



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

“DISEÑO DEL CONTROL Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS, UN INVERSOR MONOFÁSICO CONECTADO A LA RED Y BATERIAS COMO UNIDAD DE ALMACENAMIENTO”

TESINA DE SEMINARIO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Presentada por

**RONALD SEGUNDO CARCHI PARRA
MANUEL GABRIEL ROMERO CORREA**

Guayaquil – Ecuador

2010

AGRADECIMIENTO

A DIOS, luz que nos ha guiado a lo largo de nuestras vidas.

A nuestros padres responsables de nuestro desarrollo como personas de bien.

A nuestros profesores por sus conocimientos impartidos a lo largo de nuestra carrera, en especial al Msc. Sífifo Falcones Zambrano, por su guía y respaldo en la elaboración del presente trabajo.

DEDICATORIA

A Dios, que sin su bendición nada se hubiese podido realizar.

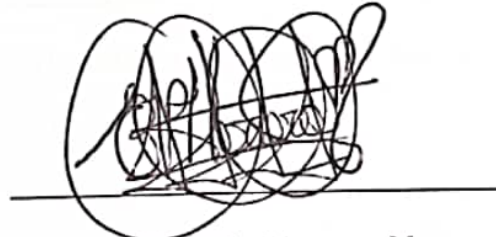
A nuestros Padres, como muestra del gran amor que tenemos por ellos.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Sixifo Falcones Z.', is written over a horizontal line. The signature is somewhat stylized and includes a large, sweeping flourish.

MSc. Sixifo Falcones Z.

PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Efrén Herrera M.', is written over a horizontal line. The signature is very dense and circular, with many overlapping loops.

MSc. Efrén Herrera M.

PROFESOR DELEGADO DEL DECANO

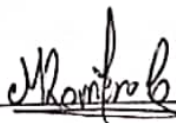
DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELASUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



Ronald Segundo Carchi Parra



Manuel Gabriel Romero Correa

RESUMEN

El presente trabajo consiste en diseñar el control de un sistema de generación de energía eléctrica basado en módulos fotovoltaicos, un inversor monofásico conectado a la red eléctrica y baterías como unidad de almacenamiento, posteriormente se comprobará el funcionamiento del sistema mediante las simulaciones realizadas en el programa MATLAB/SIMULINK.

El sistema de generación está formado por un arreglo de módulos fotovoltaicos, tres convertidores de tensión, un capacitor de enlace y una batería de almacenamiento.

Los módulos fotovoltaicos captan la energía del sol, para luego convertirla en tensión DC. Ésta tensión proveniente de los módulos es elevada mediante un convertidor DC-DC tipo Boost Aislado y es la tensión del capacitor de enlace, también es la tensión de entrada para un convertidor DC-AC, el cual mediante la técnica SPWM modulará una onda sinusoidal para su posterior conexión a la red.

Se modelarán matemáticamente los convertidores, luego se determinará el controlador más apropiado para cada uno de ellos. El propósito general es conseguir un sistema de generación eléctrica que sea capaz de aprovechar al máximo la energía captada.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|-------------|
| AGRADECIMIENTO..... | II |
| DEDICATORIA..... | III |
| TRIBUNAL DE GRADUACIÓN..... | IV |
| DECLARACIÓN EXPRESA..... | V |
| RESUMEN..... | VI |
| ÍNDICE GENERAL..... | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XV |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | XXI |
| ABREVIATURAS..... | XXII |
| SIMBOLOGÍA..... | XXV |
| INTRODUCCIÓN..... | XXVII |
| | |
| CAPÍTULO 1 | |
| DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 1 |
| 1.1 Problemas Energéticos y Medioambientales..... | 1 |
| 1.1.1 Crisis Energética Mundial..... | 1 |
| 1.1.2 El Gran Problema Medioambiental..... | 3 |
| 1.1.2.1 El Calentamiento Global..... | 3 |
| 1.1.2.1.1 Causas..... | 4 |

| | |
|---|-----------|
| 1.1.2.1.2 Consecuencias..... | 4 |
| 1.1.3 Realidad Energética del Ecuador..... | 5 |
| 1.1.3.1 Dependencia de la Hidroeléctrica Paute..... | 6 |
| 1.2 Alternativa de Solución..... | 7 |
| 1.2.1 Energía Solar Fotovoltaica..... | 8 |
| 1.2.2 Sistemas de Generación Fotovoltaica..... | 9 |
| 1.2.2.1 Sistemas Desconectados de la Red Eléctrica..... | 9 |
| 1.2.2.2 Sistemas Conectados de la Red Eléctrica..... | 9 |
| 1.2.3 Proyecto Propuesto..... | 10 |
| | |
| CAPÍTULO 2 | |
| FUNDAMENTO TEÓRICO..... | 12 |
| 2.1 Dispositivos Fotovoltaicos..... | 12 |
| 2.1.1 Célula Fotovoltaica..... | 12 |
| 2.1.1.1 Circuito Equivalente Simple de la Célula Fotovoltaica..... | 14 |
| 2.1.1.2 Tipos de Células Fotovoltaicas..... | 15 |
| 2.1.1.2.1 Células de Silicio Amorfo..... | 15 |
| 2.1.1.2.2 Célula de Silicio Monocristalino..... | 16 |
| 2.1.1.2.3 Células de Silicio Multicristalino..... | 16 |
| 2.1.1.2.4 Célula Tándem..... | 17 |
| 2.1.2 Módulo Fotovoltaico..... | 18 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.1.2.1 | Voltaje de Salida..... | 19 |
| 2.1.2.2 | Número de Células..... | 19 |
| 2.1.2.3 | Potencia de Salida..... | 19 |
| 2.1.2.4 | Curva V/I..... | 20 |
| 2.1.3 | Conjunto FV (Arreglo FV)..... | 21 |
| 2.2 | Convertidores Estáticos..... | 22 |
| 2.2.1 | Modulación por Ancho de Pulso (PWM)..... | 22 |
| 2.2.1.1 | Ciclo de Trabajo..... | 23 |
| 2.2.1.2 | Señal Portadora..... | 24 |
| 2.2.1.3 | Señal Moduladora..... | 24 |
| 2.2.1.4 | Comparador..... | 24 |
| 2.2.2 | Convertidor DC-DC tipo Boost..... | 25 |
| 2.2.2.1 | Generador de Pulsos..... | 28 |
| 2.2.3 | Convertidor DC-DC tipo Boost Aislado..... | 29 |
| 2.2.3.1 | Generador de Pulsos..... | 30 |
| 2.2.3.2 | Arreglo de Switches..... | 32 |
| 2.2.3.3 | Transformador de Alta Frecuencia..... | 35 |
| 2.2.3.4 | Puente Rectificador..... | 37 |
| 2.2.4 | Convertidor DC – AC..... | 39 |
| 2.2.4.1 | Generador de Pulsos..... | 40 |
| 2.2.4.2 | Puente Inversor..... | 43 |
| 2.3 | Herramienta de Simulación..... | 44 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.3.1 | MATLAB..... | 44 |
| 2.3.2 | SIMULINK..... | 45 |
| 2.3.3 | SimPowerSystem..... | 46 |
| 2.4 | Máximo Punto de Potencia (MPP)..... | 47 |
| 2.4.1 | Método de Perturbar y Observar (P&O)..... | 47 |
| 2.5 | Estándar de Conexión a la Red..... | 53 |
| 2.5.1 | Regulación de Voltaje..... | 54 |
| 2.5.2 | Sistema Eléctrico Aterrizado..... | 54 |
| 2.5.3 | Sincronización..... | 54 |
| 2.5.4 | Sistema Eléctrico con Coordinación de Reconexión..... | 55 |

CAPÍTULO 3

| | | |
|-------|---|-----------|
| | DIMENSIONAMIENTO, MODELAMIENTO Y DISEÑO..... | 56 |
| 3.1 | Características Eléctricas del Sistema..... | 56 |
| 3.1.1 | Voltaje de Entrada..... | 57 |
| 3.1.2 | Voltaje de Enlace..... | 57 |
| 3.1.3 | Voltaje de Salida..... | 58 |
| 3.1.4 | Potencia del Sistema..... | 59 |
| 3.1.5 | Corriente de Entrada..... | 58 |
| 3.1.6 | Corriente de Salida..... | 59 |
| 3.2 | Arreglo Fotovoltaico..... | 60 |
| 3.2.1 | Descripción del Módulo Fotovoltaico..... | 60 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 3.2.2 | Arreglo Serie de Módulos FV..... | 61 |
| 3.2.3 | Arreglo Serie-Paralelo de Módulos FV..... | 63 |
| 3.3 | Convertidor DC-DC Tipo Boost Aislado..... | 64 |
| 3.3.1 | Dimensionamiento..... | 64 |
| 3.3.1.1 | Inductor L1..... | 65 |
| 3.3.1.2 | Capacitor..... | 68 |
| 3.3.1.3 | Switches..... | 70 |
| 3.3.1.4 | Diodos..... | 72 |
| 3.3.2 | Modelamiento Matemático..... | 73 |
| 3.3.2.1 | Lazo Abierto..... | 75 |
| 3.3.2.1.1 | Comprobación de la Función de Transferencia..... | 77 |
| 3.3.2.2 | Lazo Cerrado..... | 79 |
| 3.3.2.2.1 | K Factor..... | 80 |
| 3.3.2.2.2 | Controlador..... | 85 |
| 3.3.2.2.3 | Ganancia de Lazo Abierto..... | 86 |
| 3.3.2.2.4 | Ganancia de Lazo Cerrado..... | 87 |
| 3.3.2.2.5 | Respuesta a la Función Escalón..... | 88 |
| 3.3.2.2.6 | Ejemplo en Lazo Cerrado..... | 89 |
| 3.4 | Convertidor DC-AC (Inversor)..... | 91 |
| 3.4.1 | Dimensionamiento..... | 92 |
| 3.4.1.1 | Inductor L2..... | 92 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------|-----|
| 3.4.1.2 | Capacitor de Enlace (DC-Link)..... | 94 |
| 3.4.1.3 | Switches..... | 97 |
| 3.4.2 | Modelamiento Matemático..... | 98 |
| 3.4.2.1 | Lazo Abierto..... | 100 |
| 3.4.2.2 | Lazo Cerrado..... | 102 |
| 3.4.2.3 | Control de Corriente..... | 103 |
| 3.4.2.3.1 | Controlador Gci..... | 104 |
| 3.4.2.3.2 | Ganancia de Lazo Abierto..... | 106 |
| 3.4.2.3.3 | Ganancia de Lazo Cerrado..... | 107 |
| 3.4.2.3.4 | Respuesta a la Función Escalón..... | 108 |
| 3.4.2.3.5 | Ejemplo del Control de Corriente..... | 109 |
| 3.4.2.4 | Control de Voltaje (Cascada)..... | 110 |
| 3.4.2.4.1 | Controlador Gcv..... | 111 |
| 3.4.2.4.2 | Ganancia de Lazo Abierto..... | 114 |
| 3.4.2.4.3 | Ganancia de Lazo Cerrado..... | 114 |
| 3.4.2.4.4 | Respuesta a la Función Escalón..... | 115 |
| 3.4.2.4.5 | Ejemplo del Control de Voltaje..... | 116 |
| 3.5 | Convertidor DC-DC Tipo Boost..... | 118 |
| 3.5.1 | Dimensionamiento..... | 118 |
| 3.5.1.1 | Banco de Baterías..... | 118 |
| 3.5.1.2 | Inductor..... | 119 |
| 3.5.1.3 | Switches..... | 121 |

| | | |
|--|--|-----|
| 3.5.2 | Modelamiento Matemático..... | 122 |
| 3.5.2.1 | Lazo Abierto..... | 123 |
| 3.5.2.1.1 | Comprobación de la Función de Transferencia..... | 124 |
| 3.5.2.2 | Lazo Cerrado..... | 126 |
| 3.5.2.2.1 | Controlador..... | 127 |
| 3.5.2.2.2 | Ganancia de Lazo Abierto..... | 128 |
| 3.5.2.2.3 | Ganancia de Lazo Cerrado..... | 129 |
| 3.5.2.2.4 | Respuesta a la Función Escalón..... | 130 |
| 3.5.2.2.5 | Ejemplo en Lazo Cerrado..... | 131 |
| | | |
| CAPÍTULO 4 | | |
| FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA..... | | |
| 4.1 | Conexión Del Sistema..... | 134 |
| 4.1.1 | Modelo Simplificado del Sistema..... | 135 |
| 4.1.1.1 | Etapas de Control..... | 135 |
| 4.1.1.2 | Etapas de Fuerza..... | 136 |
| 4.2 | Inicialización Del Sistema..... | 137 |
| 4.3 | Respuesta Del Sistema a Perturbaciones..... | 139 |
| 4.3.1 | Aumento y disminución de la intensidad luminosa..... | 140 |
| 4.4 | Uso Del Almacenamiento De Energía..... | 143 |
| 4.4.1 | Carga de la Batería..... | 144 |
| 4.4.2 | Descarga de la Batería..... | 146 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.5 | Componentes Adicionales Del Sistema..... | 148 |
| 4.5.1 | Seguidores Solares..... | 148 |
| 4.5.2 | Protección de Sistemas FV..... | 149 |
| 4.5.3 | Medidor de Carga de Batería..... | 150 |

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ABREVIATURAS

| | |
|---------|-------------------------------------|
| DC | Corriente Directa |
| AC | Corriente Alterna |
| AIE | Agencia Internacional de la Energía |
| EEUU | Estados Unidos de América |
| FV | Fotovoltaico |
| W | Vatios |
| KW | Kilovatios |
| Wp | Vatios pico |
| V | Voltios |
| MW | Megavatios |
| PWM | Modulación de Ancho de Pulso |
| DC LINK | Enlace de Corriente directa |
| MPPT | Máximo Punto de Potencia |
| P&O | Perturbar y Observar |
| Vref | Voltaje de Referencia |
| KVA | Kilo Voltios Amperios |
| A | Amperios |
| Hz | Hertz |

| | |
|------|---------------------------------------|
| Fp | Factor de Potencia |
| Gp | Ganancia de la Planta |
| Gc | Ganancia del Controlador |
| Gol | Ganancia de lazo Abierto |
| Gcl | Ganancia de Lazo Cerrado |
| Gpi | Ganancia de la Planta de Corriente |
| Gci | Ganancia del Controlador de Corriente |
| Goli | Ganancia de lazo Abierto de Corriente |
| Gcli | Ganancia de Lazo Cerrado de Corriente |
| Gpv | Ganancia de la Planta de Voltaje |
| Gcv | Ganancia del Controlador de Voltaje |
| Golv | Ganancia de lazo Abierto de Voltaje |
| Gclv | Ganancia de Lazo Cerrado de Voltaje |
| dB | Decibeles |
| s | Segundos |
| J | Joule |
| Ah | Amperios Hora |
| Ap | Amperios Pico |
| Vp | Voltios Pico |
| ms | Milisegundos |

| | |
|-------|-------------------------|
| Dec | Década |
| Vconv | Voltaje del Convertidor |
| Iref | Corriente de Referencia |
| Vgrid | Voltaje de la Red |

SIMBOLOGIA

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| V | Voltaje |
| I | Corriente |
| °C | Grados Centígrados |
| Ton | Tiempo de Encendido |
| Ts | Periodo de la Onda |
| D | Ciclo de Trabajo |
| Vi | Voltaje de Entrada |
| Vo | Voltaje de Salida |
| VL | Voltaje de un Inductor |
| IL | Corriente de un Inductor |
| G1 | Compuerta 1 |
| G2 | Compuerta 2 |
| IL _{ON} | Corriente de Carga de un Inductor |
| IL _{OFF} | Corriente de Descarga de un Inductor |
| S1 | Switch 1 |
| S2 | Switch 2 |
| S3 | Switch 3 |
| S4 | Switch 4 |

| | |
|-------|--|
| D1 | Diodo 1 |
| D2 | Diodo 2 |
| D3 | Diodo 3 |
| D4 | Diodo 4 |
| N | Relación de Vueltas del Transformador |
| Vp | Voltaje del Primario del Transformador |
| Vs | Voltaje del Secundario del Transformador |
| N1 | Número de Vueltas del Primario del Transformador |
| N2 | Número de Vueltas del Secundario del Transformador |
| Ga_Hi | Compuerta A en Alto |
| Ga_Lo | Compuerta A en Bajo |
| Gb_Hi | Compuerta B en Alto |
| Gb_Lo | Compuerta B en Bajo |
| VA | Voltaje de Fase A |
| VB | Voltaje de Fase B |
| VAB | Voltaje entre Línea A y B |
| Vc | Voltaje del Capacitor |
| VDC | Voltaje DC |
| ma | Índice de Modulación |
| W | Velocidad Angular |

| | |
|------------|----------------------------------|
| π | Pi |
| ΔP | Variación de Potencia |
| C | Capacitancia |
| L | Inductancia |
| RL | Resistencia |
| F | Frecuencia |
| Wn | Frecuencia Natural de Oscilación |
| E | Energía |
| Pi | Potencia de Entrada |
| Po | Potencia de Salida |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| CAPÍTULO I | |
| Figura 1.1 Histórico de la Potencia Mundial acumulada proveniente de Energía FV | 8 |
| Figura 1.2 Esquema Básico del Sistema de Generación..... | 10 |
| CAPÍTULO II | |
| Figura 2.1 Célula FV..... | 13 |
| Figura 2.2 Circuito eléctrico equivalente de la célula FV | 14 |
| Figura 2.3 Curva V/I..... | 20 |
| Figura 2.4 Etapas de la célula FV..... | 22 |
| Figura 2.5 Definición de Ton, Ts y D..... | 23 |
| Figura 2.6 Comparación para generar pulsos..... | 25 |
| Figura 2.7 Esquema del Boost..... | 26 |
| Figura 2.8 Formas de onda del voltaje y la corriente del inductor..... | 26 |
| Figura 2.9 Diagrama de Bloques de la Generación de pulsos para los switches del Boost..... | 28 |
| Figura 2.10 Esquemático del Boost Aislado..... | 29 |
| Figura 2.11 Generación de pulsos del Boost Aislado..... | 30 |
| Figura 2.12 Forma de onda de las señales portadoras..... | 30 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 2.13 | Pulsos generados para el switch G1..... | 31 |
| Figura 2.14 | Pulsos generados para el switch G2..... | 31 |
| Figura 2.15 | Arreglo de switches..... | 32 |
| Figura 2.16 | Ciclo I y III del funcionamiento del Arreglo de switches.... | 33 |
| Figura 2.17 | Ciclo II del funcionamiento del Arreglo de switches..... | 34 |
| Figura 2.18 | Ciclo IV del funcionamiento del Arreglo de switches..... | 35 |
| Figura 2.19 | Transformador de alta frecuencia..... | 36 |
| Figura 2.20 | Puente rectificador..... | 38 |
| Figura 2.21 | Forma de onda del voltaje Rectificado y no Rectificado ... | 39 |
| Figura 2.22 | Generación de pulsos y Puente Inversor del convertidor DC-AC..... | 39 |
| Figura 2.23 | Generación de pulsos del convertidor DC-AC..... | 40 |
| Figura 2.24 | Comparación entre portadoras y moduladora A y B..... | 41 |
| Figura 2.25 | Pulsos generados Ga_Hi y Ga_Lo..... | 42 |
| Figura 2.26 | Pulsos generados Gb_Hi y Gb_Lo..... | 42 |
| Figura 2.27 | Puente Inversor..... | 43 |
| Figura 2.28 | Voltaje de línea a línea..... | 43 |
| Figura 2.29 | Software usado..... | 45 |
| Figura 2.30 | Caso I del método P&O..... | 49 |
| Figura 2.31 | Caso II del método P&O..... | 50 |
| Figura 2.32 | Caso III del método P&O..... | 51 |
| Figura 2.33 | Caso IV del método P&O..... | 52 |
| Figura 2.34 | Diagrama de flujo del método P&O..... | 53 |

CAPÍTULO III

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 3.1 | Diagrama de Bloques del Sistema..... | 57 |
| Figura 3.2 | Datos Técnicos del Módulo FV..... | 61 |
| Figura 3.3 | Arreglo Serie de Módulos FV..... | 62 |
| Figura 3.4 | Arreglo Serie/Paralelo de Módulos FV..... | 63 |
| Figura 3.5 | Esquemático del Convertidor Boost Aislado..... | 65 |
| Figura 3.6 | Esquemático para dimensionar el inductor L1..... | 66 |
| Figura 3.7 | Corriente del Inductor L1..... | 67 |
| Figura 3.8 | Corriente Instantánea del Inductor L1..... | 67 |
| Figura 3.9 | Esquemático para dimensionar el capacitor C1..... | 68 |
| Figura 3.10 | Voltaje del Capacitor C1..... | 69 |
| Figura 3.11 | Voltaje Instantáneo del Capacitor C1..... | 70 |
| Figura 3.12 | Voltaje en los Switches del Boost..... | 71 |
| Figura 3.13 | Corriente en los Switches del Boost..... | 71 |
| Figura 3.14 | Voltaje en los Diodos del Boost..... | 72 |
| Figura 3.15 | Corriente en los Diodos del Boost..... | 73 |
| Figura 3.16 | Boost aislado..... | 73 |
| Figura 3.17 | Malla I..... | 73 |
| Figura 3.18 | Malla II..... | 73 |
| Figura 3.19 | Diagrama de bloque del Boost aislado..... | 77 |
| Figura 3.20 | Voltajes del capacitor (V_c) del modelo matemático | |

| | | |
|-------------|--|-----|
| | y de la planta de conmutación..... | 79 |
| Figura 3.21 | Diagrama de bloques de lazo cerrado del Boost..... | 80 |
| Figura 3.22 | Diagrama de Bode en Lazo abierto..... | 86 |
| Figura 3.23 | Diagrama de Bode en Lazo cerrado..... | 88 |
| Figura 3.24 | Respuesta del sistema a una función escalón..... | 89 |
| Figura 3.25 | Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado con planta real y modelada..... | 90 |
| Figura 3.26 | Voltaje de referencia junto a voltajes de las plantas..... | 91 |
| Figura 3.27 | Esquemático del Convertidor DC-AC..... | 92 |
| Figura 3.28 | Esquemático para dimensionar el inductor L2..... | 93 |
| Figura 3.29 | Corriente del Inductor L2..... | 93 |
| Figura 3.30 | Corriente Instantánea del Inductor L2..... | 94 |
| Figura 3.31 | Esquemático para dimensionar el DC-Link..... | 95 |
| Figura 3.32 | Voltaje del DC-Link..... | 96 |
| Figura 3.33 | Voltaje Instantáneo del DC-Link..... | 96 |
| Figura 3.34 | Voltaje en los switches del inversor..... | 97 |
| Figura 3.35 | Corriente en los switches del Inversor..... | 97 |
| Figura 3.36 | Esquemático del Convertidor DC-AC..... | 98 |
| Figura 3.37 | Voltaje del convertidor DC-AC en Lazo Abierto..... | 102 |
| Figura 3.38 | Diagrama de Bloques del control en Cascada..... | 103 |
| Figura 3.39 | Esquemático del convertidor DC-AC para diseñar el controlador de Corriente..... | 103 |
| Figura 3.40 | Diagrama de Bloques del control de corriente del | |

| | | |
|-------------|--|-----|
| | convertidor DC-AC..... | 104 |
| Figura 3.41 | Diagrama de Bode en lazo abierto de la planta de corriente del convertidor DC-AC..... | 106 |
| Figura 3.42 | Diagrama de Bode en lazo cerrado de la planta de corriente del convertidor DC-AC..... | 108 |
| Figura 3.43 | Respuesta de la planta a una función escalón..... | 109 |
| Figura 3.44 | Corriente del inductor en Lazo Cerrado..... | 110 |
| Figura 3.45 | Esquemático del convertidor DC-AC para diseñar el controlador de voltaje..... | 111 |
| Figura 3.46 | Diagrama de Bode en lazo abierto de la planta de voltaje del convertidor DC-AC..... | 115 |
| Figura 3.47 | Diagrama de Bode en lazo cerrado de la planta de voltaje del convertidor DC-AC..... | 116 |
| Figura 3.48 | Respuesta de la planta a una función escalón..... | 117 |
| Figura 3.49 | Forma de Onda de la corriente por el inductor (IL) y el voltaje del DC-link (VDC) en lazo cerrado..... | 118 |
| Figura 3.50 | Esquemático del Boost de almacenamiento..... | 119 |
| Figura 3.51 | Esquemático del convertidor Boost para el dimensionamiento del inductor L3..... | 120 |
| Figura 3.52 | Corriente por el inductor L3..... | 121 |
| Figura 3.53 | Corriente instantánea del inductor L3..... | 122 |
| Figura 3.54 | Corriente del inductor (IL) de la planta Real y la planta modelada..... | 127 |
| Figura 3.55 | Diagrama de Bloques del Lazo cerrado del Boost..... | 128 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 3.56 | Diagrama de Bode en lazo abierto del Boost..... | 130 |
| Figura 3.57 | Diagrama de Bode en lazo cerrado del Boost..... | 131 |
| Figura 3.58 | Respuesta de la planta a una función escalón..... | 132 |
| Figura 3.59 | Diagrama de bloques del sistema en Lazo cerrado con planta real y modelada..... | 133 |
| Figura 3.60 | Corriente de referencia, real por el inductor..... | 134 |

CAPÍTULO IV

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 4.1 | Modelo Simplificado del Sistema..... | 136 |
| Figura 4.2 | Etapa de control..... | 137 |
| Figura 4.3 | Etapa de fuerza..... | 138 |
| Figura 4.4 | Formas de ondas del Inicio del Sistema..... | 140 |
| Figura 4.5 | Gráfica de respuesta al cambio de intensidad de luz..... | 143 |
| Figura 4.6 | Respuesta a la carga de la batería..... | 146 |
| Figura 4.7 | Respuesta a la descarga de la batería..... | 148 |
| Figura 4.8 | Seguidor Solar con Módulo FV..... | 150 |
| Figura 4.9 | Fusible FV..... | 151 |
| Figura 4.10 | Medidor de Carga..... | 151 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| CAPÍTULO II | |
| Tabla 2.1 Rangos para la Sincronización del Sistema con la Red..... | 55 |
| CAPÍTULO III | |
| Tabla 3.1 Principales parámetros del Sistema..... | 59 |
| Tabla 3.2 Características técnicas del Módulo FV..... | 61 |
| Tabla 3.3 Tipos de Controladores..... | 81 |

INTRODUCCIÓN

El ser humano en su continua búsqueda de energía fiable y económica, lamentablemente ha abusado de aquella que proviene de combustibles fósiles, provocando el más serio problema medio ambiental como lo es el calentamiento global, el tema de mayor preocupación a nivel mundial.

Dentro de las opciones que se contemplan para minimizar este gran inconveniente, está el uso de otras fuentes de energía como: la solar, la eólica, la hidráulica, que son renovables, limpias y lo más importante, amigables con el planeta, al contrario de la proveniente de combustibles fósiles.

En la actualidad existen algunos sistemas de generación que aprovechan las energías renovables. El presente trabajo se enfoca en el diseño de un sistema que aprovecha la intensidad luminosa del sol como fuente de energía principal, con el fin de convertirla en energía eléctrica, regularla, y a su vez poder inyectarla a la red, de esta manera se contribuye a disminuir el abuso de la generación de energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles.

CAPITULO 1

DESCRIPCION DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se analizará la problemática que ha incentivado el desarrollo de este proyecto, con el deseo de plantear una alternativa que de aplicarse de manera macro, se constituya en una solución efectiva.

1.1 Problemas Energéticos y Medioambientales

Se hace referencia a problemas globales que generan gran preocupación en la actualidad. Este tipo de problemas han sido los motivos para la elaboración del presente trabajo.

1.1.1 Crisis Energética Mundial

Actualmente, el mundo se encuentra en un periodo de crisis energética, ya que dentro de algunos años, la producción mundial de petróleo convencional empezará a disminuir, al haber alcanzado actualmente el límite de producción, mientras la demanda mundial no deja de aumentar.

El consumo de petróleo se cuantificó en el año 2004 en 82'5 millones de barriles al día (cada barril contiene 159 litros) (AIE 2004), constituyendo el 40% del consumo energético y de presentar un incremento anual de su consumo a escala mundial que se ha producido cada año en lo que va del siglo, siendo los EEUU el mayor contribuyente al haber incrementado su uso en un 20% en las últimas cuatro décadas.

El choque resultante de esta creciente hambre petrolera junto con la disminución de la producción, es inevitable, a causa de la importancia de la dependencia de las economías respecto del petróleo barato. Como alternativas se están barajando multitud de opciones, desde las energías alternativas o renovables hasta las energías nucleares, aunque ninguna de ellas cuenta con una viabilidad plena.

El petróleo, hoy en día, se encuentra por todas partes, desde los plásticos utilizados en los envases o aparatos eléctricos, hasta los fertilizantes utilizados en la agricultura tienen a éste como elemento base. Entre 1945 y 1994, la inversión energética en la agricultura aumentó 120 veces, mientras que los rendimientos de las cosechas sólo aumentaron 90 veces.

1.1.2 El Gran Problema Medioambiental

El Medio Ambiente es un sistema abierto que incluye al hombre y lo que lo rodea y las estrechas relaciones que mantienen entre sí. Está formado por factores como el suelo, el agua, aire y los organismos vivos que lo habitan. Los problemas más graves son los que afectan a los recursos naturales: el agua, el aire, el suelo.

1.1.2.1 El Calentamiento Global

El calentamiento global se refiere a un aumento gradual de la temperatura en la atmósfera terrestre y en los océanos registrada en las últimas décadas. Si bien no lo indica el término, suele ser asociado este aumento de la temperatura a las actividades realizadas por el hombre. La producción excesiva de Dióxido de Carbono aumenta la existencia de los gases con efecto invernadero que son aquellos que captan los fotones infrarrojos que proviene de la tierra al ser calentada por el sol pero no generan ninguna reacción química, rotan aumentando la temperatura del aire.

1.1.2.1.1 Causas

Dentro de las causas primordiales se tiene, el uso excesivo de combustibles fósiles (carbón y petróleo) como fuentes de energía en la industria y el transporte.

Los incendios forestales podrían dejar en cualquier momento (si no ha ocurrido ya) de ser una constante ecológica natural para convertirse en una variable antropogénica en la ecuación del calentamiento global, y que el exceso de incendios forestales, motivado por la mano del hombre, podría estar implicado como una variable de primer orden en la aceleración del proceso del calentamiento global.

1.1.2.1.2 Consecuencias

El clima en la Tierra es muy difícil de predecir, porque existen muchos factores para tomar en cuenta: lluvia, luz solar, vientos, temperatura. Por eso, no se puede definir exactamente qué efectos acarreará el Calentamiento Global.

Pero, al parecer, los cambios climáticos podrían ser muy severos.

Una primera consecuencia, muy posible, es el aumento de las sequías: en algunos lugares disminuirá la cantidad de lluvias. En otros, la lluvia aumentará, provocando inundaciones.

Una atmósfera más calurosa podría provocar que el hielo cerca de los polos se derritiera. La cantidad de agua resultante elevaría el nivel del mar. Un aumento de sólo 60 centímetros podría inundar las tierras fértiles de Bangladesh, en India, de las cuales dependen cientos de miles de personas para obtener alimentos. Las tormentas tropicales podrían suceder con mayor frecuencia.

1.1.3 Realidad Energética del Ecuador

Ecuador es un país exportador de crudo (480.000 barriles diarios aproximadamente). Se puede afirmar que más del 90% de la energía que consume del país, proviene de los hidrocarburos.

Este país destina un subsidio cerca de los 2.000 millones de dólares para (importar) los combustibles fósiles (principalmente gasolina, gas y diesel). Esto es un problema porque significa que todos los ecuatorianos estamos subvencionando el consumo de esos combustibles.

El precio de la gasolina que en los mercados internacionales está alrededor de tres dólares, en Ecuador se la vende entre 1,6 y 2 dólares.

La energía que se consume en el país, es esencialmente de derivados de petróleo, debido a que se cuenta con un gran número de centrales térmicas que son el soporte para la red eléctrica nacional.

