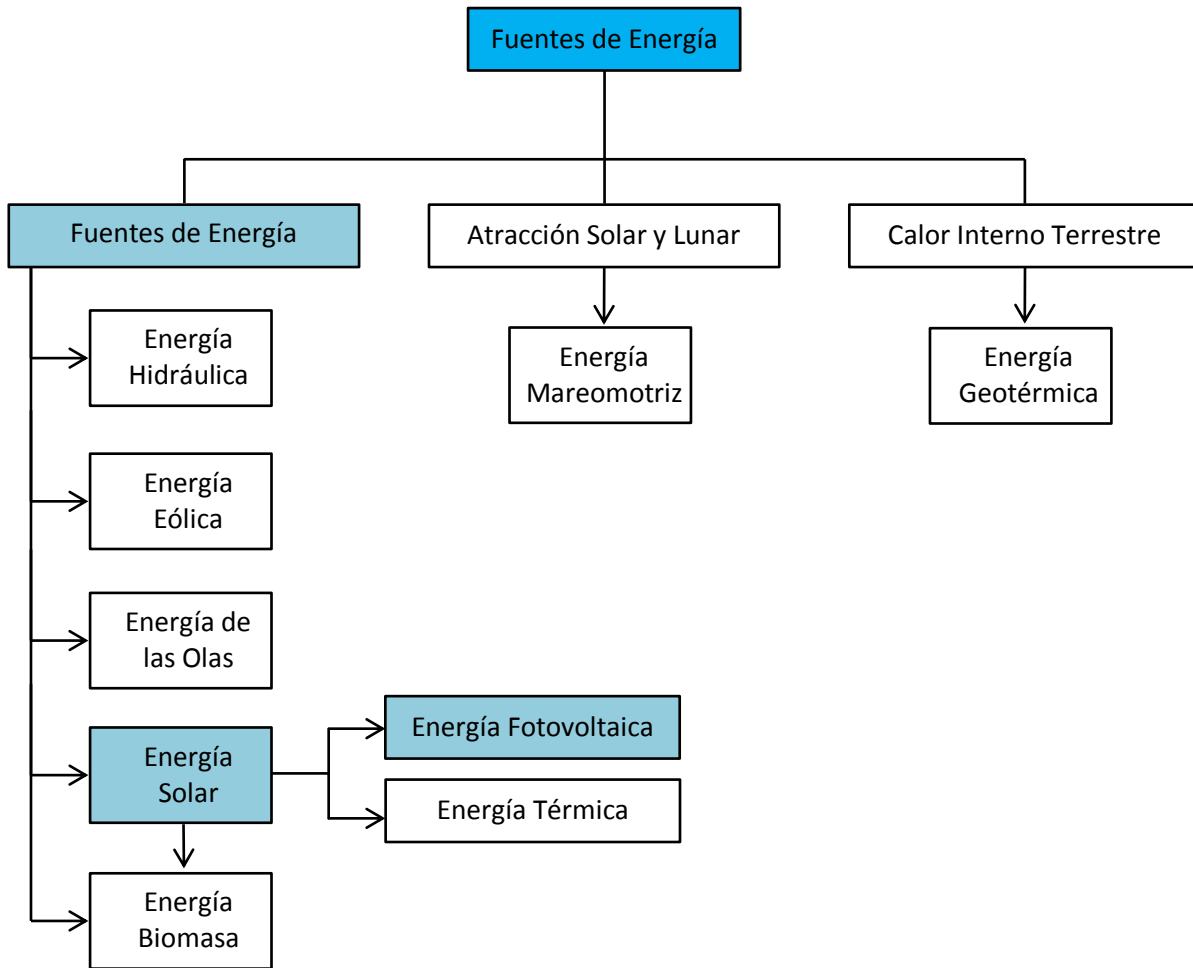
Se estima que a nivel mundial, la generación de energía por medio de fuentes naturales aumentara a 25% de la generación bruta de electricidad en 2018, frente a los años pasados como fueron el 20% en 2011 y 19% en 2006.

México es uno de los países con políticas de desarrollo sustentable, donde ratifica el compromiso para incrementar el uso de las energías renovables como un medio para reducir el impacto ambiental, así mismo para fortalecer la residencia de los mercados energéticos y por lo tanto propiciar el desarrollo de este tipo de tecnologías en la comunidad consumidora de electricidad.

Las políticas de sustentabilidad buscan incrementar la eficiencia energética y el aprovechamiento máximo de las energías renovables en nuestro país con una visión de largo plazo y de la misma manera se tiene como objetivo la mitigación del cambio climático.

Las energías renovables son aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, proceso o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad y que se regenera naturalmente, por lo que se encuentra disponible de forma continua, y lo cual perdurarán por miles de años.

Las fuentes de energía renovables como tal, se puede clasificar de distintas formas, y una de ellas es por medio de la radiación solar, tal como se muestra en la figura 1.1



*Fig. 1.1 Clasificación de las fuentes de energía*

### 1.3 ENERGÍA SOLAR

La energía del sol es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el sol. La radiación solar que alcanza la tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce a través de la absorción de la radiación.

La energía solar es una energía renovable que no contamina, conocida también como energía limpia o energía verde. La energía solar se puede transformar de dos maneras, la primera utiliza una parte del espectro electromagnético de la energía del sol para producir calor, la cual se le denomina energía solar térmica.

La segunda utiliza la otra parte del espectro electromagnético del sol para producir electricidad, llamada también como energía solar fotovoltaica. La transformación se realiza por medio de módulos fotovoltaicos (MFV).

#### **1.4 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Es una de las energías más abundante y prometedoras de las energías renovables en el mundo. A través de los MFV, es factible proveer energía eléctrica por medio de la conversión del fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico.

Este tipo de energía comparada con las fuentes convencionales, tiene muchas ventajas claras, tales como:

- ✓ No son contaminantes
- ✓ No requieren mucho mantenimiento
- ✓ No requieren una extensa instalación para operar
- ✓ No consumen combustibles fósiles
- ✓ No generan ruido, totalmente silenciosos
- ✓ Prácticamente es una fuente inagotable

En general los MFV, tienen una vida útil de operación hasta los 25 años aproximadamente.

#### **1.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (SFV)**

Son arreglos de módulos fotovoltaicos, conectados entre sí en serie, en paralelo o mixto según sea necesario de acuerdo a la figura 1.2; la función es convertir la energía solar directamente en energía eléctrica, después se acondiciona la señal eléctrica, esta última por medio de electrónica de potencia, por último se usara de acuerdo a los requerimientos necesarios.



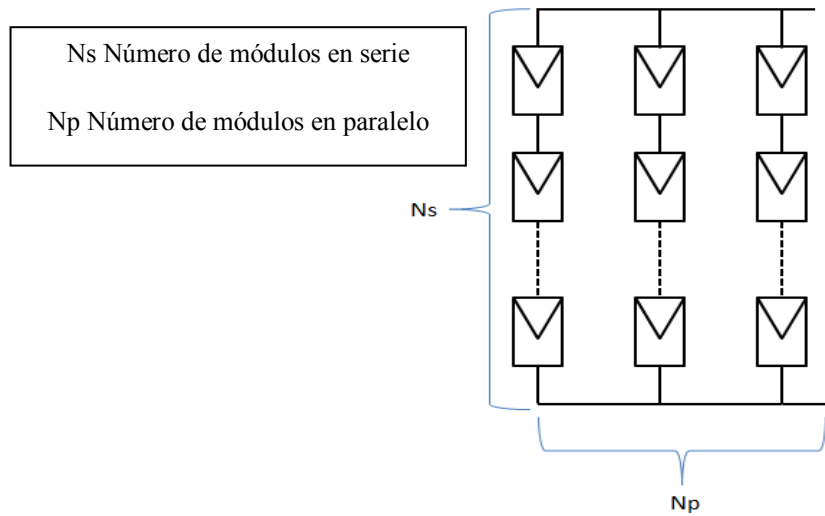


Fig. 1.2 Arreglos fotovoltaicos

Los principales elementos de un sistema fotovoltaico (SFV) se muestran en la figura 1.3:

- ✓ Arreglo de módulos fotovoltaicos
- ✓ El inversor de corriente de CD a CA.
- ✓ Cables e interruptores
- ✓ Estructuras y montajes
- ✓ Cargas en CA.

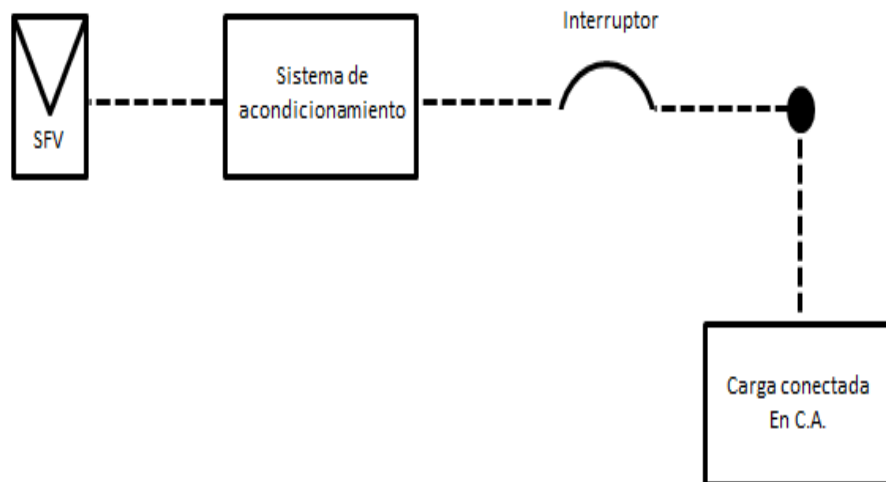
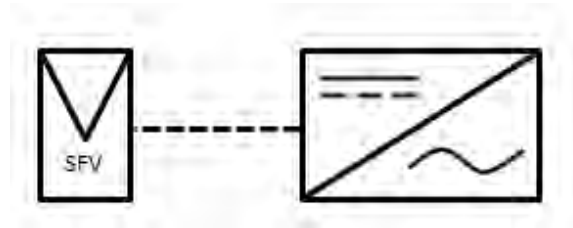


Fig. 1.3 Elementos de un SFV

## 1.6 INVERSORES

Es un dispositivo electrónico de potencia, también llamado convertidor electrostático, cuya función principal es convertir la señal de CD de salida de un sistema fotovoltaico (SFV) en una señal de CA sincronizada con la red. A éste se le refiere como el elemento central de a interfaz entre la fuente de generación de energía fotovoltaica y la red eléctrica.

La señal de salida de este dispositivo puede ser monofásica o trifásica de acuerdo al tipo de carga instalada en el inmueble. Los inversores realizan otras funciones tales como protección y control para el funcionamiento eficiente y seguro de la energía generada; por lo que es referenciado como un subsistema de acondicionamiento de potencia tal como se muestra en 1.4 [2].



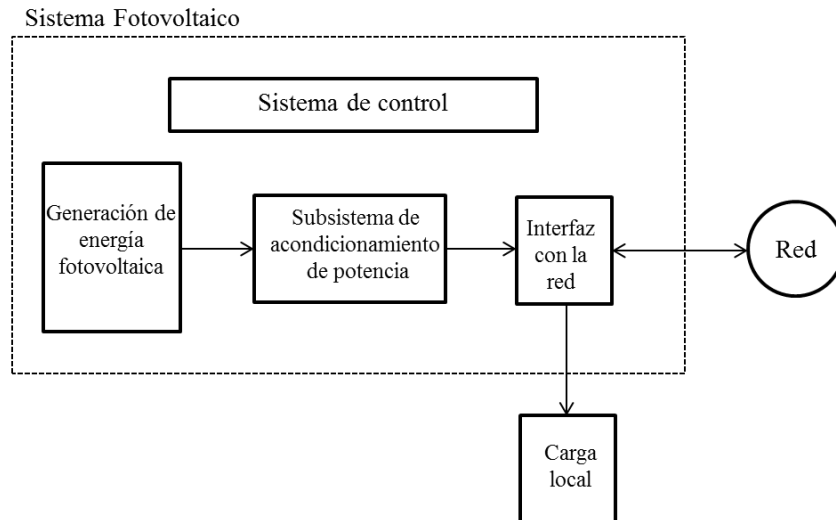
*Fig. 1.4 Conversión de la corriente de entrada CD a CA.*

## 1.7 INTERFAZ CON LA RED ELÉCTRICA

La señal de salida del inversor se conecta con las cargas CA instaladas del inmueble así como también con el sistema eléctrico de distribución. Permite al SFV operar en paralelo con la red para que la energía pueda fluir en uno u otro sentido entre la red y la interfaz; por lo tanto se puede tener las siguientes funciones:

- ✓ Distribución de la CA que fluye entre el sistema de acondicionamiento de potencia, las cargas conectadas y las líneas de distribución de la red.
- ✓ Provisión de los medios de desconexión para seguridad y mantenimiento de los equipos.
- ✓ Medición de flujo de energía entre el sistema, las cargas locales y la red eléctrica.
- ✓ Protección para el sistema de CA que no sean proporcionadas por el inversor.

En la figura 1.5 se muestra el diagrama a bloque donde se representa la interfaz con la red eléctrica:



*Fig. 1.5 Diagrama a bloques de un sistema fotovoltaico interconectado*

## 1.8 SISTEMA FOTOVOLTAICO INTERCONECTADO A LA RED (SFVI)

El sistema fotovoltaico interconectado (SFVI) consiste en la integración de varios componentes, cada uno de ellos cumpliendo con una o más funciones específicas, a fin de que éste pueda aportar energía y de esta manera disminuir la demanda del consumo energético. Uno de los componentes del sistema es el módulo fotovoltaico, el cual genera energía en corriente directa (CD) a partir de un arreglo eléctrico y por medio de un inversor convierte la energía generada en corriente alterna (CA), así como la tensión y frecuencia necesaria para sincronizarse a la red eléctrica. Estos equipos cuentan con las protecciones necesarias para operar de manera óptima con la red eléctrica y cumplen con las especificaciones de la compañía suministradora de energía (CFE) para estos equipos instalados. [3]

Al conectarse en paralelo con la red, el SFV contribuye al suministro de la energía demandada a la red. Las cargas conectadas en la instalación del consumidor, pueden ser alimentadas por cualquiera de las dos fuentes existentes o por ambas simultáneamente, dependiendo de los valores instantáneos de las cargas, así como de la potencia de salida de los SFV. Es por ello que se debe instalar un medidor de energía eléctrica tipo bidireccional. Estos medidores tienen la capacidad de medir la energía que se utiliza de la red así como la energía que el sistema de energía renovable entrega a la red eléctrica, es decir los excedentes de energía. El flujo de energía de un sistema fotovoltaico interconectado se muestra a continuación en la siguiente figura

A continuación, en la figura 1.6 se muestra el esquema de conexión de un sistema fotovoltaico interconectado a la red eléctrica el cual consta de los siguientes elementos:

- ✓ La generación de energía
- ✓ El convertidor de potencia
- ✓ El sistema de protección
- ✓ Las cargas conectadas
- ✓ La medición del flujo de energía
- ✓ La fuente suministradora (CFE)

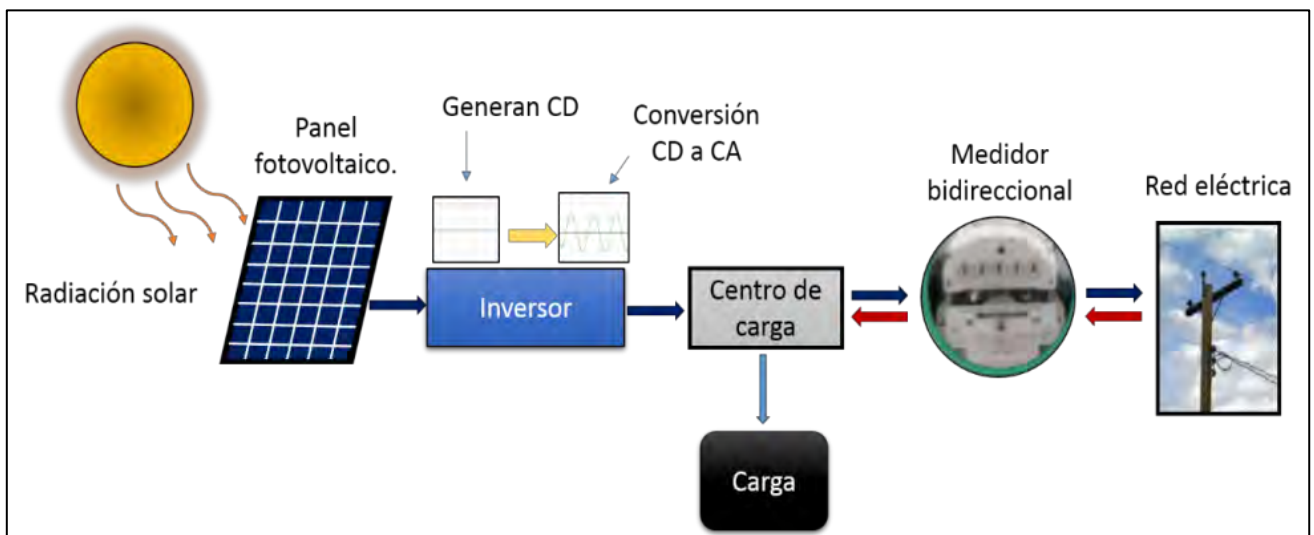


Fig. 1.6 Esquema de un sistema interconectado a la red

## 1.9 SISTEMAS SMART GRID

El aumento de la demanda de potencia en el mundo, en particular en México; han hecho que se suministre energía fotovoltaica a la red eléctrica mediante la conversión de energía a CA. Los módulos fotovoltaicos (MFV) fueron en el pasado los elementos más costosos de éstos sistemas, pero hoy en día se encuentra una tendencia a la baja en el precio de los MFV, y por la misma razón el costo de los inversores interconectados a la red monofásica, son cada vez más viables.

