



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**“DISEÑO DE CONTROL Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADA EN MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS, UN INVERSOR TRIFÁSICO CONECTADO A LA RED Y
BATERÍAS COMO UNIDAD DE ALMACENAMIENTO”**

TESINA DE SEMINARIO

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA Y
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Presentado por:

RICARDO ANDRÉS PAREDES PEÑAHERRERA

FABIÁN ROBERTO AYALA TERÁN

GUAYAQUIL – ECUADOR

2010

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres.

Fabián Roberto Ayala Terán

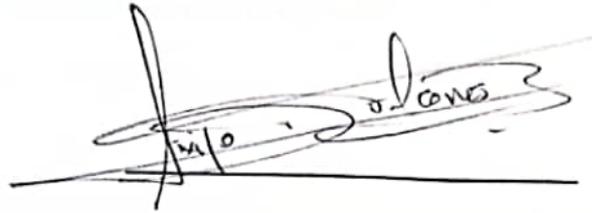
A mi abuelo Víctor Hugo Peñaherrera.

Ricardo Andrés Paredes Peñaherrera

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por darnos la oportunidad de culminar nuestra vida estudiantil superior con éxito. Agradecemos a nuestros padres por el apoyo incondicional ofrecido durante todo este tiempo. Y agradecemos al moderador de nuestro seminario de graduación por habernos impartido sus conocimientos y así poder haber culminado con nuestra propuesta de proyecto.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

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

Ing. Sixifo Falcones Z.

PROFESOR DEL SEMINARIO DE GRADUACIÓN

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Efrén Herrera', written over a horizontal line. The signature is very stylized and circular.

Ing. Efrén Herrera

DELEGADO DEL DECANO

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesina de seminario, nos corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)

Ricardo Andrés Paredes Peñaherrera

Fabián Roberto Ayala Terán

RESUMEN

Se escogió este tema por la siguiente razón: La importancia de utilizar la luz solar como fuente de energía renovable y por la aplicación de conocimientos de control automático y electrónica de potencia, las cuales son las bases de nuestra carrera. El proyecto consiste en el diseño de controladores analógicos (BOOST no aislado, BOOST aislado y un inversor), diseño de un controlador principal, simulación de un sistema de generación de energía eléctrica, para finalizar con una simulación general del sistema y un análisis de las posibles fallas.

El sistema consta de las siguientes partes: paneles fotovoltaicos, los cuáles transforman la energía solar a energía eléctrica. La salida del sistema de paneles se conecta un convertidor BOOST que regula y filtra el voltaje DC entregado por el DC-Link al arreglo de paneles de 520VDC A 200VDC aproximadamente (depende del MPPT), este convertidor utiliza un transformador de alta frecuencia con el objetivo de producir aislamiento. Del DC-Link alimentamos un convertidor DC-DC BUCK para cargar baterías, y también se conecta un inversor trifásico el cuál proporcionará energía a la red trifásica conectada. Cabe resaltar que nuestro proyecto no será implementado físicamente. El proyecto sólo se basa en simulaciones y cálculos.

El reporte consta de cuatro capítulos. Como primer punto, se describe la motivación para la realización de nuestro proyecto, y a su vez un esquema general de lo que se plantea. Como siguiente punto, se elaboró un marco teórico que trata sobre energía renovable, energía solar, panel fotovoltaico y baterías. Además se habla sobre los programas que se utilizará para el proyecto (Simulink, SisoTool, SimPowerSystem y MatLab) y teoría sobre los cuatro tipos de convertidores. Como tercer punto, se menciona el dimensionamiento, análisis, simulaciones y diseño de los componentes de cada convertidor, baterías y paneles fotovoltaicos además de diseñar los controladores para cada convertidor. Finalmente se muestra el circuito completo con todos los convertidores y controladores en una simulación general, se hace un análisis del controlador principal que es el que administra todos los convertidores y un análisis de contingencias.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO.....	II
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	III
DECLARATORIA EXPRESA.....	IV
RESUMEN.....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ABREVIATURAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
INTRODUCCION.....	XV