1.1.3.1 Dependencia de la Hidroeléctrica Paute

La Central Hidroeléctrica Paute Molino, o comúnmente conocida como represa Paute, se encuentra ubicada en el río Paute, a 115 kilómetros de Cuenca, Ecuador. Es la generadora hidroeléctrica más grande de este país, contribuyendo con la mayor cantidad de energía eléctrica en el país, 1100 MW.

La Fase A de la Central Paute Molino fue construida entre 1976 y 1983 y la Fase C entre 1985 y 1991. La ejecución de las obras de esta Central fue un proceso espectacular, por la magnitud de los movimientos de tierra, excavaciones, construcciones, utilización de tecnología, maquinaria y mano de obra nacional e internacional. El mayor volumen de las obras fue en la Fase A y B que comprendieron la construcción de un complejo sistema de túneles.

Por tratarse de una central hidroeléctrica, se tiene una ligada dependencia con el nivel del embalse, el cual está determinado por las lluvias en esta región. El problema empieza cuando hay ausencia de lluvias y el nivel del embalse baja, disminuyendo la producción eléctrica de esta central.

1.2 Alternativa de Solución

En vista de los problemas energéticos y medioambientales que hoy en día representan gran preocupación a nivel mundial, una solución inteligente es recurrir a la generación eléctrica mediante el uso de energías alternativas como lo es la energía solar fotovoltaica.

1.2.1 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía considerada como renovable, ya que consiste en aprovechar la radiación del sol para convertirla en energía eléctrica mediante dispositivos capaces de realizar el fenómeno fotovoltaico.

Debido al avance de la tecnología se cuenta con dispositivos capaces de aprovechar este tipo de energía, es más, es posible implementar sistemas de generación basados en ella, los cuales son un buen aporte a la reducción de la dependencia de energías basadas en combustibles fósiles.

En los últimos años ha existido un gran aumento en la producción de energía eléctrica basada en energía solar fotovoltaica, como se muestra en la siguiente gráfica.

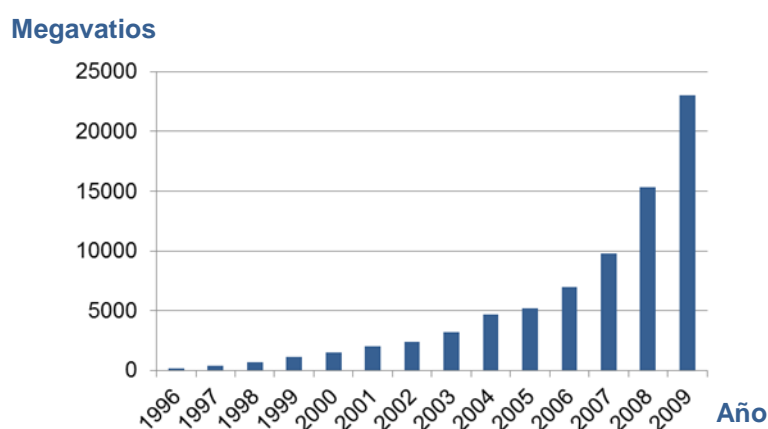


Figura 1.1 Histórico de la Potencia Mundial acumulada proveniente de Energía FV

1.2.2 Sistemas de Generación Fotovoltaica

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de dispositivos cuya función es transformar la energía solar directamente en energía eléctrica, acondicionando esta última a los requerimientos de una aplicación determinada. Estos sistemas de generación han nacido como una posible solución a los problemas energéticos existentes en la actualidad

1.2.2.1 Sistemas Desconectados de la Red Eléctrica

Son los más extendidos para proveer electricidad a lugares alejados de las redes de distribución. Normalmente, la electricidad generada es utilizada en iluminación y cargas de potencia reducida. Su rango de potencia es de 20 a 200W para hogares y 500 a 2.500W para caseríos. Pueden reemplazar o reducir la necesidad de iluminación con combustible en hogares rurales. Hasta el año 2008, existían más de 1.2 millones de sistemas instalados mundialmente.

1.2.2.2 Sistemas Conectados a la Red Eléctrica

Pueden ser de tipo distribuido o centralizado. Los de tipo distribuido proporcionan energía a una carga localizada,

conectada también a la red eléctrica. La potencia instalada de estos sistemas va desde 1 a 100kW. A menudo, la electricidad generada es inyectada a la red de distribución cuando la generación del sistema fotovoltaico es mayor que las cargas a alimentar en el lugar. Representan una **alternativa a la generación convencional centralizada** para fortalecer la calidad de sentido de la distribuidora.

1.2.3 Proyecto Propuesto

El proyecto que se plantea como solución a la problemática mencionada, consiste en diseñar los controladores de un sistema de generación de energía eléctrica basado en módulos fotovoltaicos, cuyo funcionamiento será verificado mediante un software de simulación.

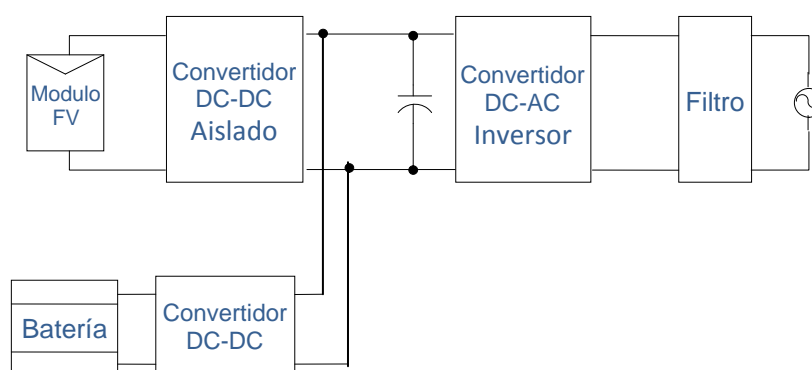


Figura 1.2 Esquema Básico del Sistema de Generación

Se busca aprovechar la energía del sol para generar energía eléctrica mediante este sistema. Como se sabe, la energía que se consume en los hogares proviene de la red eléctrica pública, por lo que el consumo se debe pagar a la empresa que provee este servicio.

El uso de una batería como almacenamiento permite guardar energía cuando se tenga excedentes, llegando al punto en que se pueda proveer energía a la red eléctrica. Así también se pudiera dar el caso que la demanda eléctrica es mayor a lo que produce el sistema, por lo que tranquilamente se podría tomar esa energía faltante de la red eléctrica pública.

Es necesario aclarar que el sistema que se va a diseñar se lo podrá aplicar, únicamente en sitios donde se reciba una sola fase de alimentación.

CAPITULO 2

FUNDAMENTO TEORICO

En este capítulo se mencionan algunos conceptos básicos para la correcta comprensión del tema tratado, y se describen las herramientas necesarias que se va a utilizar para el desarrollo del mismo.

2.1 Dispositivos Fotovoltaicos

La palabra fotovoltaico está formada por la combinación de dos palabras, una de origen griego: **foto**, que significa luz, y la otra, **voltaico** que significa eléctrico.

En definitiva los dispositivos fotovoltaicos son elementos que toman la energía del sol para convertirla en energía eléctrica.

2.1.1 Célula Fotovoltaica

La célula fotovoltaica, es el elemento sobre el que se realiza el fenómeno fotovoltaico encargado de transformar la energía solar

en eléctrica, se basa en un efecto físico denominado fenómeno fotovoltaico, que consiste en la producción de una fuerza electromotriz por acción de un flujo luminoso que incide sobre la superficie de dicha célula.

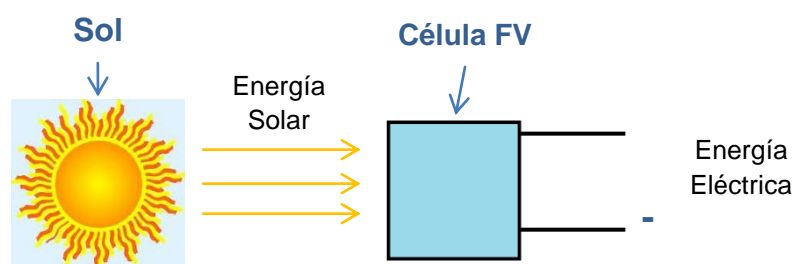


Figura 2.1 Célula FV

La célula fotovoltaica más común consiste en una delgada lámina de un material semiconductor compuesto principalmente por silicio de cierto grado de pureza, que al ser expuesto a la luz solar absorbe fotones de luz con suficiente energía como para originar el "salto de electrones", desplazándolos de su posición original hacia la superficie iluminada. Al desprenderse estos electrones con su carga negativa originan la aparición de huecos o lagunas con cargas positivas.

Como los electrones tienden a concentrarse del lado de la placa donde incide la luz solar, se genera un campo eléctrico con dos zonas bien diferenciadas: la negativa, de la cara iluminada donde están los electrones y la positiva en la cara opuesta donde se

encuentran los huecos o lagunas. Si ambas zonas se conectan eléctricamente mediante conductores adheridos a cada una de las caras de la placa el desequilibrio eléctrico origina una fuerza electromotriz o diferencia de potencial, creando una corriente eléctrica para igualar las cargas. Dicha corriente, se genera en un proceso constante mientras actúe la luz solar sobre la cara sensible de la lámina.

2.1.1.1 Circuito Equivalente Simple de la Célula Fotovoltaica

Un circuito equivalente simple para la célula fotovoltaica consiste en un diodo real en paralelo con una fuente ideal de corriente. Esta fuente va a liberar corriente de forma proporcional a la intensidad solar a la que está expuesta la célula.

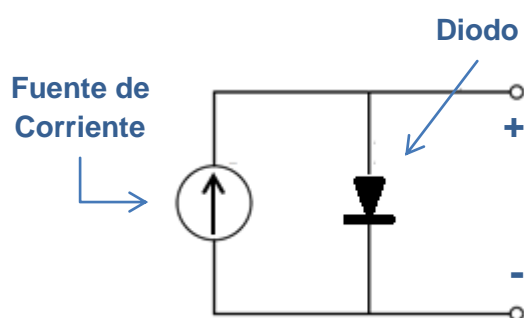


Figura 2.2 Circuito eléctrico equivalente de la célula FV

2.1.1.2 Tipos de Células Fotovoltaicas

En la actualidad se dispone de varios tipos de células fotovoltaicas que se mencionan a continuación.

2.1.1.2.1 Células de Silicio Amorfo

El silicio durante su transformación, produce un gas que se proyecta sobre una lámina de vidrio. La celda es gris muy oscuro. Es la célula de las calculadoras y relojes llamados solares. Estas células fueron las primeras en ser manufacturadas, ya que se podían emplear los mismos métodos de fabricación de diodos.

- **Ventajas:**

- Funciona con una luz difusa baja (incluso en días nublados).
- Menos costosa que otras tecnologías.
- Integración sobre soporte flexible o rígido.

- **Desventajas**

- Rendimiento a pleno sol bajo, del 5% al 7%
- Rendimiento decreciente con el tiempo (~7%).

2.1.1.2.2 Célula de Silicio Monocristalino

Al enfriarse, el silicio fundido se solidifica formando solo un único cristal de grandes dimensiones. Luego se corta el cristal en delgadas capas que dan lugar a las células. Estas células generalmente son de color azul uniforme.

- **Ventajas:**

- Buen rendimiento de 14% al 16%
- Buena relación W/m²
- Número de fabricantes elevado.

- **Desventajas**

- Costo elevado

2.1.1.2.3 Células de Silicio Multicristalino

Durante el enfriamiento de silicio en un molde se forman varios cristales. La fotocélula es de aspecto azulado, pero no es uniforme, se distinguen diferentes colores creados por los diferentes cristales.

- **Ventajas:**

- Células cuadradas (con bordes redondeados en el caso de Si monocristalino) que permite un mejor funcionamiento en un módulo.
- Eficiencia de conversión óptima, alrededor de 100 Wp/m², pero un poco menor que en el monocristalino
- Lingote más barato de producir que el monocristalino.

- **Desventajas**

- Bajo rendimiento en condiciones de iluminación baja.

2.1.1.2.4 Célula Tándem

Apilamiento monolítico de dos células individuales. Mediante la combinación de dos células (capa delgada de silicio amorfo sobre silicio cristalino, por ejemplo) que absorben en el espectro al mismo tiempo se solapan, mejorando el rendimiento en comparación con

las células individuales separadas, sean amorfas, cristalinas o microcristalinas.

- **Ventajas**

- Alta sensibilidad en un amplio rango de longitudes de onda. Excelente rendimiento.

- **Desventaja**

- El costo es alto debido a la superposición de dos células.

2.1.2 Módulo Fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos o también llamados "paneles solares", son un conjunto de células fotovoltaicas conectadas entre sí, con el objetivo de transformar la luz proveniente del sol, a energía eléctrica.

La vida útil de un módulo trabajando como generador depende de la construcción del mismo y no de la vida útil de las células FV, ya que no se conoce el límite de la vida útil de un semiconductor.

2.1.2.1 Voltaje de Salida

La industria de baterías precedió a la de los sistemas FVs, de manera que la adopción de 12V para el voltaje de salida del panel era una opción práctica. Por otra parte, este valor no demanda la conexión de un número excesivo de células en serie.

La industria de aparatos electrodomésticos usados en vehículos recreacionales adoptó asimismo el valor de 12V, de manera que el usuario de un sistema FV con este voltaje podrá incorporar electrodomésticos de DC diseñados para vehículos recreacionales en su sistema FV domiciliario.

2.1.2.2 Número de Células

En principio, se necesitaría conectar un mínimo de 24 células en serie para alcanzar un voltaje nominal de salida de 12V. Los paneles comerciales contienen un mayor número de ellas (36 o más).

2.1.2.3 Potencia de Salida

La potencia máxima de salida (potencia pico) de un panel FV es, sin duda alguna, la característica eléctrica más

importante del mismo. La implementación de un sistema FV doméstico requiere el uso de paneles con potencias de salidas entre 60 y 100 W. El uso de paneles con baja potencia de salida (menor costo) no se justifica en muchos casos, ya que deberá usarse un mayor número de ellos.

2.1.2.4 Curva V/I

Todo generador tiene una curva típica para la potencia de salida en función de la corriente de carga. El panel FV no escapa esta regla. La curva I-V de un panel FV proporciona, indirectamente, la relación mencionada, ya que asocia los valores de V e I para diferentes cargas. La potencia de salida para una condición de trabajo está dada por el producto de los valores de I y V correspondientes.

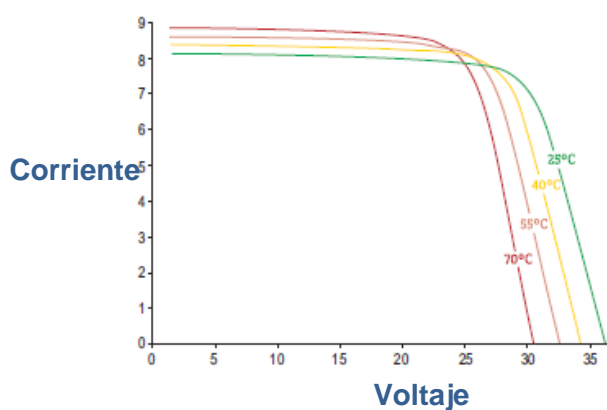


Figura 2.3 Curva V/I

Dos variables afectan la potencia de salida: la cantidad de irradiación (W/m^2) y la temperatura de trabajo del panel ($^{\circ}C$). La variación debida al nivel de irradiación sirve para estimar la acción de nubes pasajeras o de cielo totalmente nublado. Tenga presente, al respecto, que estas curvas contemplan la irradiación total (directa y reflejada) que recibe el panel. En la práctica, dependiendo del terreno, de reflejos de la luz por otras nubes, el nivel de salida puede incrementarse temporariamente, en lugar de decrecer.

2.1.3 Conjunto FV (Arreglo FV)

El módulo pasa a convertirse en el elemento primario de la parte generadora.

Cuando el consumo se incrementa, el valor de la corriente de carga aumenta, por lo que se requiere cables de mayor diámetro, los que son más costosos y difíciles de conectar. La solución es incrementar el voltaje de salida del sistema, conectando varios paneles usando una combinación serie. Si con el nuevo voltaje el consumo demanda un incremento de corriente, entonces deberán conectarse grupos de igual voltaje de salida en paralelo.

Al agrupamiento serie-paralelo de paneles se lo denomina conjunto FV. La figura a continuación muestra, los pasos de esta evolución.

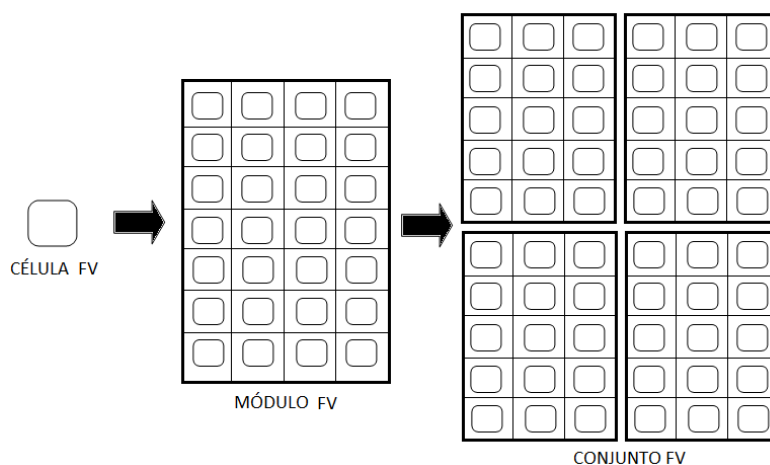


Figura 2.4 Etapas de la célula FV

2.2 Convertidores Estáticos

Los convertidores estáticos son capaces de transformar la tensión eléctrica en diversas formas, tanto de DC-DC, de DC-AC y de AC-DC.

2.2.1 Modulación por Ancho de Pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulsos es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una de una señal o fuente de energía, ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

2.2.1.1 Ciclo de Trabajo

El ciclo de trabajo de una señal periódica es la relación existente entre el tiempo en que permanece la señal en estado alto, el que se denominará T_{on} , sobre el periodo de la misma, T_s .

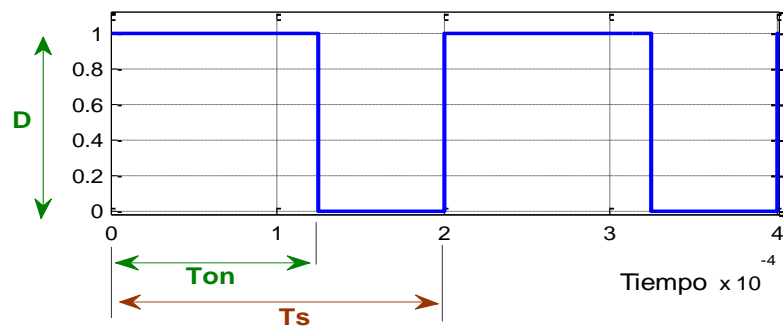


Figura 2.5 Definición de T_{on} , T_s y D

Expresado matemáticamente:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s}$$

Ecuación 2.1

D = es el ciclo de trabajo

T_{on} = es el tiempo en que la función está en alto (ancho del pulso)

T_s = es el período de la función

Un circuito básico capaz de realizar modulación por ancho de pulso, se encuentra constituido por: una señal portadora, una señal moduladora y un comparador.

2.2.1.2 Señal Portadora

La señal portadora se caracteriza por tener frecuencias elevadas mucho mayores a la de la señal moduladora, siendo las formas más comunes de esta señal portadora, las señales dientes de sierra y triangulares.

2.2.1.3 Señal Moduladora

Esta señal puede ser continua o periódica dependiendo del tipo de modulación, pero va a ser la que establezca el ancho de los pulsos y por consiguiente el ciclo de trabajo.

2.2.1.4 Comparador

El comparador es un componente que recibe la señal portadora y moduladora con el objetivo de restarlas, y en base al resultado dará en su salida una señal periódica de altos y bajos. Lo más común es que cuando la resta de las dos señales de entrada sea negativa, el voltaje en

la salida del comparador sea cero, y cuando la resta sea positiva, el voltaje de salida sea un nivel de voltaje alto.

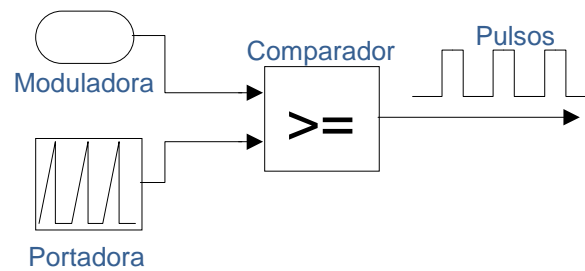


Figura 2.6 Comparación para generar pulsos

2.2.2 CONVERTIDOR DC-DC TIPO BOOST

Es un circuito eléctrico encargado de tomar la tensión de su entrada V_i y brindar una tensión de salida V_o mayor a la de la entrada.

Los switches que posee le permiten modular un voltaje promedio en su salida, gracias a la carga y descarga del inductor que posee.

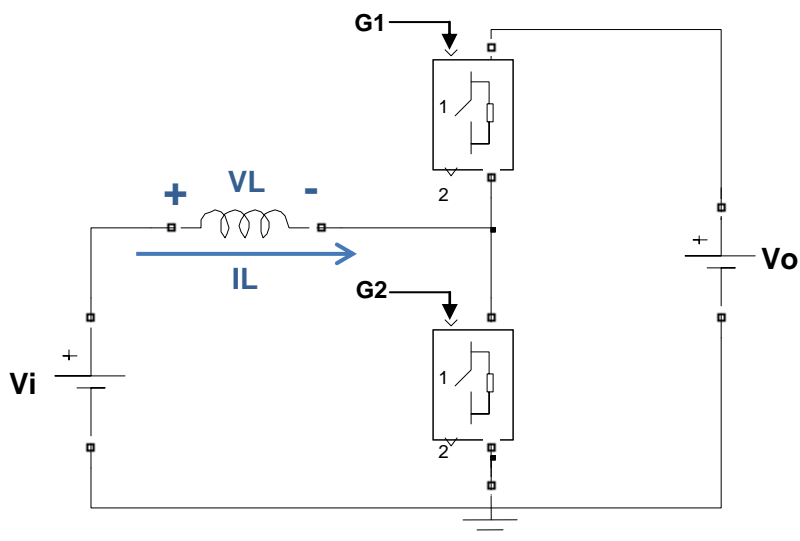


Figura 2.7 Esquema del Convertidor Boost

A continuación se muestra la forma de onda que tiene el voltaje del inductor, y la corriente del inductor, lo cual es clave para demostrar la fórmula del voltaje de salida.

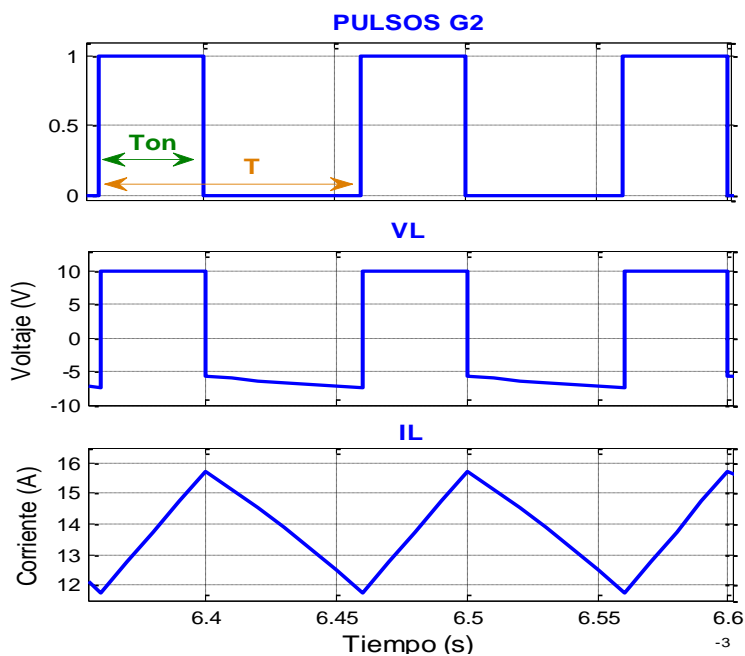


Figura 2.8 Formas de onda del voltaje y la corriente del inductor.

Cuando el switch **G2** está activado, el inductor está almacenando energía, en este momento, la corriente que pasa a través del mismo es ($I_{L_{ON}}$):

$$I_{L_{ON}} = \frac{1}{L} \int_0^{DT} V_i \partial t$$

Ecuación 2.2

$$I_{L_{ON}} = \frac{1}{L} V_i \times D \times T$$

Cuando deja de funcionar el switch **G2**, automáticamente el switch **G1** se activa, se genera un nuevo camino para la corriente, en ese instante la corriente que pasa por el inductor está definida como ($I_{L_{OFF}}$):

$$I_{L_{OFF}} = \frac{1}{L} \int_0^{(1-D)T} (V_i - V_o) \partial t$$

Ecuación 2.3

$$I_{L_{OFF}} = \frac{1}{L} (V_i - V_o)(1 - D) \times T$$

La corriente almacenada y entregada por el inductor debe de ser igual a cero, esto puede ser expresado de la siguiente manera:

$$I_{L_{OFF}} + I_{L_{ON}} = 0$$

Ecuación 2.4

$$\left(\frac{1}{L} V_i \times D \times T \right) + \left(\frac{1}{L} (V_i - V_o)(1 - D) \times T \right) = 0$$

$$(V_i \times D) + ((V_i - V_o)(1 - D)) = 0$$

$$((V_i - V_o) + (V_o \times D)) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D}$$

Ecuación 2.5

Donde:

V_o =Voltaje de salida

V_i =Voltaje de entrada

D =Ciclo de trabajo sobre el switch G2

2.2.2.1 Generador de Pulsos

Los pulsos a generarse deben ser complementarios, lo que significa que mientras un switch está apagado, el otro está encendido. Por eso se usa el bloque de negación **NOT**

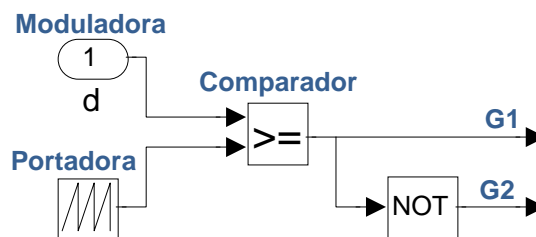


Figura 2.9 Diagrama de Bloques de la Generación de pulsos para los switches del Boost

2.2.3 CONVERTIDOR DC-DC TIPO BOOST AISLADO

También llamado convertidor elevador, debido a que su función principal es proporcionar una tensión de salida mayor a la de su entrada, así como de proveer el debido aislamiento. Este convertidor es un tipo de fuente de alimentación conmutada que se ha dividido en cuatro partes para su mejor entendimiento.

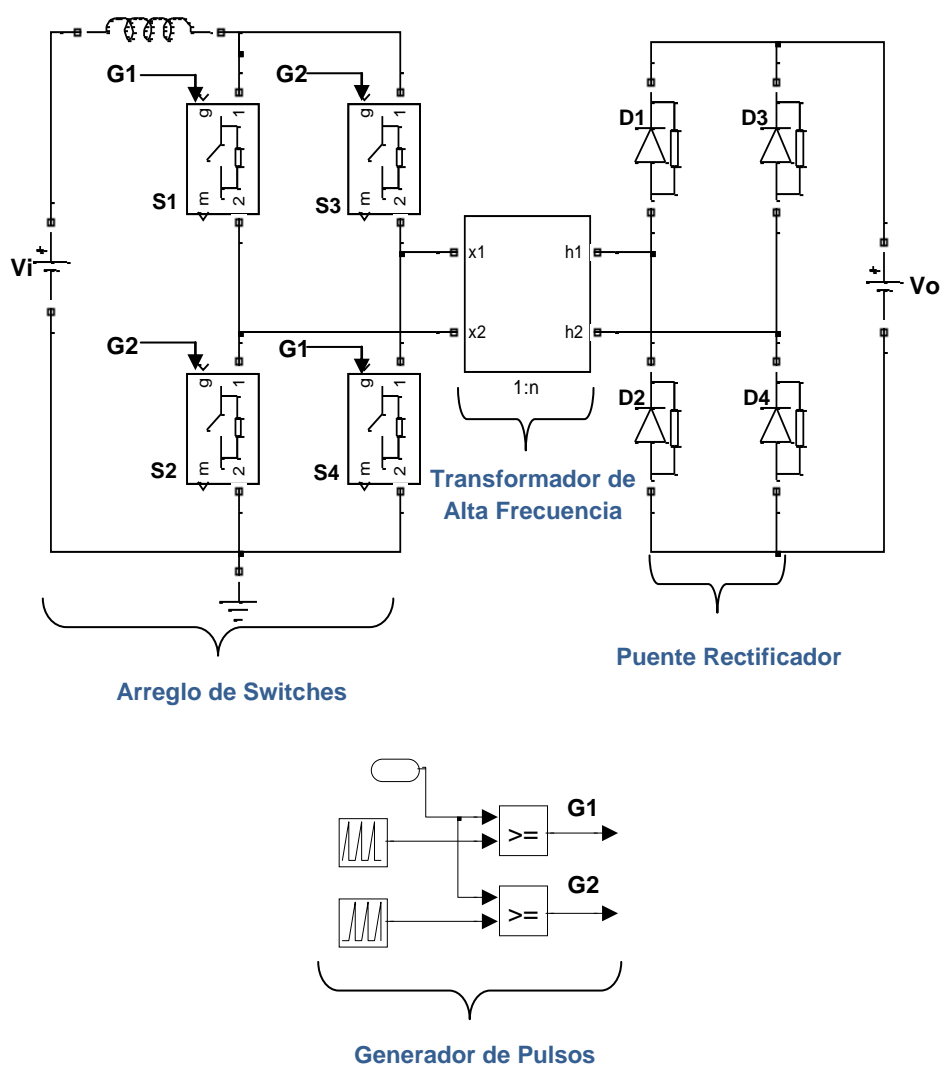


Figura 2.10 Esquemático del Boost Aislado

2.2.3.1 Generador de Pulsos

Se refiere a un arreglo de elementos que se encargan de producirlos pulsos para el encendido y apagado de los switches del convertidor Boost.

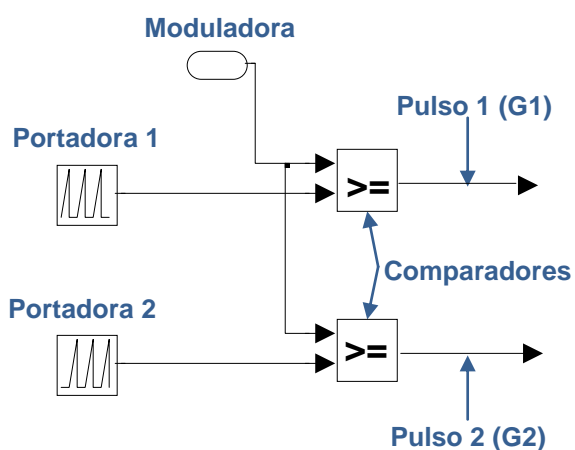


Figura 2.11 Generador de pulsos del Boost aislado.

Las señales portadoras 1 y 2 deben ser señales triangulares complementarias de la siguiente forma:

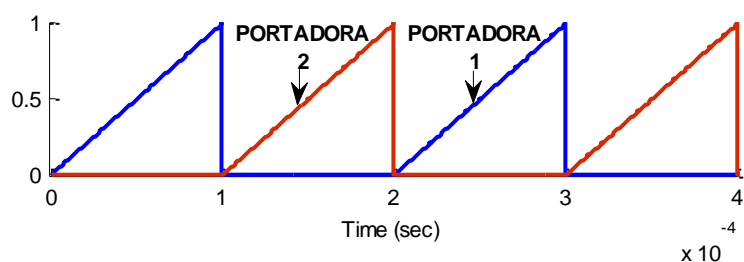


Figura 2.12 Forma de onda de las señales portadoras.