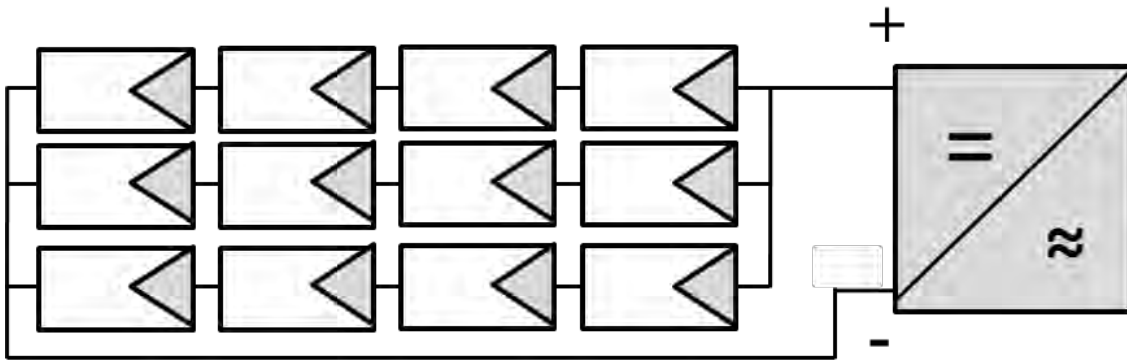
Los avances en los diseños y materiales usados para la fabricación de los módulos fotovoltaicos, así como los sistemas eólicos, las celdas de combustible entre otros sistemas de generación de energía renovables, han permitido adaptarse a los sistemas de generación de energía convencionales para satisfacer las necesidades específicas de los consumidores.

A medida que estos recursos se vuelvan intermitentes en la naturaleza, la red eléctrica necesita sistemas integrados como son la supervisión y el control. De igual manera, se requiere la automatización de subestaciones para controlar y administrar los diferentes flujos de energía que provengan de la generación de energía renovable. [4]

En el caso de los inversores conectado a la red, deben presentar una onda senoidal pura. Esto es debido a que la salida, la forma de onda, deber ser prácticamente idéntica a la de la red para permitir el buen funcionamiento del sistema. Además de proporcionar una frecuencia correcta también deben regular la tensión de salida, haciéndola coincidir con los valores de trabajo determinados.

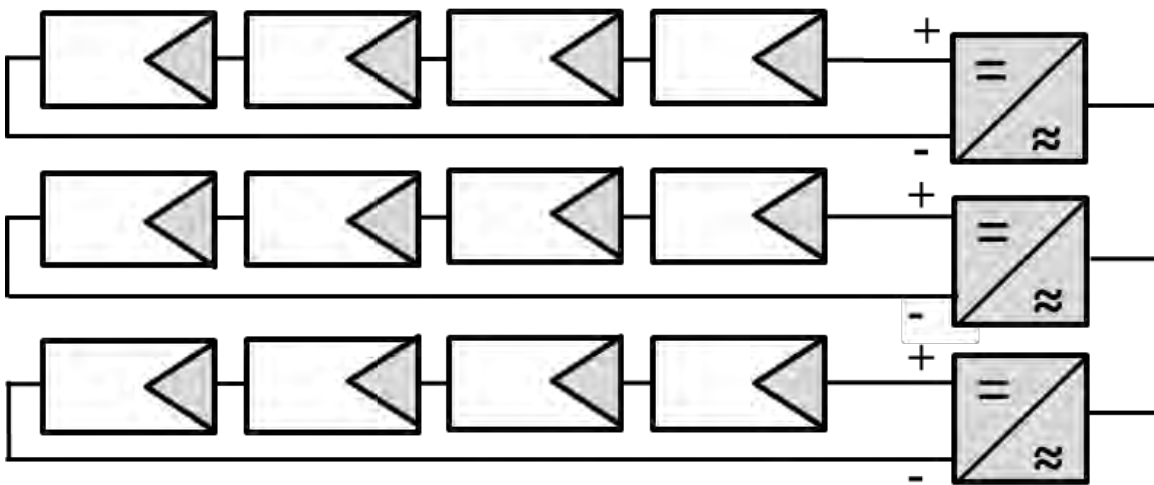
Los inversores de conexión a la red se clasifican según la configuración del sistema:

Inversores centrales, donde la instalación fotovoltaica dispone de un único inversor, generalmente trifásico y de alta potencia, como se observa en la siguiente figura 1.7



*Fig. 1.7 Esquema de un inversor central*

Los inversores modulares: también denominados “string inverters” tienen potencias que oscilan hasta los 5 kW, generalmente monofásicos (figura 1.8)



*Fig. 1.8 Esquema de los inversores modulares*

### 1.10 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los requerimientos actuales en el uso eficiente de la energía plantean grandes retos para la ingeniería. Existe una diversidad de soluciones para esta temática desde sistemas redundantes, segmentación de módulos, sistemas en paralelo, gestores de energía, sistemas inteligentes de conexión de carga, etc. En este trabajo se propone desarrollar un sistema que gestione, controle y haga eficiente el flujo de potencia en un sistema de generación de energía basado en módulos fotovoltaicos. De igual manera se contara con un sistema inteligente de conexión y distribución de cargas. Se considera a priori como sistema inteligente básico dado que es capaz de percibir, razonar y actuar el gestor de energía. Quedando para trabajos futuros el proceso de aprendizaje, aplicando otras técnicas de control inteligente más complejas, como son las llamadas redes neuronales, sistemas expertos, algoritmo genético entre otros.

### 1.11 JUSTIFICACIÓN

Con la implementación de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (SFVI); el panorama energético ha cambiado notablemente en los flujos de energía en la red eléctrica. Ahora los usuarios no solo son consumidores, sino también tiene la posibilidad de producir energía limpia y segura, por medio de los sistemas fotovoltaicos, y aportarlo a la red de la compañía suministradora; de esta manera el flujo de potencia se vuelve bidireccional. Implementando un sistema que controle y optimice la generación, el acondicionamiento y el consumo energético, como es el gestor de energía, ahora el sistema se convierte en una micro red inteligente ( $\mu$ Smart Grid). Esto ayudará ahorrar y reducir costos en la facturación eléctrica.

La transformación hacia una red inteligente, promete cambiar por completo el esquema tradicional del modelo comercial actual y la relación de la industria eléctrica con todos los productores de pequeña y mediana escala. Este tipo de redes inteligentes optimizan los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, beneficiando de esta manera tanto a consumidores como productores

### 1.12 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar e implementar un gestor de energía para inversores fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica, implementando la tecnología  $\mu$ Smart Grid para optimizar y hacer más eficiente la energía.

### 1.13 OBJETIVOS PARTICULARES

- a. Analizar las micro-redes inteligentes ( $\mu$ Smart Grid)
- b. Determinar las leyes de operación para el gestor de energía
- c. Estudiar los algoritmos para el gestor de energía
- d. Diseñar y simular un gestor de energía basado en un microcontrolador
- e. Implementar el gestor de energía

### 1.14 ALCANCES DE LA TESIS

Desarrollo de un gestor de energía para un sistema monofásico a 3 hilos, 220 Volt. Para conectar o desconectar al sistemas de generación fotovoltaico, el acondicionamiento de potencia, inversor, y las cargas conectadas a cada uno de las fases del sistema bifásico.

### 1.15 METODOLOGÍA

1. **Revisión de bibliografía y estado del arte:** revisión bibliográfica del tema. Investigación en artículos de revista científicos y libros.
2. **Seleccionar el tipo de inversor para el SFV:** seleccionar el inversor el cual cumpla con las necesidades del tema de tesis, así como también características específicas como la eficiencia mínima requerida del 80% así como el costo del mismo debe adaptarse al proyecto.
3. **Determinar las leyes del gestor de energía:** se analizarán las leyes de redundancia, así como las leyes de función de operación del gestor de energía.



4. **Determinar los algoritmos para el gestor de energía:** se analizará y determinará las operaciones sistemáticas para las leyes de redundancia y operación del gestor. Así como también el análisis de flujo de energía y balance de carga para dicha funcionalidad.
  
5. **Diseñar el gestor de energía:** se diseñara un gestor de energía el cual tendrá como propósito la reconfiguración de operación del sistema de generación de energía así como también el de las cargas conectadas. Lo anterior se realizará mediante circuitos integrados, arreglo de interruptores de transferencia (Swich), sensores de corriente entre otros.
  
6. **Pruebas del circuito del gestor de energía:** una vez que se tiene la construcción del circuito se realizarán pruebas y mediciones de los parámetros eléctricos antes mencionados. Se utilizarán equipos de laboratorio para llevar a cabo estas mediciones como son: osciloscopios y multímetros.

---

## CAPÍTULO II

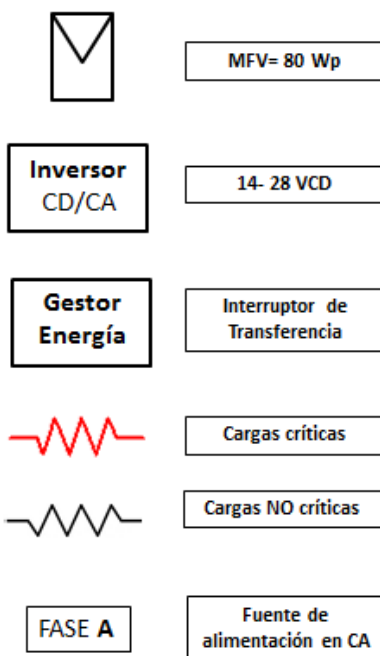
### ANÁLISIS Y DISEÑO DEL GESTOR

---

#### 2.1 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA

Se realiza una descripción de los componentes importantes que se usaron para la instalación del sistema de generación y conversión de la energía, la cual ayudará a la red eléctrica, en este caso el consumo eléctrico del usuario.

En el siguiente figura 2.1 se presenta los elementos que conforma el sistema interconectado que se implementó junto con en el gestor de energía.



*Fig. 2.1 componentes para un SFVI*

## 2.1 LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Se usarán seis MFV policristalino de la marca “TOTAL ENERGIE”, con capacidad de 80 Wp cada uno; los cuales son conectados en paralelo para obtener una capacidad total de 240 Wp para cada uno de los inversores. A continuación se muestra la placa de especificaciones del MFV con el que se trabajó. Ver tabla 2.1

Tabla 2.1. Placa de datos del MFV

Marca	TOTAL ENERGIE
Modelo	TE850
Potencia Máxima	80 W <sub>p</sub>
Voltaje Máximo	17.3 V
Corriente Máxima	4.6.A
Corriente de Corto Circuito	5 A
Voltaje de Circuito Abierto	21.8 V
Potencia Mínima	77.5 W <sub>p</sub>

## 2.2 INVERSOR CON INTERCONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA

Los inversores utilizados para el interconectado a la red eléctrica, son el modelo 250GT para aerogenerador y solar; con capacidad de 250 W, con un voltaje de entrada de 14 a 28 VCD y la salida de 110 VCA, opera en un rango de frecuencia de 45 Hz a 65 Hz y con una eficiencia de 92%. El inversor se conectará a la red eléctrica comercial. En la siguiente imagen 2.2 se muestra el inversor utilizado.



*Fig. 2.2 Inversor Smart Grid 250GT*

### **2.3 EL GESTOR DE ENERGÍA**

El gestor de energía tiene como objetivo principal reconfigurar tanto a los módulos fotovoltaicos (MFV) como las cargas conectadas bajo ciertas condiciones de generación y consumo de energía eléctrica. Primeramente el gestor tomará decisiones ante fallas, corregirá desbalance de cargas, podrá reconfigurar y reconectar cargas de manera inteligente.

El objetivo del gestor de energía es analizar las redes eléctricas y por medio de la tecnología  $\mu$ Smart Grid, de esta manera optimizar y hacer más eficiente la energía. Para lograr lo anterior es necesario determinar las leyes de operación para el gestor.

## 2.4 LEYES DE OPERACIÓN DEL GESTOR

Se analizaron las leyes de redundancia, así como las leyes de función de operación del gestor de energía para determinar la forma en la que tomara decisiones el interruptor de transferencia. Para ello es necesario realizar el análisis de las diferentes condiciones en las etapas de generación, conversión y distribución de la energía generada por el sistema fotovoltaico

## 2.5 ANÁLISIS LÓGICO DEL GESTOR

Para analizar las secuencias y la operación del interruptor de transferencia en las diferentes etapas

y condiciones del sistema, será necesario definir lo siguiente:

“0”: posición del interruptor de transferencia el cual conduce

“1”: posición del interruptor de transferencia el cual NO conduce

$S_i$  : interruptor de transferencia

Lo anterior ayudará a entender el funcionamiento y la manera de cómo se realiza la transferencia de la energía, puesto que este dispositivo se encargará de guiar la energía de forma óptima. A continuación en la figura 2.3 se muestra el interruptor de transferencia y las posiciones en la que conmuta para que fluya la energía.

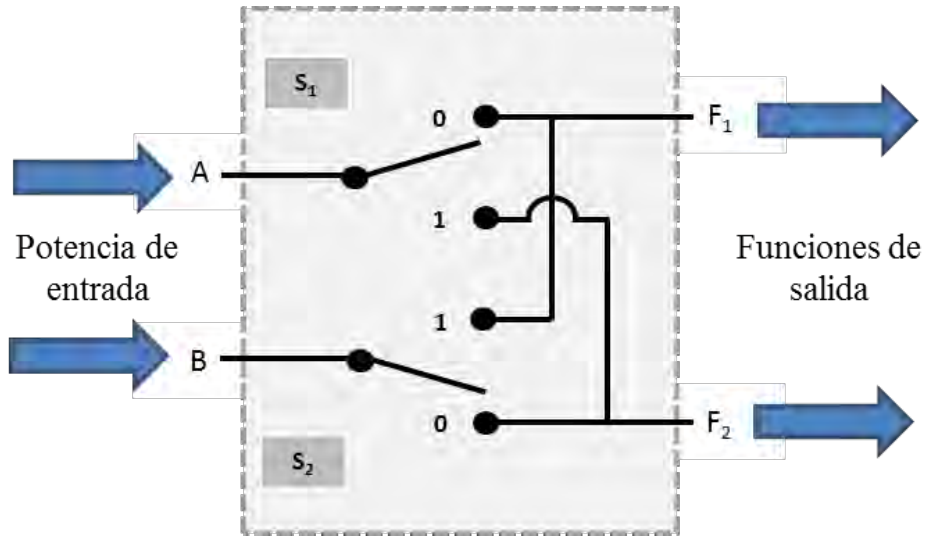


Fig. 2.3 Interruptor de transferencia

## 2.6 CONFIGURACIÓN DE LOS MFV

En la siguiente figura, 2.4; se muestra un diagrama a bloques del interruptor de transferencia en la sección de generación de energía. La tabla 2.1 nos presenta todas las conmutaciones posibles del interruptor de transferencia,  $S_1$  y  $S_2$ , en la parte de generación.