Capítulo 1

ENERGÍA RENOVABLE Y MOTIVACIÓN.....	1
1.1 Energía Renovable.....	1
1.1.1 Energía Solar.....	2
1.2 Propuesta de proyecto.....	4

Capítulo 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Panel Fotovoltaico.....	6
2.1.1 Principio de Funcionamiento.....	7
2.1.2 Lista de Aplicaciones de los Paneles Fotovoltaicos.....	8
2.2 Baterías.....	9
2.2.1 Principio de Funcionamiento.....	9
2.2.2 Tipos de baterías.....	10
2.3 Convertidores.....	10
2.3.1 Ciclo de Trabajo.....	10
2.3.2 Convertidor BOOST DC-DC no aislado.....	13
2.3.3 Convertidor BOOST DC-DC aislado.....	16
2.3.4 Inversor Trifásico.....	19
2.3.4.1 Generación de los pulsos de los tiristores.....	24

2.3.4.2 Ecuaciones del Inversor Trifásico.....	24
2.4 Transformada $abc-dq0$	25
2.4.1 Objetivo de la Transformada.....	26
2.4.2 Transformada $abc-\alpha\beta\gamma$	26
2.5 Máxima extracción de energía (MPPT).....	31
2.5.1 Ventajas del MPPT.....	32
2.6 Herramientas utilizadas.....	33
2.6.1 MatLab.....	33
2.6.2 SisoTool.....	34
2.6.2 SimPowerSystem.....	34
2.7 Técnica K_Factor	34

Capítulo 3

DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES Y CONTROLADORES.....	36
3.1 Criterios a tomar en cuenta para el diseño de los controladores que se usarán en el proyecto.....	37
3.2 Parámetros Generales.....	38
3.3 Diseño del convertidor del pv	39
3.3.1 Convertidor del Panel Fotovoltaico.....	40
3.3.1.1 Transformador Ideal.....	41
3.3.2 Simulación del Convertidor BOOST del Panel Fotovoltaico.....	41
3.3.2.1 Cálculo del Inductor	43
3.3.2.2 Cálculo del Capacitor en el DC-Link.....	44
3.3.2.3 Cálculo del capacitor del Panel Fotovoltaico.....	45
3.3.2.4 Diseño del Controlador.....	47
3.4 Diseño del Convertidor de la Batería.....	55
3.4.1 Convertidor del Banco de Baterías.....	56
3.4.1.1 Simulación del Convertidor de Baterías.....	57
3.4.1.2 Cálculo del Inductor	59
3.4.1.3 Cálculo del Capacitor	60
3.4.1.4 Diseño del Controlador	61
3.5.1 Diseño del inversor trifásico.....	69
3.5.1.1 Simulación de la comparación entre Moduladora	

y Portadora para la generación de pulsos.....	71
3.5.1.2 Simulación de la corriente que soporta cada tiristor	72
3.5.1.3 Simulación de los voltajes de salida del Inversor Trifásico de línea a línea.....	72
3.5.1.4 Simulación de los voltajes de salida del inversor de línea a neutro.....	73
3.5.1.5 Simulación del Voltaje en el DC-Link	74
3.5.2 Diseño del controlador interno	75
3.5.2.1 Controlador de Corriente.....	77
3.5.3 Diseño del controlador externo	80
3.5.3.1 Controlador de voltaje.....	82

Capítulo 4

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA UNIFICADO.....	84
4.1 Esquema del sistema completo.....	85
4.2 Simulaciones del sistema completo.....	86
4.2.1 Simulación general cambiando valor de referencia de voltaje en el PV y agregando una perturbación en la corriente que inyecta el PV.....	86
4.2.2 Simulación general aplicando cambio de referencia en la corriente en el convertidor de la batería, cambio de referencia en el voltaje del PV y perturbación de corriente en el convertidor del PV.....	88
4.3 Análisis de Contingencia.....	90
4.3.1 Al momento de arrancar el sistema en caso de que no haya acuerdo con la empresa eléctrica.....	90
4.3.2 Arranque del sistema en caso de que haya acuerdo con la empresa eléctrica.....	91
4.3.3 Para apagar el sistema	91
4.3.4 Fallas en la red.....	92
4.4 Controlador Principal.....	92

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

Gp_{pv} : Ganancia de la planta del convertidor del panel fotovoltaico.