La comparación de la Portadora 1 con la señal moduladora es la responsable de generar los Pulsos 1 llamados también "G1" que son los que harán la conmutación del Switch 1 y el Switch 4, y la comparación de la Portadora

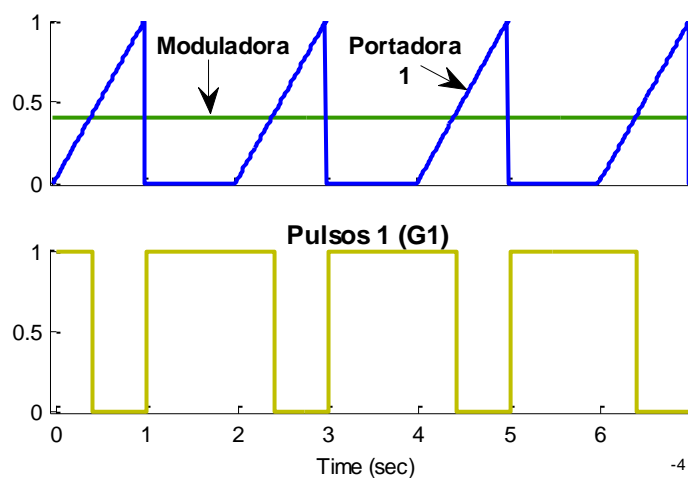


Figura 2.13 Pulsos generados para el switch S1.

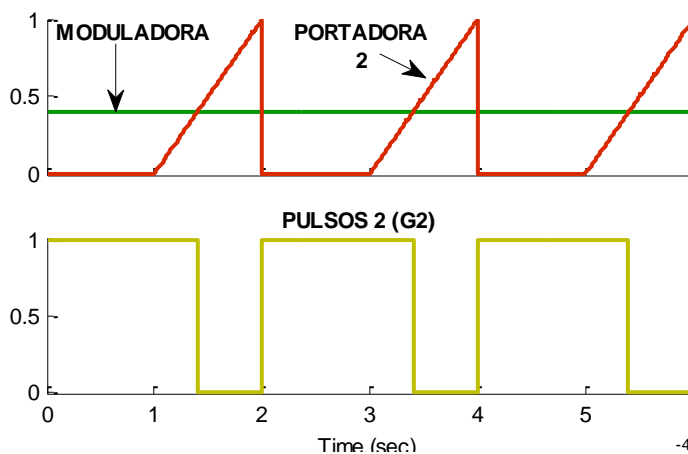


Figura 2.14 Pulsos generados para el switch S2.

2.2.3.2 Arreglo de Switches

La intención de este arreglo de switches es generar voltajes **positivos y negativos** usando la debida secuencia de encendido y apagado (pulsos) de los mismos, con el fin de enviarlos a un transformador de alta frecuencia, el cual se va a encargar de elevar los niveles de voltaje o simplemente proporcionar aislamiento.

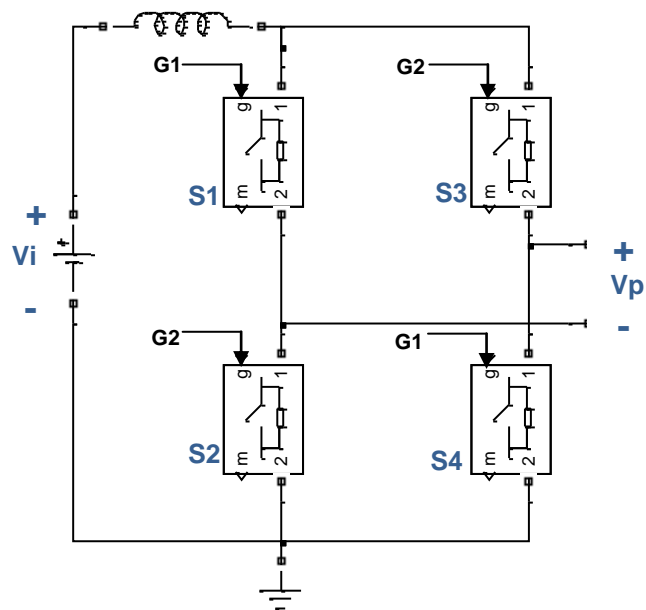


Figura 2.15 Arreglo de switches.

El principio de funcionamiento de este convertidor se fundamenta en la carga y descarga de un inductor, los cuales suceden en cuatro ciclos.

El **Ciclo I** y **III** se caracterizan por encontrarse todos los switches encendidos. En este caso el inductor se carga mediante el lazo que se aprecia en la figura, adquiriendo la energía que le provee una batería u otra fuente de voltaje DC, el que está representado con V_i . Entiéndase que en este ciclo esta **fente DC entrega energía** al inductor, el cual mantiene un sentido de corriente en la dirección del lazo mostrado en la figura. El voltaje de salida para estos casos es:

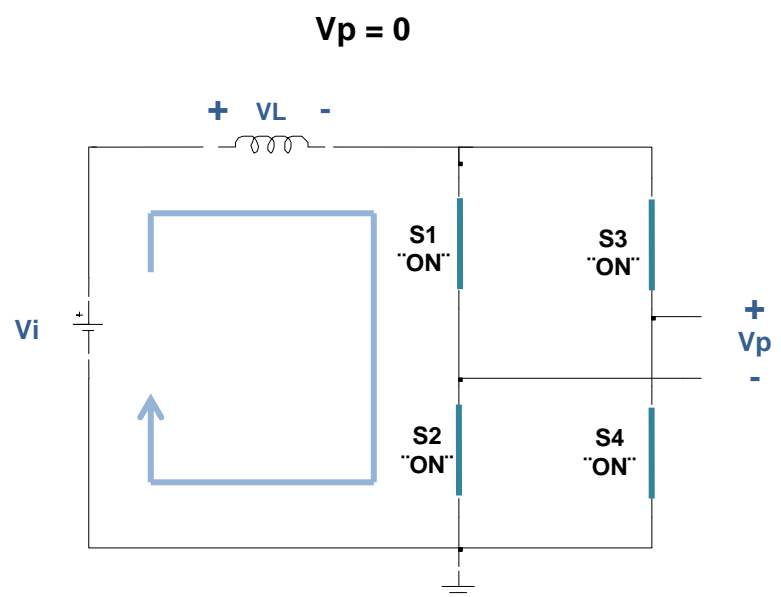


Figura 2.16 Ciclo I y III del funcionamiento del Arreglo de switches

En el **Ciclo II** se apagan los switches S1 y S4, mientras que S2 y S3 se mantienen encendidos. Como en el caso

anterior el inductor se cargó gracias a la fuente DC y debido a que es un elemento que se opone a los cambios bruscos de corriente, el sentido de la corriente a través de este nuevo lazo se mantiene pero cambiando la polaridad del inductor debido a que éste elemento **entrega la energía** almacenada en este caso. Debido a esto, el voltaje instantáneo de salida es:

$$V_p = V_i + V_L$$

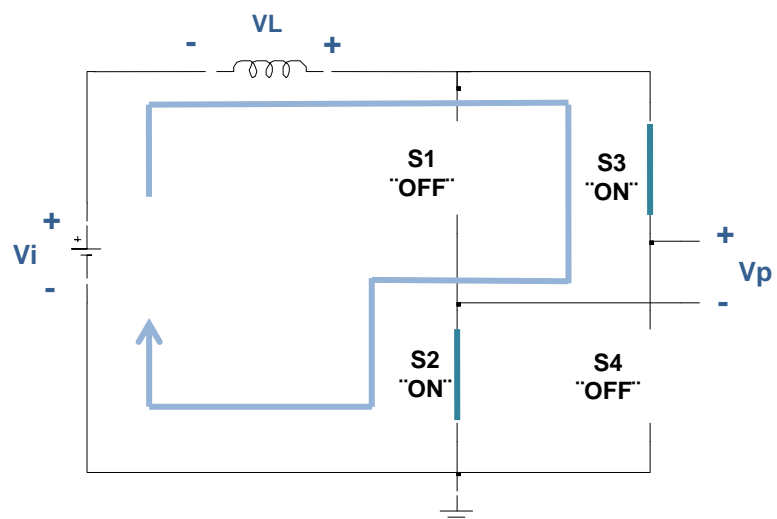


Figura 2.17 Ciclo II del funcionamiento del Arreglo de switches

En el **Ciclo IV** se apagan los switches S2 y S3, mientras que S1 y S4 se mantienen encendidos. Aquí sucede lo mismo que en el ciclo II con respecto al inductor, la diferencia está en que debido a la conmutación opuesta

de los switches el voltaje de salida instantáneo cambia de polaridad resultando:

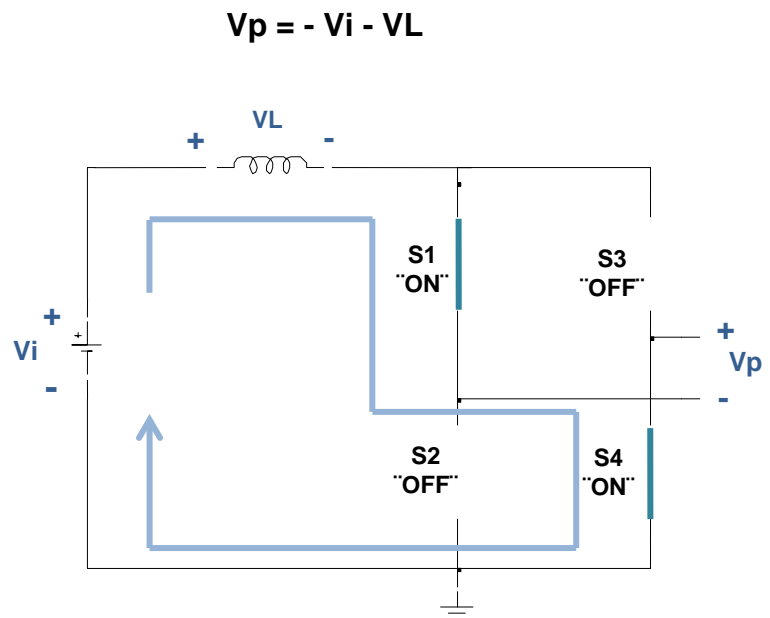


Figura 2.18 Ciclo IV del funcionamiento del Arreglo de switches

2.2.3.3 Transformador de Alta Frecuencia

Se lo utiliza principalmente como medida de protección, en equipos que trabajan directamente con la tensión de red. En el presente proyecto por tratarse de convertidores que están conectados a la red, el transformador de alta frecuencia se vuelve un **elemento necesario**.

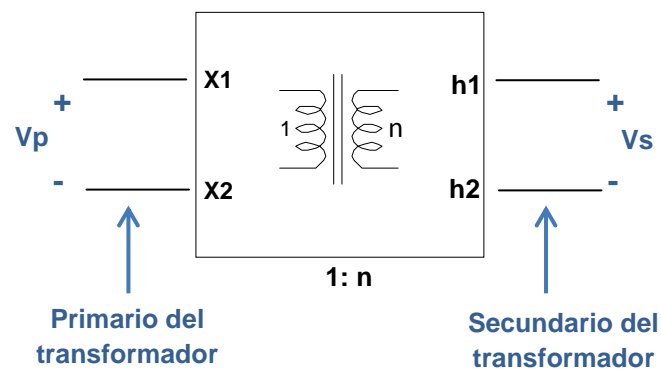


Figura 2.19 Transformador de alta frecuencia.

El transformador de alta frecuencia también se caracteriza por presentar tamaños mucho más pequeños que el de un transformador común, debido a que se reduce la cantidad de vueltas en el devanado primario y secundario. Esta reducción de tamaños brinda ventajas como ahorro de costos y de espacio en la implementación de distintas aplicaciones.

Las relaciones del transformador de alta frecuencia tanto de voltaje como de corriente, obedecen a las del transformador tradicional.

N1: Número de vueltas del devanado primario.

N2: Número de vueltas del devanado secundario.

$$\mathbf{n} = \frac{N1}{N2}$$

Ecuación 2.5

n: Relación de vueltas del transformador

Vp: Voltaje del primario

Vs: Voltaje del secundario

$$\frac{Vp}{Vs} = n$$

Ecuación 2.6

2.2.3.4 Puente Rectificador

Se emplean cuatro diodos dispuestos conforme a la figura 2.20. Sólo son posibles dos estados de conducción, los diodos 1 y 4 conducen (tensión positiva) y el 2 y 3 no conducen, o por lo contrario solo los diodos 2 y 3 conducen y el 1 y 4 no conducen.

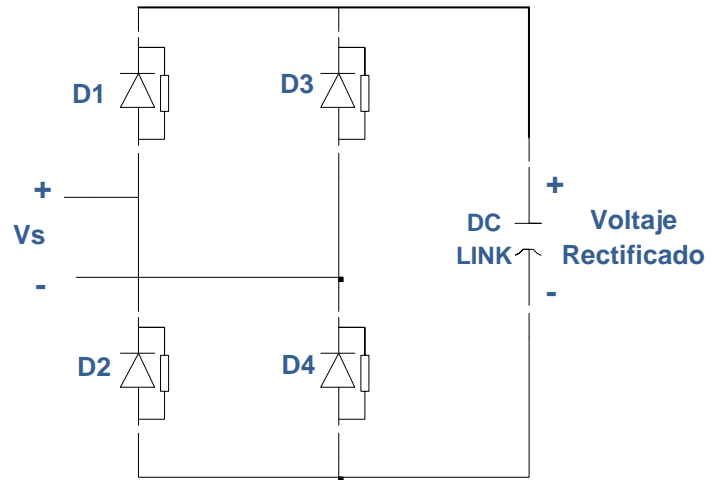


Figura 2.20 Puente rectificador.

El motivo de usar este puente rectificador se debe a que en la salida del transformador de alta frecuencia se tiene un voltaje alterno (voltajes positivos y negativos) que en promedio da un voltaje igual a cero. Por esto razón se rectifica dicho voltaje, obteniendo voltajes positivos con valor promedio positivo y regulable, el cual va a proveer energía al capacitor de enlace.

Para tener una mejor idea de la función que cumple el puente rectificador, se presenta las siguientes gráficas con sus respectivas señales.

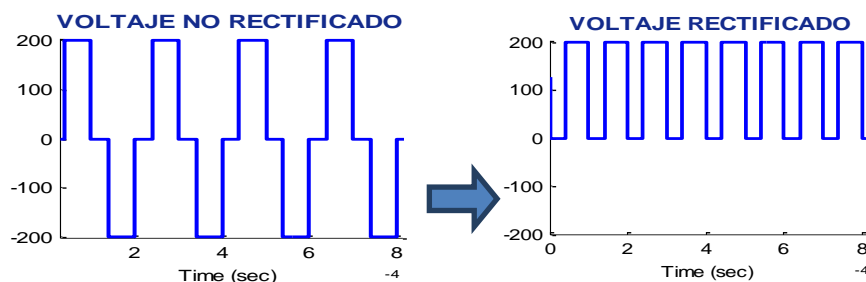


Figura 2.21 Forma de onda del voltaje Rectificado y no Rectificado (Vs).

2.2.4 CONVERTIDOR DC – AC

También llamado inversor, su función principal es la de recibir un voltaje DC en su entrada y mediante técnicas de conmutación de switches, entregar en su salida un voltaje AC, pudiendo ser comúnmente un voltaje sinusoidal o cualquier otro tipo de voltaje variable.

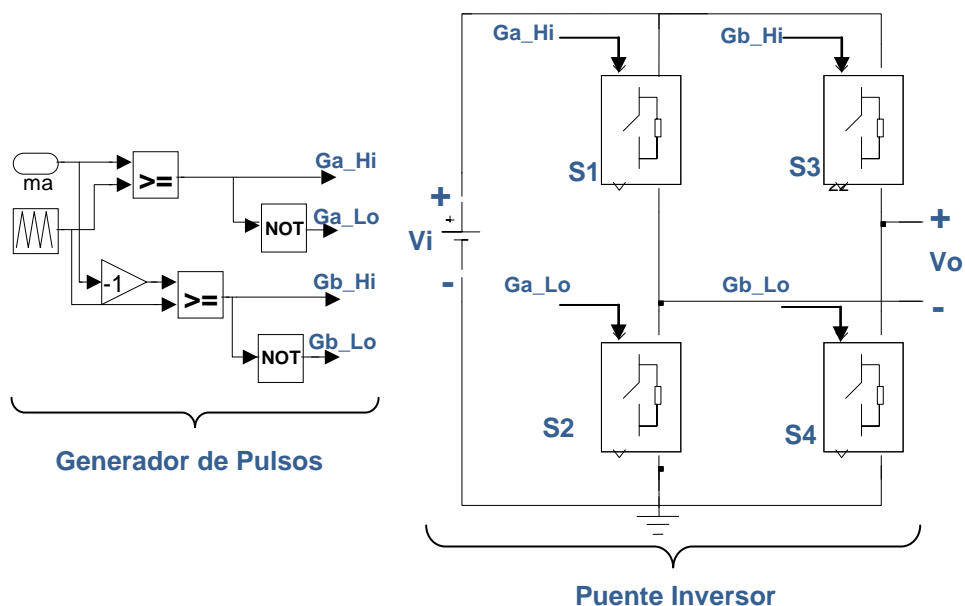


Figura 2.22 Esquema del Convertidor DC-AC.

Los convertidores DC-AC pueden ser monofásicos, bifásicos, trifásicos o polifásicos, dependiendo de la aplicación que vaya a tener.

Para un mejor análisis de este convertidor, se lo ha dividido en dos partes que a continuación se las describe en detalle.

2.2.4.1 Generador de Pulsos

Es el encargado de producir cuatro señales de pulsos, dos principales y dos complementarias, que serán las que controlen el encendido y apagado de los switches S1, S2, S3 y S4 del puente inversor.

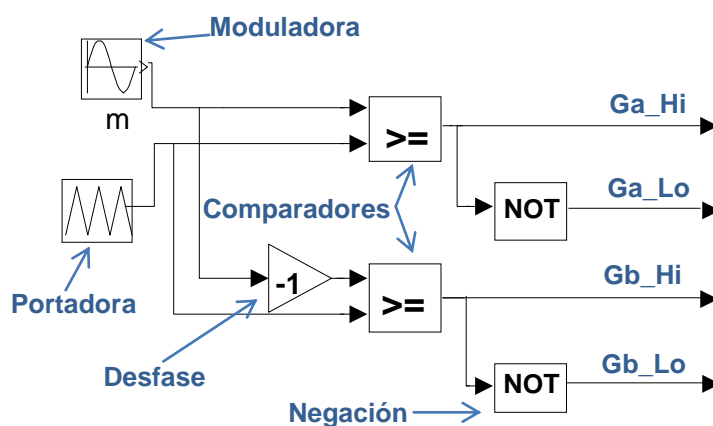


Figura 2.23 Generación de pulsos del convertidor DC-AC.

El generador de pulsos recibe una señal moduladora y una portadora. Esta señal moduladora es de tipo sinusoidal y se la ha llamado Moduladora A, luego esta señal se la desfasa 180 grados para obtener una segunda señal moduladora la que se llama Moduladora B. La portadora es una señal triangular de frecuencia mucho mayor a las ondas seno.

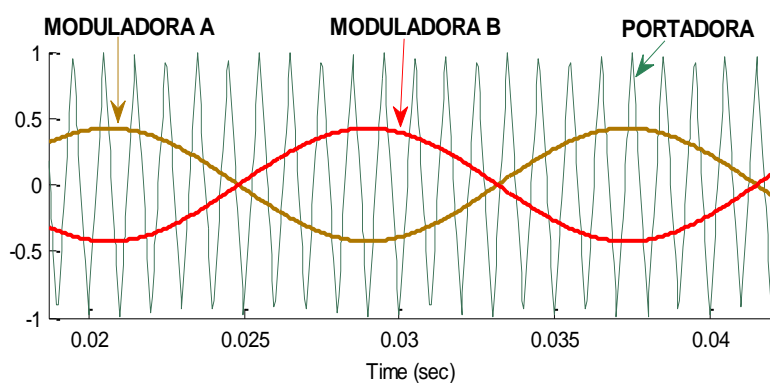


Figura 2.24 Comparación entre portadora y Moduladora A y B.

La Moduladora A se compara con la Portadora, generando la señal de pulsos **Ga_Hi** que controlará el switch S1 del puente inversor. La señal de pulsos **Ga_Lo** proviene del complemento de Ga_Hi y será la que controle el switch S2.

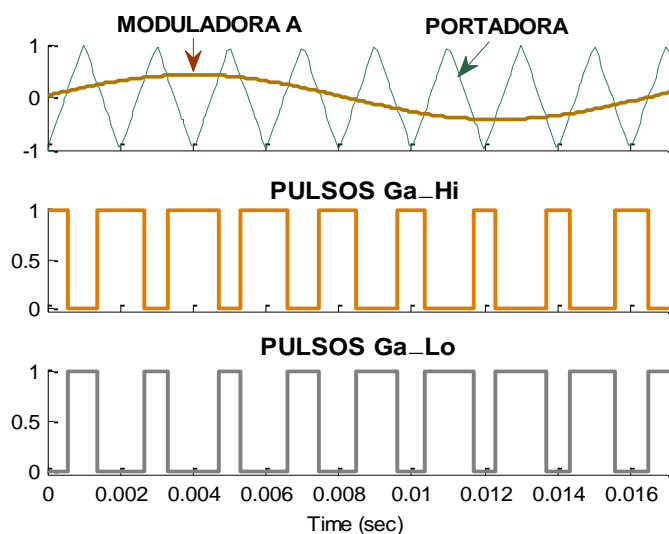


Figura 2.25 Pulsos generados Ga_Hi y Ga_Lo.

De la misma manera, con la comparación de la Moduladora B y la Portadora, se generan los pulsos **Gb_Hi** que van al switch S3. El complemento de estos pulsos da origen a los pulsos **Gb_Lo** que son para el switch S4.

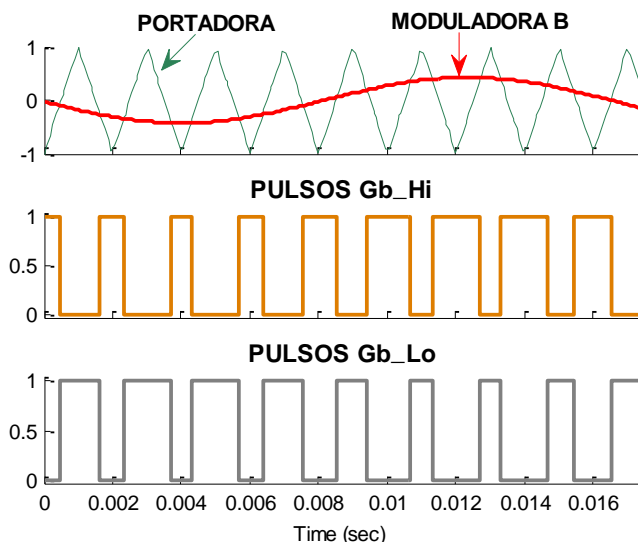


Figura 2.26 Pulsos generados Gb_Hi y Gb_Lo.

2.2.4.2 Puente Inversor

Se encuentra formado por los switches encargados de realizar la conmutación de voltaje. Este puente es capaz de generar cualquier tipo de señal alterna, con la posibilidad de variar amplitud y frecuencia.

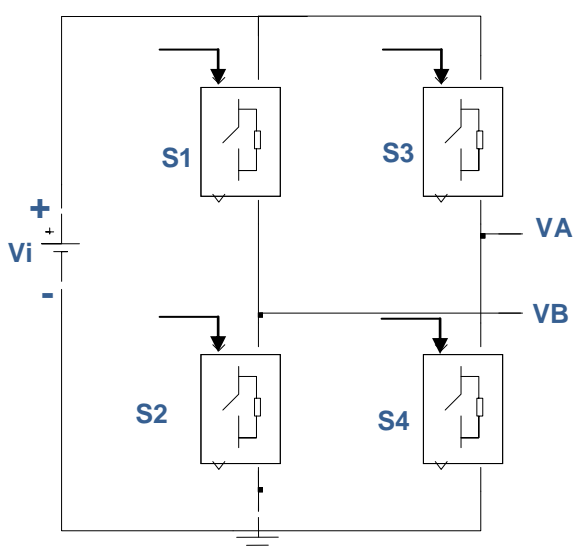


Figura 2.27 Puente Inversor.

En la siguiente gráfica se observa el voltaje de línea a línea VAB.

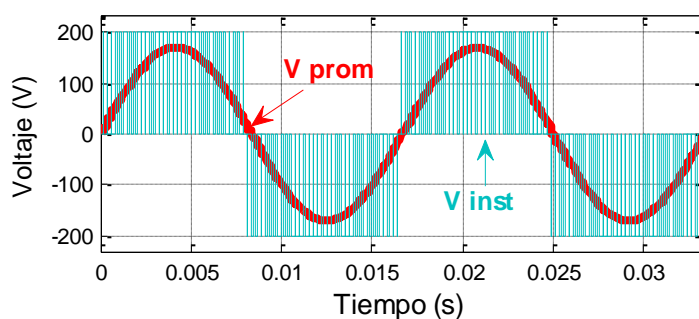


Figura 2.28 Voltaje de línea a línea.

A continuación se hace la demostración del voltaje de salida de este convertidor.

$$\begin{aligned}\bar{V}_a &= \frac{V_{DC}}{2} + m_A \frac{V_{DC}}{2} \text{Sin}(\omega t + \theta) \\ \bar{V}_b &= \frac{V_{DC}}{2} + m_A \frac{V_{DC}}{2} \text{Sin}(\omega t + \theta + \pi) \\ \bar{V}_{ab} &= \bar{V}_a - \bar{V}_b = m_A V_{DC} \text{Sin}(\omega t + \theta) = m V_{DC} \\ \hat{V}_{ab} &= \hat{V}_{conv} = \hat{V}_{AC} = m_A V_{DC}\end{aligned}$$

Ecuación 2.7

Donde:

VAB: Voltaje de salida del inversor

Ma: Índice de Modulación

VDC: Voltaje de Enlace

2.3 Herramienta de Simulación

Se hace uso de este tipo de herramientas para comprobar los modelos de las plantas, de los controladores y las diferentes demostraciones gráficas, es necesario valerse de un software que permita realizar todo esto.

2.3.1 MATLAB

MATLAB es un ambiente de cómputo, de alta ejecución numérica y de visualización. MATLAB integra el análisis numérico, cálculo

de matrices, procesamiento de señales y realización de gráficas en un ambiente sencillo de utilizar, donde los problemas y sus soluciones son expresados justamente como están escritas; a diferencia de la programación tradicional

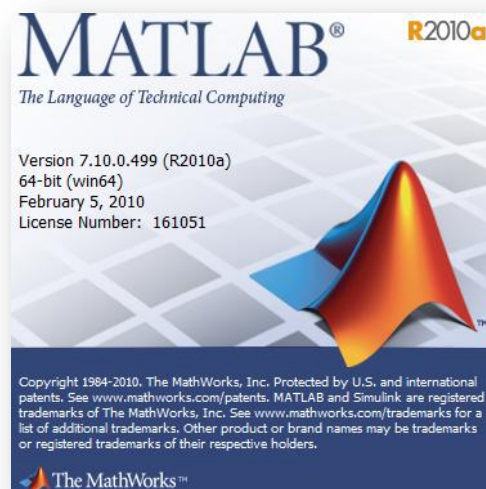


Figura 2.29 Software usado.

2.3.2 SIMULINK

Simulink es una librería de MATLAB que permite la simulación de procesos mediante diagramas de bloques, también da la posibilidad de modelar y analizar sistemas dinámicos.

Funciona sobre MATLAB, es decir, para iniciar SIMULINK es necesario entrar antes en MATLAB. Ambos programas están desarrollados y comercializados por *TheMathWorks, Inc.* SIMULINK es soportado en sistemas Windows, Unix o Macintosh

Simulink puede simular cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas y ecuaciones diferenciales discretas. Esto significa que se puede modelar sistemas continuos en el tiempo, discretos en el tiempo o sistemas híbridos

SIMULINK puede trabajar con:

- Sistemas lineales y no lineales
- Sistemas en tiempo continuo, muestreados o un híbrido de los dos.
- Sistemas multifrecuencia

2.3.3 SimPowerSystem

SimPowerSystem es una herramienta del entorno Simulink que permite diseñar y analizar la generación, transmisión, distribución y consumo en sistemas eléctricos.

Comparte la arquitectura de SimMechanics, herramienta de análisis para conjuntos mecánicos, lo que facilita la integración de componentes electromecánicos y sistemas de control en la simulación. Sus bibliotecas permiten desarrollar sistemas complejos e independientes, como los usuales en automóviles,

aeronaves, plantas de proceso y plantas de generación de energía eléctrica.

2.4 Máximo Punto de Potencia (MPPT)

La potencia suministrada por el generador fotovoltaico varía dependiendo de las condiciones de entorno como puede ser la temperatura, la irradiación y también debido a las variaciones de la carga conectada al sistema. Por tanto, es conveniente establecer algoritmos de control del ciclo de trabajo que permitan extraer la máxima potencia posible del generador fotovoltaico en cualquier condición de temperatura, irradiación y carga. Estos algoritmos se denominan MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) y su objetivo es ajustar el punto de trabajo de operación del generador fotovoltaico para que este se corresponda con el MPPT. El método escogido para el presente trabajo se describe a continuación.

2.4.1 Método de Perturbar y Observar (P&O)

Este algoritmo de seguimiento de potencia varía el voltaje del panel y monitoriza la potencia resultante. Si la potencia medida es mayor que la medida en la muestra anterior se continúa realizando la misma variación en el voltaje (aumento o disminución), si la potencia es menor que la obtenida en la

muestra anterior, se realiza la variación de voltaje opuesta (disminución o aumento) a la que se estaba haciendo en el ciclo anterior. Las muestras del voltaje del panel solar permiten ubicar el punto de operación. Una vez alcanzado el punto de máxima potencia el algoritmo P&O hará que el punto de operación del panel oscile en torno a él.

A continuación se muestran gráficamente los cuatro casos posibles en los que se puede encontrar el sistema fotovoltaico y la correspondiente acción de control a ejercer sobre el ciclo de trabajo para alcanzar el Máximo Punto de Potencia.

Primer Caso: Acercándose a MPPT y $PO < MPPT$

$$\Delta P = P(k) - P(k-1) > 0 \text{ y } \Delta V = V(k) - V(k-1) > 0 :$$

En este caso el incremento de potencia ΔP , definido como la potencia actual menos la potencia en la muestra anterior, es positivo. Igualmente el incremento de tensión de salida del generador fotovoltaico también es positivo. La acción de control a realizar en este caso es disminuir el ciclo de trabajo de forma que siga aumentando la tensión de salida del panel solar hasta que se alcance el punto MPPT.