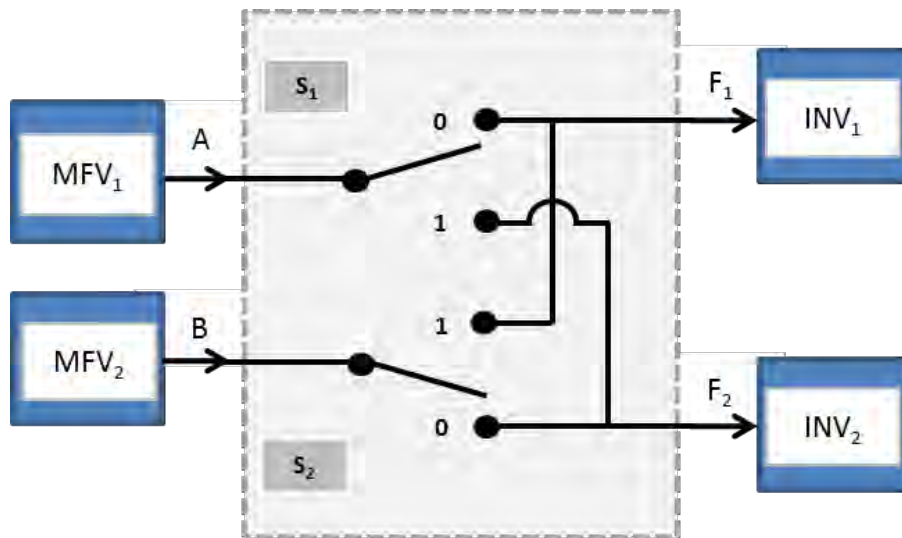


Fig. 2.4 Interruptor de transferencia para los MFV

A y B: son las potencias generadas por los MFV.

F<sub>1</sub> y F<sub>2</sub>: Funciones de salida del interruptor de transferencia.

Tabla 2.2 Condiciones de transferencia en parte de generación de energía.

CONDICIONES	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>
1.- Cada MFV conectado a su inversor correspondiente	0	0	A	B
2.- El MFV2 se conecta junto con MFV1 junto al inversor 1	0	1	A+B	0
3.- El MFV1 se conecta junto con MFV2 junto al inversor 2	1	0	0	A+B
4.- Los MFV se conmutan y conectan a los inversores	1	1	B	A

La siguiente figura muestra las posibles combinaciones que realiza el interruptor de transferencia en la etapa de generación de acuerdo a lo señalado en la tabla 2.2.

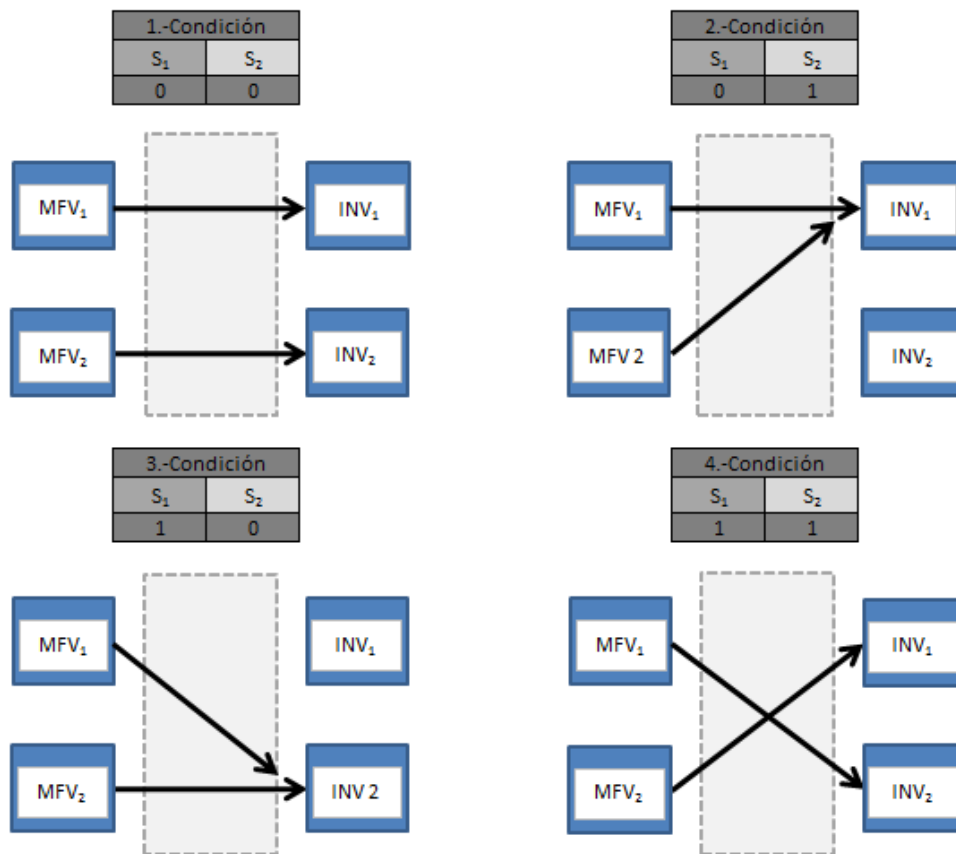


Fig. 2.5 Combinaciones de las condiciones lógicas del interruptor de transferencia para los MFV

La condición 1 es cuando los módulos fotovoltaicos se encuentran operando normalmente, es decir, cada MFV está conectado a su inversor correspondiente.

La condición 2 y 3 se da cuando los inversores presentan alguna falla, por lo tanto el interruptor de transferencia toma la decisión de reconfigurar los MFV y conectarlos en el inversor 1 o en el inversor 2, según donde se presente la falla.

La condición 4 es prácticamente la misma que la condición 1, por ello no se utiliza.

## 2.7 CONFIGURACIÓN DE LOS INVERSORES

En la siguiente figura, 2.6; se muestra un diagrama a bloques del interruptor de transferencia en la sección de acondicionamiento de energía (Inversores). La tabla 2.3 nos presenta todas las conmutaciones posibles del interruptor de transferencia,  $S_3$  y  $S_4$ , en la parte de acondicionamiento y su interconexión a la red de eléctrica (FASE<sub>A</sub> y FASE<sub>B</sub>).

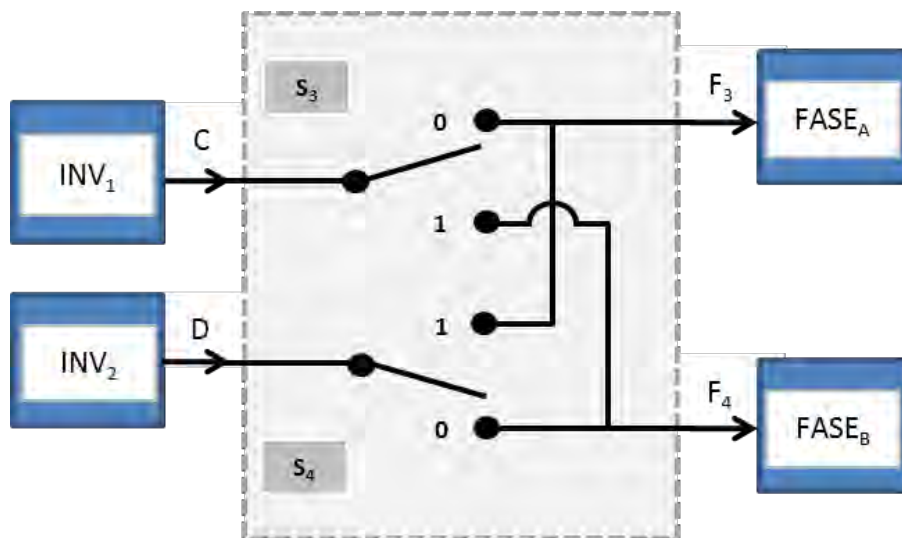


Fig. 2.6 Interruptor de transferencia para los inversores



C y D: son las potencias generadas por los inversores.

F<sub>3</sub> y F<sub>4</sub>: Funciones de salida del interruptor de transferencia.

Tabla 2.3 Condiciones de transferencia en parte de acondicionamiento.

CONDICIONES	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
1.- Cada inversor conectado a su fase correspondiente	0	0	C	D
2.- El INV 2 se conecta junto con INV 1 en la fase A	0	1	C+D	0
3.- El INV 1 se conecta junto con INV 2 en la fase B	1	0	0	C+D
4.- Los inversores se conmutan y conectan a las fases	1	1	D	C

La siguiente figura muestra las posibles combinaciones que realiza el interruptor de trasferencia en la etapa de acondicionamiento de acuerdo a lo señalado en la tabla 2.3.

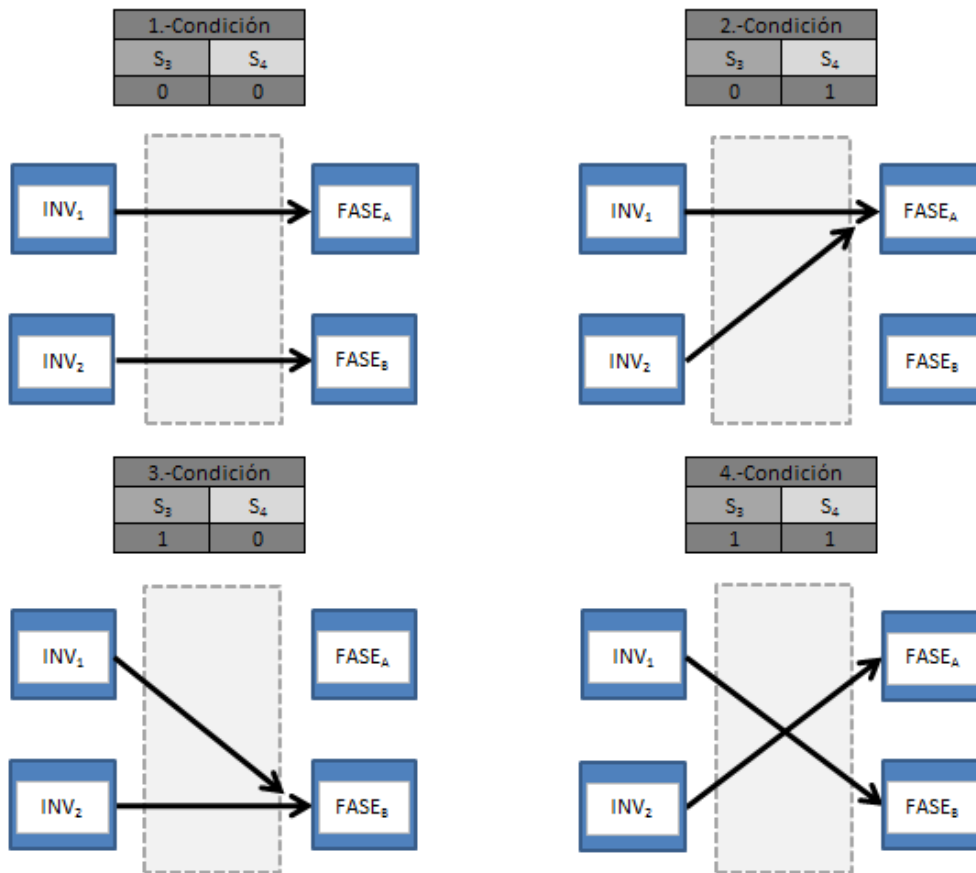


Fig. 2.7 Combinaciones de las condiciones lógicas del interruptor de transferencia para los inversores

La condición 1 es cuando los inversores operan normalmente y se encuentran conectados a las fases A y B respectivamente.

La condición 2 y 3 se presenta cuando hay un desbalance de tensión, sea en la fase A o en la fase B. el desbalance máximo permitido es del 5% sobre el valor del voltaje nominal.

La condición 4 es la misma que la condición 1.

## 2.8 CONFIGURACIÓN DE LAS CARGAS CONECTADAS

En este último diagrama a bloques se muestra las posibles reconfiguraciones de las cargas instaladas en cada una de las fases A y B, figura 2.8. Los interruptores  $S_7$  y  $S_8$  son para desconexión parcial o permanente de las cargas NO críticas.

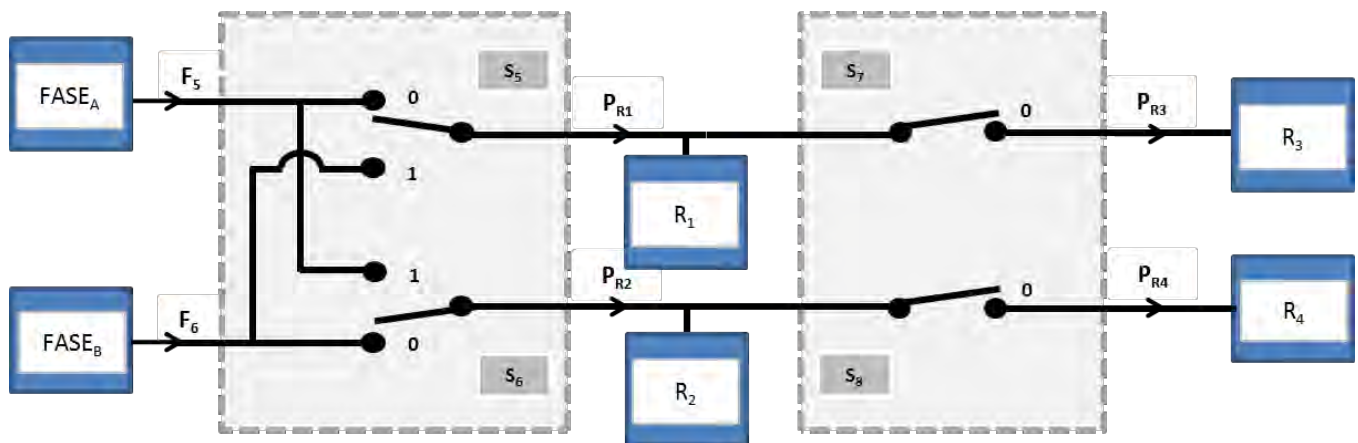


Fig. 2.8 Interruptores de transferencia para las cargas NO críticas

En la etapa de consumo de potencia por parte de las cargas conectadas, tenemos las siguientes condiciones:

$F_5$  y  $F_6$ : Funciones de salida del interruptor de transferencia.

$P_{R1}$ ,  $P_{R2}$ ,  $P_{R3}$  Y  $P_{R4}$ : Potencias consumidas por las cargas.

En la tabla 2.4 se observa las condiciones en la que trabajan los interruptores de transferencia de acuerdo con las operaciones de las cargas conectadas.

Tabla 2.4 Condiciones de transferencia en parte de consumo de potencia

CONDICIONES	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>8</sub>
1.- Cada carga conectada a su fase correspondiente	0	0	P <sub>R1</sub>	P <sub>R2</sub>
2.- Las cargas R1 y R2 se conecta a la fases A	0	1	P <sub>R1</sub> + P <sub>R2</sub>	0
3.- Las cargas R1 y R2 se conecta a la fases B	1	0	0	P <sub>R1</sub> + P <sub>R2</sub>
4.- Las cargas se conmutan y conectan a las fases	1	1	P <sub>R2</sub>	P <sub>R1</sub>

La siguiente figura 2.9 muestra las posibles combinaciones que realiza el interruptor de transferencia en la etapa de suministro de acuerdo a lo señalado anteriormente en la tabla 2.4.