Gc_{pv} : Ganancia del controlador para convertidor del panel fotovoltaico.

Gp_{bat} : Ganancia de la planta para el convertidor del banco de baterías.

Gc_{bat} : Ganancia del controlador para el convertidor del banco de baterías.

Gp_{inv_i} : Ganancia de la planta del inversor del lazo interno (corriente).

Gc_{inv_i} : Ganancia del controlador del inversor del lazo interno (corriente).

Gp_{inv_v} : Ganancia de la planta del inversor del lazo externo (voltaje).

Gc_{inv_v} : Ganancia del controlador del inversor del lazo externo (voltaje).

PV: panel fotovoltaico

MPPT: Seguidor del punto máximo de potencia.

VDC: Voltaje en el capacitor DC-Link.

DC-Link: enlace DC de los tres convertidores.

PLL: Lazo de seguimiento de fase.- Se trata de un sistema realimentado, en el que las magnitudes realimentadas son la frecuencia y la fase.

plot: gráfico.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1:	Variación de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos en función de los años.....	3
Figura 1.2:	Costo de manufactura de un PV por Mega Vatio por año.....	4
Figura 1.3:	Bosquejo general de la propuesta de proyecto.....	5
Figura 2.1:	Bloque de paneles fotovoltaicos	6
Figura 2.2:	Estructura interna de una celda fotovoltaica.....	8
Figura 2.3:	Esquema de un convertidor básico y ciclo de trabajo.....	11
Figura 2.4:	Simulación de la comparación Moduladora Vs Portadora en Simulink.....	12
Figura 2.5:	Esquema del convertidor BOOST DC-DC no aislado usando Simulink.....	13
Figura 2.6:	Simulación de los voltajes de entrada y salida del convertidor BOOST no aislado en Simulink.....	15
Figura 2.7:	Circuito del convertidor BOOST DC-DC aislado en Simulink.....	16
Figura 2.8:	Simulación de corriente y voltaje en la batería y en la carga usando Simulink.....	17
Figura 2.9:	Rizado de la corriente en la batería usando Simulink.....	18
Figura 2.10:	Simulación del rizado de la corriente en la carga usando Simulink.....	18
Figura 2.11:	Circuito del Inversor Trifásico realizado en Simulink.....	20
Figura 2.12:	Simulación de los Voltajes de Línea a Línea del Inversor realizados en Simulink.....	21
Figura 2.13:	Esquema general del Inversor realizado en Simulink.....	22
Figura 2.14:	Generación de pulsos para los tiristores del inversor. Se tiene 3 moduladoras sinusoidales que se comparan con una portadora triangular. Hecho en Simulink.....	23
Figura 2.15:	Simulación de la comparación de la moduladora $m_a(T)$ con la portadora, realizado en Simulink.....	24
Figura 2.16:	Obtención de la matriz $abc-dq0$	26
Figura 2.17:	Descomposición del Vector S en plano 3D.....	27