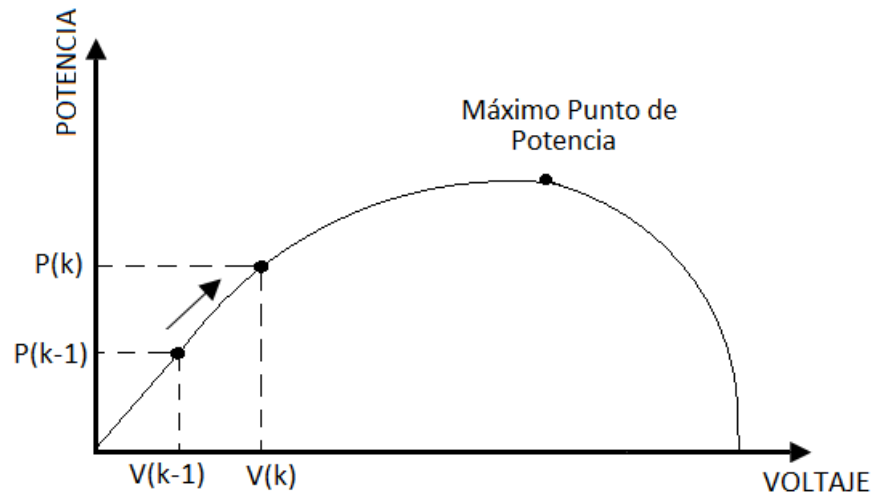


Figura 2.30 Caso I del método P&O

Segundo Caso: Acercándose a MPPT y $P_O > MPPT$

$$\Delta P = P(k) - P(k-1) > 0 \text{ y } \Delta V = V(k) - V(k-1) < 0 :$$

En este caso el incremento de potencia ΔP , es positivo mientras que el incremento de tensión de salida es negativo. La acción de control a realizar en esta situación es aumentar el ciclo de trabajo de forma que siga disminuyendo la tensión de salida del panel solar hasta que se alcance el punto MPP

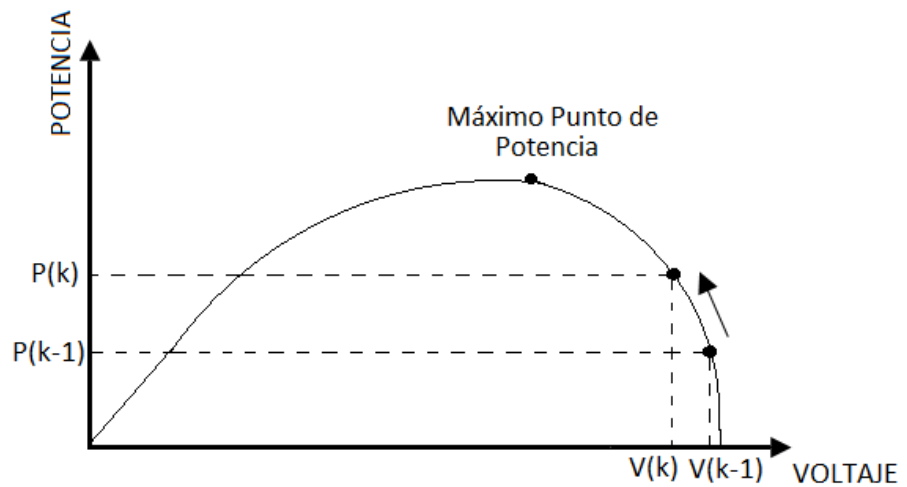


Figura 2.31 Caso II del método P&O

Tercer Caso: Alejándose de MPPT y $PO < MPPT$

$$\Delta P = P(k) - P(k-1) < 0 \text{ y } \Delta V = V(k) - V(k-1) < 0 :$$

El incremento de potencia ΔP y de tensión de salida es negativo.

La acción de control a realizar en este caso es, como en el caso a), disminuir el ciclo de trabajo de forma que aumente la tensión de salida del panel solar hasta que se alcance el punto MPPT

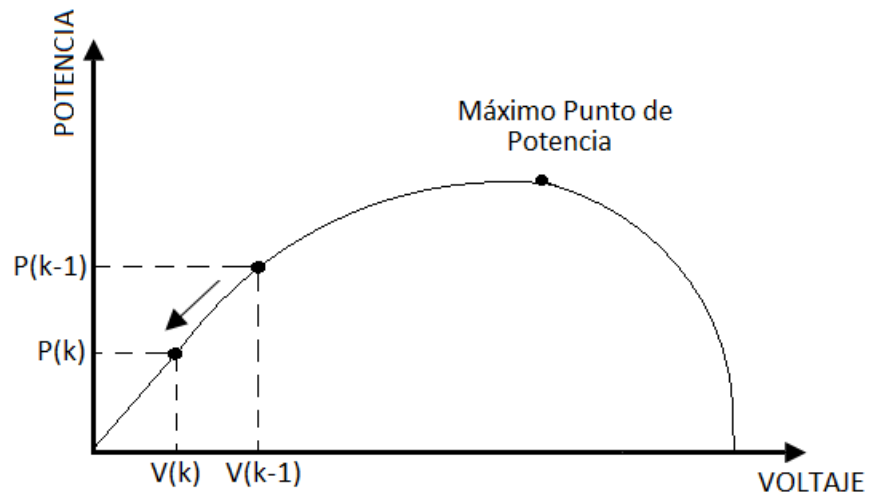


Figura 2.32 Caso III del método P&O

Cuarto Caso: Alejándose de MPPT y $PO > MPPT$

$$\Delta P = P(k) - P(k-1) < 0 \text{ y } \Delta V = V(k) - V(k-1) > 0 :$$

El incremento de potencia ΔP , es *negativa* mientras que el incremento de tensión de salida es positivo. La acción de control a realizar en esta situación es aumentar el ciclo de trabajo de forma que siga disminuyendo la tensión de salida del panel solar hasta que se alcance el punto MPPT.

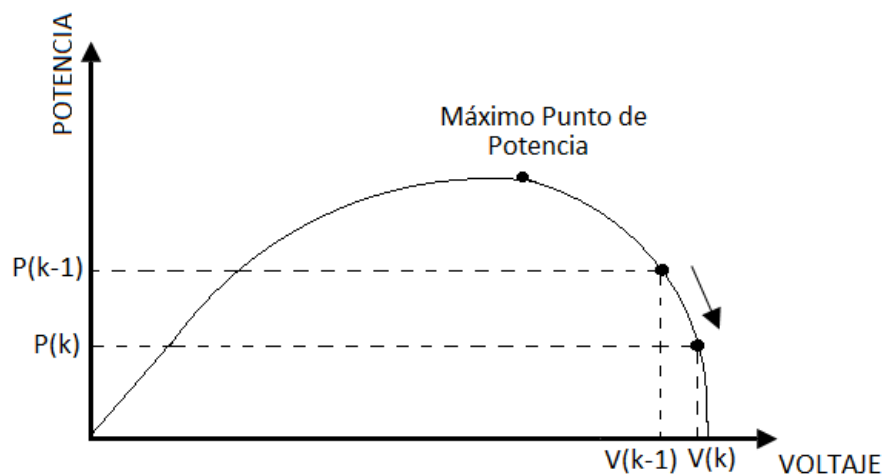


Figura 2.33 Caso IV del método P&O

Gracias a los pasos descritos anteriormente y teniendo en cuenta la forma de la curva de potencia, se puede mantener el punto de funcionamiento oscilando entorno al punto de máxima potencia. La oscilación se puede minimizar reduciendo el tamaño de los incrementos, aunque esto, por otro lado, reduce la velocidad de convergencia hacia el MPP. Este método funciona tanto con el uso de valores instantáneos como con valores medios. Sin embargo puede fallar ante cambios muy bruscos de la irradiación. A continuación se muestra el algoritmo utilizado para facilitar la aplicación de este método.

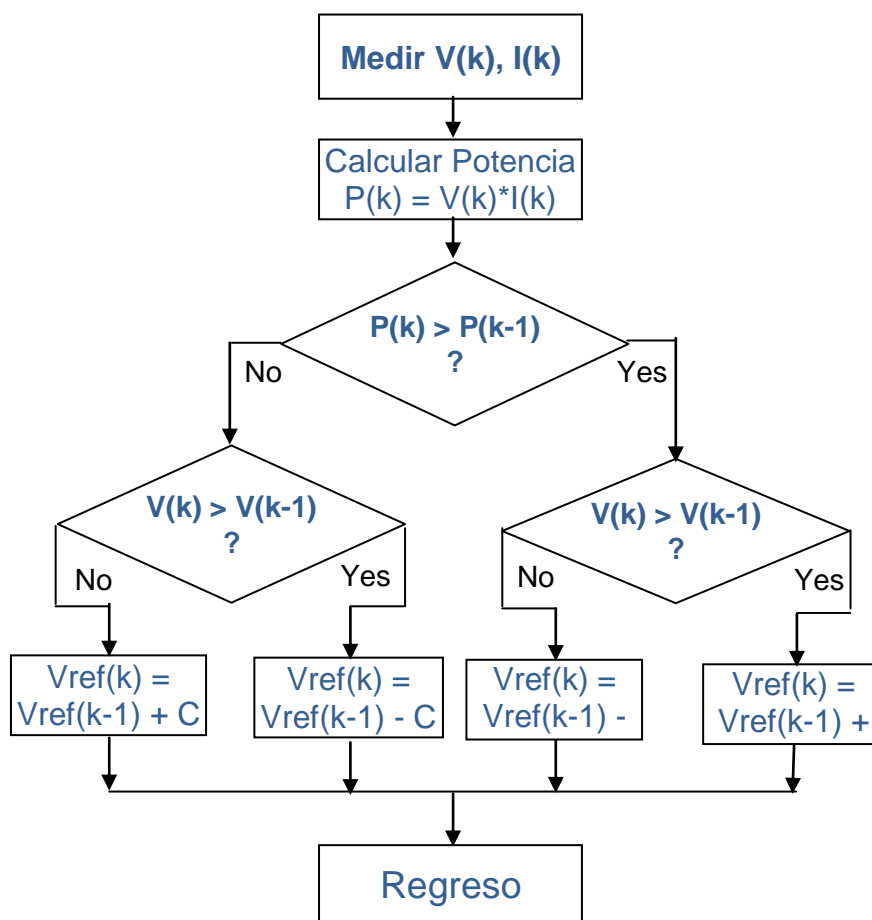


Figura 2.34 Diagrama de flujo del método P&O.

2.5 Estándar de Conexión a la Red

El estándar de conexión a la red consiste en un grupo de consideraciones y normativas que se deben tomar con total responsabilidad en la conexión de un sistema a la red eléctrica, ya que permite prevenir fallas que pueden causar daños serios en el equipo, o lo que es peor, daños en las personas.

2.5.1 Regulación de Voltaje

El voltaje en cualquier punto dado está sujeto a cambios constantes y se necesita de la regulación de voltaje para mantener el voltaje dentro de límites aceptables, siendo 5% la desviación máxima permitida en comparación con el voltaje nominal del sistema, esto de acuerdo a los límites de la norma ANSI C84.1-2006.

2.5.2 Sistema Eléctrico Aterrizado

Es muy importante contar con un sistema eléctrico debidamente aterrizado ya que garantiza las siguientes condiciones:

- Mayor seguridad del personal y equipos
- Mayor confiabilidad del servicio
- Menores magnitudes de los transitorios
- Mayor facilidad de la localización de las fallas a tierra.

2.5.3 Sincronización

Para llevar a cabo la sincronización de los sistemas eléctricos, se debe mantener los siguientes rangos de diferencias:

Tabla 2.1 Rangos para la sincronización del Sistema con la Red

| Potencia (KVA) | Diferencia de Frecuencias, Δf (Hz) | Diferencia de Voltaje, ΔV (%) | Diferencia del Ángulo de Fase, $\Delta \Phi$ (grados) |
|----------------|--|---------------------------------------|---|
| 0 - 500 | 0.3 | 10 | 20 |
| > 500 - 1500 | 0.2 | 5 | 15 |
| > 1500 - 10000 | 0.1 | 3 | 10 |

2.5.4 Sistema Eléctrico con Coordinación de Reconexión

Limita la duración de las interrupciones. Del 70 al 95% de las fallas, son por condiciones ambientales. Los reconectores pueden ser desde instantáneos (milisegundos) hasta minutos.

CAPITULO 3

DIMENSIONAMIENTO, MODELAMIENTO Y DISEÑO.

En el presente capítulo se procede a dimensionar los valores de los elementos del sistema de generación, posterior a eso se modelará matemáticamente los convertidores para encontrar las funciones de transferencia y de esta forma poder diseñar el controlador para cada uno de ellos.

3.1 Características Eléctricas del Sistema

El paso previo al dimensionamiento, modelado y diseño, consiste en establecer claramente los parámetros de funcionamiento del sistema. Tanto voltajes, corrientes y lo más importante, la potencia del sistema de generación.

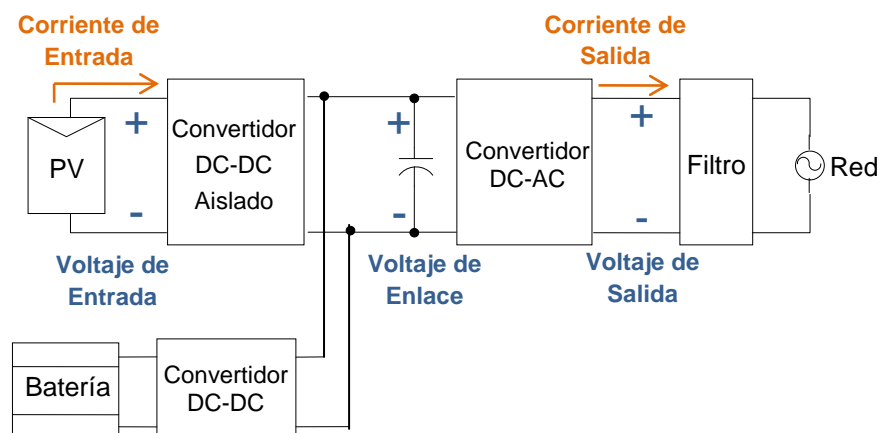


Figura 3.1 Diagrama de Bloques del Sistema

3.1.1 Voltaje de Entrada

Se denomina como voltaje de entrada del sistema, al voltaje que proporciona el arreglo de módulos fotovoltaicos, resultantes de la conversión de energía solar a eléctrica. Se ha definido un nivel de voltaje de **150 Vdc**, el cual será elevado por el convertidor DC-DC.

3.1.2 Voltaje de Enlace

El voltaje de enlace, es un nivel de tensión DC que proporciona el convertidor DC-DC y es manejado por el Capacitor de Enlace, con el fin de tener un nivel de voltaje lo más estable, para que sea modulado por el convertidor DC-AC. El valor de éste voltaje de enlace se lo ha fijado en **200 Vdc**.

3.1.3 Voltaje de Salida

El objetivo del tema propuesto es tener un sistema de generación conectado a la red eléctrica. Por tal motivo se ha decidido que el voltaje de salida del sistema sea de **120Vac** a **60Hz**.

3.1.4 Potencia del Sistema

El sistema de generación será diseñado de tal manera, que tenga la capacidad para brindar **aproximadamente** a la red, **10Kw** de potencia activa, en condiciones máximas.

3.1.5 Corriente de Entrada

Como ya fue definido el voltaje de entrada del sistema y así mismo la potencia aproximada del sistema, se puede calcular la corriente de entrada aproximada. Esta corriente es continua.

$$P_{dc} = V_i \times I_i$$

Ecuación 3.1

$$I_i = \frac{P}{V_i}$$

$$I_i = \frac{10000 \text{ W}}{150 \text{ V}}$$

$$I_i = 67 \text{ A aproximadamente}$$

3.1.6 Corriente de Salida

De igual manera que la corriente de entrada, se puede calcular la corriente de salida del sistema mediante la potencia del sistema y el voltaje de salida del sistema. Cabe mencionar que la corriente de salida del sistema es corriente alterna, por lo que se debería considerar el factor de potencia, y en efecto se asume un factor de potencia **Fp = 1**

$$P_{ac} = V_o \times I_o \times F_p$$

Ecuación 3.2

$$I_o = \frac{P_{ac}}{V_o \times F_p}$$

$$I_o = \frac{10000 \text{ W}}{120 \text{ V}_{rms} \times 1}$$

$$I_o = 84 \text{ Arms aproximadamente}$$

En la tabla 3.1 se muestra los valores de los principales parámetros del sistema, tanto de voltaje, corriente y potencia.

Tabla 3.1 Principales Parámetros del Sistema

| Parámetros | DC | AC |
|----------------------|------------|---------------|
| Voltaje de Entrada | 150 V | ----- |
| Voltaje de Enlace | 200 V | ----- |
| Voltaje de Salida | ----- | 120 Vrms |
| Potencia del Sistema | 10 Kw | 10 Kw |
| Corriente de Entrada | 67 A aprox | ----- |
| Corriente de Salida | ----- | 84 Arms aprox |

3.2 Arreglo Fotovoltaico

Se define como Arreglo FV, al conjunto de Módulos FV que se necesitan para proveer la potencia al sistema de generación.

En base a las características eléctricas definidas anteriormente, se determina el número de módulos FV a utilizar.

3.2.1 Descripción del Módulo Fotovoltaico

En base a la variedad de modelos y fabricantes de módulos FV existentes en la actualidad, se tomó como referencia para el desarrollo del presente proyecto, un módulo capaz de entregar **30 Vdc** y **8 Adc**, en condiciones de máxima potencia, equivalente a **240 W**.

$$P \text{ módulo} = (V \text{ módulo}) \times (I \text{ módulo})$$

Ecuación 3.3

$$P \text{ módulo} = (30 V) \times (8 A)$$

$$P \text{ módulo} = 240 W$$

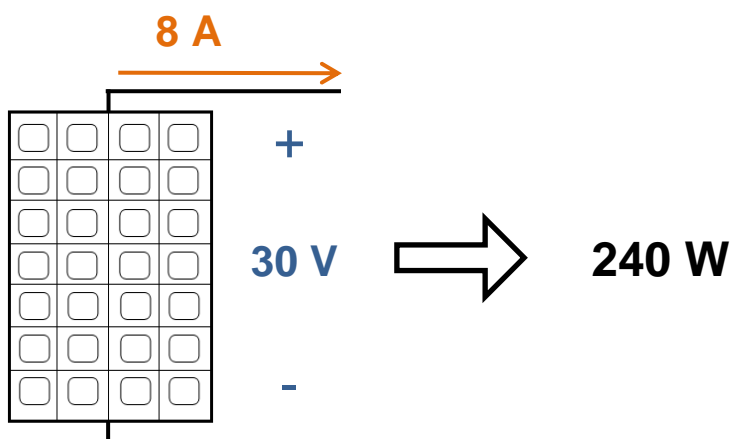


Figura 3.2 Datos Técnicos del Módulo FV

A continuación se muestra una tabla de otras características técnicas del módulo FV seleccionado.

Tabla 3.2 Características técnicas del Módulo FV.

| Datos Eléctricos | | |
|-----------------------------|-----|---|
| Potencia Máxima | 240 | W |
| Eficiencia | 15 | % |
| Voltaje a Potencia Máxima | 30 | V |
| Corriente a Potencia Máxima | 8 | A |
| Voltaje de Circuito Abierto | 38 | V |
| Voltaje de Corto Circuito | 9 | V |

3.2.2 Arreglo Serie de Módulos FV

El objetivo de este tipo de arreglo (serie), es obtener el voltaje de entrada necesario para el sistema, el cual fue definido previamente en **150 Vdc**.

Cada módulo FV es capaz de proporcionar **30 Vdc**, por tal motivo, se necesita de **5** módulos dispuestos en serie, para lograr un voltaje total de 150 V. La corriente resultante será de **8 Adc** debido a que los módulos dispuestos en serie, proporcionan el mismo valor de corriente.

$$P_{\text{arreglo serie}} = 5 \times (P_{\text{módulo}})$$

Ecuación 3.4

$$P_{\text{arreglo serie}} = 5 \times (240 \text{ W})$$

$$P_{\text{arreglo serie}} = 1200 \text{ W}$$

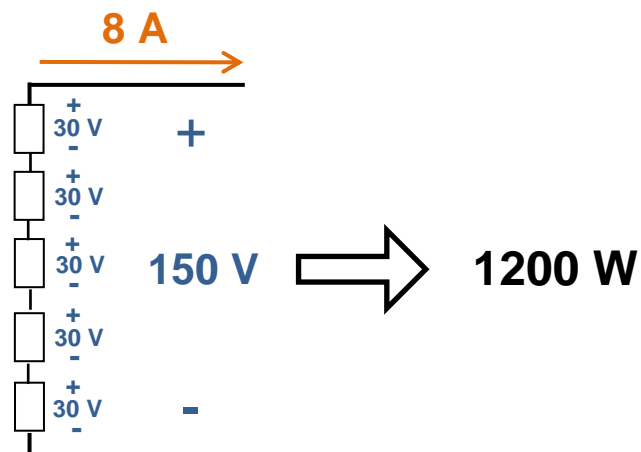


Figura 3.3 Arreglo Serie de Módulos FV

El arreglo serie proporciona el voltaje de salida deseado de 150 V, así como 8 A de corriente. Con este arreglo se alcanza una potencia de **1200 W**.

3.2.3 Arreglo Serie-Paralelo de Módulos FV

El arreglo serie brinda el voltaje de salida deseado, pero aún no se obtiene la potencia deseada. Lo que se necesita para lograr la potencia de **9600 W**, es colocar **8** arreglos serie en forma paralela.

$$P_{\text{arreglo serie/paralelo}} = 8 \times (P_{\text{arreglo serie}})$$

Ecuación 3.5

$$P_{\text{arreglo serie/paralelo}} = 8 \times (1200 \text{ W})$$

$$P_{\text{arreglo serie/paralelo}} = 9600 \text{ W}$$

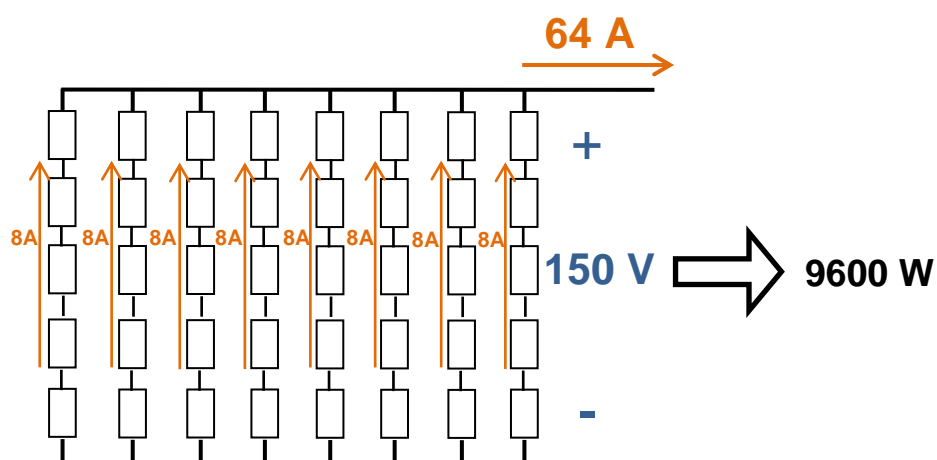


Figura 3.4 Arreglo Serie/Paralelo de Módulos FV

Como se puede apreciar en el gráfico anterior, se necesita **40** módulos FV para obtener una potencia de **9,6 Kw**, valor cercano al que se buscaba de 10 Kw.

Se debe mencionar que no es posible conseguir los 10 Kw de forma exacta debido a que la potencia depende de los módulos en serie que se coloquen en el arreglo FV. Si se agrega una columna más en serie, se estaría aumentando 1,2 Kw al sistema, teniendo 10,8 Kw lo cual excede de forma considerable la potencia establecida al principio del capítulo.

3.3 Convertidor DC-DC Tipo Boost Aislado

En esta sección se dimensionará cada elemento del convertidor DC-Dc, posteriormente se realizará un modelado matemático para encontrar la función de transferencia, la cual será comprobada en lazo abierto.

Finalmente se diseñará el controlador más adecuado para este convertidor.

3.3.1 Dimensionamiento

Se encontrará el valor más apropiado de los componentes de este convertidor para tener un correcto funcionamiento del mismo.

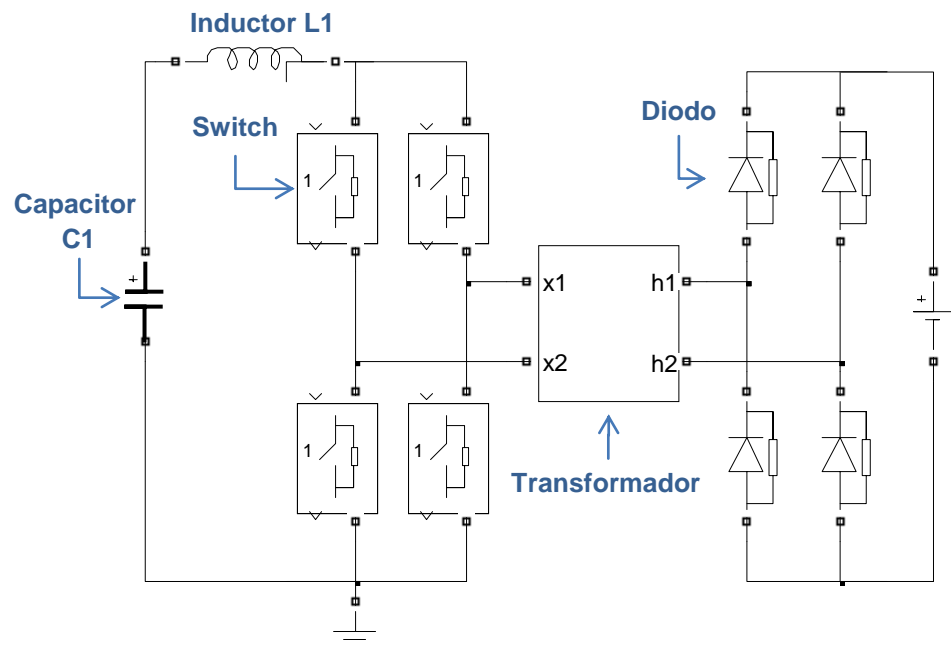


Figura 3.5 Esquemático del Convertidor Boost Aislado

3.3.1.1 Inductor L1

Se necesita encontrar el valor de la inductancia $L1$ que permita tener un rizado máximo del 10 % de la corriente que circula por el mismo (I_{l1}). Se va a hacer circular por el inductor la corriente de entrada del sistema que es de 70 A aproximadamente, por lo que el rizado máximo sería de 7 A.

Se ubica una fuente de voltaje de 157 Vdc que corresponde al voltaje del arreglo FV (V_c), en el extremo izquierdo del inductor, mientras que en el lado derecho se fija un valor apropiado de d (índice de modulación del

boost), para tener un voltaje promedio de 150 Vdc, de esta manera se tendría una diferencia de voltaje de 7 Vdc en los extremos del inductor. Se agrega una resistencia de $0,1 \Omega$ que bien puede ser interpretada como una resistencia parásita del conductor, la cual al tener 7 Vdc en sus extremos, va a producir una corriente de 70 A aproximadamente.

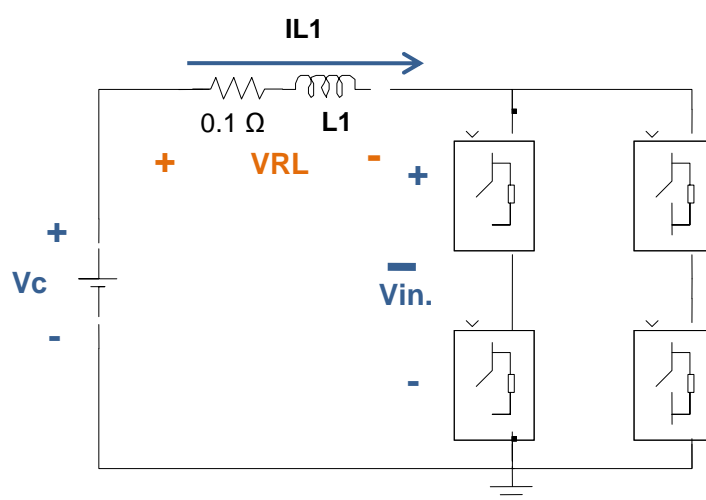


Figura 3.6 Esquemático para dimensionar el inductor L1

Una vez que se tiene los 70 A aproximados, se empieza a variar los valores de la inductancia L1 hasta encontrar un valor apropiado, que permita tener un rizado máximo de 7 A. El valor escogido ha sido de **1 mH**.

En la siguiente gráfica se puede observar que la corriente promedio en el inductor es de 70 A como se requería.

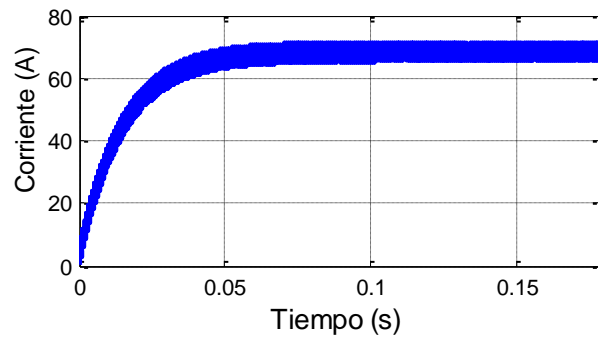


Figura 3.7 Corriente del Inductor L1

Ahora se hace un acercamiento (zoom) en la corriente del inductor para verificar que el valor de inductancia escogido, cumpla con el requerimiento.

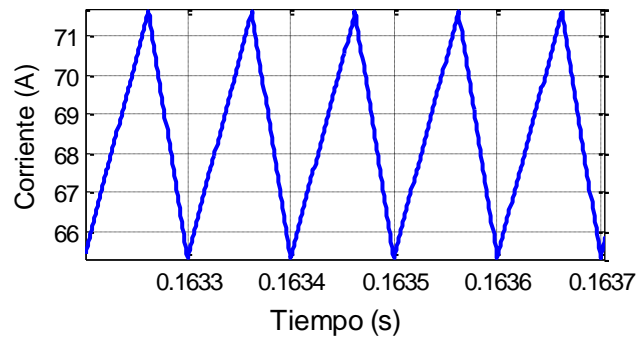


Figura 3.8 Corriente Instantánea del Inductor L1

$$\text{Rizado Inductor } L1 \leq 10\% \text{ Corriente Inductor } L1$$

Ecuación 3.6

$$I_{max} - I_{min} \leq 0.1 \times (70 \text{ A})$$

$$71,5 \text{ A} - 65,5 \text{ A} \leq 7 \text{ A}$$

$$6 \text{ A} \leq 7 \text{ A}$$

3.3.1.2 Capacitor

Ahora se va a encontrar el valor de la capacitancia $C1$ que permita tener un rizado máximo del 1% en el voltaje del capacitor. El voltaje del capacitor (V_c) corresponde al voltaje de entrada del sistema que es de **150 Vdc**, por lo que el rizado máximo equivale a 1,5 V.

Se coloca una fuente de corriente en la entrada del convertidor entregando **10A**, tratando de simular que se está inyectando una pequeña potencia al sistema, la cual es proporcionada por los módulos FV en la realidad. El voltaje del capacitor es de 150Vdc, pero debido a esta corriente que se inyecta al sistema y se entrega a la red, se genera un rizado en el voltaje del capacitor.

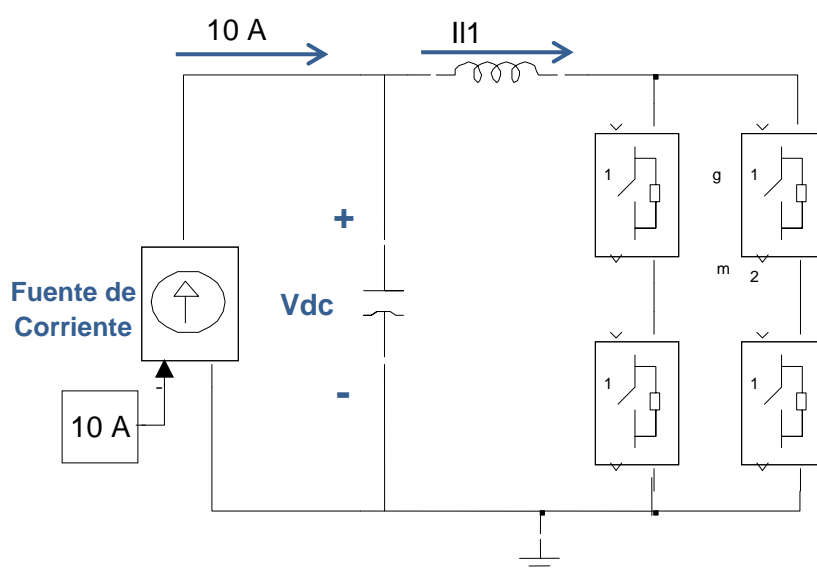


Figura 3.9 Esquemático para dimensionar el capacitor $C1$

El valor del capacitor que se ha escogido es de **100 μF** , ya que le permite tener un rizado de voltaje menor al 10% del voltaje DC, que en este caso es de 150V.

A continuación se muestra la gráfica del voltaje para un capacitor de 50 μF y se observa que se encuentra a un voltaje de 150 V, luego de estabilizarse. Se debe aclarar que las oscilaciones que se aprecian al inicio del gráfico, no corresponden al rizado del que se hablaba, estas corresponden a oscilaciones propias del sistema, debido a la presencia de un inductor y un capacitor en la entrada del convertidor, la cual genera este tipo de oscilaciones.