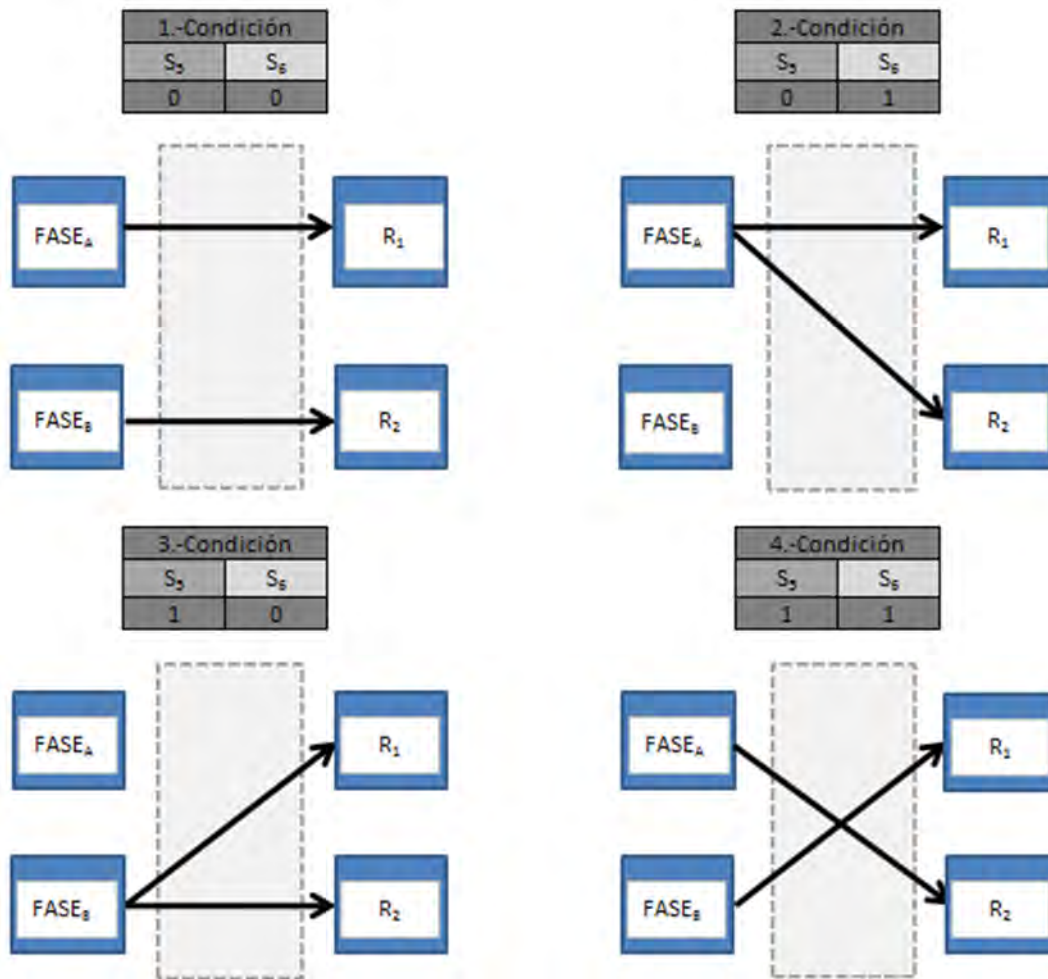


Fig. 2.9 Combinaciones de las condiciones lógicas del interruptor de transferencia para las cargas

La condición 1 es cuando las cargas se encuentran estables, es decir que la magnitud de la corriente que circula en cada una de las fases se encuentra balanceada. La condición 2 y 3 se presenta cuando hay un desbalance de corriente, sea en la fase A o en la fase B. el desbalance máximo permitido es del 25% sobre el valor de la corriente medida.

La condición 4 es la misma que la condición 1. Los interruptores de transferencia S7 y S8 solo controlan las cargas R3 y R4 mediante la condición de conexión y desconexión, es decir, estas cargas pueden o no desconectarse permanentemente sin ningún problema. Se deberá tener cuidado con el tipo de carga durante la reconexión. La determinación de que si una carga es crítica o no, esta dependerá del usuario; por ejemplo el sistema de iluminación de un quirófano puede ser una carga crítica y ésta puede soportar una conmutación de fase sin ninguna complicación. Por otro lado una computadora de escritorio pudiera no soportar una conmutación de fase a menos que incluya una UPS o un regulador de voltaje, el cual soportaría un pequeño transitorio.

### 2.9 ANÁLISIS DEL CIRCUITO DEL GESTOR DE ENERGÍA

En este apartado se diseñó el circuito completo del conjunto de los interruptores de transferencia en cada una de las etapas antes mencionadas, ver figura 2.10. Donde trabajarán por medio de las reconfiguraciones, es decir, de acuerdo a las condiciones lógicas que se vayan presentando y en donde el gestor de energía tomará las decisiones más inteligentes para la optimización de la energía.

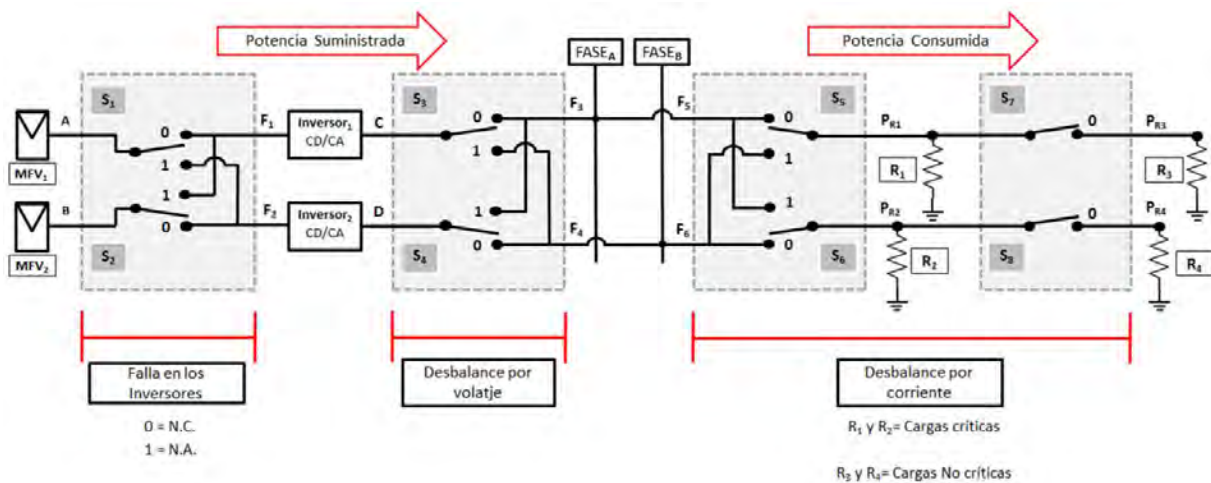


Fig. 2.10 Circuito del gestor de energía

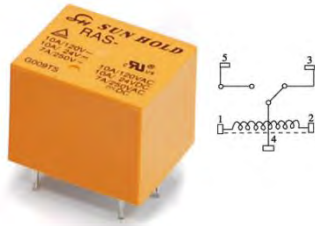

Por ejemplo, en la etapa de generación de energía, si llegase a fallar un inversor, el gestor tiene la flexibilidad de reconectar los MFV al lado contrario de la falla para que siga inyectando potencia a la red eléctrica sin ningún problema.

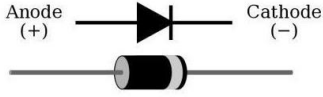





En el caso de que haya un desbalance por tensión, los interruptores de transferencia actuarían y se conectarán ambos inversores a la fase que lo necesite, en este caso, la que presente caída de tensión. Para la condición en la que se presente un desbalance por corriente, debido a las cargas conectadas, primeramente se redistribuyen las cargas no críticas para no afectar al sistema interconectado; y si aun así persiste esta problemática el gestor de energía toma la decisión de desconectar de forma permanente las cargas R3 y R4 y esperar un determinado tiempo para volver a conectarlas.


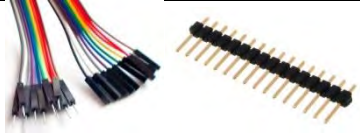

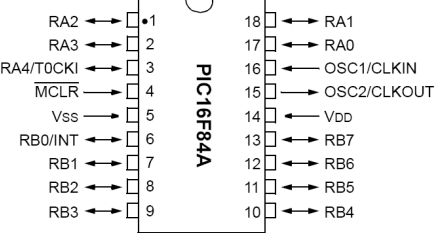
## 2.10 CONSTRUCCIÓN DEL GESTOR DE ENERGÍA

En este capítulo se describe la selección de los componentes electrónicos para la elaboración del PCB del gestor de energía. Durante el diseño del circuito se obtuvo la lista con especificaciones de cada uno de los elementos que conforman dicha placa electrónica, tal como se muestra a continuación:

Tabla 2.5 Lista de materiales

<b>Relevadores RAS 24-10</b>		Se utilizó este tipo de relevador debido a que sus características cumplen con el propósito del interruptor de transferencia. Este componente es de 1 polo, 2 tiros y con una bobina de 24 VCD
<b>Transistores BD-135</b>		Se optó por el transistor BD-135 debido a que el voltaje del colector es 45 VCD, así como la corriente de 1.5 A.

<b>Diodos rectificadores 1N4004</b>		<p>El diodo ayudará transmitir la corriente en una sola dirección y conectado en paralelo con los relevadores evitara un sobrevoltaje, permitiendo que cuando el transistor se abra, la corriente que venía circulando por la bobina continúe ahora su paso por el diodo.</p>
<b>Resistencias 330 <math>\Omega</math> y 100 <math>\Omega</math></b>		<p>Fueron necesarios ocupar dos valores de resistencias, las de 100 <math>\Omega</math> conectadas en serie con el colector del transistor y las 330 <math>\Omega</math> para conectarse en serie con los LED's.</p>
<b>LED's</b>		<p>Los LED's se utilizaron para indicar el encendido o apagado de los relevadores en cada una de las secuencias que se programaron.</p>
<b>Base de PIC DE 18 pines</b>		<p>Fue necesario utilizar una base de 18 pines para el PIC, esto debido a que el microcontrolador se estará retirando a cada momento para programarlo</p>
<b>Bloques de terminales</b>		<p>Los bloques de terminales se necesitaron para la conexión eléctrica para las fases, neutro y las cargas.</p>
<b>Placa de cobre</b>		<p>Para elaborar la tarjeta se necesitó de una placa de cobre de 30 cm x 30 cm. Para llevara a cabo la impresión del circuito.</p>

<b>Push botton</b>		Este elemento electrónico se utilizará para resetear al microcontrolador, con solo presionarlo.
<b>cables de conexión y tira o peineta de 3, 5 y 8 pines</b>		Los cables y pines servirán para las conexiones entre la tarjeta del gestor y la del microcontrolador
<b>Cristal oscilador</b>		Este componente electrónico controlará los tiempos de procesamiento del PIC
<b>PIC 16F84</b>		Para realizar las pruebas de reconfiguración del gestor, se necesitó de un microcontrolador de 18 pines para cargar las instrucciones de control en la tarjeta electrónica.

## 2.11 DISEÑO DE LAS PLACAS DE PCB DEL GESTOR DE ENERGÍA Y DEL CONTROL EN ULTIBOARD

Se diseñó la placa electrónica (PCB) del circuito del gestor como se muestra en la figura 2.11, una vez que se obtuvo el circuito unifilar del gestor de energía. Después se procede a realizar el diseño en el software ULTIBOARD, donde se dibujarán y trazarán las medidas correspondientes de cada uno de los componentes electrónicos que se van a utilizar. A continuación, se muestra en la siguiente figura el diseño final de los interruptores de transferencia.

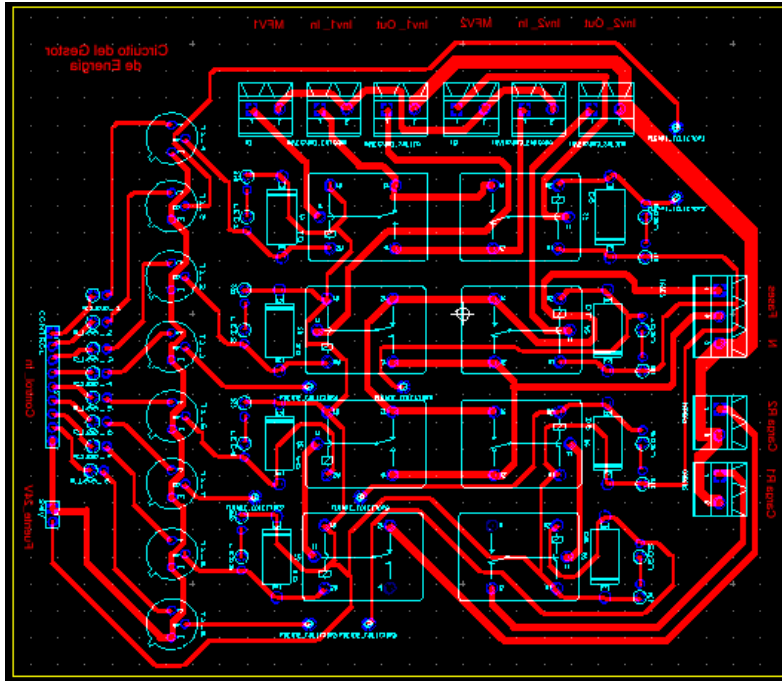


Fig. 2.11 Diseño del gestor de energía

Es importante señalar que se debe tener mucho cuidado a la hora de realizar el diseño, por ejemplo: tener en consideración la corriente máxima con la que trabajará el gestor de energía, esto debido a que se tiene que colocar pistas de estaño más gruesas debido a la circulación de la corriente.

La simetría es un punto que se debe tomar en cuenta para sea eficiente los espacios y que la placa no sea tan grande, considerando las medidas del PCB. De igual manera, identificar la colocación de cada componente electrónico tal como se muestra en la imagen superior. A continuación, se muestra la placa finalmente terminada, figura 2.12; con todos los elementos electrónicos, las pistas estañadas para una mejor conducción de voltaje y soporte de corriente. Y lo más impórtate es que se cumpla con el diseño del circuito para poder realizarle las pruebas correspondientes.



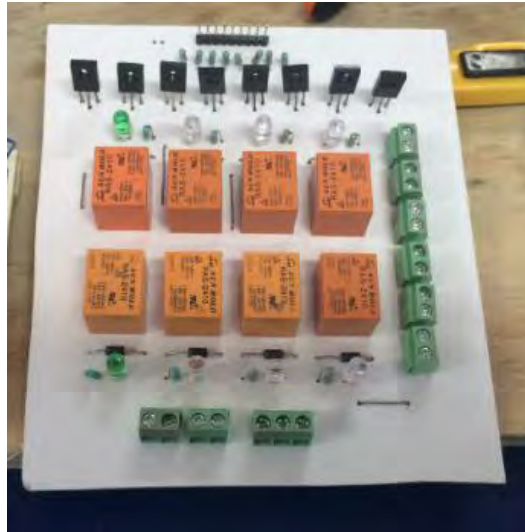


Fig. 2.12 Placa terminada del gestor de energía

Para llevar a cabo las pruebas iniciales de reconfiguraciones del gestor de energía es necesario un circuito de control que lo ayude a realizar su trabajo. Por lo tanto, se diseñó un en el mismo software ULTIBOARD el controlador del PIC como se puede observar en la imagen 2.13.

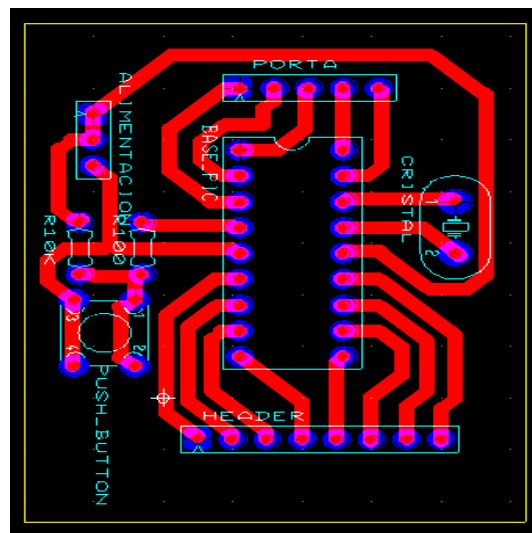
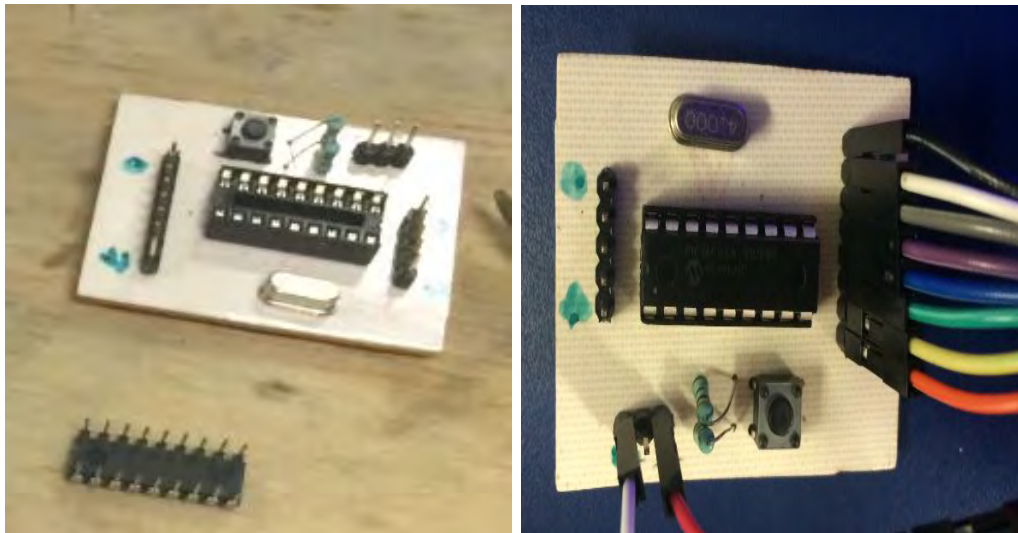


Fig. 2.13 Diseño del microcontrolador PIC

De igual manera, cuando ya se tiene el diseño en el software, es necesario repetir los pasos anteriores para la elaboración de la placa de PCB del control. Así mismo tomar en cuenta

las recomendaciones para la colocación de cada uno de los componentes electrónicos. De tal forma obtener un circuito como el que se presenta en la figura 2.14.