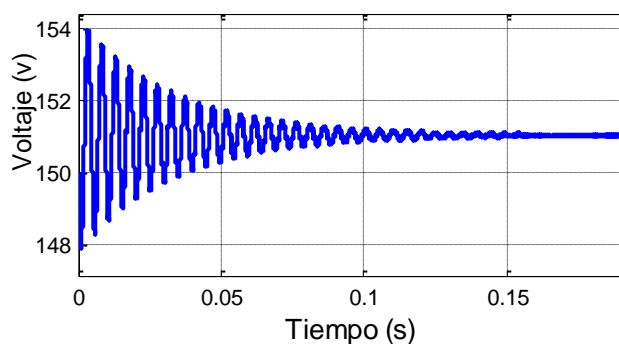


Figura 3.10 Voltaje del Capacitor C1

Para poder observar el rizado que se necesita limitar, se hace un acercamiento a la gráfica anterior (zoom), cuando el voltaje se encuentra estable.

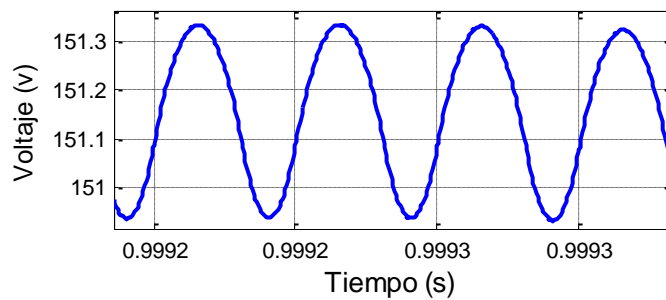


Figura 3.11 Voltaje Instantáneo del Capacitor C1

Rizado Voltaje C1 \leq 1% Voltaje Capacitor C1

Ecuación 3.7

$$V_{max} - V_{min} \leq 0.01 \times (150 V)$$

$$151,4 V - 150,9 V \leq 1,5 V$$

$$0,5 V \leq 1,5 V$$

3.3.1.3 Switches

Los switches son los elementos que realizan la conmutación de voltaje y corriente en el sistema, lógicamente el voltaje y la corriente de estos, son de tipo **pulsante**.

Los parámetros a determinar son: el voltaje máximo y la corriente máxima (picos) que van a soportar los switches en condiciones de máxima potencia. Para poder determinar estos parámetros, es necesario analizar el sistema en condiciones nominales.

A continuación se aprecia la gráfica del voltaje en uno de los switches (igual para todos), pudiendo observar que la conmutación se hace de **0 V – 200 V**. Se toma este rango como el parámetro del voltaje que se buscaba.

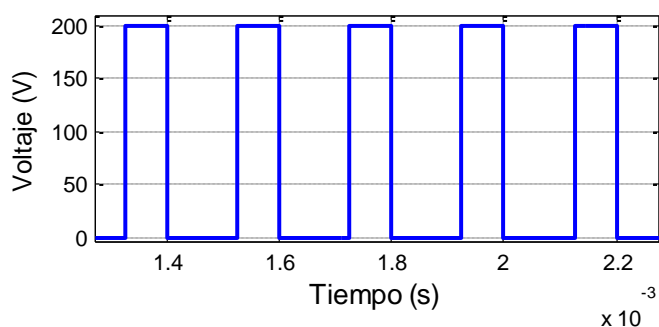


Figura 3.12 Voltaje en los Switches del Boost

La corriente en uno de los switches (igual para todos) se muestra a continuación, pudiendo observar que el rango de la corriente es 0 A – 70 A. En base a esta información se determina que el valor de la corriente para los switches debe ser de **80 A**.

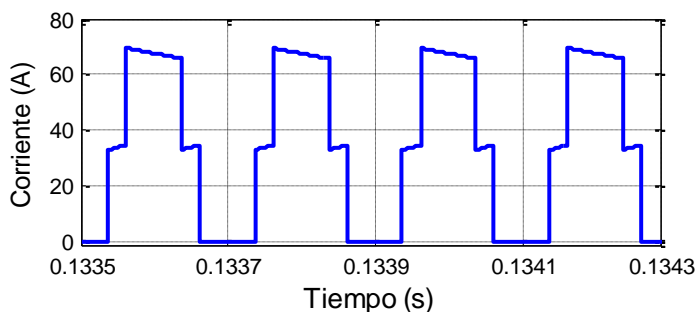


Figura 3.13 Corriente en los Switches del Boost

3.3.1.4 Diodos

De igual manera que en los switches, se debe determinar el valor pico máximo de voltaje y corriente que van a manejar los diodos del puente rectificador en condiciones máximas de trabajo.

La gráfica de voltaje muestra que es necesario un rango de **0 V – 200 V**.

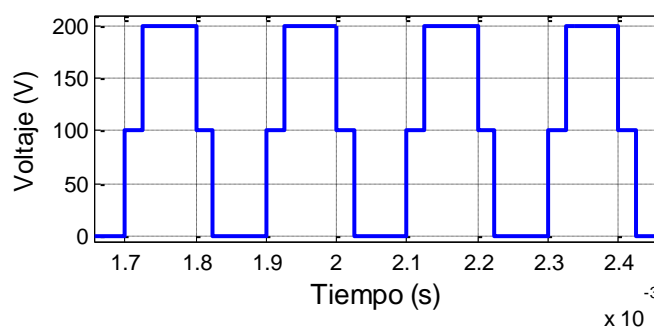


Figura 3.14 Voltaje en los Diodos del Boost

Como se aprecia en la gráfica de corriente, el valor pico es de 70 A aproximadamente, por lo que se deberían seleccionar diodos capaces de conducir corrientes mayores a la observada en la figura 3.15.

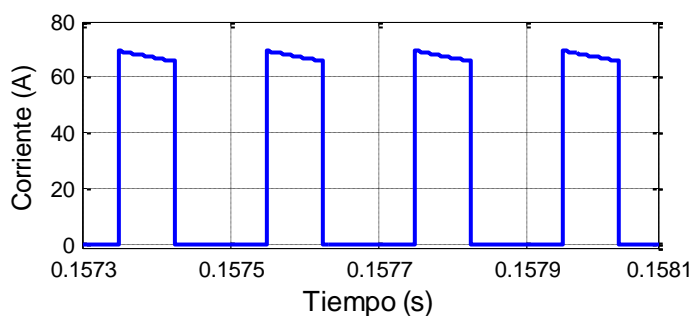


Figura 3.15 Corriente en los Diodos del Boost

3.3.2 Modelamiento Matemático

Se procederá a obtener, el modelo matemático del convertidor Boost aislado con la finalidad de representar de la mejor manera el comportamiento de la planta con la que se está trabajando. Un modelado correcto, es esencial en el diseño del controlador, ya que el modelo y el control están estrechamente ligados.

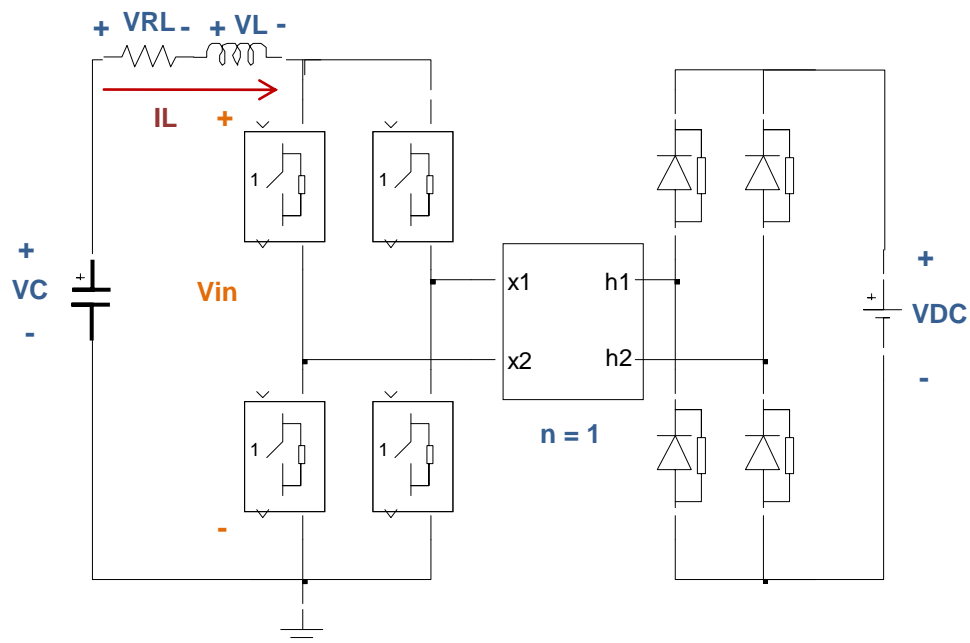


Figura 3.16 Boost Aislado

Se puede apreciar, que la corriente I_L que pasa a través del inductor tiene una dirección de izquierda a derecha, nótese también, que el capacitor está en paralelo con el voltaje del arreglo de los paneles. La resistencia parásita R_L produce una caída de voltaje V_{RL} , que hay que considerarla en las ecuaciones del modelo.

La entrada al convertidor está definida como V_{in} , la salida del convertidor se llama V_{DC} .

Como se sabe, un transformador de alta frecuencia forma parte del convertidor DC-DC, el número de vueltas (n) forma parte de la ecuación característica del convertidor. Para obtener la ecuación característica de la planta, el punto de partida será la expresión del voltaje diferencial del inductor. El desarrollo de las ecuaciones del modelo es presentado a continuación.

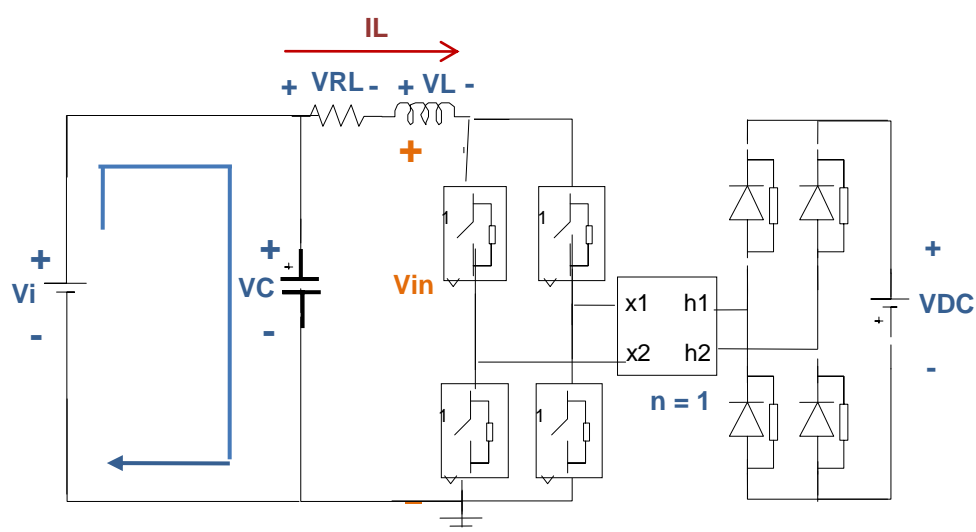


Figura. 3.16 Esquemático del Boost Aislado. Malla 1

$$V_i = V_c$$

$$V_i = \frac{1}{C} \int i(t) \delta t$$

Ecuación 3.8

$$V_i = \frac{1}{sC} I(s)$$

$$I(s) = sC V_i$$

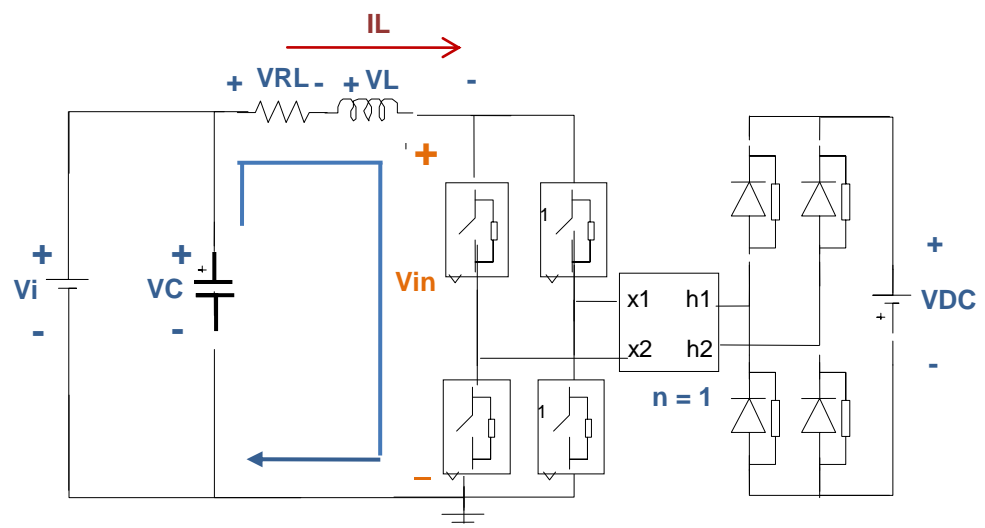


Figura. 3.17 Esquemático del Boost Aislado. Malla 2

$$\overline{V_{in}} + V_{RL} + V_L - V_C = 0$$

Ecuación 3.9

$$\overline{V_{in}} = V_C - V_L - V_{RL}$$

$$\overline{V_{in}} = \frac{1}{C} \int i(t) \delta t - L \frac{\delta I_L}{\delta t} - R I_L(t)$$

$$\overline{V_{in}} = -\frac{1}{sC} I(s) - sL I(s) - R I(s)$$

$$\overline{Vin} = -\frac{1}{sC} sCVi - sL(sCVi) - R(sCVi)$$

$$\overline{Vin} = -Vi - s^2LCVi - sRCVi$$

$$\overline{Vin} = Vi(-1 - s^2LC - sRC)$$

$$\overline{Vin} = \frac{VDC \times d}{n}$$

$$\frac{VDC \times d}{n} = Vi(-1 - s^2LC - sRC)$$

$$\frac{Vi}{d} = \frac{VDC}{n(-1 - s^2LC - sRC)}$$

$$\frac{Vi}{d} = \frac{VDC/LC}{n(-\frac{1}{LC} - \frac{s^2LC}{LC} - \frac{sRC}{LC})}$$

$$\frac{Vi}{d} = \frac{-VDC \times Wn^2}{n(s^2 + \frac{1}{\tau}s + Wn^2)}$$

Ecuación 3.10

Se puede apreciar que el modelo matemático, obtenido de la planta presenta ecuaciones diferenciales debido a la presencia del inductor y del capacitor.

Del modelo matemático, la variable a controlar es **d**.

3.3.2.1 Lazo Abierto

Ahora se presenta una simulación del modelo matemático de la planta, para afirmar que efectivamente funciona, a su vez se simulará conjuntamente a la planta y estos resultados se compararán. Adicionalmente se presentarán los cálculos teóricos que confirmarán que la planta es la adecuada.

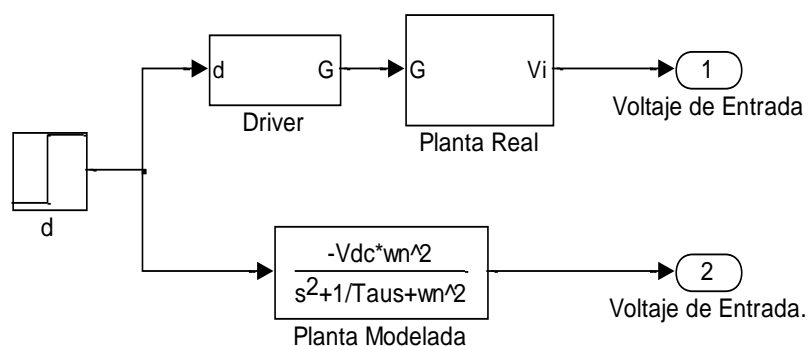


Figura 3.19 Diagrama de bloque del Boost aislado.

3.3.2.1.1 Comprobación de la Función de Transferencia

Se desea que el voltaje de capacitor (**Vc**) sea por un instante 140V y luego sea 120V, para lo cual se necesita determinar dos índices de modulación (**d**) distintos para poder cumplir con estos requerimientos. La simulación en lazo abierto usará un voltaje en la salida del

convertidor (**VDC**) de 200 V, la relación de vueltas del transformador de alta frecuencia (**n**) es igual a 1.

Ya conociendo los valores que se están usando, se procede a realizar los cálculos.

$$V_c = \frac{VDC \times (1 - D)}{n}$$

$$D = 1 - \frac{V_c}{VDC};$$

Para $V_c = 120$ \longrightarrow $D = 0.4$

Para $V_c = 140$ \longrightarrow $D = 0.3$

Una vez determinados teóricamente los índices de modulación necesarios para obtener los niveles de voltajes deseados en el capacitor, se colocará estos valores en Matlab/Simulink que es la herramienta de simulación y se comprobará si se obtiene estos niveles de voltaje tanto con la planta real y con la función de transferencia. A continuación se presentará las gráficas para comprobar lo antes expuesto.

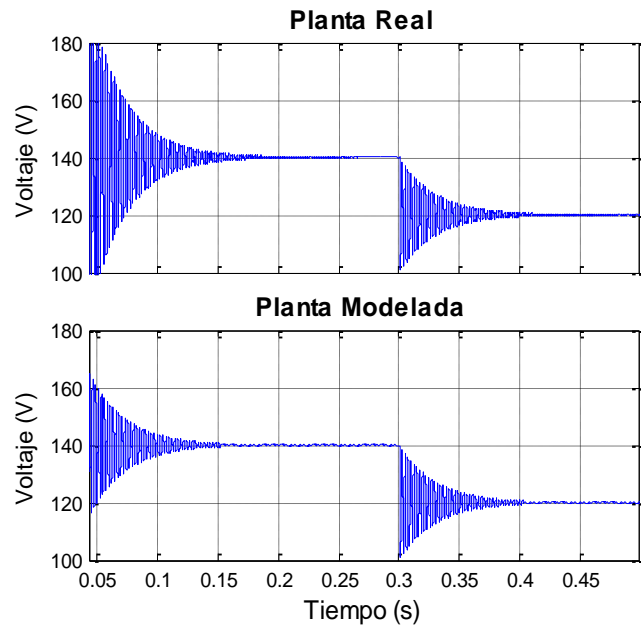


Figura 3.20 Voltaje del capacitor (V_c) del modelo matemático y de la planta de conmutación.

Al observar las simulaciones se puede corroborar los resultados teóricos y se puede concluir, gracias a las simulaciones que efectivamente la función de transferencia representa fielmente a la planta real.

3.3.2.2 Lazo Cerrado

El lazo cerrado representa la retroalimentación del sistema, en donde el controlador es la parte fundamental del mismo.

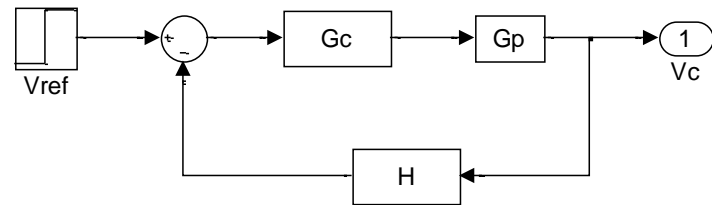


Figura 3.21 Diagrama de bloques del lazo cerrado del Boost aislado

3.3.2.2.1 K Factor

En el presente proyecto, se usará un código desarrollado en Matlab, llamado K-factor, con la finalidad de determinar el controlador adecuado para el manejo de la planta y sus requerimientos.

El código requiere a su entrada, la función de transferencia de la planta que se va a controlar, el ancho de banda en Hz del controlador que es el encargado de la velocidad con la que va a responder el controlador a errores que se puedan producir y por último el margen de fase.

El concepto de selección del tipo de controlador se da aplicando la siguiente fórmula:

$$\phi = \text{Margen de fase} - \phi_{\text{de corte}} - 90^\circ$$

Ecuación 3.11

Donde:

ϕ : Ángulo de la planta

Margen defase: Dato ingresado por el usuario

ϕ de corte: Es el ángulo donde se da la frecuencia de corte.

Dependiendo del valor resultante del denominado ángulo de la planta, se escoge el controlador apropiado de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3.3 Tipos de Controladores.

| ϕ | Tipo de controlador |
|--------------|---------------------|
| 0° | Tipo I |
| $< 90^\circ$ | Tipo II |
| $> 90^\circ$ | Tipo III |

Con este código de aproximación, se obtendrá siempre un polo en el origen en cualquier controlador, se tienen 3 tipos de controladores.

El controlador tipo I tiene la siguiente forma:

$$G_c(s) = \frac{K_c}{s}$$

Ecuación 3.12

Este controlador es el más sencillo de todos, ya que consta únicamente de una ganancia y un polo en el origen, es decir es un controlador integrador.

El controlador tipo II tiene la siguiente forma:

$$G_c(s) = \frac{K_c \left(1 + \frac{s}{w_z}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{w_p}\right)}$$

Ecuación 3.13

Este controlador es más elaborado, ya que aparte de tener una ganancia y un polo en el origen, tienen un polo real y un zero real, ya que si no fuesen reales, el controlador estuviera mal diseñado, ya que el uso de polos complejos implicaría inestabilidad.

Para determinar la ubicación del zero se deberá usar la siguiente fórmula:

$$W_z = \frac{2 \times \pi \times fc}{\tan\left(\frac{\phi}{2} + 45^\circ\right)}$$

Ecuación 3.14

Donde:

W_z : Posición del zero

fc : Frecuencia de corte

ϕ : Ángulo de la planta

Para determinar la ubicación del polo se deberá usar la siguiente fórmula:

$$W_p = \tan\left(\frac{\phi}{2} + 45^\circ\right) \times 2 \times \pi \times fc;$$

Ecuación 3.15

Donde:

W_p : Posición del polo

fc : Frecuencia de corte

ϕ : Ángulo de la planta

El controlador tipo III tiene la siguiente forma:

$$G_C(s) = \frac{K_C \left(1 + \frac{s}{w_z}\right)^2}{s \left(1 + \frac{s}{w_p}\right)^2}$$

Ecuación 3.16

Este controlador es el más elaborado de todos, es similar al controlador tipo II pero este posee dos polos y dos zeros aparte de la ganancia y el polo en el origen.

Para determinar la ubicación del zero se deberá usar la siguiente fórmula:

$$W_z = \frac{2 \times \pi \times f_c}{\tan\left(\frac{\phi}{4} + 45^\circ\right)}$$

Ecuación 3.17

Donde:

W_z : Posición del zero

f_c : Frecuencia de corte

ϕ : Ángulo de la planta

Para determinar la ubicación del polo se deberá usar la siguiente fórmula:

$$Wp = \tan\left(\frac{\phi}{4} + 45^\circ\right) \times 2 \times \pi \times fc$$

Ecuación 3.18

Donde:

Wp: Posición del polo

fc: Frecuencia de corte

ϕ: Ángulo de la planta

3.3.2.2.2 Controlador

Para determinar el controlador de este convertidor se hace uso del código K-Factor, al cual se le provee la función de transferencia de la planta, el ancho de banda fijado en **1800Hz** y un margen de fase de **60 Db/dec.**

El controlador resultante es de **Tipo III** con polos y ceros reales, se lo muestra a continuación.

$$G_c = \frac{-90164.9728 (s + 1506)^2}{s (s + 8.492e004)^2}$$

3.3.2.2.3 Ganancia de Lazo Abierto

$G_{ol}(s) = \text{Ganancia de lazo abierto (open loop)}$

$$G_{ol}(s) = G_c(s) \cdot G_p(s)$$

Ecuación 3.19

$$G_{ol}(s) = \frac{80146642460419.28 (s + 1506)^2}{s (s + 8.492e004)^2 (s^2 + 66.67s + 2.222e006)}$$

Se hace uso de las herramientas de simulación de Matlab para hacer un diagrama de bode en lazo abierto

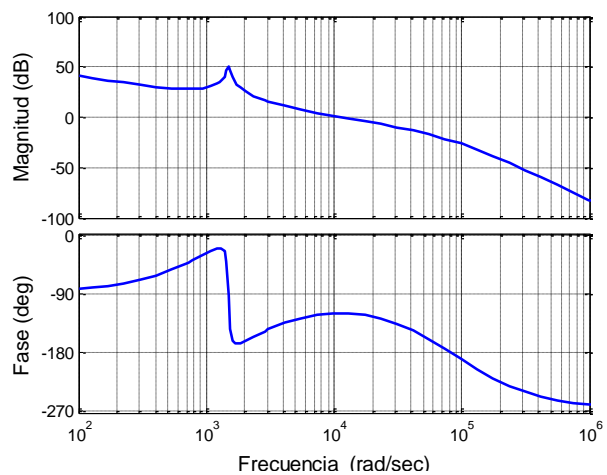


Figura 3.22 Diagrama de Bode en Lazo abierto

Se puede apreciar que la frecuencia natural de oscilación **Wn** es aproximadamente **1.4 Khz**.

3.3.2.2.4 Ganancia de Lazo Cerrado

$Gcl(s)$ = Ganancia de lazo cerrado (close loop)

$$Gcl(s) = \frac{Gol(s)}{1 - Gl(s)}$$

Ecuación 3.21

$$A(s) = \frac{80146642460419.28}{(s + 1.114e005)(s + 4.346e004)}$$

$$B(s) = \frac{(s+1506)^2}{(s + 1.042e004)(s + 3657)(s + 985.6)}$$

$$\frac{Vc(s)}{Vref(s)} = A(s) \times B(s);$$

Se presenta el diagrama de bode en lazo cerrado que proporciona Matlab.

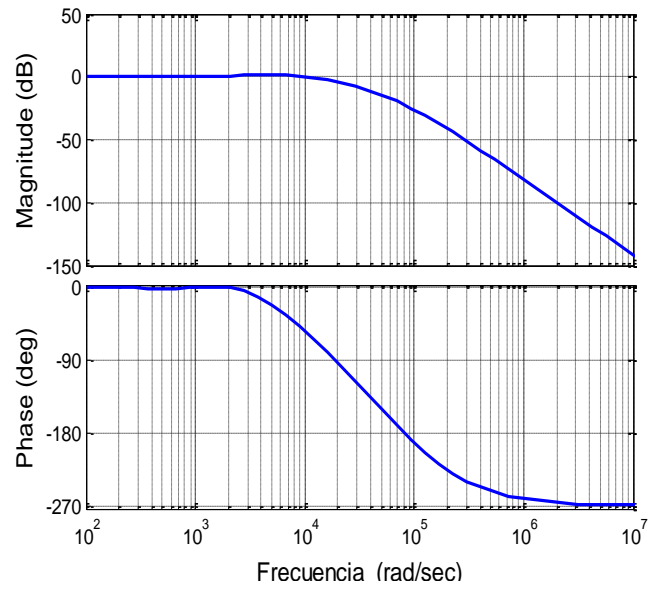


Figura 3.23 Diagrama de Bode en Lazo cerrado.

Se puede comprobar que el sistema es estable debido a que la gráfica de magnitud decae conjuntamente con la de fase.

3.3.2.2.5 Respuesta a la Función Escalón

Se prueba el convertidor en lazo cerrado a una función escalón o también conocido como step.

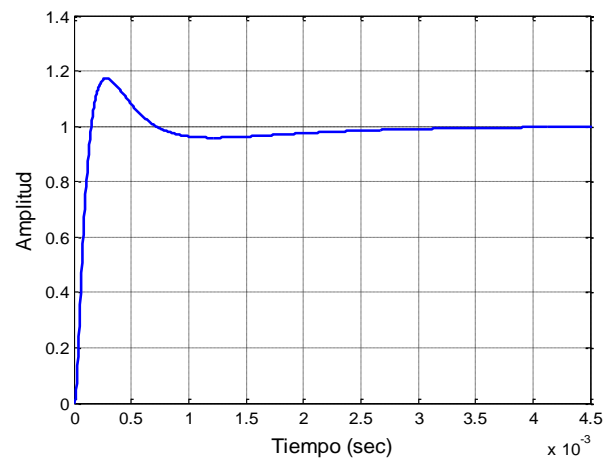


Figura 3.24 Respuesta del sistema a una función escalón

Según la gráfica se puede asegurar que el sistema si es estable y tiene un tiempo máximo de estabilización de **3ms**.

3.3.2.2.6 Ejemplo en Lazo Cerrado

Este es el esquema que presenta la planta real y la planta modelada en retroalimentación negativa, con su respectivo controlador.

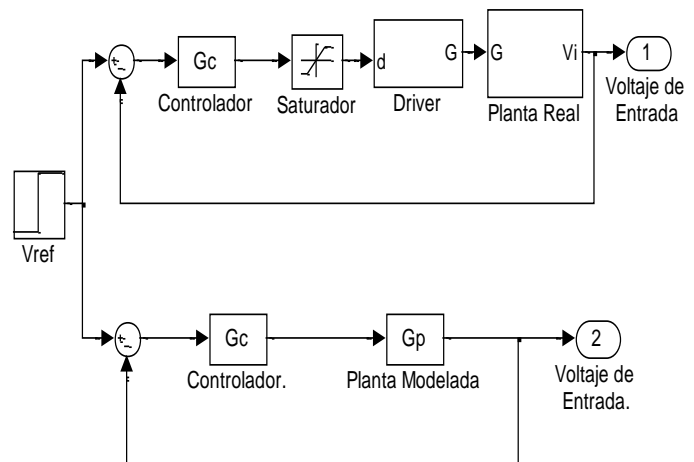


Figura 3.25 Diagrama de bloques del sistema en Lazo cerrado con planta real y modelada.

Es necesario verificar que el controlador cumpla su objetivo de mantener el voltaje de referencia que se le indique. Se desea que el voltaje V_c en primera instancia sea de **130V** y después de un corto tiempo cambie a **150V**, entonces estos valores son los asignados al voltaje de referencia V_{ref} .

Luego de la correspondiente simulación, se presentan las gráficas resultantes.

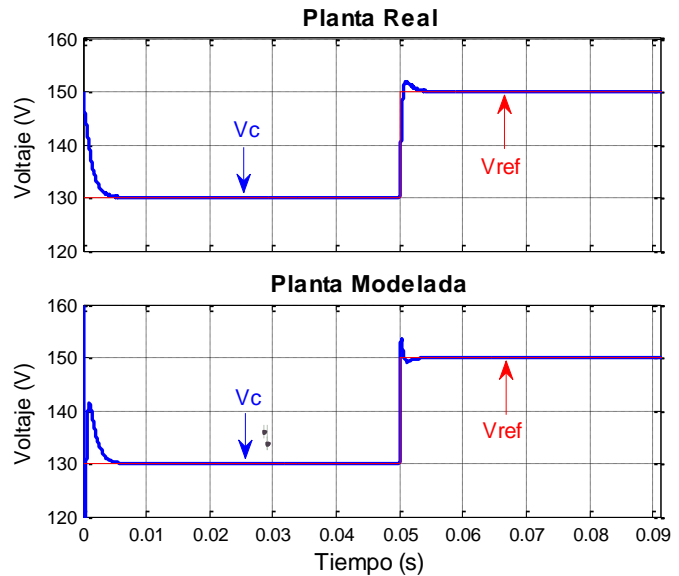


Figura 3.26 Voltaje de referencia junto a los voltajes de las plantas.

Efectivamente se pudo observar que el voltaje V_c sigue correctamente el voltaje V_{ref} , por lo que se puede afirmar que el controlador ha sido bien diseñado.

3.4 Convertidor DC-AC (Inversor)

Se va a dimensionar los elementos del convertidor DC-AC, luego se hará un modelado matemático para encontrar la función de transferencia, la cual será comprobada en lazo abierto.

Finalmente se diseñará el controlador más adecuado para este convertidor.

3.4.1 Dimensionamiento

En este convertidor se dimensionará un inductor, los switches y un capacitor denominado "capacitor de enlace".

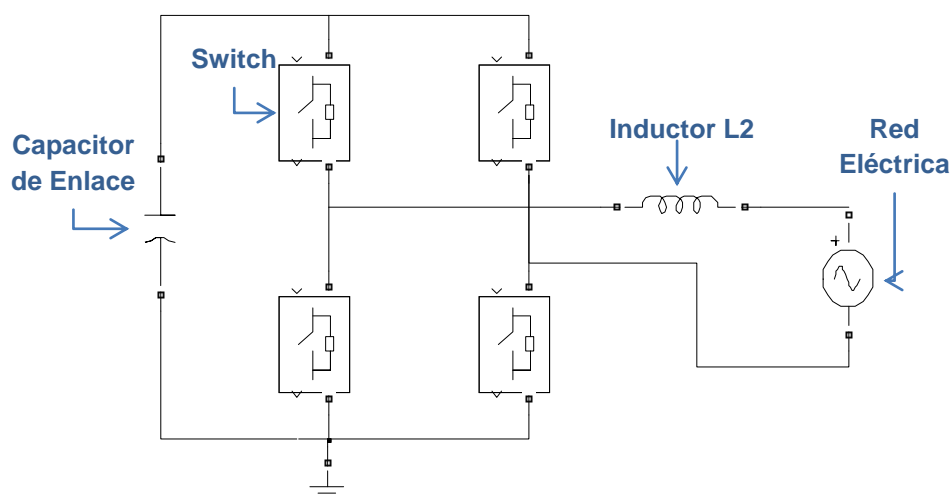


Figura 3.27 Esquemático del Convertidor DC-AC

3.4.1.1 Inductor L2

Se debe encontrar el valor de la inductancia L2 que permita tener un rizado máximo del 10 % de la corriente que circula por el mismo (I_{red}). Se va a hacer circular por el inductor la corriente máxima de salida del sistema que es de 113 A pico (80 Arms), por lo que el rizado máximo permitido es de 13A pico.

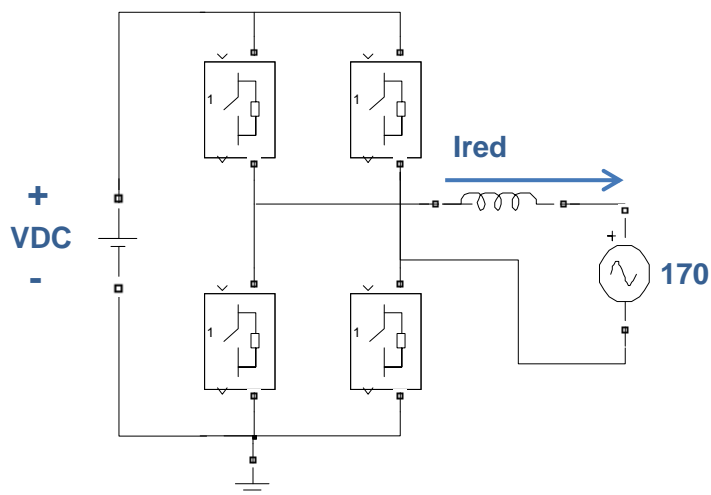


Figura 3.28 Esquemático para dimensionar el inductor L2

La forma en la que se inyecta corriente a la red eléctrica es mediante el desfase del voltaje de salida del convertidor con el voltaje de la red.

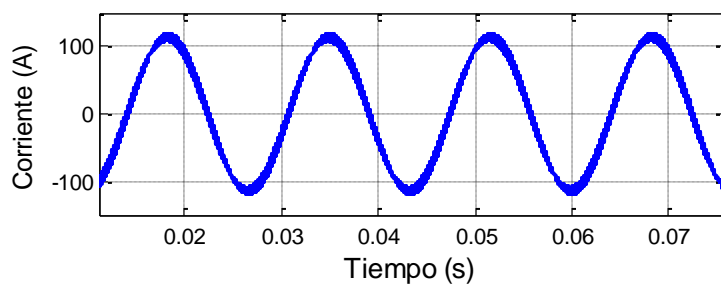


Figura 3.29 Corriente del Inductor L2

Se puede apreciar que efectivamente se tiene un valor cercano a 113 A pico en la corriente que circula por el inductor. Pero el rizado no se lo puede ver, ya que se

debe hacer un acercamiento para observar la variación instantánea de la corriente del inductor.

Se hace un acercamiento (zoom) en la corriente del inductor para observar la corriente instantánea y poder verificar el rizado. Se ha elegido un valor de inductancia para L2 de **150 uH**, el cual satisface la necesidad como se aprecia en la gráfica.

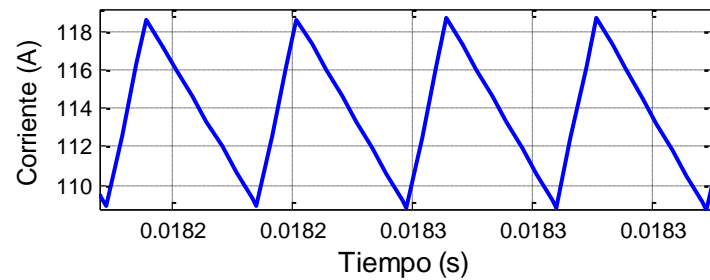


Figura 3.30 Corriente Instantánea del Inductor L2

$$\text{Rizado Inductor } L2 \leq 10\% \text{ Corriente Inductor } L2$$

$$I_{max} - I_{min} \leq 0.1 \times (113 \text{ A})$$

$$119 \text{ A} - 109 \text{ A} \leq 13 \text{ A}$$

$$10 \text{ A} \leq 13 \text{ A}$$

3.4.1.2 Capacitor de Enlace (DC-Link)

Se va a encontrar el valor de la capacitancia C2 que permita tener un rizado máximo del 1% en el voltaje del capacitor. El voltaje del capacitor corresponde al voltaje

de enlace del sistema (VDC) que es de **200 Vdc**, por lo que el rizado máximo equivale a 2 V.

Para poder observar el rizado en el voltaje del capacitor se inyecta una corriente mediante una fuente de corriente. Se ha cogido un valor aleatorio de 10 Adc.

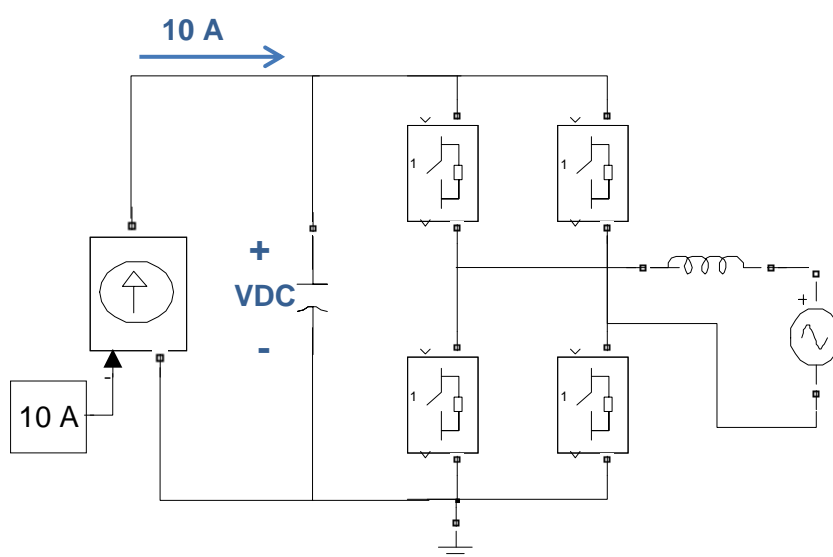


Figura 3.31 Esquemático para dimensionar el DC-Link

Se puede apreciar que el voltaje del capacitor se mantiene en 200 V como se esperaba. Este voltaje posee un rizado que se observará posteriormente.

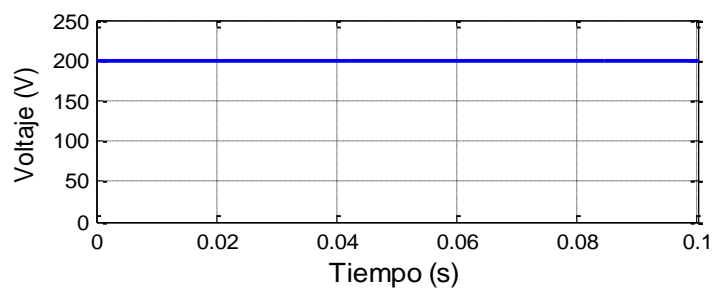


Figura 3.32 Voltaje del DC-Link

En este gráfico se observa un acercamiento (zoom) del voltaje del capacitor, pudiendo ahora sí, apreciar el rizado existente. El valor de capacitancia para C2 se ha fijado en **12 mF**, obteniendo un rizado dentro de los rangos permitidos.

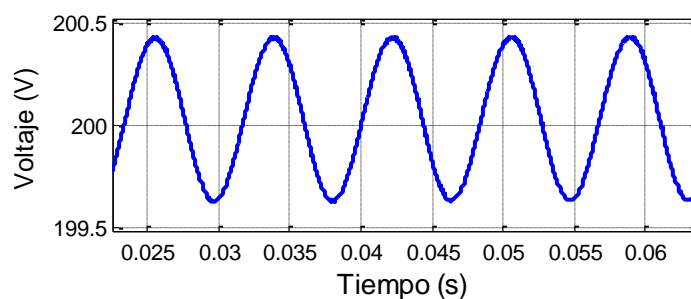


Figura 3.33 Voltaje Instantáneo del DC-Link

Rizado Voltaje C2 \leq 1% Voltaje Capacitor C2

$$V_{max} - V_{min} \leq 0.01 \times (200 V)$$

$$200,5 V - 199,5 V \leq 2 V$$

$$1 V \leq 2 V$$

3.4.1.3 Switches

Se aprecia la gráfica del voltaje en uno de los switches (igual para todos), pudiendo observar que la conmutación se hace de **0 V – 200 V**. Se toma este rango como el parámetro del voltaje que se buscaba.

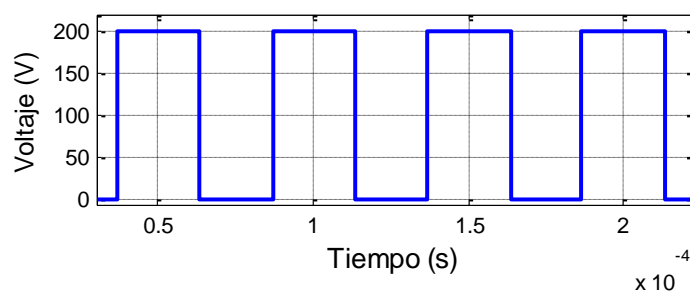


Figura 3.34 Voltaje en los switches del inversor

La corriente en uno de los switches (igual para todos) se muestra a continuación, pudiendo observar que el rango de la corriente es 0 A – 80 A. Por esta razón se fija el valor de la corriente para los switches en **80 A**.

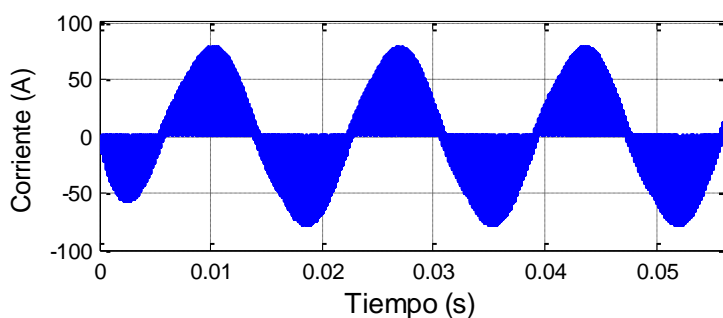


Figura 3.35 Corriente en los switches del Inversor

3.4.2 Modelamiento Matemático

El inversor monofásico DC-AC, es la última etapa del sistema de generación, la salida del inversor es una fuente de voltaje AC y la red es considerada otra fuente de voltaje AC, es por este motivo que se coloca un inductor en medio de estas dos fuentes de voltaje.

Al estar conectado a la red, el voltaje está fijado por la misma, por eso el modelo de la planta se va a enfocar en la determinación de las ecuaciones de la corriente que se va a inyectar hacia la red por parte del inversor.

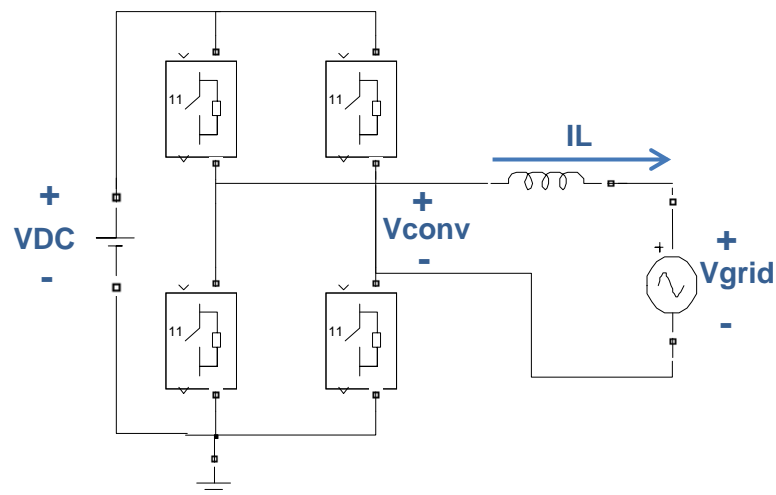


Figura 3.36 Esquemático del Convertidor DC-AC

Por estos motivos, el análisis matemático se va a centrar en la salida del inversor y la conexión con la red a través del inductor (**L**). Por la dirección de la corriente a través del inductor (**IL**), lo

que se hace, es entregar potencia hacia la red, pero como se observa, el inversor puede ser bidireccional es decir que también se puede obtener energía desde la red. Para poder tener un flujo de potencia desde el convertidor hacia la red, el voltaje del convertidor **Vconv** debe ser ligeramente mayor al voltaje de la red **Vgrid**.

La diferencia de estos dos voltajes, da como resultado el voltaje del inductor, se obviará la caída de voltaje que produce la resistencia parásita del inductor, que debido a su valor muy despreciable no afectará en lo absoluto a las ecuaciones características.

A continuación se presenta el desarrollo de las ecuaciones que representan a la planta. Es necesario saber que el índice de modulación (**ma**) forma parte del modelo así como el voltaje de enlace DC (**VDC**).

$$\overline{V_{conv}} - V_{grid} = VL$$

Ecuación 3.22

$$(ma \times VDC) - V_{grid} = L \frac{\partial IL}{\partial t}$$

$$\int ((ma \times VDC) - V_{grid}) dt = L \times IL$$

$$IL = \frac{1}{L} \int ((ma \times VDC) - V_{grid}) \delta t$$

Al observar el desarrollo de las ecuaciones del sistema, se puede concluir que se trata de una ecuación con una integral debido a la presencia del inductor, que es el elemento que introduce esta complejidad al sistema.

La corriente a través del inductor que es lo que se va a controlar, debido a que el voltaje está controlado por la red, está en función del índice de modulación **ma**.

3.4.2.1 Lazo Abierto

Una vez analizado matemáticamente el convertidor DC-AC, se torna fundamental observar su comportamiento y fijarse que factores son los que pueden afectar su funcionamiento. Se busca determinar la respuesta del convertidor si se procede a manipular tanto la amplitud de la portadora **ma**, así como el ángulo de desfase Θ .

Se desea que el voltaje de salida del convertidor DC-AC (**Vconv**) sea **195 Vpk**, el voltaje de la red será **170 Vpk** y la fuente de voltaje que representa al voltaje de enlace DC (**VDC**) tiene un valor de **200 V**. Para lograr conseguir este valor de **Vconv**, se debe manipular el parámetro **ma**. Adicionalmente se desea que la red este desfasada **120°** de el voltaje de salida del convertidor DC-AC. Es decir se

desea observar que la salida del convertidor DC-AC adelante a la red.

Ya conociendo los valores que se están usando, se procede a realizar los cálculos.

$$\overline{V_{conv}} = ma \times VDC;$$

Ecuación 2.23

$$ma = \frac{\overline{V_{conv}}}{VDC}$$

$$ma = \frac{195}{200}$$

$$D = 0.975;$$

Una vez determinado de forma teórica el valor de ma necesario para obtener el nivel de voltaje deseado en la salida del convertidor DC-AC, se procede a colocar este valor junto al desfase deseado en la herramienta de simulación y se comprobará si se obtiene el nivel de voltaje y el desfase deseado. A continuación se presentará las gráficas para comprobar lo antes expuesto.

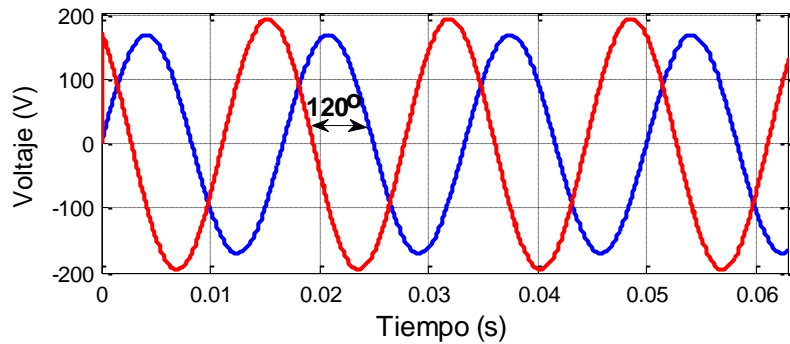


Figura 3.37 Voltaje del convertidor DC-AC en Lazo Abierto

Como se esperaba, se obtuvo el nivel de voltaje y el desfase deseado, lo que confirma que gracias a **ma** se puede controlar el pico de el voltaje en la salida del convertidor y con el parámetro **theta(Θ)** se controla el desfase del voltaje de salida con el voltaje de la red (**Vgrid**).

3.4.2.2 Lazo Cerrado

El lazo cerrado de este convertidor consiste en dos controladores, uno para corriente y otro para voltaje, que finalmente se ponen en cascada.

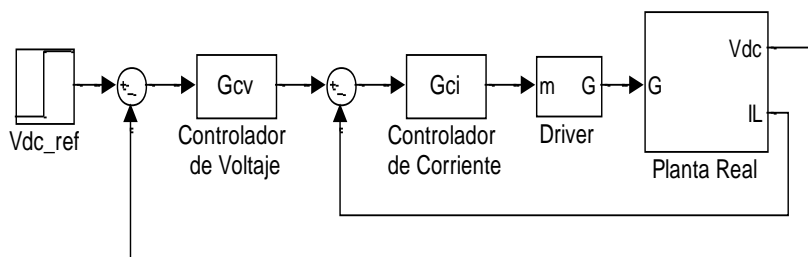


Figura 3.38 Diagrama de Bloques del control en Cascada

3.4.2.3 Control de Corriente

La corriente que se va a controlar es la que pasa por el inductor. El sistema para comprobar este lazo consta, de una fuente de voltaje DC que representa al voltaje del capacitor de enlace VDC, el convertidor DC-AC monofásico, un inductor y una fuente de voltaje AC que representa al voltaje de la red.

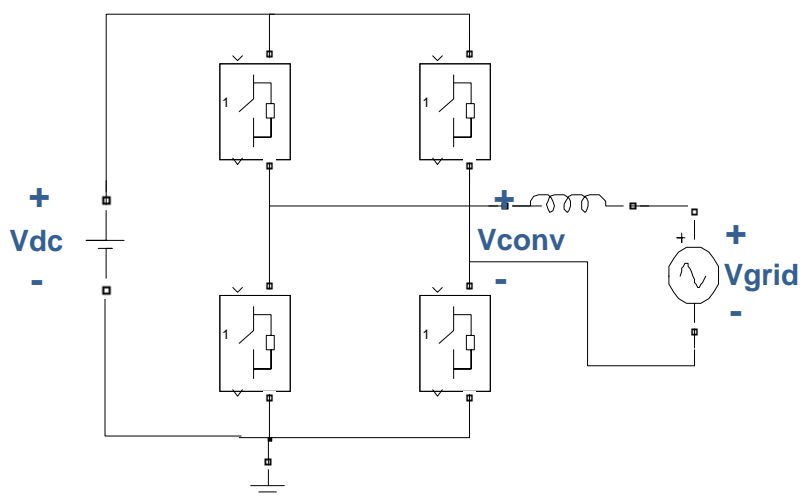


Figura 3.39 Esquemático del convertidor DC-AC para diseñar el controlador de corriente

Ahora se presenta el diagrama de bloques, al cual se le aplica una señal de referencia, que variará de manera repentina, con la finalidad de observar la respuesta del controlador que va a ser determinado con la ayuda del código **K factor**.

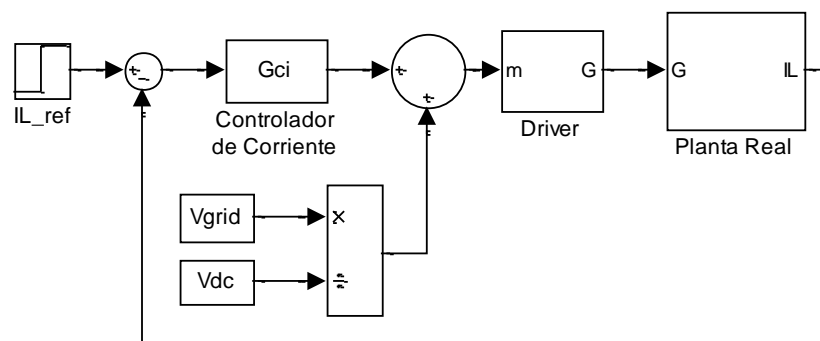


Figura 3.40 Diagrama de Bloques del control de corriente del convertidor DC-AC

3.4.2.3.1 Controlador Gci

Para determinar el controlador de corriente, se necesita previamente obtener la planta de corriente, que va a ser encontrada a continuación:

$$VL(t) = \overline{Vconv} - Vgrid$$

Ecuación 3.24

$$L \frac{d IL(t)}{dt} = \overline{V_{conv}}$$

$$L \frac{d IL(t)}{dt} = ma(t) \times V_{dc}$$

$$L \times s \times IL(s) = ma(s) \times V_{dc}$$

$$\frac{IL(s)}{ma(s)} = \frac{V_{dc}}{Ls}$$

Ahora se reemplaza los valores para obtener la expresión final.

$$G_{pi} = \frac{200 V}{(150 \mu F)s}$$

$$G_{pi} = \frac{1333333,33}{s}$$

Para esta comprobación se desea que el controlador tenga un ancho de banda de **1000Hz** y un margen de fase de **60 Db/dec.**

El controlador obtenido, es de **Tipo II**, con un polo en el origen, un cero real y un polo real. A continuación se presenta el controlador.

$$G_{ci} = \frac{110,5016 (s + 1684)}{s (s + 2.345e004)}$$

3.4.2.3.2 Ganancia de Lazo Abierto

$G_{oli}(s) = \text{Ganancia de lazo abierto (open loop)}$

$$G_{oli}(s) = G_{ci}(s) \cdot G_{pi}(s)$$

$$G_{oli}(s) = \frac{147335460.3019 (s + 1684)}{s^2 (s + 2.345e004)}$$

Se hace uso de las herramientas de simulación de Matlab para hacer un diagrama de bode en lazo abierto.

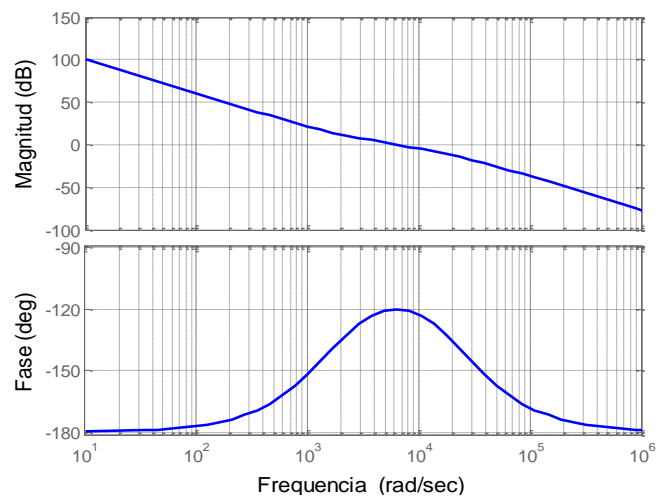


Figura 3.41 Diagrama de Bode en lazo abierto de la planta de corriente del convertidor DC-AC.

Se observa del diagrama de bode, que se está teniendo un comportamiento de un integrador, lo que indica que el sistema es estable.

3.4.2.3.3 Ganancia de Lazo Cerrado

$G_{cli}(s) = \text{Ganancia lazo cerrado (close loop)}$

$$G_{cli}(s) = \frac{G_{oli}(s)}{1 - G_{li}(s)}$$

$$\frac{IL(s)}{IL_{ref}(s)} = \frac{147335460.3019 (s + 1684)}{(s + 1.443e004) (s + 6283) (s + 2736)}$$

Se presenta el diagrama de bode en lazo cerrado que proporciona Matlab

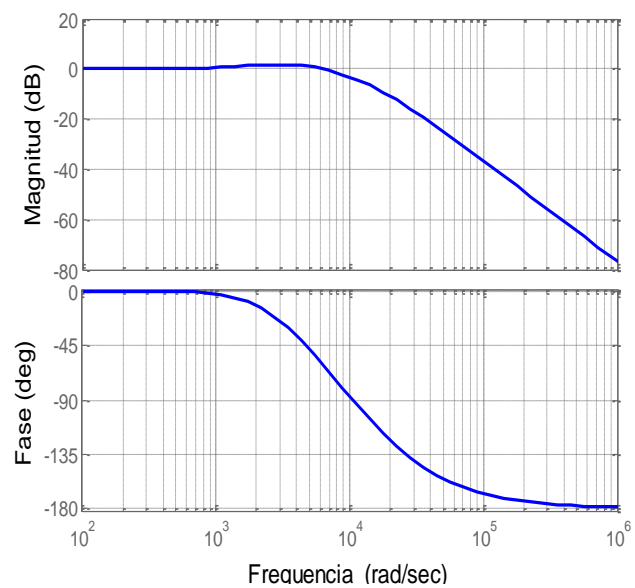


Figura 3.42 Diagrama de Bode en lazo cerrado de la planta de corriente del convertidor DC-AC.

Del diagrama se puede concluir que se obtuvo un comportamiento estable, que es lo que se esperaba que sucediera si el cálculo del controlador y planta era el correcto.

3.4.2.3.4 Respuesta a la Función Escalón

Se observará la rapidez de respuesta de la ganancia de lazo cerrado. Por lo tanto se simulará una perturbación al sistema, esta perturbación va a ser realizada por la función escalón, es bueno acotar que esta perturbación es la peor que se puede tener.

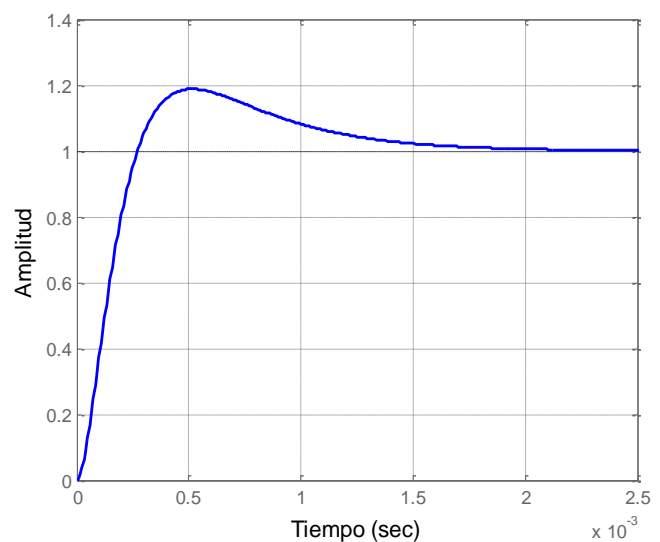


Figura 3.43 Respuesta de la planta a una función escalón.

Según la gráfica se puede asegurar que el sistema si es estable y tiene un tiempo máximo de estabilización de **2.2ms**.

3.4.2.3.5 Ejemplo del Control de Corriente

Se ingresará como una constante el valor del voltaje del enlace DC (**VDC**), de valor **200V**.

Las corrientes de referencia van a ser primero **25 Ap**, luego a los 0.05 s cambiará a **100 Ap**.

La retroalimentación va a estar dada por la medición de la corriente que está pasando por el inductor.

Luego de la correspondiente simulación, se presentan las gráficas resultantes.

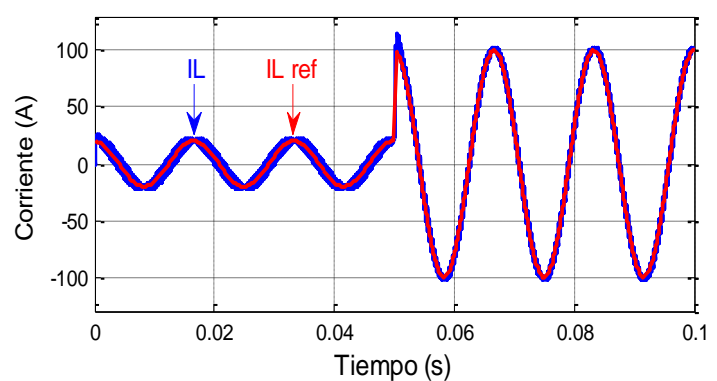


Figura 3.44 Corriente del inductor en Lazo Cerrado.

Se observó que la corriente que pasa por el inductor siguió la referencia de manera satisfactoria, comprobando también que el lazo responde velozmente a una perturbación que se pueda producir en la entrada.

3.4.2.4 Control de Voltaje (Cascada)

Se analizó el controlador de la corriente que circula por el inductor. Ahora se diseñará un control capaz de mantener estabilizado el voltaje de enlace del sistema de generación.

Este controlador de voltaje se complementará con el control de corriente previamente visto, teniendo de esta manera un control denominado **control en cascada**, en donde existirán dos lazos de retroalimentación, el lazo interno estará encargado de controlar la corriente por el inductor, mientras que el lazo externo deberá mantener estable el voltaje de enlace.

Es necesario mencionar que el lazo interno (corriente) debe ser mucho más rápido que el lazo externo (voltaje).

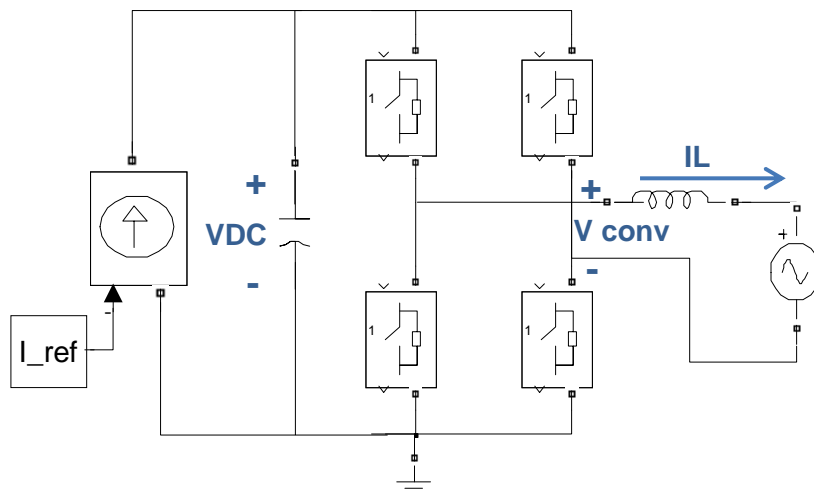


Figura 3.45 Esquemático del convertidor DC-AC para diseñar el controlador de voltaje

3.4.2.4.1 Controlador Gcv

El objetivo del controlador es mantener el voltaje de enlace del sistema lo más estable posible, lo cual efectivamente se lo va a realizar pero de forma indirecta, ya que en realidad lo que se va a controlar es la **energía** contenida por el capacitor. La razón de controlar la energía del capacitor se debe a que si se hubiera diseñado el controlador específicamente para controlar voltaje, sería una tarea difícil diseñarlo, ya a que se tendría una expresión cuadrática para el voltaje del capacitor. Como se sabe, la energía de un

capacitor es proporcional al cuadrado de su voltaje, lo que implica que si se controla la energía, de forma explícita se controlará el cuadrado de su voltaje.

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_c^2$$

Ecuación 3.25

Para determinar el controlador de voltaje, se necesita presentar la función de transferencia, se la encuentra haciendo un flujo de energía del convertidor.

$$dE(t) = \int P_i DC - P_o AC$$

Ecuación 3.26

$$dE(t) = -P_o AC$$

$$s \cdot E(s) = -P_o(s)AC$$

$$s \cdot E(s) = - \frac{V_{conv} \cdot p_k(s) \times I_L \cdot p_k(s)}{2}$$

$$\frac{E(s)}{I_L \cdot p_k(s)} = - \frac{V_{conv} \cdot p_k}{2s}$$

$$G_{pv} = - \frac{V_{conv} \cdot p_k}{2s}$$

Ahora se reemplaza los valores correspondientes, **Vconv.pk= 170V** para tener la función final.

$$G_{pv} = - \frac{170}{2s}$$

$$G_{pv} = - \frac{85}{s}$$

Se desea que el controlador tenga un ancho de banda de **12 Hz** y un margen de fase de **60 Db/dec.**

El motivo de establecer un ancho de banda de 12 Hz para el controlador de voltaje se debe a que se necesita evitar las oscilaciones en el voltaje del capacitor, las cuales tienen una frecuencia de 120 Hz, por lo que se las separa una década.