*Fig. 2.14 Circuito del PIC terminado*

## 2.12 Programación del PIC usando los criterios de operación del gestor

Para realizar la programación del PIC 16F84A es necesario tener instalado los siguientes softwares en la computadora:

- ✓ MicroCode Studio
- ✓ PIC -600

El primero es un compilador que traduce comandos en un código de “ceros y unos” en un lenguaje de programación Pic Basic que hace más fácil y rápido a programación de microcontroladores. Este lenguaje produce un código que puede ser programado para una variedad de microcontroladores que tengan de 8 a 68 pins, como es el caso del PIC6F84. El PIC-600 es el encargado de cargar el programa, es decir se encarga en el proceso de grabación dentro del entorno del PIC cual tiene un conjunto de secuencias que se relacionan para hacer funcionar al microcontrolador.

En esta sección se mostrará el lenguaje de programación PIC BASIC usado para el control de las reconfiguraciones de los interruptores de transferencia que interactúan en el gestor de energía.

Cabe mencionar que en el siguiente código se describe las secuencias de acuerdo a los criterios de operación señalados con anterioridad. Imagen del Código del PicBasic:

```

*****
'' condición 1 conmutacion entre los relevadores S1 y S2
''0= normalmente cerrado
''1=normalmente abierto

''''CICLO DEL MFV''''

ciclo:
S1 VAR PORTB.0
S2 VAR PORTB.1

''los dos interruptores están normalmente cerrado
LOW S1
LOW S2
''3mS o 3 segundos
PAUSE 3000

''Combinación 0 y 1 prende lro S2
HIGH S2
PAUSE 3000
LOW S2

''combinación 1 y 0 prende ahora S1
HIGH S1
PAUSE 3000
LOW S1

''combinación 1 y 1 prenden los dos al mismo tiempo S1 y S2

HIGH S1
HIGH S2
PAUSE 3000
LOW S1
LOW S2

''''CICLO DE LOS INVERSORES''''

S3 VAR PORTB.2
S4 VAR PORTB.3

''los dos interruptores están normalmente cerrado
LOW S3
LOW S4
''3mS o 3 segundos
PAUSE 3000

''Combinación 0 y 1 prende lro S4
HIGH S4
PAUSE 3000
LOW S4

''combinación 1 y 0 prende lro S3
HIGH S3
PAUSE 3000
LOW S3

```

```

''combinación 1 y 1 prenden los dos al mismo tiempo S3 y S4
HIGH S5
HIGH S6
PAUSE 3000
LOW S5
LOW S6
.....

''''CICLO DE LAS CARGAS''''
S7 VAR PORTB.6
S8 VAR PORTB.7

''los dos interruptores están normalmente cerrado
LOW S7
LOW S8
''3mS o 3 segundos
PAUSE 3000

''Combinación 0 y 1 prende 1ro S8
HIGH S8
PAUSE 3000
LOW S8

''combinación 1 y 1 prenden los dos al mismo tiempo S3 y S4
HIGH S3
HIGH S4
PAUSE 3000
LOW S3
LOW S4
.....

''''CICLO DE LAS FASES''''
S5 VAR PORTB.4
S6 VAR PORTB.5

''los dos interruptores están normalmente cerrado
LOW S5
LOW S6
''3mS o 3 segundos
PAUSE 3000

''Combinación 0 y 1 prende 1ro S6
HIGH S6
PAUSE 3000
LOW S6

''combinación 1 y 0 prende 1ro S5
HIGH S5
PAUSE 3000

''combinación 1 y 0 prende 1ro S7
HIGH S7
PAUSE 3000
LOW S7

''combinación 1 y 1 prenden los dos al mismo tiempo S3 y S4
HIGH S7
HIGH S8
PAUSE 3000
LOW S7
LOW S8

GOTO ciclo

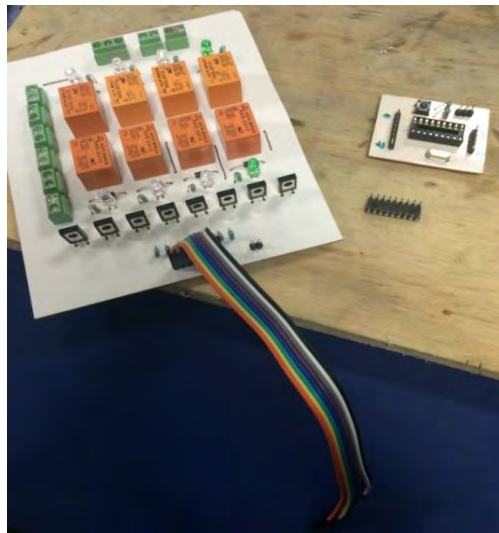
```

Fig. 2.15 Código de PicBasic

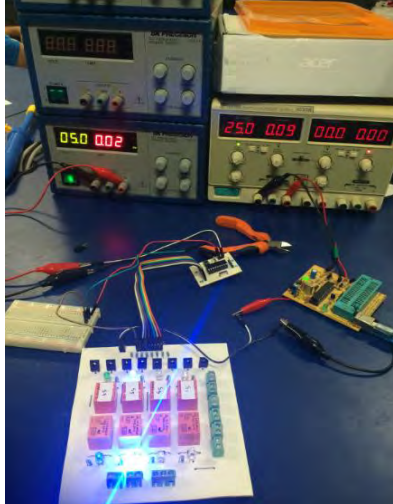
### 2.13 PRUEBAS DE CONTROL AL PCB DEL GESTOR USANDO EL PIC

Una vez que se haya programado el código para el PIC16F84A, se haya cargado y puesto en el PCB de control. Se debe realizar las conexiones eléctricas correspondientes, tal como se muestra en la figura 2.16

También será necesario contar con fuentes reguladas, las cuales van a activar la tarjeta control del PIC porque trabaja a 5 VCD. Y la segunda fuente servirá para proporcionarle 25 VCD al circuito del gestor, para que comience a realizar las reconfiguraciones de los criterios antes mencionados. Cuando se realiza las pruebas de las secuencias los LED's serán los indicadores de encendido o apagado de los interruptores, es decir, que se estarán llevando a cabo las reconfiguraciones descritas de cada una de las condiciones del gestor de energía. Como se puede observar en las figuras siguientes.



*Fig. 2.16 Conexiones eléctricas mediante cables eléctricos*



*Fig. 2.17 Pruebas a la tarjeta del Gestor usando el circuito de control PIC*

En la figura 2.17 se puede observar que los LED's que encendieron fueron de color azul, es decir, que la reconfiguración de las cargas críticas se llevó acabo; dicho de otro modo, que las este tipo de cargas se reconfiguran y se conectan ya sea a la fase A o a la fase B dependiendo donde haya mayor desbalance de corriente, tal como se explicó en las condiciones de operación de las cargas.

Por otra parte, en la figura 2.18 se observan los indicadores de color verde, lo que significa que el circuito de control al detectar que aún hay un desbalance de corriente entre las fases, se procede a desconectar permanentemente las cargas R3 y R4 que son las de tipos no críticas.



*Fig. 2.18 Indicadores de los interruptores de transferencia*

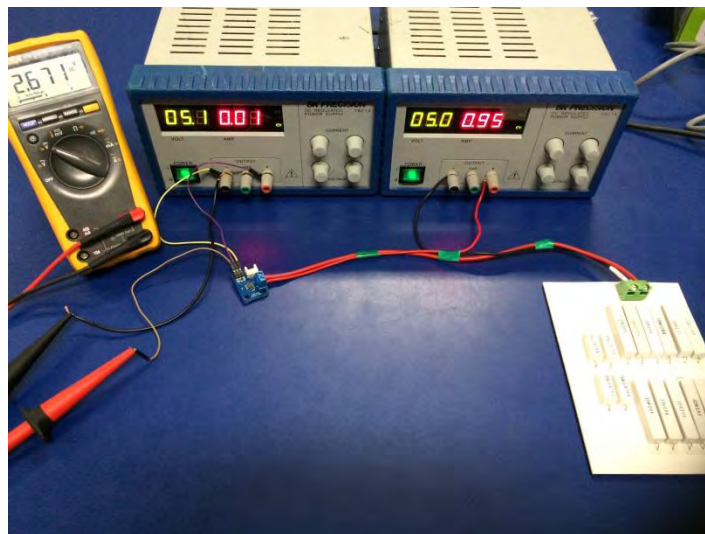
## 2.14 PRUEBAS AL SENSOR DE CORRIENTE

Para medir la corriente en el circuito del gestor de energía se requirió del sensor ACS712 el cual tiene un rango de operación de -5 a +5 A sea en CD o en CA. Este sensor opera mediante el efecto hall, el cual detecta el campo magnético que se produce por el fenómeno de inducción, debido a la corriente que circula por el conductor eléctrico. Figura 2.19



*Fig. 2.19 Sensor de corriente ACS712*

Una de las pruebas realizadas fue la de conectarle una carga de 100 watts al sensor, la cual era alimentada por medio de una fuente regulada tal como se observa en la figura 2.20



*Fig. 2.20 Conexión del sensor a una fuente de voltaje*

Para obtener los valores corriente, ello fue necesario realizar una conversión de voltaje corriente mediante la siguiente

ecuación:

$$I = \frac{V_s - V_c}{S}$$

Donde :

$V_s$  = Voltaje salida

$V_c$  = Conste. de Voltaje (2.5V)

$S$  = sensibilidad (185 mV/A)

Ec. 2.1

Por ejemplo:

$$I = \frac{2.671V - 2.5V}{185mV/A} = 0.924A$$

Ec. 2.2

Estos datos y cálculos servirán para implementarlo en el programa del gestor de energía, para poder realizar las comparaciones en las salidas de los inversores y en la etapa de consumo de potencia de las cargas conectadas.

## 2.15 PRUEBAS CON EL ARDUINO UNO

En primer instancia se utilizó un microcontrolador PIC para probar las diferentes etapas del gestor, sin embargo para el proceso de censado se utilizó el microcontrolador Arduino Uno, dado que el PIC no cuenta con entradas analógicas suficientes. De esta manera el Arduino se encargaría del proceso de censado y el PIC de la parte de conmutación del gestor. Figura 2.21



Fig. 2.21 Arduino Uno



A continuación se mencionan las características y especificaciones técnicas del Arduino

*Tabla 2.6. Especificaciones técnicas del Arduino*

Microcontrolador	ATmega 328
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada	7 – 12 V
Voltaje de entrada (limite)	6 -20 V
Entradas digitales	14 Pins
Entradas analógicas	6 Pins
Corriente CD (Digital)	40 mA
Flash Memory	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 Mhz

Debido a estas características se eligió este microcontrolador, por la versatilidad que tiene en el lenguaje de programación. En el capítulo 3 se desarrollan los códigos para cada uno de los procesos que debe realizar el gestor de energía.

---

## **CAPÍTULO III**

### **ALGORITMO DEL GESTOR DE ENERGÍA**

---

#### **3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL GESTOR**

A continuación se presenta el diagrama de flujo donde se analizaron y determinaron las operaciones sistemáticas para las leyes de redundancia y operación del gestor. Así como también el análisis de flujo de energía y balance de carga para dicha funcionalidad tal como se observa en la figura 3.1.

Se llevara a cabo el análisis de cada uno de los procesos del gestor, en donde se explicará con detalle, las condiciones descritas en el capítulo 2, el funcionamiento mediante el uso del lenguaje de programación que se me empleo para dicho prototipo.

El diagrama de flujo del gestor de energía será implementado por medio del software Arduino. El cual se encargara de procesar todos los valores analógicos para obtener valores digitales. Estos valores serán de vital importancia en la conectividad del gestor ya que el microcontrolador estará mandando las señales correspondientes para activar, desactivar y reconfigurar a cada uno de los interruptores de transferencia

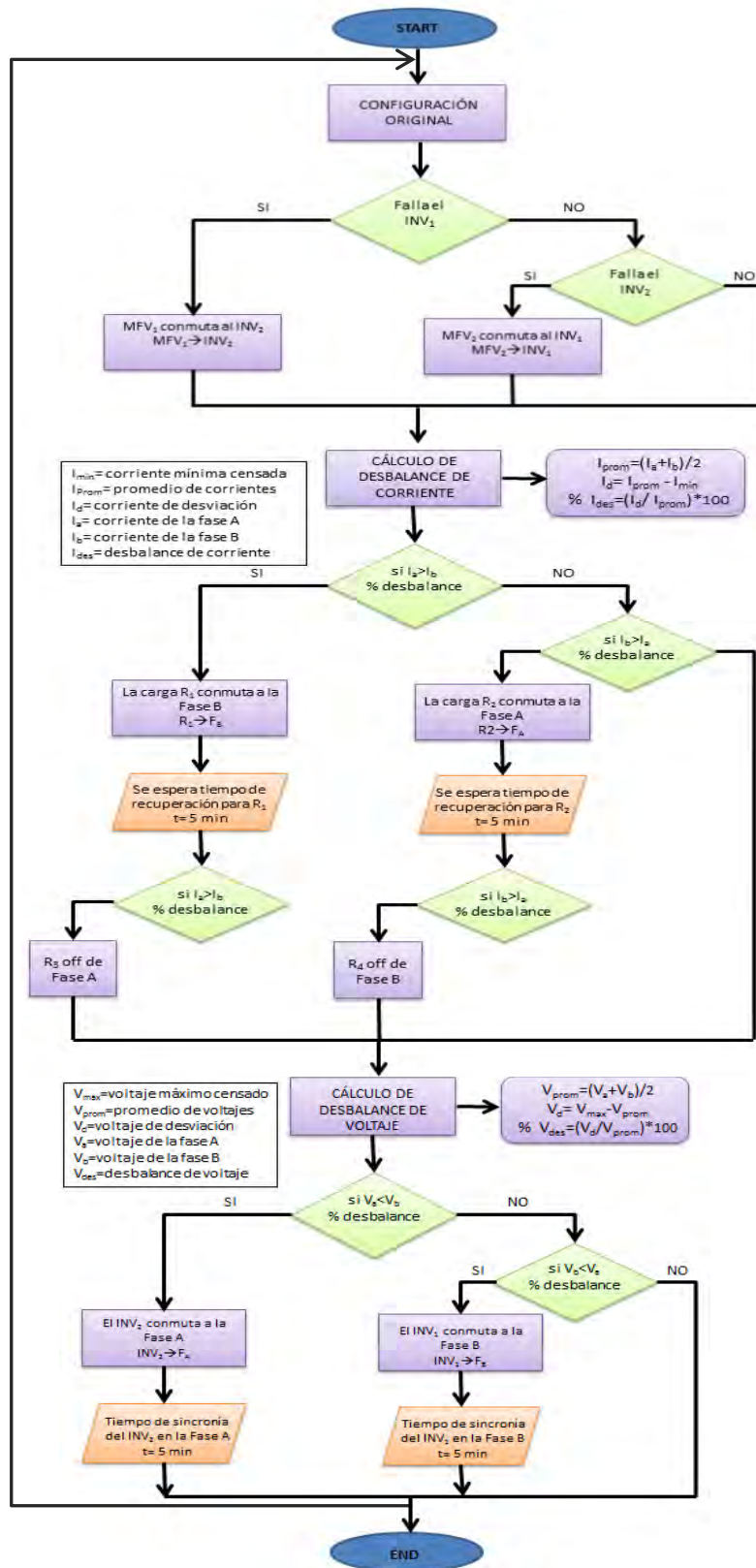
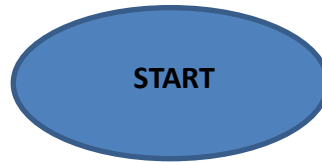


Fig. 3.1 Diagrama de flujo del gestor

### 3.2 INICIO DEL PROGRAMA (START)

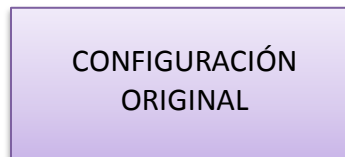
Se da por iniciado el programa del gestor de energía, figura 3.2



*Fig.3.2 Inicio del programa*

### 3.3 CONFIGURACIÓN INICIAL Y VARIABLES

En este apartado se declaran las variables que se vayan a calcular en cada uno de los procesos y tomas de decisiones a lo largo del diagrama.