El controlador obtenido, es de **Tipo II**, con un polo en el origen, un cero real y un polo real. A continuación se presenta el controlador.

$$G_{cv} = - \frac{-249.6036(s + 20.2)}{s(s + 281.4)}$$

3.4.2.4.2 Ganancia de Lazo Abierto

$G_{olv}(s) = \text{Ganancia lazo abierto (open loop)}$

$$G_{olv}(s) = G_{cv}(s) \cdot G_{pv}(s)$$

$$G_{olv}(s) = \frac{21216.3063 (s + 20.2)}{s^2 (s + 281.4)}$$

Se hace uso de las herramientas de simulación de Matlab para hacer un diagrama de bode en lazo abierto.

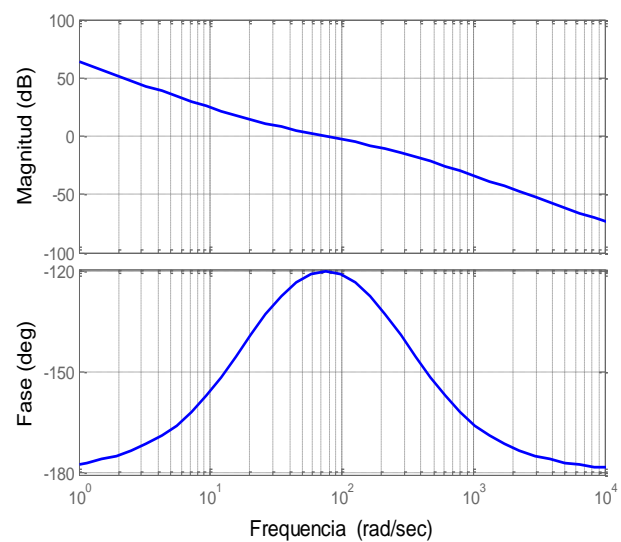


Figura 3.46 Diagrama de Bode en lazo abierto de la planta de voltaje del convertidor DC-AC.

3.4.2.4.3 Ganancia de Lazo Cerrado

$G_{clv}(s) = \text{Ganancia lazo cerrado (close loop)}$

$$G_{clv}(s) = \frac{G_{olv}(s)}{1 - G_{li}(s)}$$

$$\frac{VDC(s)}{VDC_ref(s)} = \frac{21216.3063 (s + 20.2)}{(s + 173.2) (s + 75.4) (s + 32.83)}$$

Se presenta el diagrama de bode en lazo cerrado que proporciona Matlab

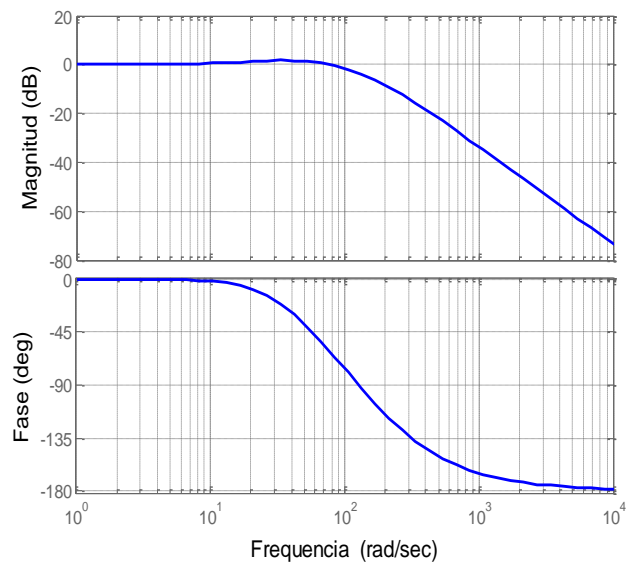


Figura 3.47 Diagrama de Bode en lazo cerrado de la planta de voltaje del convertidor DC-AC.

Se puede comprobar que el sistema es estable debido a que la gráfica de magnitud decae conjuntamente con la de fase.

3.4.2.4.4 Respuesta a la Función Escalón

Se prueba el convertidor en lazo cerrado a una función escalón o también conocido como step.

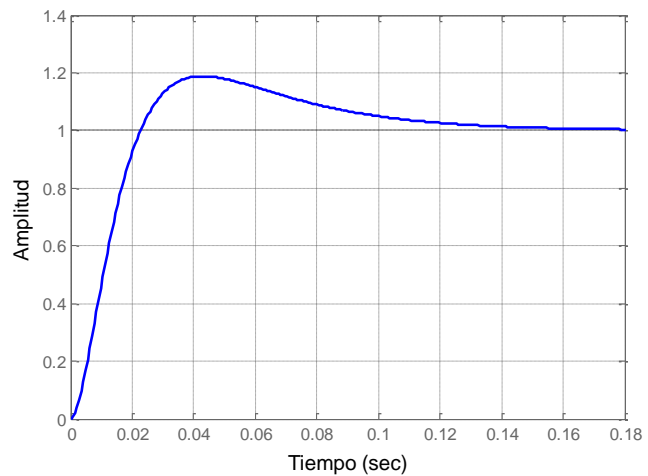


Figura 3.48 Respuesta de la planta a una función escalón.

Según la gráfica se puede asegurar que el sistema si es estable y tiene un tiempo máximo de estabilización de **150 ms**.

3.4.2.4.5 Ejemplo del Control de Voltaje

El motivo de este ejemplo es demostrar que el voltaje del capacitor (V_{dc}) se mantiene constante a pesar de cambiar la corriente que fluye por el inversor (perturbación).

Inicialmente se hace fluir una corriente de **8 Ap**, luego de un pequeño tiempo se cambia el valor a **20 Ap**. Para demostrar la efectividad

del control en cascada, el voltaje V_{dc} debe mantenerse constante en **200 V**, ya que esa es la referencia que se ha ingresado.

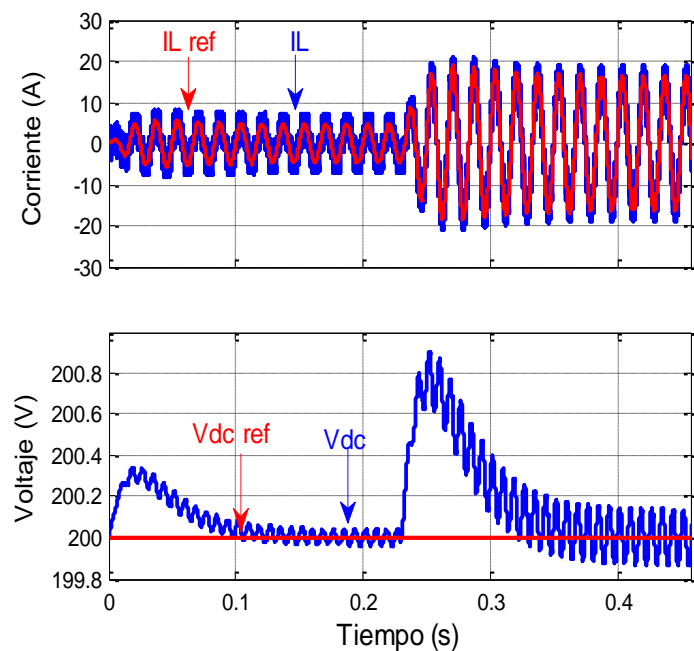


Figura 3.49 Formas de Onda de la corriente por el inductor (IL) y el Voltaje del DC-link (VDC) en lazo cerrado

Efectivamente el voltaje V_{dc} se mantiene estable en 200 Vdc, existiendo un pequeño salto en el momento de la perturbación de la corriente, lo cual se considera normal y está dentro de los rangos permitidos, por lo tanto se puede decir que el controlador funciona correctamente.

3.5 Convertidor DC-DC Tipo Boost.

El convertidor Boost o también llamado elevador, que va a ser usado para el manejo de corriente de la batería. Este convertidor es un tipo de fuente de alimentación conmutada.

3.5.1 Dimensionamiento

Se va a dimensionar el banco de baterías, el inductor y los switches de este convertidor, de manera que se cumpla con los límites de voltaje y corriente permitidos.

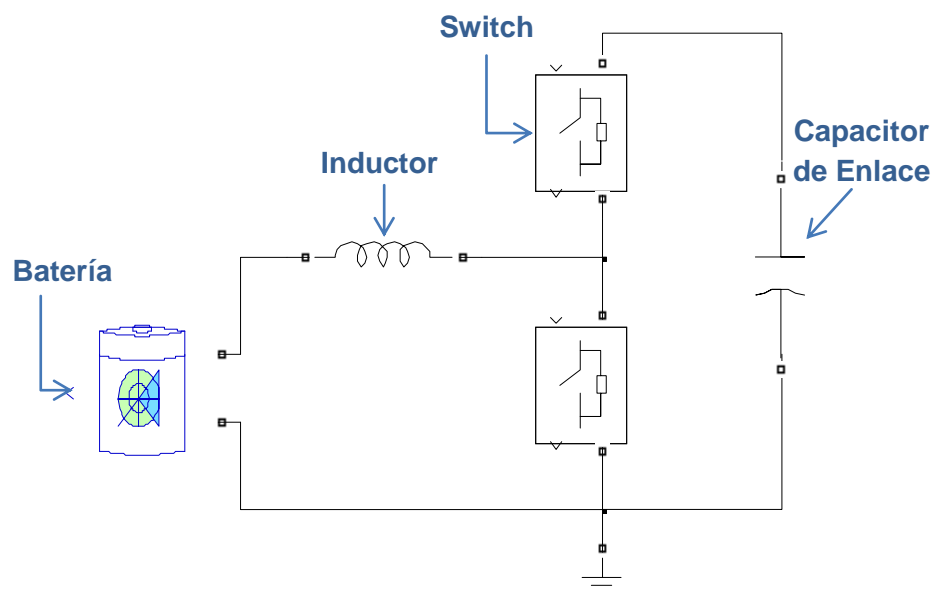


Figura 3.50 Esquemático del Boost de almacenamiento

3.5.1.1 Banco de Baterías

El banco de batería debe ser capaz de mantener un voltaje DC de **120 V**, por lo que se ha tomado la decisión

de colocar en serie, 10 fuentes de 12 V cada una, de esta manera logrando el voltaje deseado. En cuanto a la corriente se ha decidido que cada fuente sea capaz de brindar **80 Ah**.

3.5.1.2 Inductor

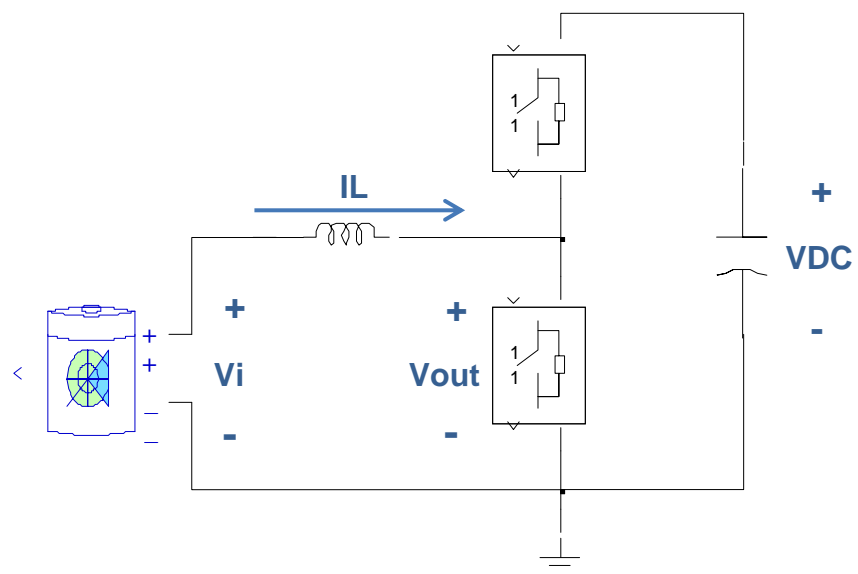


Figura 3.51 Esquemático del convertidor Boost para el dimensionamiento del inductor L3

Se necesita determinar el valor de la inductancia L3 que permita tener un rizado máximo del 10 % de la corriente que circula por el mismo (I_L). Se hará circular por el inductor una corriente de 80 A, por lo que el rizado máximo permitido es de 8A.

Variando el voltaje de la parte izquierda del inductor, se puede controlar el sentido y el valor de la corriente que circula por el inductor.

Se escoge el valor correcto de d (índice de modulación) para tener un voltaje de 112 V en el lado izquierdo del inductor (V_i), de esta manera se genera una diferencia de voltaje de 8 V que caen sobre la resistencia parásita de 0,1 ohm, esto será lo que producirá una corriente de 80 A de izquierda derecha, lo cual significa que la batería está entregando energía al sistema.

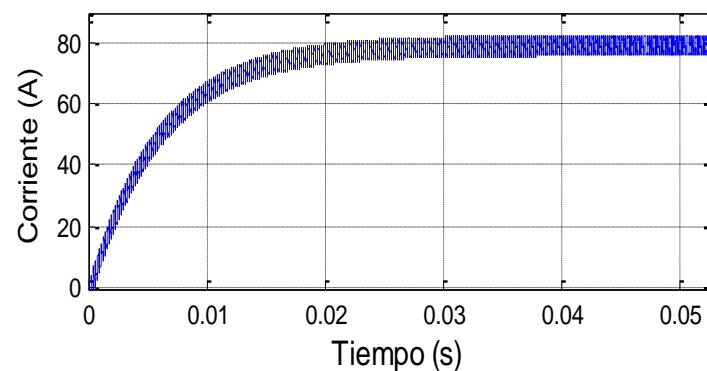


Figura 3.52 Corriente por el inductor L3

La gráfica muestra que la corriente efectivamente toma el valor de 80 A aproximadamente, también se puede notar que esta corriente presenta un rizado que se va a tratar de limitar.

Se realiza un acercamiento (zoom) para observar los valores que tiene el rizado de corriente. En base a esto se escogió un valor de inductancia de **600 uH**, el cual va a permitir tener el rizado requerido.

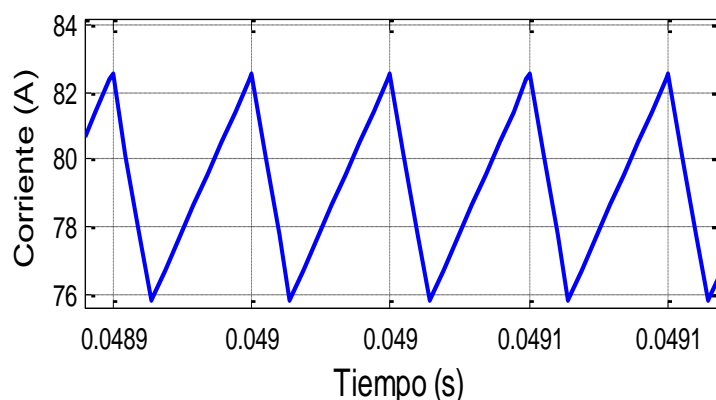


Figura 3.53 Corriente instantánea del inductor L3

$$\text{Rizado Inductor } L3 \leq 10\% \text{ Corriente Inductor } L3$$

$$I_{max} - I_{min} \leq 0.1 \times (80 \text{ A})$$

$$83 \text{ A} - 76 \text{ A} \leq 8 \text{ A}$$

$$7 \text{ A} \leq 8 \text{ A}$$

3.5.1.3 Switches

El valor de voltaje y de corriente que deben soportar los switches de este convertidor, son los mismos que del convertidor Boost Aislado. Por esta razón, los rangos máximos de voltaje y de corriente que soportarán los

switches de este convertidor se adoptarán iguales que los del convertidor Boost Aislado.

3.5.2 Modelamiento Matemático

El modelo de este convertidor es muy similar al modelo del boost aislado, con la diferencia que ahora ya no se tiene un transformador de alta frecuencia ni se cuenta con ningún puente rectificador y solo cuenta con dos switches.

Se puede apreciar, que la corriente I_L que pasa a través del inductor tiene una dirección de izquierda a derecha, es decir, la batería que está representada como la fuente de voltaje V_i está entregando potencia hacia la fuente que se encuentra en la derecha (V_{DC}), que representa al capacitor de enlace DC. La entrada del convertidor es por el lado de la fuente de la derecha (V_{DC}) y la salida del inversor es V_{out} . Además se ha añadido una resistencia parásita R_L que va a producir una caída de voltaje V_{RL} , que debe ser considerada dentro de la obtención del modelo que describa de mejor manera el comportamiento de la planta.

Para obtener la ecuación característica, una vez más la expresión del voltaje diferencial del inductor será el punto de

partida. El desarrollo de las ecuaciones del modelo es presentado a continuación.

$$V_i - \overline{V_{out}} - V_{RL} = VL$$

Ecuación 3.27

$$V_i - (d \times VDC) - IL(RL) = L \frac{\partial IL}{\partial t}$$

$$V_i - (d \times VDC) = IL(RL) + L \frac{\partial IL}{\partial t}$$

$$IL(t) = \frac{1}{L} \int V_i - (d \times VDC) - IL(RL) \delta t$$

Se obtiene una ecuación, donde dependiendo del valor de la variable **d**, se puede entregar o almacenar energía.

Se aplica la transformada de Laplace y se obtiene la función de transferencia de la planta.

$$\frac{IL(s)}{d(s)} = \frac{-\frac{VDC}{L}}{s + \frac{1}{\tau}}$$

Ecuación 3.28

3.5.2.1 Lazo Abierto

Una vez obtenida el modelado de la planta, se debe comparar si este resultado matemático representa de una

manera adecuada a la planta. Esta comparación se la realizará observando el resultado de las simulaciones de ambos modelos. Para tener una certeza aun mayor, se presentarán los cálculos teóricos que confirmarán que la planta es la adecuada.

3.5.2.1.1 Comprobación de la Función de Transferencia

La fuente de voltaje **V_i** que tendrá un valor de 120 V, representa a la batería, se va a hacer que haya una corriente **I_L** desde la fuente **V_i** hacia el convertidor Boost de un valor de 60 A y a su vez se hará que fluya una corriente desde el convertidor hacia la fuente **V_i** de un valor de 20 A. Estas corrientes se van a lograr manipulando el índice de modulación **d** .

Para la simulación en lazo abierto se usará como voltaje de entrada del convertidor (**V_{DC}**) un valor de 200 V. El valor de la resistencia parásita del inductor (**R_L**) es 0.1 Ω .

Ya conociendo los valores que se están usando, se procede a realizar los cálculos.

$$IL = \frac{Vi - Vin}{RL}$$

Ecuación 3.29

$$IL = \frac{Vi - (d \times VDC)}{0.1}$$

$$IL = \frac{120 - (200 \times d)}{0.1}$$

$$d = \frac{120 - (0.1 \times IL)}{200}$$

Para $IL = 60 \longrightarrow d = 0.57$

Para $IL = -20 \longrightarrow d = 0.61$

Ya calculados los índices de modulación necesario para obtener los valores de corrientes deseadas, se procede a colocar estos valores dentro de Matlab y se comprobará si efectivamente se obtienen los resultados esperados.

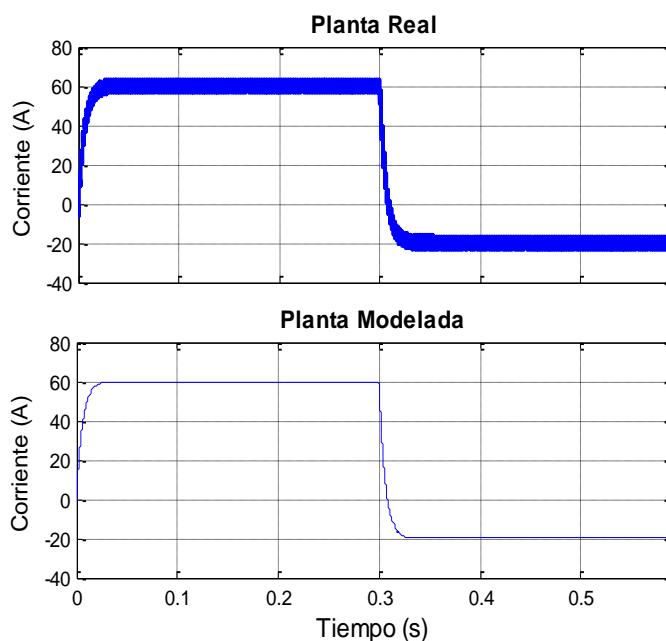


Figura 3.54 Corriente del inductor (I_L) de la planta Real y la planta modelada.

De las simulaciones se puede concluir que se han obtenido los resultados esperados por lo que se confirma que la función de transferencia es una aproximación matemática bastante representativa de la realidad.

3.5.2.2 Lazo Cerrado

Una vez comprobado que la planta fue modelada de manera correcta, se va a dimensionar el controlador y a realizar la retroalimentación del lazo para que se compare

con una señal de referencia y de generarse un error, el controlador manejará el parámetro **d**, para mantener el error con un valor de 0.

A continuación se presenta el diagrama de bloques de la planta.

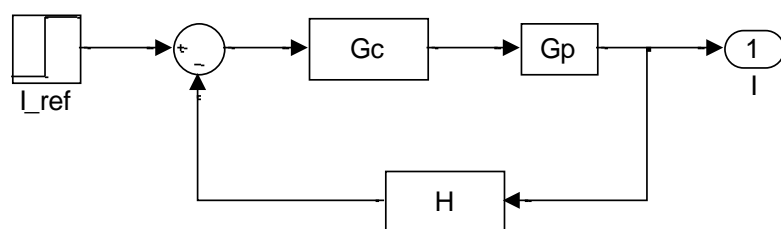


Figura 3.55 Diagrama de Bloques del Lazo cerrado del Boost.

3.5.2.2.1 Controlador

Una vez más, se usará el código del **K factor**, por tal motivo se le ingresa la función de transferencia de la planta, el ancho de banda cuyo valor ingresado es **1000 Hz** y el margen de fase con su valor de **60 dB/dec**.

Como resultado del código, se obtuvo que el controlador adecuado para cumplir con todos los requerimientos es un controlador **Tipo II**, es decir un controlador con un polo en el

origen, un polo y un zero real. A continuación se muestra la función de transferencia del controlador.

$$G_c = \frac{-209.9073 (s + 1773)}{s (s + 2.226e004)}$$

3.5.2.2.2 Ganancia de Lazo Abierto

Ya dimensionado el controlador, ahora se realiza el análisis de la ganancia de lazo abierto, este análisis se realiza con los diagramas de magnitud y fase de la planta, de estos diagramas se puede obtener el margen de fase y el ancho de banda de la planta.

$G_{ol}(s)$ = Ganancia de lazo abierto (open loop)

$$G_{ol}(s) = G_c(s) \cdot G_p(s)$$

$$G_{ol}(s) = \frac{139938172.164 (s + 1773)}{s (s + 2.226e004)(s + 166.7)}$$

Se hace uso de las herramientas de simulación de Matlab para hacer un diagrama de bode en lazo abierto.

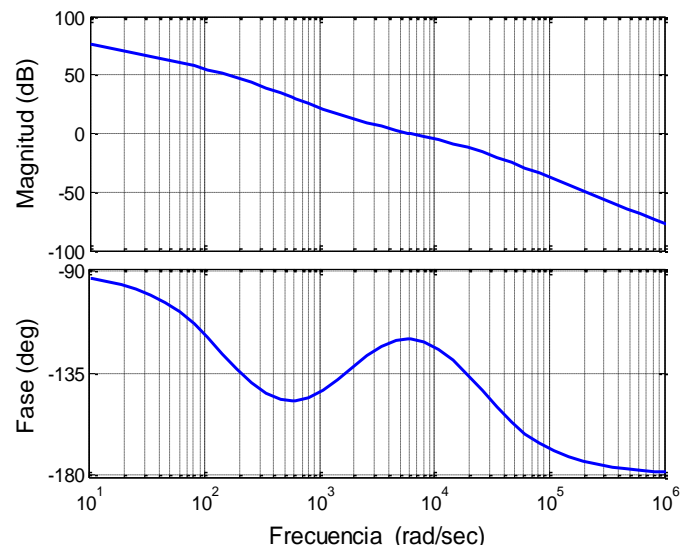


Figura 3.56 Diagrama de Bode en lazo abierto del Boost

3.5.2.2.3 Ganancia de Lazo Cerrado

$G_{cl}(s)$ = Ganancia de lazo cerrado (close loop)

$$G_{cl}(s) = \frac{G_{ol}(s)}{1 - G_{l}(s)}$$

$$\frac{I(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{139938172.164 (s + 1773)}{(s + 1.258e004) (s + 7055) (s + 2796)}$$

Se presenta el diagrama de bode en lazo cerrado que proporciona Matlab

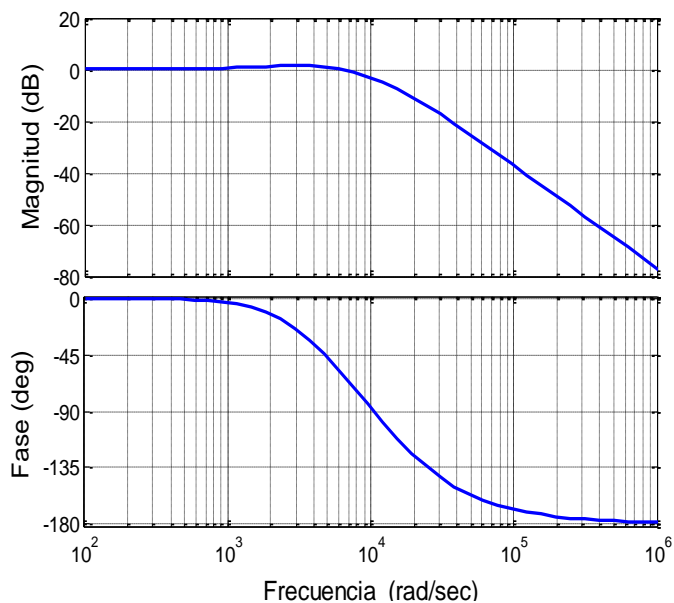


Figura 3.57 Diagrama de Bode en lazo cerrado del Boost

Se observa entonces que de la gráfica de magnitud y fase de la ganancia de lazo cerrado, la planta tiene un comportamiento estable, pues tiene un comportamiento de un integrador.

3.5.2.2.4 Respuesta a la Función Escalón

Uno de los principales intereses es observar la rapidez de respuesta de la ganancia de lazo cerrado. Por lo tanto se simulará una perturbación al sistema, esta perturbación va a ser realizada por la función escalón.

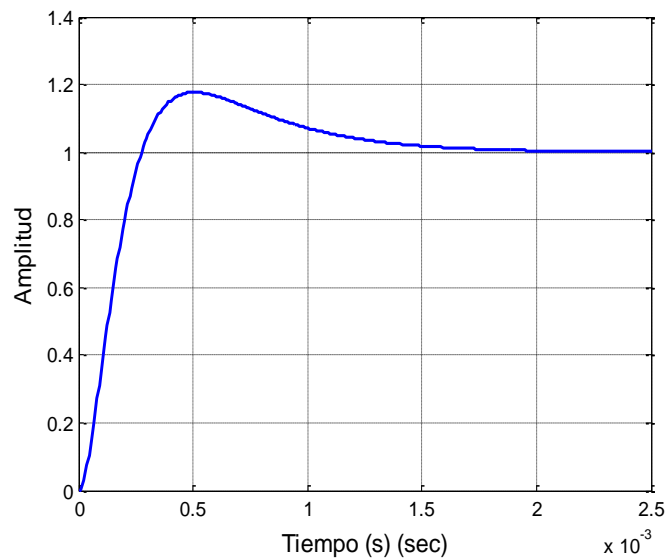


Figura 3.58 Respuesta de la planta a una función escalón.

Se aprecia que la respuesta de la ganancia está dentro de las expectativas. La estabilidad del sistema se da alrededor de los **2ms**.

3.5.2.2.5 Ejemplo en Lazo Cerrado

Este es el esquema que presenta la planta real y la planta modelada en retroalimentación negativa, con su respectivo controlador.

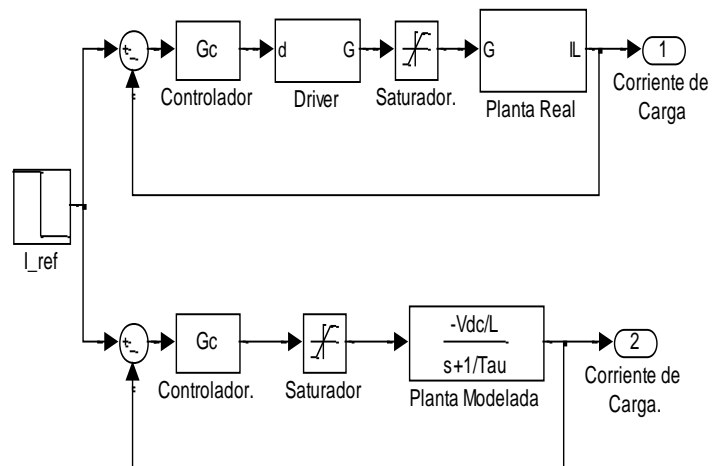


Figura 3.59 Diagrama de bloques del sistema en Lazo cerrado con planta real y modelada.

El valor de la fuente V_i , que representa la batería, es de **120V**, el capacitor está cargado inicialmente con un voltaje de **200V** que ese el voltaje del capacitor de enlace. Las corrientes de referencia van a ser primero **40A**, luego a los 0.02 segundos cambiará a **-20A**. La retroalimentación va a estar dada por la medición de la corriente que está pasando por el inductor.

Luego de la correspondiente simulación, se presentan las gráficas resultantes.

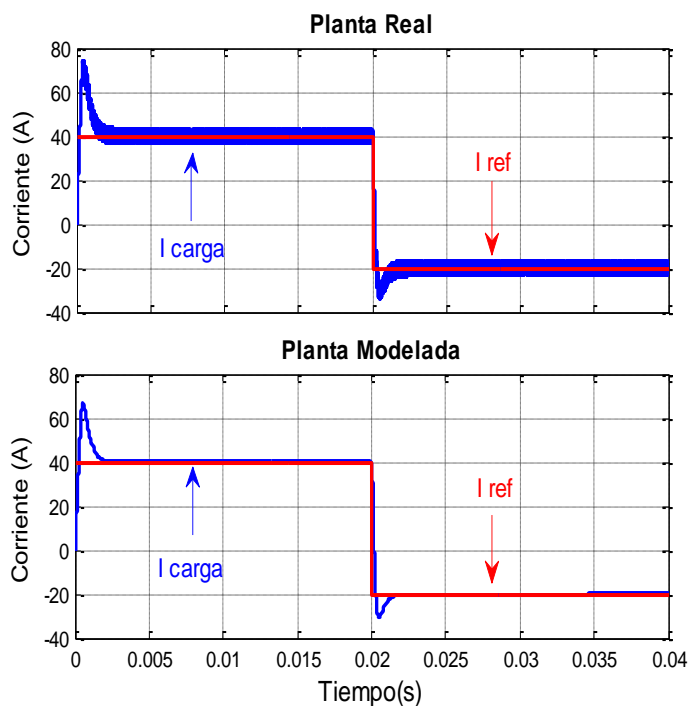


Figura 3.60 Corriente de referencia, real y modelada por el inductor.

Se observó que la corriente que pasa por el inductor siguió la referencia de manera satisfactoria, aparte se comprueba que la batería puede entregar o recibir corrientes y que el controlador es capaz de manejar estos dos estados.

CAPITULO 4

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

En este capítulo se analizará, los posibles inconvenientes que se pueden tener con este tipo de generación eléctrica y a su vez observar la respuesta del sistema planteado para identificar sus fortalezas y sus debilidades.