*Fig.3.3 Variables declaradas*

El segmento del código implementado en la figura 3.3 es:

---

```
int S1=2;int S2=3;int S3=4;int S4=5;int S5=6;int S6=7;int S7=8;int S8=9;
const int analogIn1 = A0;
const int analogIn2 = A1;
int ciclo=0;
int mVperAmp = 185; int RawValue1= 0;
int RawValue2= 0;
int ACSoffset = 2500;
double Voltage1 = 0;
double Amps1 = 0;
double Voltage2 = 0;
double Amps2 = 0;
int D8=8;
```

```

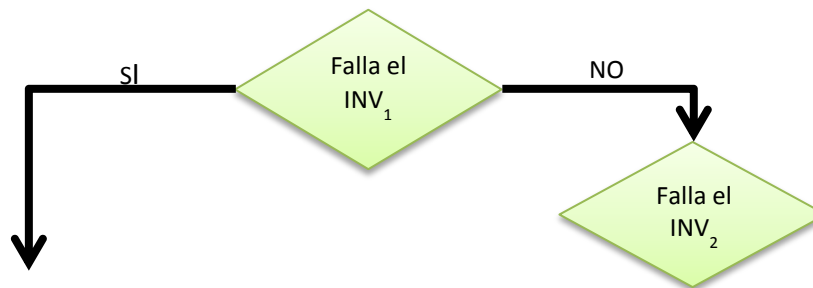
int D9=9;
void setup()
{
Serial.begin(9600);
pinMode(D8,OUTPUT);
pinMode(D9,OUTPUT);
}
void loop(){

```

---

### 3.4 FALLAS EN LOS INVERSORES

En esta sección si se implementarían sensores de corriente en las salidas de los inversores, éstos detectarían si hubiera algún fallo en la parte de acondicionamiento. Es aquí donde el gestor realiza la reconfiguración de los interruptores de transferencia en los MFV hacia el lado opuesto de la falla. Figura 3.4



*Fig.3.4 Fallas de inversores*

El segmento del código implementado en la figura 3.4 es:

---

```

ciclo=1;
double VCDnom=127;
if(VoltageCD1< VoltageCD2)
{
VCDnom= VoltageCD2;
}
else
{
VCDnom= VoltageCD1;
}
Serial.print("\t VCDnom = ");

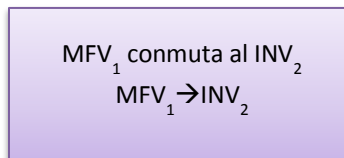
```

```
Serial.println(VCDnom,3);
for(int i=0;i<=1;i++)
{
{
```

---

### 3.5 CONMUTACIÓN DE LOS MFV

Durante la generación de energía por parte de los MFV se llegase a detectar que unos de los inversores dejen de funcionar, por ejemplo el inversor 1, el interruptor de transferencia transfiere el voltaje de salida de los MFV hacia el inversor 2. Tal como se describe en la figura 3.5



*Fig.3.5 Conmutación de los MFV*

El segmento del código implementado en la figura 3.5 es:

---

```
if(VoltageCD1 > VoltageCD 2)
{
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, HIGH);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}
else if (VoltageCD 2> VoltageCD 1)
{
digitalWrite(S1, HIGH);
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
```

```

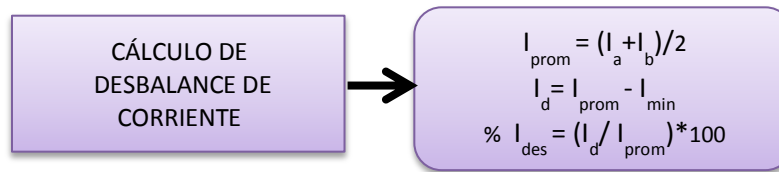
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}

```

---

### 3.6 CÁLCULO DE DESBALANCE DE CORRIENTE

Para realizar el cálculo de las correspondiente a este proceso, es necesario realizar una serie de operaciones matemáticas básica para obtener la corriente mínima, máxima, promedio, desviación y la corriente de desbalance, el cual no de ser mayor que el 25%.



*Fig.3.6 Operaciones básicas para la corriente*

El segmento del código implementado en la figura 3.6 es:

---

```

ciclo=1;
double Iprom=(Amps1+Amps2)/2;
double Imin=0;
if(Amps1<Amps2)
{
Imin=Amps1;
}
else
{
Imin=Amps2;
}
double Id= Iprom - Imin;
double Ides=(Id/Iprom)*100;
Serial.print("\t Id = ");
Serial.println(Id,3);
for(int i=0;i<=1;i++)
{
if (Ides > 25)

```

---

### 3.7 COMPARACIÓN DE LAS CORRIENTES DE CADA FASE

En el bloque de decisión se realiza una comparación de las corrientes que circulan en cada una de las fases A y B, mediante los sensores de corriente y de esta manera tomar la mejor decisión para reconfigurar la distribución de las cargas no críticas.

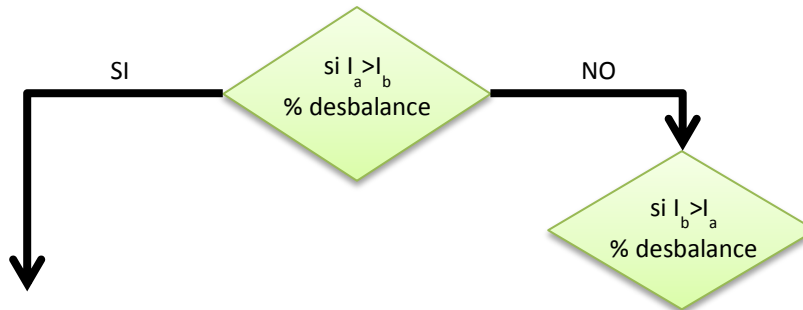


Fig.3.7 Calculo de desbalance de corriente

El segmento del código implementado en la figura 3.7 es:

---

```

ciclo=1;
double Iprom=(Amps1+Amps2)/2;
double Imin=0;
if(Amps1<Amps2)
{
Imin=Amps1;
}
else
{
Imin=Amps2;
}
double Id= Iprom - Imin;
double Ides=(Id/Iprom)*100;
Serial.print("\t Id = ");
Serial.println(Id,3);
for(int i=0;i<=1;i++)
{
if (Ides > 25)
{
if(Amps1>Amps2)
{
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);
}
}
}
  
```



```

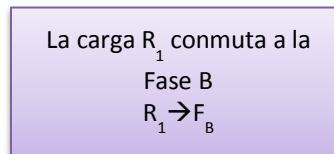
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, HIGH);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}
else if (Amps2>Amps1)
{
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, HIGH);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}

```

---

### 3.8 CONMUTACIÓN DE CARGAS NO CRITICAS

Cuando se tiene los valores de las corrientes de cada fase y la comparación entre ellas, el gestor realiza una reconfiguración. Por ejemplo, si la fase A esta muy cargada, lo que se procede es desconectar la carga R1 y conectarla a la fase B y lo mismo se realiza para el caso de la carga R2. Tal como se muestra en la figura 3.8



*Fig.3.8 Reconexión de la carga R1*

El segmento del código implementado en la figura 3.8 es:

---

```

if(Amps1>Amps2)
{
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, LOW);
}

```

```

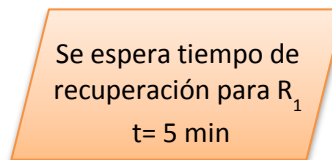
digitalWrite(S6, HIGH);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}
else if (Amps2>Amps1)
{
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, HIGH);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}

```

---

### 3.9 TIEMPO DE RECUPERACIÓN

Una vez que se haya realizado la reconfiguración de las cargas, se espera un tiempo de 5 minutos para la recuperación de la carga, en este caso para R, es decir que el programa vuelve a realizar la medición en las fases para detectar si ya están balanceadas las cargas o no.



*Fig.3.9 Tiempo de recuperación*

El segmento del código implementado en la figura 3.9 es:

---

```

delay(50000);
i++;
}
if (Ides > 25
{
Serial.print("\tDesbalance");
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);

```

```

digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}
else
{
Serial.print("\tBalanceda <25");
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}
}
}

```

---

### 3.10 DESCONEXIÓN DE CARGAS NO CRÍTICAS

En esta parte del diagrama de flujo, si el desbalance persiste por arriba del 25%, el gestor realizará una desconexión permanente de las cargas R3 y R4 en el circuito.

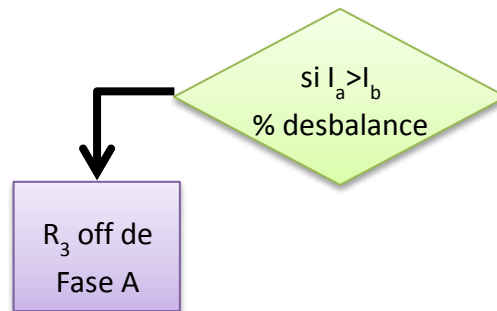


Fig.3.10 Desconexión de cargas por desbalance de corriente

El segmento del código implementado en la figura 3.10 es:

---

```

Serial.print("\tDesbalance");
digitalWrite(S1, LOW);

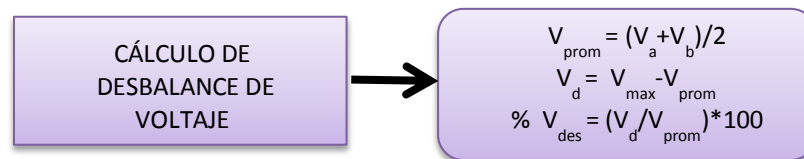
```

```
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
```

---

### 3.11 CÁLCULO DE DESBALANCE DE VOLTAJE

En este proceso se realiza el cálculo de los voltajes de las fases A y B así como también de los valores mínimo, máximo, el promedio, desviación y el desbalance de voltaje. Este último no debe ser mayor al 5% del valor nominal, es decir 127 V.



*Fig.3.11 Operaciones básicas para el voltaje*

El segmento del código implementado en la figura 3.11 es:

---

```
ciclo=1;
double Vprom=( Voltage1+ Voltage2)/2;
double Vmax=127;
if(Voltage1< Voltage2)
{
Vmax= Voltage2;
}
else
{
Vmax= Voltage1;
}
```

---

### 3.12 COMPARACIÓN DE LOS VOLTAJES DE CADA FASE

Con base a las operaciones del bloque anterior, se realiza una comparación entre los voltajes de la fase A y fase B. Esto es para calcular en el cual de las dos fases existe el desbalance mayor al 5%. Tal como se observa en la figura 3.12

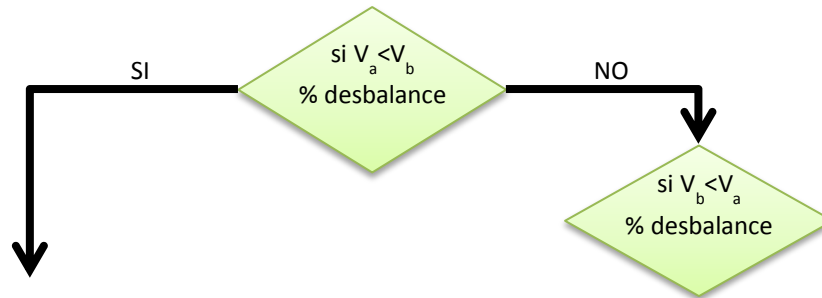


Fig.3.12 Calculo de desbalance de voltaje

El segmento del código implementado en la figura 3.12 es:

---

```

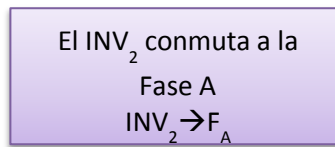
ciclo=1;
double Vprom=( Voltage1+ Voltage2)/2;
double Vmax=127;
if(Voltage1< Voltage2)
{
Vmax= Voltage2;
}
else
{
Vmax= Voltage1;
}
double Vd= Vmax-Vprom;
double Vdes=(Vd/Vprom)*100;
Serial.print("\t Vd = ");
Serial.println(Vd,3);
for(int i=0;i<=1;i++)
{
if (Vdes > 5)
{

```

---

### 3.13 CONMUTACIÓN DE LOS INVERSORES

Si en el proceso en el que el sistema interconectad se encuentra funcionando y se presenta un desbalance en la fase A, el inversor 2 se conmuta hacia a dicha fase y de esta manera, los dos inversores estarían inyectando voltaje a la red eléctrica. Ahora, si la fase desbalanceada fuera la B se aplica el mismo procedimiento por parte del inversor 1.



*Fig.3.13 Reconexión de los inversores a la red eléctrica*

El segmento del código implementado en la figura 3.13 es:

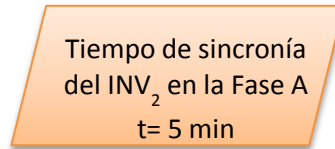
```

-----
if(Voltage1 > Voltage 2)
{
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, HIGH);
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}
else if (Voltage 2 > Voltage 1)
{
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, HIGH);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}
-----

```

### 3.14 TIEMPO DE SINCRONÍA CON LA RED ELÉCTRICA

Este tiempo de espera en el proceso de sincronía cuando unos de los inversores se reconfigura, por efecto de desbalance de voltaje, a la red eléctrica.



*Fig.3.14 Reconfiguración de los inversores a la red eléctrica*

El segmento del código implementado en la figura 3.14 es:

---

```

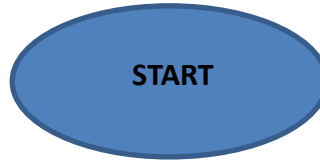
delay(50000);
i++;
}
if (Vdes > 5)
{
Serial.print("\tDesbalance ");
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}
else
{
Serial.print("\tBalanceada <5");
digitalWrite(S1, LOW);
digitalWrite(S2, LOW);
digitalWrite(S3, LOW);
digitalWrite(S4, LOW);
digitalWrite(S5, LOW);
digitalWrite(S6, LOW);
digitalWrite(S7, LOW);
digitalWrite(S8, LOW);
}
}

```

---

### 3.15 FIN DEL PROGRAMA

Se da por terminado el programa del gestor de energía, de esta manera se cumple con todos los procesos y cálculos realizado en dicho programa, ver Figura 3.15



*Fig.3.15 Fin del programa*



---

## CAPÍTULO IV

### PRUEBAS EXPERIMENTALES

---

#### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL INVERSOR INTERCONECTADO A LA RED ELÉCTRICA

Como se mencionó en capítulos anteriores, se utilizó un inversor comercial Modelo 250GT para sistemas de generación eólica y/o solar; con capacidad de hasta 250 W, así como el voltaje de entrada de 14 VDC a 28 VCD y la salida de 110 VCA, opera en un rango de frecuencia de 45 Hz a 65 Hz y con una eficiencia de 92%. En esta sección se presentan los resultados experimentales de cada etapa del gestor de energía.

En un escenario de prueba consistente en una red monofásica donde se tienen conectadas cargas no lineales a la red eléctrica tales como, computadoras, cargadores, difusores de aire acondicionado y lámparas con balastro electrónico, se realizaron pruebas de conexión y desconexión de fuentes de alimentación para el inversor.

#### 4.2 PRUEBAS DE VOLTAJE DE ENTRADA AL INVERSOR

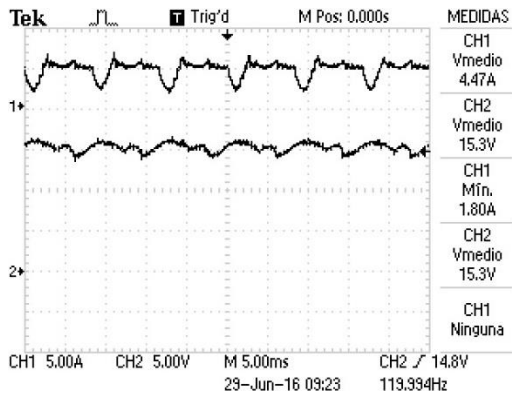
Se realizaron pruebas experimentales para caracterizar a los inversores. La tabla 4.1 resume los resultados obtenidos ante variaciones del voltaje en corriente directa a la entrada del inversor.

*Tabla 4.1. Valores de las pruebas de voltaje y corriente a la entrada del inversor*

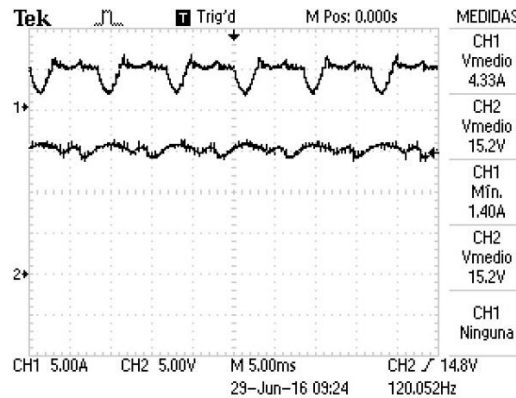
# de prueba	Voltaje CD	Corriente CD	Rizo de Voltaje	Corriente P-Pico
1	15.3V	4.47A	3.4V	5.8A
2	15.2V	4.33A	2.8V	5.6A
3	14.5V	3.67A	1V	1.2A

4	14.3V	888mA	800mV	1.2A
5	13.8V	879mA	200mV	400mA
6	12.9V	605mA	200mV	400mA

La figura 4.1 muestra las formas de entrada del voltaje y la corriente para las pruebas realizadas al inversor: #1 (4.1a), #2 (4.1b), #3 (4.1c), #4 (4.1d), #5 (4.1e) y #6 (4.1f). En este caso corresponden a los voltajes de entrada especificados en la tabla 4.1. Las figuras 4.1a, 4.1b y 4.1c muestran los casos en el que el inversor se encuentra sincronizado con la línea de CA y la corriente de entrada muestra cierta distorsión por la demanda de la red. En el caso de la figura 4.1c, se muestra que ante una disminución en el voltaje (14.5 volts), la corriente de entrada reduce su valor medio, pero presenta una mayor distorsión. Sin embargo, a partir de los 14.3 volts (4.1d y 4.1e), el inversor deja de extraer energía de la fuente, aunque aún mantiene sincronía.



a)



b)

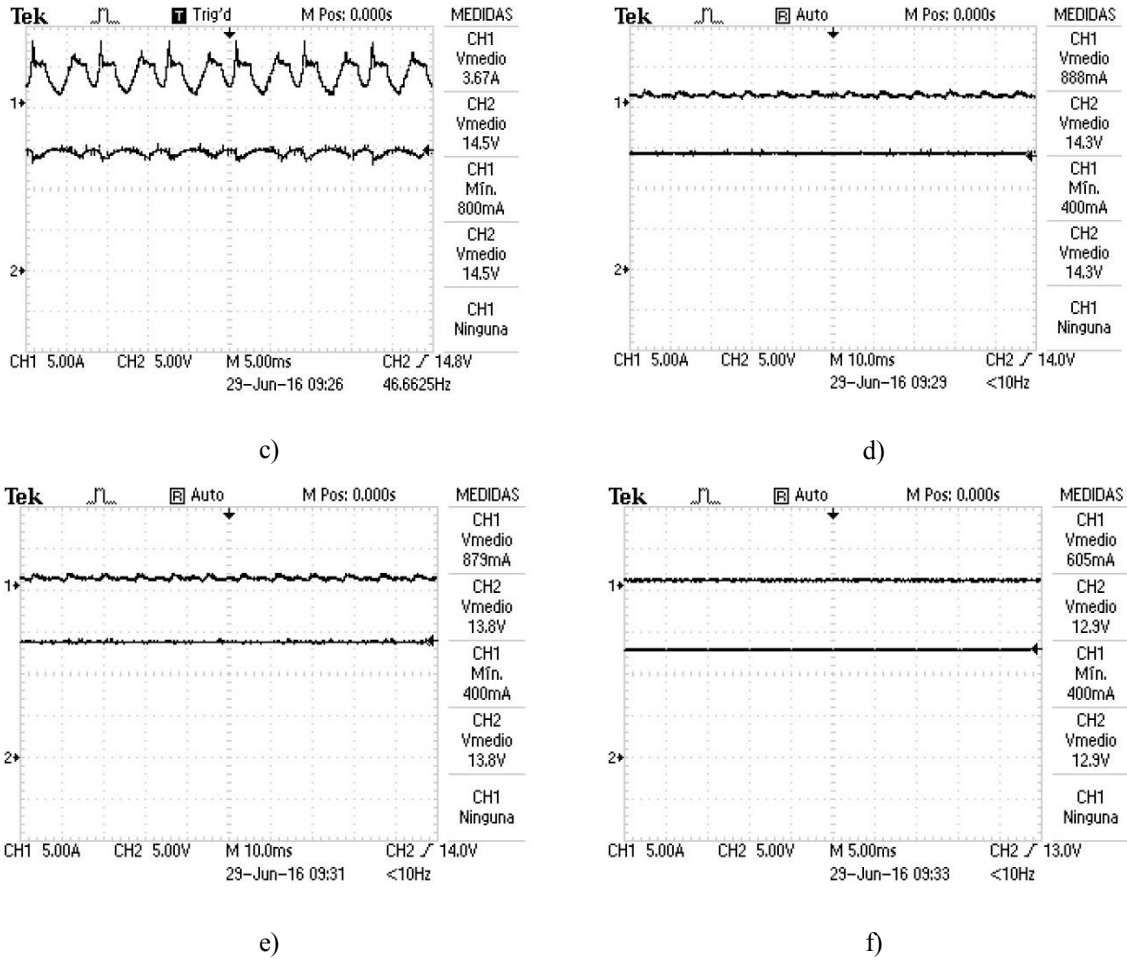


Fig. 4.1 Señales de corriente y voltaje de entrada del inversor

En la figura 4.1f se muestra que debajo de ese valor (12.9 volts), el inversor queda fuera de operación.

### 4.3 PRUEBAS DE CORRIENTE SUMINISTRADA POR EL INVERSOR

De forma análoga, se midieron el valor de las corrientes que suministra el inversor a la red eléctrica para todas las pruebas listadas en la tabla 4.1. La figura 4.2 muestra las corrientes de salida del inversor para cada caso: #1 (4.2a), #2 (4.2b), #3 (4.2c), #4 (4.2d), #5 (4.2e) y #6 (4.2f).

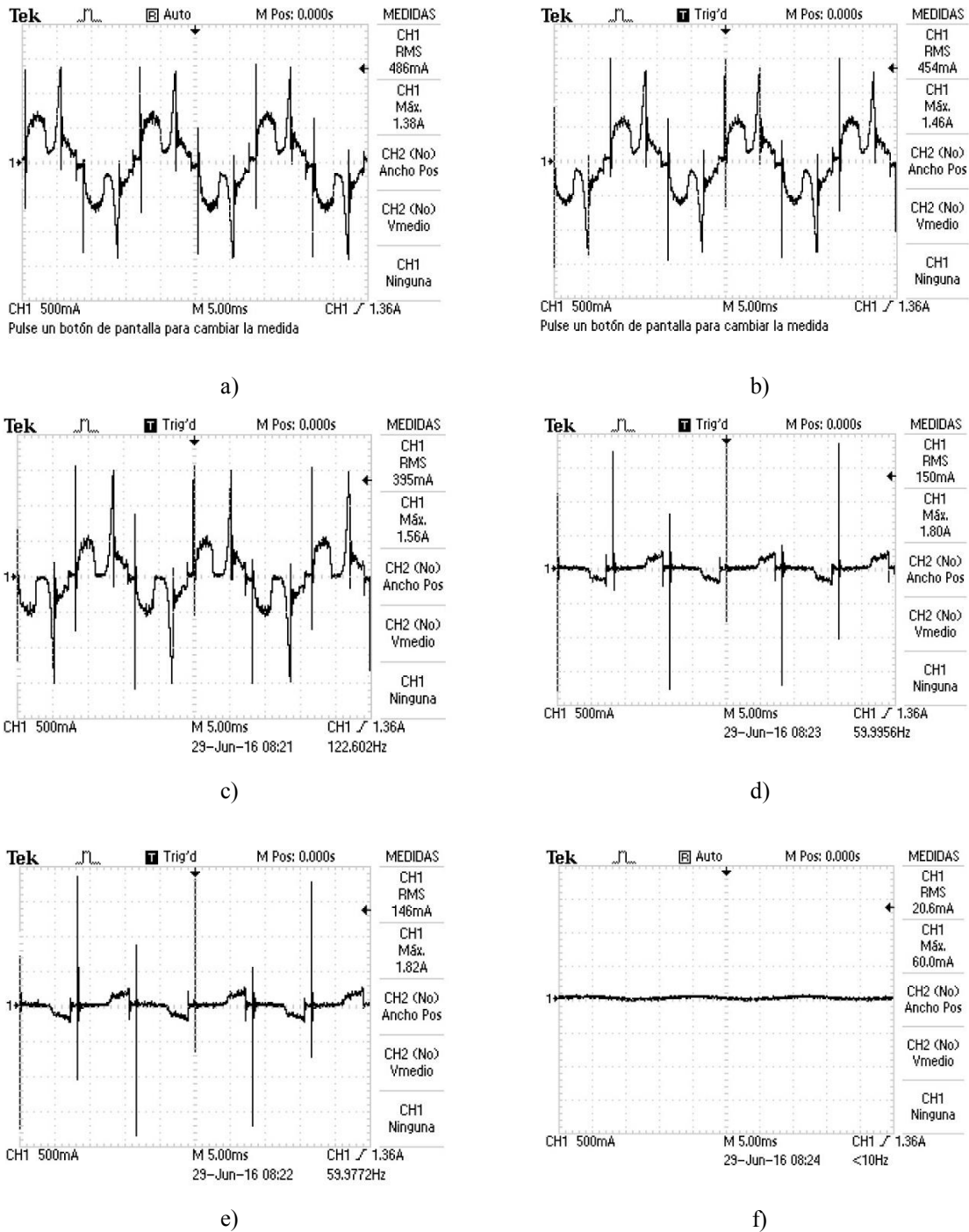


Fig. 4.2 Señales de corriente de salida del inversor

Las figuras 4.2a, 4.2b y 4.2c muestran los casos cuando el inversor se sincroniza con la red eléctrica y suministra una corriente de CA a la red. Se nota cierta distorsión de forma en la corriente suministrada. En las pruebas #4 y #5, la corriente suministrada se va a un valor

mínimo, pero aún se mantiene la sincronía (figuras 4.2d, 4.2e). La figura 4.2f muestra el caso donde el inversor queda fuera de línea por bajo voltaje suministrado.

#### 4.4 PRUEBAS DE LA ETAPA DE GENERACIÓN.

Como se mencionó en el capítulo 2 y 3, el modo inicial de operación establece que los inversores sean conectados cada uno a una fuente de alimentación de CD (Figura 4.3) que suministre los valores mínimos de tensión de operación del inversor (sección anterior).

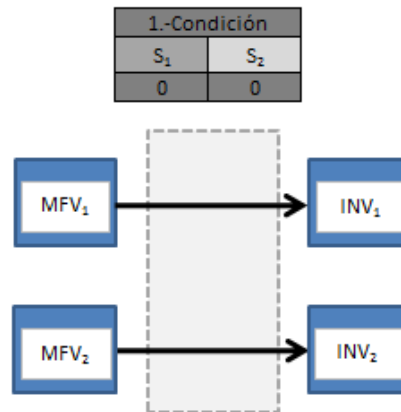


Fig. 4.3 Modo inicial de operación

Al conectar la fuente de energía (fuente de CD o MFV) al inversor mediante el interruptor de transferencia (condición 1), el inversor requiere un lapso de tiempo de aproximadamente 220 ms para sincronizarse con la red eléctrica (Figura 4.4). El tiempo de sincronización es considerado en el algoritmo de reconfiguración. La señal B corresponde al pulso generado por el control y la señal A corresponde a la corriente generada por el inversor, donde se observa el retardo en la operación del inversor, el cual es de 220 ms, como se había mencionado anteriormente. Se nota algunas perturbaciones, las cuales se deben a la naturaleza de las cargas que están conectadas en la misma red del inversor.

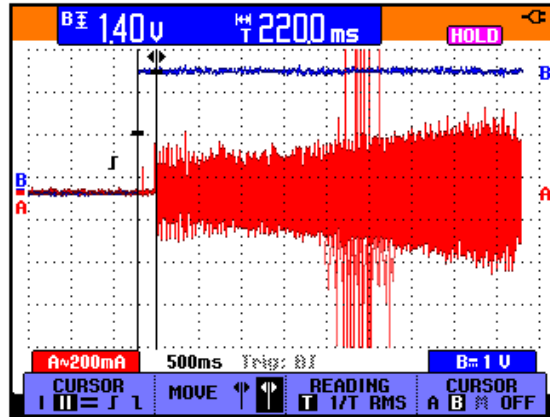


Fig. 4.4 Tiempo de sincronización del inversor

La figura 4.5 muestra la corriente de entrada y la corriente de salida del inversor. Los picos de corriente en ambas señales corresponden a la demanda de corriente en la red que se realizaron las pruebas.

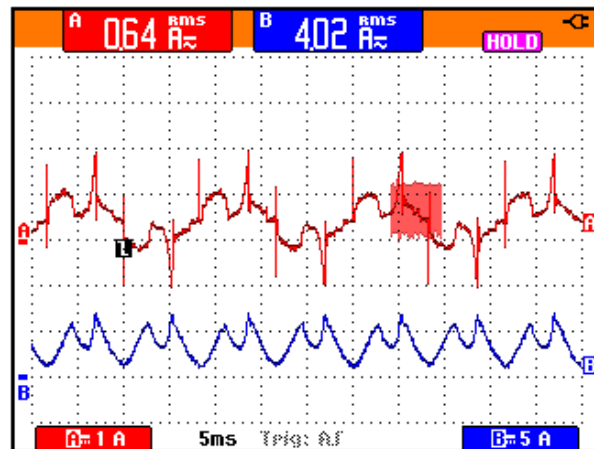


Fig. 4.5 Corrientes de entrada y salida del inversor sincronizado con la red.

En caso de falla de un inversor, el gestor re-direcciona el flujo de energía y se reconfiguran las fuentes a un solo inversor (Figura 4.6). La detección se realiza mediante el sensado de corriente de salida de cada inversor.

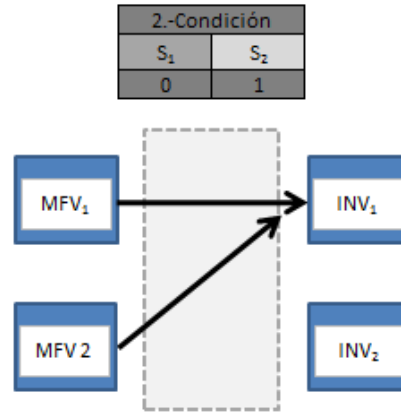
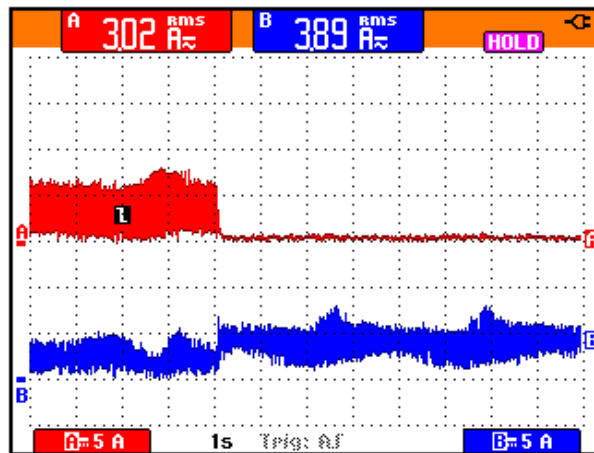
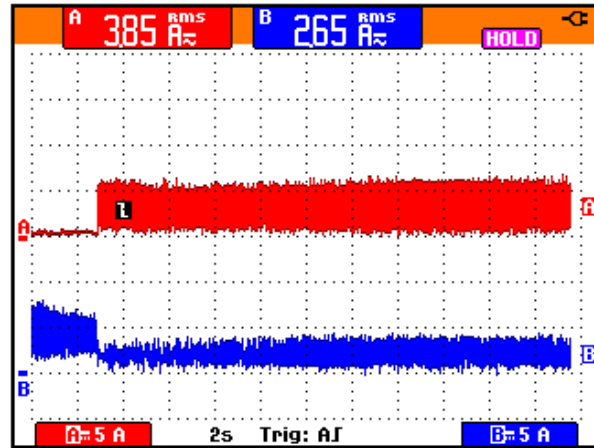


Fig. 4.6 Condición de reconfiguración ante la falla de un inversor.