Adicionalmente se mostrará algunos elementos extras que se deberían implementar al sistema, con la finalidad de protegerlos y evitar el daño, tanto de módulos FV, convertidores estáticos y elementos de almacenamiento.

4.1 Conexión Del Sistema

Una vez que se ha dimensionado y posteriormente comprobado el correcto funcionamiento de los convertidores que forman parte del sistema pero de manera individual, es tiempo de unir todos los convertidores con la finalidad de observar el funcionamiento del sistema completo.

4.1.1 Modelo Simplificado del Sistema.

Se ha dividido el sistema en dos etapas muy claras, la de fuerza o también conocida como la etapa de potencia que está constituida por los convertidores estáticos de tensión, y la etapa de control, la cual tiene la función de mantener estable el funcionamiento de la etapa de fuerza.

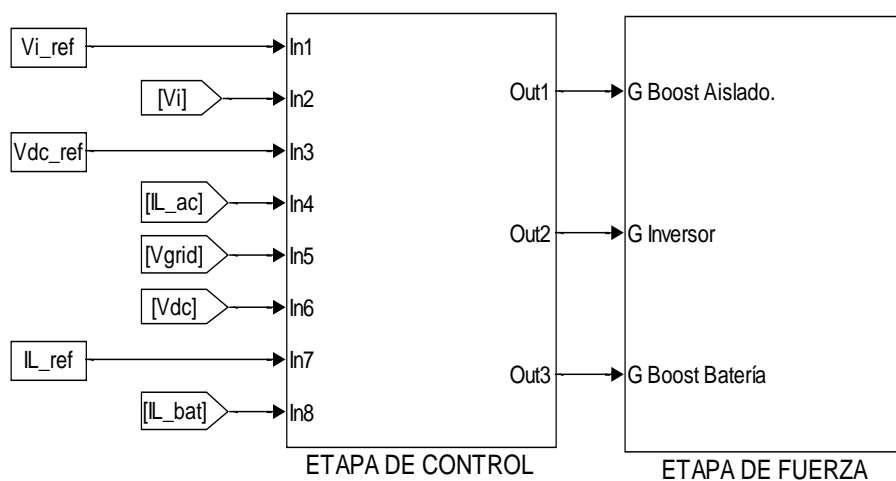


Figura 4.1 Modelo Simplificado del Sistema.

4.1.1.1 Etapa de Control

La etapa de control es un subsistema en el que se puede encontrar los controladores de los convertidores de tensión. Cada controlador recibe su respectiva señal de referencia y el valor de la variable que se está controlando, las que corresponden a las señales desde In1 hasta In8.

La salida de los controladores son los pulsos que activan los switches de los convertidores, estos son Out1, Out2 y Out3.

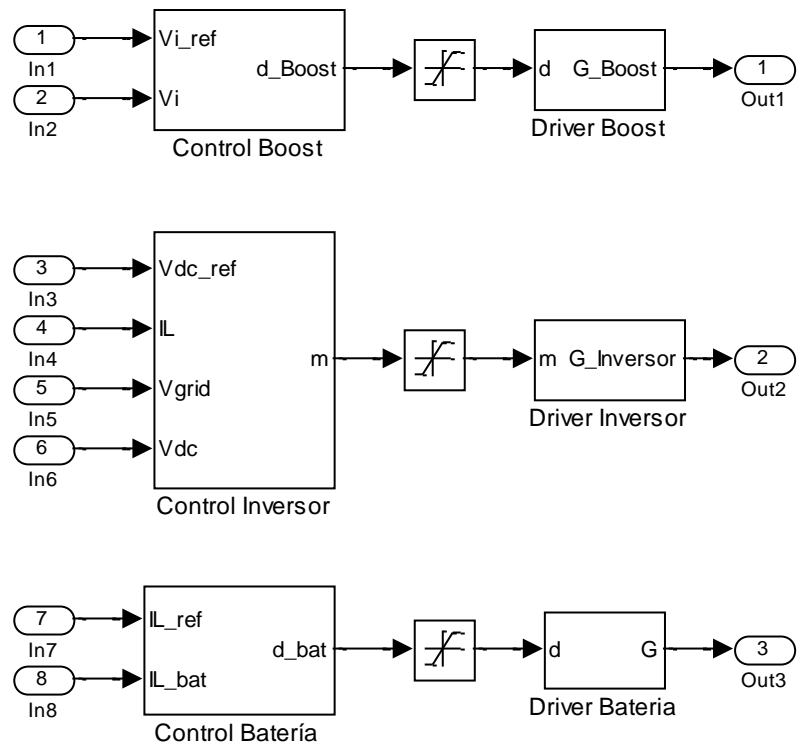


Figura 4.2 Etapa de control.

4.1.1.2 Etapa de Fuerza

Esta etapa contiene los convertidores de tensión así como los módulos fotovoltaicos, inductores y capacitores que permiten realizar el adecuado tratamiento de la energía eléctrica.

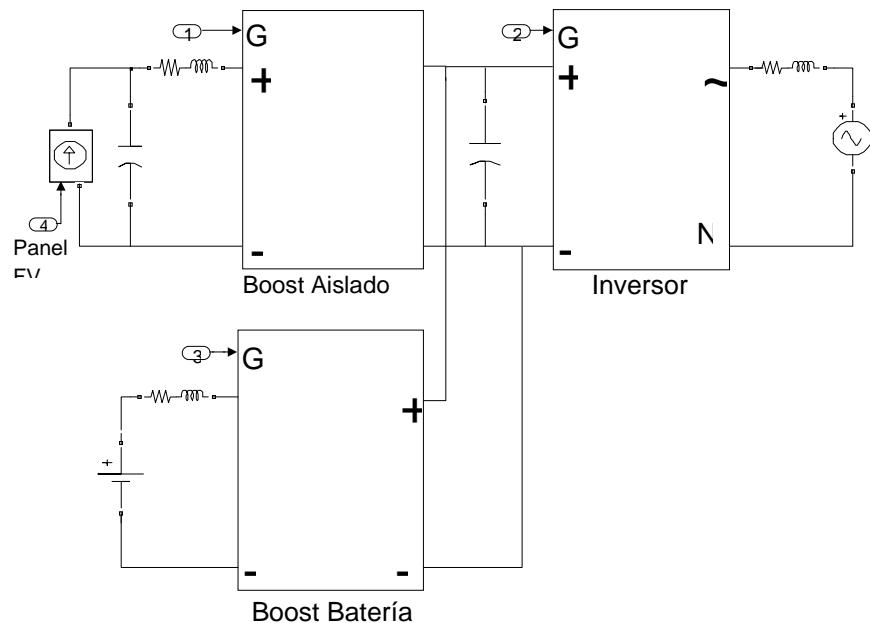


Figura 4.3 Etapa de fuerza

4.2 Inicialización Del Sistema

En el momento que se pone a funcionar el sistema completo, se debe tener presente algunos aspectos que permitan el correcto funcionamiento del mismo.

La estabilización del voltaje de enlace es la primera cosa que se debe conseguir, por este motivo, al momento de encender el sistema, se va a poner a funcionar únicamente el Inversor, el cual como ya se conoce, es el encargado de regular este voltaje. Mientras esto sucede, no se debe tener ninguna potencia entrando al sistema ya que sería una gran perturbación para la estabilización del voltaje de enlace, así que se fija el voltaje de entrada del sistema al valor del voltaje de circuito abierto

de los módulos FV que es de **180 V**, ya que en este valor es cuando se tiene cero de corriente saliendo de los módulos FV y entrando al sistema.

Una vez que el voltaje de enlace se ha estabilizado en **200 V**, el sistema ya está listo para recibir potencia de los módulos FV, entonces se empieza a cambiar el voltaje del arreglo FV, desde el valor de circuito abierto hasta el valor de voltaje nominal que es de **150 V**. El cambio se lo hace modificando la referencia del voltaje del arreglo FV o voltaje de entrada, mediante una rampa decreciente que cae de 180 V a 150 V.

A medida que el voltaje del arreglo FV va decreciendo, se va acercando más a su valor nominal, y la corriente que entregan los módulos FV empieza a crecer hasta también llegar a su valor nominal. De esta forma se asegura que la potencia que llega al sistema al momento de encenderlo, crezca de forma progresiva y no crezca de forma brusca.

A continuación se muestra la simulación de lo previamente mencionado. Desde 0s hasta 0.2s se estabiliza el voltaje de enlace sin tener potencia entrando al sistema, ya que se mantiene el voltaje del arreglo FV en el valor de voltaje de circuito abierto.

Desde 0.2s hasta 0.7s se empieza a mover el punto de operación de arreglo FV, de esta manera se controla que la potencia que reciba el

sistema cuando se enciende vaya creciendo desde cero hasta su valor nominal.

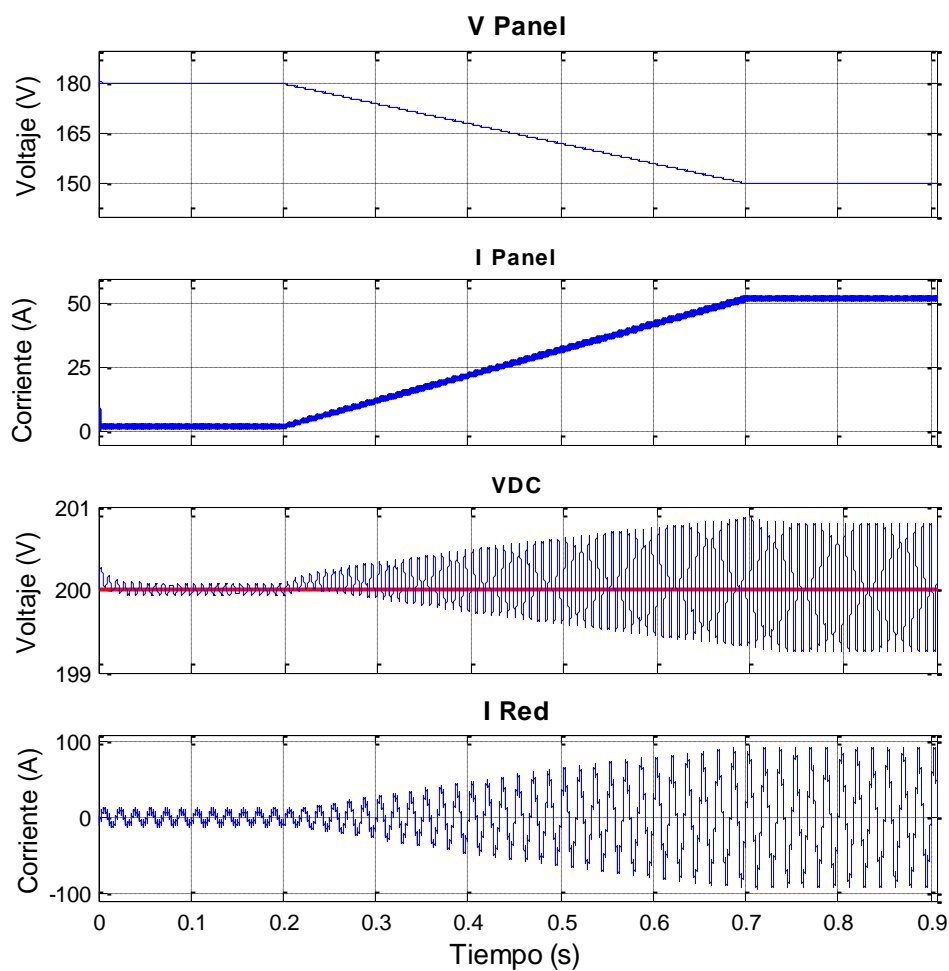


Figura 4.4 Formas de ondas del Inicio del Sistema

4.3 Respuesta Del Sistema a Perturbaciones.

La generación FV, es muy sensibles a factores medioambientales, por eso se pondrá a prueba el diseño previamente realizado, se aplicará perturbaciones para observar cuan robusto es el sistema diseñado.

4.3.1 Aumento y disminución de la intensidad luminosa.

La generación FV depende de la luz, esta es una variable que no se puede controlar porque depende de factores ambientales.

Por este motivo este tipo de generación se vuelve intermitente, lo que se convertiría en un verdadero problema, porque no se tiene una fuente de energía perenne.

La simple presencia de una nube, sería una disminución en la intensidad de luz que recibe el panel, lo que se traduce en una menor inserción de corriente hacia el sistema de generación planteado. Así mismo las noches en general sería un problema para el sistema, ya que al no haber presencia de luz queda inactivo, es por este motivo que se requiere un almacenamiento.

Es de mucho interés observar la respuesta del sistema a estas perturbaciones que se dan constantemente.

A continuación se presentará de manera simulada el comportamiento de todo el sistema ante estos inconvenientes propios de trabajar con este tipo de energía renovable.

Al inicio de la simulación se va a mantener constante en 30 A, la corriente que inyecta al sistema el FV, hasta que a los 0.1 s de la simulación se procede a simular la disminución de la intensidad de luz que se traduce en una caída en la corriente que se

inyecta al sistema, el valor seleccionado es 15 A, este valor de corriente se mantendrá hasta que a los 0.2 s, se simulará que existe una mayor intensidad de luz es decir una mayor corriente que inyecta el panel, el valor seleccionado es de 40 A.

Con todas estas variaciones en la intensidad de luz, que se convierten en perturbaciones del sistema, se espera observar que el voltaje del capacitor que se encuentra en paralelo a los módulos FV mantenga su referencia, que es de 150 V.

Al existir una perturbación en la entrada, es necesario revisar también que ha sucedido con el VDC, ya que este nivel de voltaje es muy importante para el funcionamiento adecuado del inversor. También se muestra la corriente que se está inyectando a la red, se espera que cuando la corriente del panel aumente, la corriente hacia la red también lo haga, lo que significa que la potencia aumenta. Cuando la corriente inyectada por el panel disminuye la corriente hacia la red también lo hará.

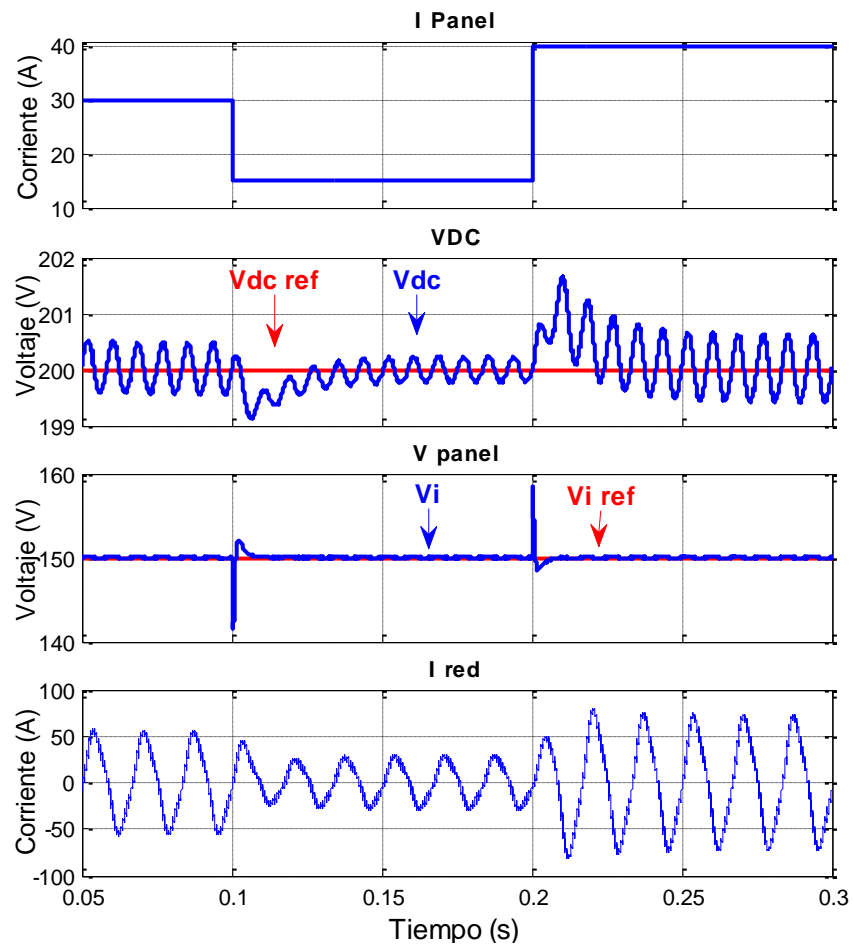


Figura 4.5 Gráfica de respuesta al cambio de intensidad de luz.

Como resultado de la simulación se puede concluir que efectivamente el sistema está contestando satisfactoriamente a las perturbaciones que pueden causar el aumento o la disminución de la intensidad de la luz, porque está manteniendo los voltajes de referencia.

4.4 Uso Del Almacenamiento De Energía

La demanda de energía eléctrica aumenta en ciertas horas del día, llegando a niveles pico, en los que se necesita de alguna manera aliviar este gran consumo energético, en el caso de Ecuador, es un riesgo tener niveles de consumo pico, ya que se depende de la hidroeléctrica Paute, la cual si no posee un nivel de agua adecuado, simplemente no se puede cubrir la demanda en estos horarios.

El presente proyecto podría ser una alternativa para alivianar la demanda energética en las horas pico, debido a que posee un almacenamiento de energía basado en una batería, la cual se puede cargar y descargar conforme sea el caso.

Se vuelve fundamental, crear un algoritmo, que sea el que determine el momento que se deba cargar la batería, o el momento que se deba descargar la misma. Este algoritmo debería manejar datos históricos de la intensidad de luz en la región donde se instale el sistema de generación, a su vez debe también manejar la demanda de energía del sector, así como el costo de la energía durante las horas picos, para que de esta manera, este algoritmo genere la corriente de referencia para la batería y así aprovechar al máximo el almacenamiento.

4.4.1 Carga de la Batería

El proceso de carga de la batería consiste en tomar potencia de los módulos fotovoltaicos para almacenarla en la batería. La potencia se traduce en corriente que fluye desde el enlace DC hacia la batería. La carga se la puede realizar cuando se tiene niveles altos de radiación solar, así se estará almacenando energía para usarla cuando se la necesite.

Se presenta la gráfica de carga de la batería, el valor negativo de la corriente de la batería se debe a que la referencia de la corriente fue definida de forma positiva desde la batería hacia el convertidor Boost.

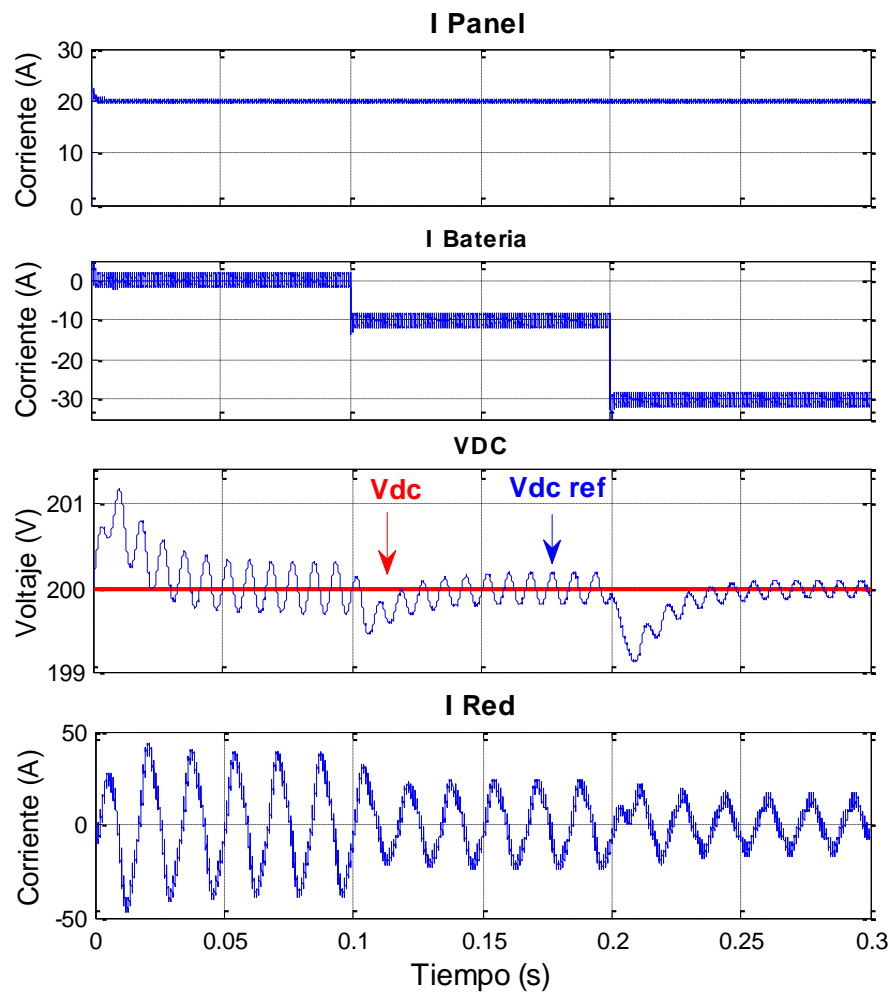


Figura 4.6 Respuesta a la carga de la batería

En la gráfica se puede notar que en **0.1 s** empieza la carga de la batería por lo que decae instantáneamente el voltaje del enlace DC, lo cual se debe a que en el instante que se inyecta potencia a la batería, el capacitor pierde parte de su energía, pero inmediatamente los controladores eliminan tal perturbación. Así mismo se puede notar que la corriente que se está inyectando a

la red eléctrica disminuye debido a que se toma potencia del sistema para cargar la batería, entonces se ve reflejado en la disminución de la potencia que se entrega a la red.

En **0.2 s** se aumenta el valor de la corriente de carga, por lo que se nota una mayor perturbación en el voltaje de enlace y la disminución de la corriente que se inyecta a la red, es más notoria.

4.4.2 Descarga de la Batería

El propósito de descargar la batería es para aprovechar la energía que se ha almacenado, los momentos adecuados para realizarlo son; en las horas pico de consumo eléctrico para tratar de reducir la demanda y cuando los módulos fotovoltaicos no estén entregando suficiente potencia para el sistema.

Se presenta la gráfica de descarga de la batería, el valor positivo de la corriente de la batería se debe a que la referencia de la corriente fue definida de forma positiva desde la batería hacia el convertidor Boost.

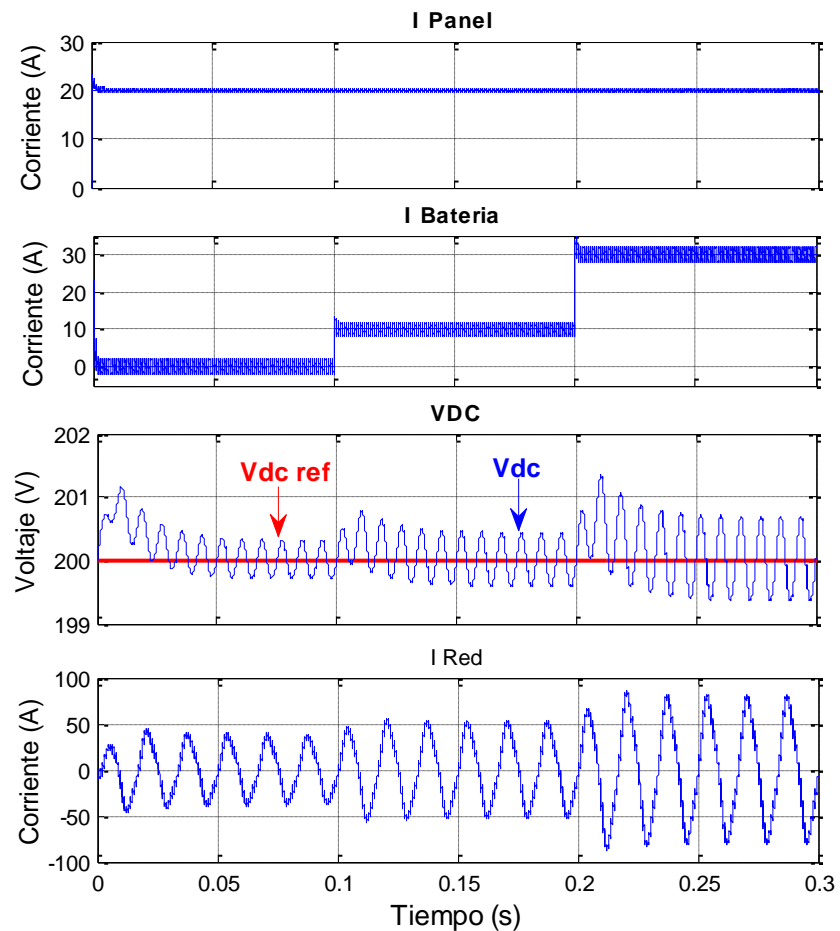


Figura 4.7 Respuesta a la descarga de la batería

Se puede notar que en **0.1s** comienza la descarga de la batería, por lo que el voltaje de enlace se ve afectado debido a que se está inyectando potencia al convertidor DC-AC, por este motivo la energía almacenada en el capacitor incrementa de forma instantánea, por ende su voltaje. Pero gracias a la acción de los controladores, se estabiliza el valor de voltaje en la referencia deseada. También se aprecia que la corriente que se inyecta a la red aumenta su amplitud, efecto que es muy lógico, debido a que

se suma la corriente que provee el arreglo FV con la corriente de la batería, traduciéndose en un aumento de la potencia que se entrega a la red eléctrica.

En **0.2 s** se aumenta el valor de la corriente de descarga de la batería, por lo que se nota una mayor perturbación en el voltaje de enlace y el aumento de la corriente que se inyecta a la red, es más notorio.

4.5 Componentes Adicionales Del Sistema

Además de los componentes que se han descrito en el desarrollo de este trabajo, existen algunos otros que pueden ser muy positivos para el sistema, ya sea aportando en la confiabilidad, seguridad y hasta aumentando la eficiencia del mismo. Por esta razón se describirán algunos de ellos.

4.5.1 Seguidores Solares

Consiste en soportes móviles, cuya posición varía durante el día, siempre buscando captar la mayor cantidad de radiación solar.

Sobre este soporte se sujetan los módulos FV. Dependiendo del grado de libertad del movimiento, se conocen dos tipos: el seguidor de un eje y de dos ejes.



Figura 4.8 Seguidor Solar con Módulo FV

Fuente: www.sumiseran.es

Se puede hacer que el movimiento de seguidor sea controlado por el algoritmo del punto de potencia máximo MPPT.

4.5.2 Protección de Sistemas FV

El uso de fusibles proporciona seguridad y flexibilidad de trabajo al sistema FV. Es necesario mencionar que una batería en cortocircuito puede sostener miles de amperios por varios segundos. Para evitar daños irreparables en el banco de baterías, así como en el cableado, se necesita la protección de un fusible entre la batería y el convertidor Boost de la batería.

También se debe mencionar que las condiciones de cortocircuito relacionadas con las celdas solares no permiten niveles de

corriente suficientes para abrir un fusible estándar y aislar eficazmente las cadenas fotovoltaicas (PV) con falla.



Figura 4.9 Fusible FV

Fuente: www.perusolar.org

4.5.3 Medidor de Carga de Batería

Es importante la batería dentro del sistema, es por este motivo que se vuelve imperativo la implementación de un elemento para la medición de su carga, ya que este instrumento es el que indicará si la batería tiene el nivel óptimo de voltaje para seguir satisfaciendo las necesidades de todo el sistema.



Figura 4.10 Medidor de Carga

Fuente: www.onlymoteros.es

Estos medidores funcionan con un multímetro de escala expandida. Por lo general el nivel de la carga se la expresa en porcentaje, tiene 10 divisiones que representan 10% de variación. Adicionalmente poseen 3 luces adicionales, una para indicar que se ha alcanzado el nivel máximo de carga de la batería, otra para indicar el voltaje de ecualización que siempre es elevado, el último indica que el nivel de voltaje de la batería es bajo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Tanto el rizado del voltaje de los capacitores, como el rizado de la corriente que circula por los inductores que se ha podido observar en las simulaciones del sistema, se encuentran dentro de los rangos máximos permitidos. Esto permite afirmar que el dimensionamiento de capacitancias e inductancias ha sido correcto.
2. El modelo promedio de los convertidores que fue usado para obtener los respectivos controladores responde de forma similar que los modelos de conmutación, frente a las distintas perturbaciones que en su debido momento se aplicaron, lo cual confirma que el modelo promedio representa de excelente manera al sistema.

3. Las simulaciones demuestran que la corriente que se inyecta a la red toma menos tiempo en ser estabilizada con respecto al voltaje de enlace, esto sucede tal cual se lo predijo, debido a que el inversor necesitaba un controlador en cascada, donde el lazo interno que regula la corriente es más rápido que el lazo externo que regula el voltaje de enlace.
4. El sistema tiene la capacidad de brindar la potencia máxima para la que fue diseñado, sin encontrarse necesariamente los módulos FV brindando su potencia máxima. La razón de esto es que se puede complementar la potencia que entregan los módulos FV con la potencia del almacenamiento.
5. La inicialización del sistema que se propuso no presentó inconvenientes, ya que el voltaje de enlace, el voltaje del panel y la corriente de salida del inversor fueron reguladas en un tiempo menor a 0,8s aproximadamente, tiempo considerado como satisfactorio.

Recomendaciones

1. Sería importante realizar todos los estudios necesarios tales como factibilidad, sostenibilidad e impacto ambiental para determinar si el tema planteado es aplicable, o si es necesario realizar alguna modificación con

la finalidad de satisfacer las demandas de energía en el sector donde el sistema va a ser instalado, si es rentable y finalmente si es amigable con el entorno.

2. Ser cuidadoso al elegir la batería a ser usada, ya que el almacenamiento es transcendental. Asegurarse que se va a trabajar a temperaturas adecuadas, a su vez, que pueda soportar los picos de corriente máximo del sistema. Revisarla y darle mantenimiento periódicamente con la finalidad de alargar su vida útil.
3. Seleccionar los fusibles para la protección de forma adecuada, ya que por la presencia de inductores en el sistema, al momento de existir un corto circuito, el fusible se acciona cortando el camino de la corriente, algo que el inductor no lo permitirá, por tal motivo el inductor inmediatamente cambia su polaridad con la finalidad de mantener la corriente y este cambio puede producir un rompimiento dieléctrico y ocasionar un incendio.
4. Tener presente todos los parámetros de la norma IEEE 1547 para la conexión con la red, ya que de no cumplirse, habrá problemas como desbalance en los voltajes, armónicos, bajones de voltaje o subidas de voltaje en la red, lo que sería perjudicial para todos los abonados de la empresa eléctrica del lugar donde esté instalado el sistema.

5. Al momento de dimensionar los elementos que forman parte de los diversos convertidores estáticos usados en el presente proyecto, asegurarse que no se los sobredimensionen, ya que este hecho haría que el sistema se encarezca más innecesariamente.

6. La empresa eléctrica provee dos fases de 120 Vrms a la mayoría de viviendas en la actualidad, por lo que sus cargas van divididas entre sus dos fases para tenerlas balanceadas. El sistema que se ha diseñado tiene una salida de voltaje de 120 Vrms, al ser instalado en este tipo de viviendas, causaría un desbalance de las fases. Por este motivo se podría duplicar el voltaje de salida del sistema a 240 Vrms con lo cual no existiría ningún inconveniente. Para lograr este cometido, se debe también duplicar el voltaje de enlace de 200 V a 400 V.

BIBLIOGRAFIA

1. Marcelo Romero Tous, "ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA", Primera Edición, Ediciones Ceac, 2008.
2. Muhammad H. Rashid, "ELECTRÓNICA DE POTENCIA", Tercera Edición, Pearson Education, México 2004.
3. Revista Electro Industria, "El Boom de la Generación Fotovoltaica en el Mundo", <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=798&tip=7>, 2010.
4. Dorf Bishop, "SISTEMAS DE CONTROL MODERNO", Décima Edición, Pearson Education, 2008.
5. Benjamin Kuo, "SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO", Séptima Edición, Pearson Education, 1996.

6. Siliken, Energía Renovable, <http://www.siliken.com>, 2010.

7. Diego Oñate Arresti, "DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR", Primera Edición, http://www.torres-refrigeracion.com/pdf/art_fot_014.pdf, 2010.