Al conectar las dos fuentes de alimentación en paralelo, es posible que exista un desbalance. En la figura 4.7 se muestra la reconfiguración de las fuentes de alimentación hacia un solo inversor, nótese que cualquier variación de voltaje de las fuentes, generaría un desbalance entre las corrientes suministradas por la fuente.

En el caso de módulos fotovoltaicos, es muy posible que existan desbalances de tensión debido a varias causas: degradación, sombreados, excretas de pájaros, acumulación de suciedad, etc.

La señal **A** corresponde a la fuente re-direccionada (MFV<sub>2</sub>), la señal **B** (MFV<sub>1</sub>) corresponde a la fuente asignada inicialmente al inversor (INV<sub>1</sub>). Inicialmente la fuente **B**, suministra la totalidad de corriente al inversor, sin embargo, al momento de conectar la fuente **A** el suministro se divide (figura 4.7a). Al momento de desconexión de la fuente **A**, de nueva cuenta la fuente **B** se encargará de suministrar la totalidad de corriente (figura 4.7b).



a)

b)

Fig. 4.7 Reconfiguración de dos fuentes a un inversor.



En la figura 4.8 se muestra a detalle las corrientes de ambas fuentes de alimentación A y B.

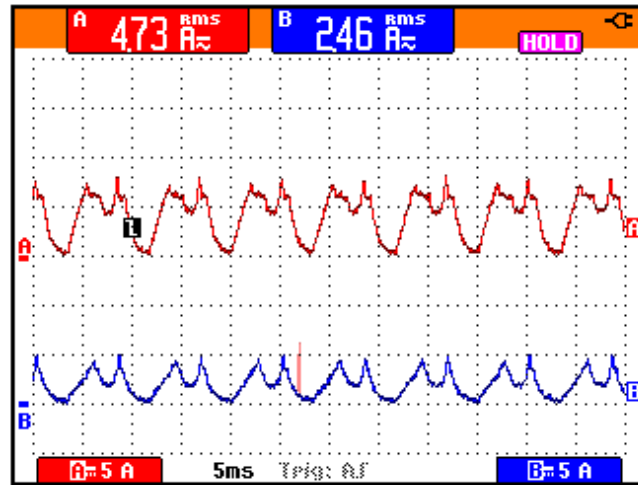


Fig. 4.8 Corrientes de entradas al inversor.

#### 4.5 PRUEBAS DE LA ETAPA DE CARGAS.

Una de las reconfiguraciones que puede requerirse en el sistema es re-direccionamiento de las cargas (figura 4.9). Ya sea que se conecten a otra fase (cargas críticas) o que se desconecten de la red (cargas no críticas)

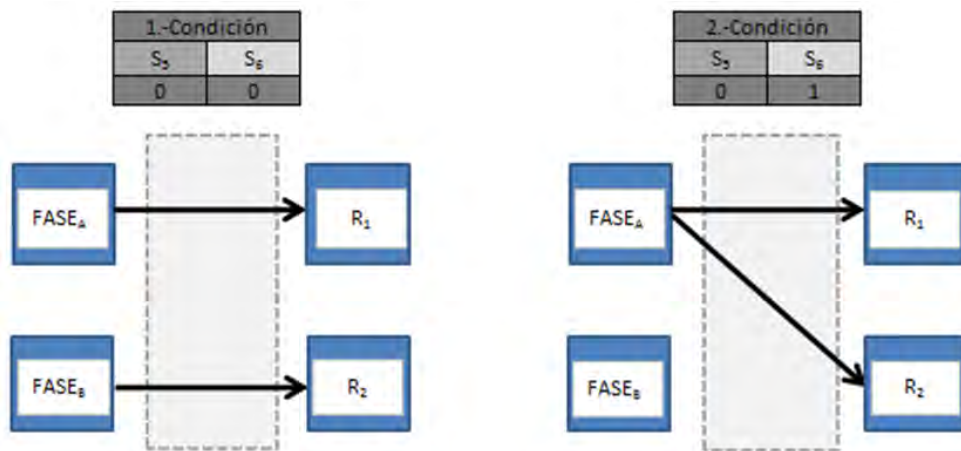
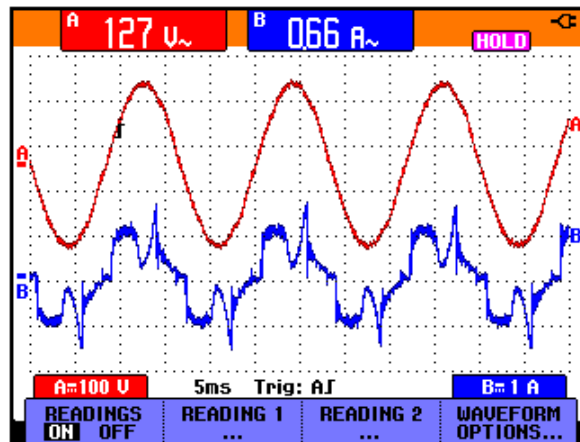
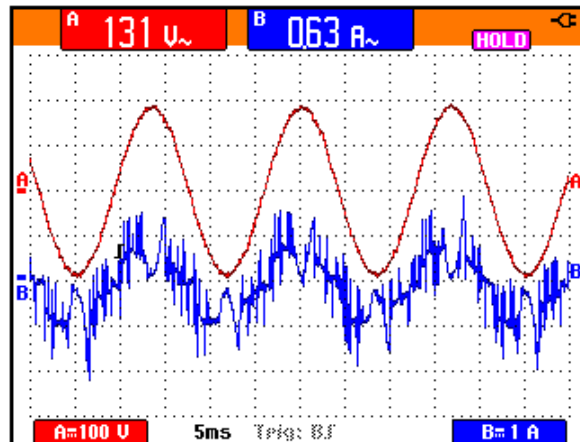


Fig. 4.9 Reconfiguración de cargas.

La forma de corriente del inversor depende de la naturaleza de las cargas conectadas en la red. La figura 4.10 muestra el efecto sobre la forma de onda al desconectar una carga no lineal (se desconectó de la red, una carga de iluminación de 576 watts). La figura 4.10a muestra el caso donde la red contiene varias cargas no lineales, en la figura 4.10b se muestra el efecto de la desconexión de dichas cargas.



a)

b)

Fig. 4.10 Voltaje y corriente de salida del inversor sincronizado con la red.

Inicialmente se tienen conectadas en la red de prueba las siguientes cargas:

<b>Tipo de carga</b>	<b>Descripción</b>
No crítica, No lineal	- 6 luminarias de 96 Watts que incluyen balastos electrónicos
Crítica, No lineal	-4 Computadoras de escritorio de 300 Watts cada uno
No crítica, No lineal	-2 laptops de 230 Watts
Crítica, Lineal inductiva	-2 Aires Acondicionados tipo “minisplit” de 2200 watts c/u
No crítica, Lineal resistiva	-2 Cautines para soldar de 60 watts c/u

La determinación de si una carga es crítica o no está en función de la aplicación y de las necesidades del usuario. En nuestro caso consideramos cargas críticas a las PC's dado que no pueden desconectarse y reconectarse sin perder los datos (salvo que tengan sistema de respaldo de alimentación UPS). También debido a la forma de operar de los aires acondicionados, los consideramos cargas críticas (si son desconectados no se pueden reconectar inmediatamente).

El valor de la corriente que se muestra en la figura 4.11, corresponde al valor de la corriente que el inversor se encontraba suministrado en ese momento a la red eléctrica. Cabe mencionar que el inversor solo aporta una fracción de la corriente demandadas por las cargas, ya que la red eléctrica aporta la mayor parte.

La figura 4.11 muestra el comportamiento de la corriente suministrada por el inversor en esta red de prueba. Se nota ciertas intermitencias en la demanda de corriente. La señal A corresponde a la corriente aportada por el inversor a la red eléctrica y la señal B es la corriente demandada por la fuente de alimentación en CD.

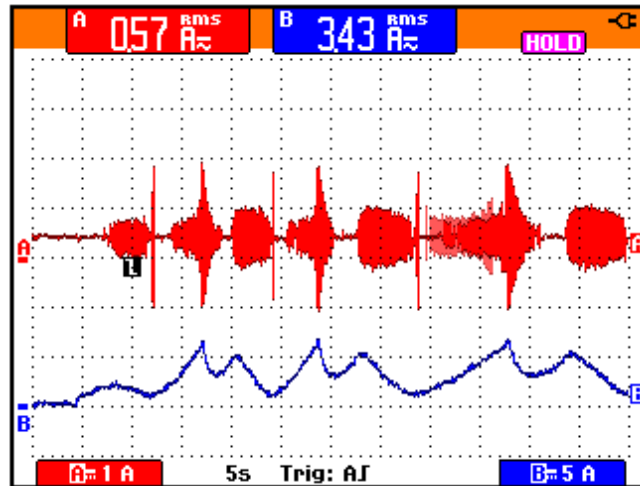


Fig. 4.11 Corriente de salida del inversor en condiciones iniciales

Se configuro al gestor para que realice de manera programada la desconexión de cargas no críticas. La figura 4.12 muestra la corriente suministrada por el inversor a la red cuando se desconectan las luminarias y las laptops.

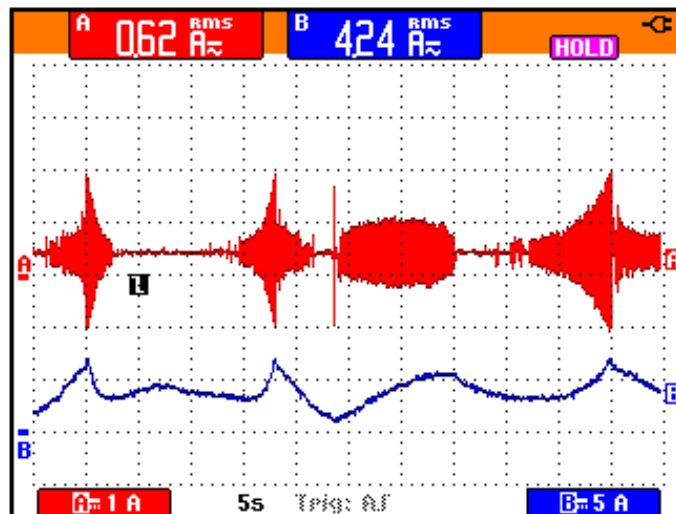


Fig. 4.12 Corriente de salida del inversor ante la desconexión de algunas cargas no-lineales

Finalmente se dejaron conectadas solo las cargas lineales. La figura 4.13 muestra el comportamiento de la corriente suministrada por el inversor. En los momentos donde los climas dejaban de operar se nota que la corriente suministrada se reducía al mínimo.

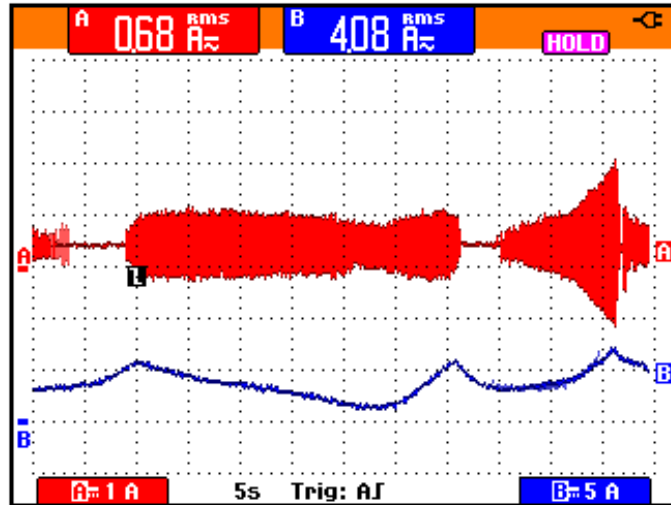


Fig. 4.13 Corriente de salida del inversor ante la desconexión de algunas cargas no-lineales

De esta manera se realizaron las pruebas de las etapas que conforman la micro red. Cabe señalar que algunas pruebas podrán realizarse cuando se tenga la infraestructura suficiente para ello. A continuación, se listan algunas limitaciones de las pruebas experimentales realizadas:

- ✓ Las pruebas se realizaron en un sistema monofásico, esto debido a que no se tuvo durante meses disponible el taller de ingeniería por construcción en su interior. Al no contar con un sistema bifásico, el desbalance de corriente en los sensores tuvo que ser inducido con fuentes externas para que el gestor inicie la reconfiguración de cargas.
- ✓ Inicialmente se contaba con dos inversores que se caracterizaron. Al final solo quedaba uno disponible por lo que la reconfiguración de los inversores entre fases no fue posible realizarla.

---

## CONCLUSIONES

---

Las redes inteligentes también conocidas como “*smart-grids*”, son una alternativa que optimiza el uso de energía. La gestión de la energía y su versatilidad ante cambios en la red ofrece a los sistemas de generación un uso eficiente de la energía generada.

Este trabajo de tesis presentó el análisis y el diseño de un gestor de energía para una micro-red inteligente. Se presentaron esquemas de operación y reconfiguración que permiten optimizar el flujo de energía desde las fuentes generadoras hasta cargas conectadas a la red eléctrica.

Se presentó un algoritmo para la toma de decisiones en las reconfiguraciones, así como algunos resultados experimentales de los inversores interconectados a la red eléctrica ante variaciones del voltaje de entrada, variaciones de carga, reconfiguraciones de fuentes etc.

En el capítulo 1 se plantea la problemática de la optimización de uso de energía en redes eléctricas; se aborda también la temática de energías renovables y las topologías para la interconexión a la red eléctrica.

En el capítulo 2, se presenta el diseño y fabricación del módulo de conmutación, se programó el algoritmo en varios sistemas embebidos y se realizaron diversas pruebas experimentales. Se desarrollaron varios algoritmos de verificación ya sea por etapas o de manera global con el objetivo de evaluar la respuesta del inversor en el sistema.

En el capítulo 3 se detalla el algoritmo de reconfiguración, se describe cada sección de éste y se presenta de manera simplificada el código de programación.

---

En el capítulo 4, se presenta las pruebas experimentales realizadas. Durante el proceso de experimentación se encuentra que existe muchas perturbaciones en la red, debido a la proximidad con otras redes eléctricas próximas, además de que la red de prueba forma parte de la red general de la universidad y no existe aislamiento entre ellas.

Si bien existieron algunas limitaciones para realizar todas las pruebas experimentales requeridas, consideramos que hay las sufrientes para verificar la funcionalidad del gestor. De igual manera consideramos que es factible realizar trabajos complementarios a esta tesis donde se realicen el análisis de flujo de potencia con algoritmos más completos, optimización de rutas, estudios de confiabilidad, etc.

---

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, and D. Morton, "Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid," in 2008 IEEE international symposium on industrial electronics, 2008, pp. 1627-1632.
- [2] Solar photovoltaic inverter requirements for smart grid applications. Innovative Smart Grid Technologies Middle East (ISGT Middle East), 2011 IEEE. ISBN:978-1-4673-0987-5
- [3] Comisión Federal de Electricidad, "Interconexión a la red eléctrica de sistemas fotovoltaicos de baja tensión" 2009
- [4] L. Chang, "Topologies of single-Phase Inverter for Small Distributed Power Generator", IEEE Trans. Power Electron., vol. 19 No. 5