Figura 2.18: Nuevas componentes del Vector S	27
Figura 2.19: Componentes del Vector $S'(T)$ Y $H(T)$ en el plano Π	28
Figura 2.20: Voltajes de la red.....	28
Figura 2.21: Matriz de Transformación $[T]_{abc-\alpha\beta\gamma}$	29
Figura 2.22: Matriz de Transformación $[T]_{abc-\alpha\beta\gamma}$ sin eje 0.....	29
Figura 2.23: Representación de la trayectoria del vector $V(T)$ sobre el plano Π	30
Figura 2.24: Componentes del Vector $V(T)$ en el plano $dq0$	30
Figura 2.25: Matriz de Transformación $[T]_{abc-dq0}$	31
Figura 2.26: Curva Voltaje Vs Corriente (MPPT).....	32
Figura 3.1: Convertidor del Panel Fotovoltaico realizado en Simulink.....	40
Figura 3.2: Circuito del Transformador Ideal hecho en Simulink.....	41
Figura 3.3: Simulación del Voltaje en el DC-Link, usando Simulink.....	41
Figura 3.4: Simulación del Voltaje Máximo que soporta cada tiristor, usando Simulink.....	42
Figura 3.5: Simulación de la corriente de rizado y voltaje en el inductor realizado en Simulink.....	43
Figura 3.6: Simulación del voltaje de rizado y corriente en el capacitor DC-Link realizado en Simulink.....	44
Figura 3.7: Simulación del Voltaje en el panel fotovoltaico realizado en Simulink.....	45
Figura 3.8: Voltaje de rizado y corriente en el capacitor realizado en Simulink.....	46
Figura 3.9: Esquema total del convertidor y controlador del panel fotovoltaico realizado en Simulink.....	47
Figura 3.10: Bloque controlador del Panel Fotovoltaico realizado en Simulink.....	48
Figura 3.11: Respuesta de Magnitud y Margen de fase del controlador del PV realizado con SisoTool.....	50
Figura 3.12: Trayectoria de la raíces del controlador del PV realizado en SisoTool.....	52
Figura 3.13: Respuesta del controlador del PV a una entrada paso hecho en SisoTool.....	53

Figura 3.14: Comparación entre $V_i(V)$ y $V_{i_Ref}(V)$ realizado en Simulink	54
Figura 3.15: Error en la Señal de voltaje $V_i(V)$ y variación del índice de modulación hecho en Simulink.....	54
Figura 3.16: Circuito electrónico del convertidor BOOST del banco de baterías realizado en Simulink.....	56
Figura 3.17: Simulación del voltaje en el DC-Link hecho en Simulink.....	57
Figura 3.18: Simulación de la corriente que soporta cada tiristor. Realizado en Simulink.....	58
Figura 3.19: Simulación de voltaje y rizado de corriente en el inductor hecho en Simulink	59
Figura 3.20: Simulación de corriente y rizado de voltaje en el capacitor DC-Link realizado en Simulink	60
Figura 3.21: Esquema total del convertidor y controlador del banco de baterías realizado en Simulink.....	61
Figura 3.22: Esquema del controlador del banco de baterías.....	62
Figura 3.23: Respuesta de Magnitud y Margen de fase del controlador de banco de baterías realizados en con SisoTool.....	64
Figura 3.24: Trayectoria de las raíces del controlador de baterías.....	65
Figura 3.25: Respuesta del controlador de baterías ante una entrada paso hecho en SisoTool.....	66
Figura 3.26: Comparación entre $I_L(T)$ e I_Ref realizado en Simulink.....	67
Figura 3.27: Simulación del error de corriente en $I_L(T)$ y variación de hecho en Simulink.....	68
Figura 3.28: Circuitería del inversor trifásico realizado en Simulink.....	69
Figura 3.29: Simulación de los pulsos a los tiristores a partir de las ondas moduladoras y portadora realizados en Simulink.....	71
Figura 3.30: Simulación de la corriente que soporta cada tiristor realizado en Simulink.....	72
Figura 3.31: Simulación de los Voltajes de Línea-Línea de salida del Inversor, Hecho en Simulink.....	73
Figura 3.32: Simulación de los voltajes de Línea-Neutro de salida del inversor realizado en Simulink.....	73
Figura 3.33: Simulación del voltaje en el DC-Link realizado en Simulink	74

Figura 3.34: Circuito del inversor utilizado para diseñar el controlador interno realizado en Simulink.....	75
Figura 3.35: Controlador de corriente para el Inversor realizado en Simulink.....	76
Figura 3.36: Diseño del controlador de corriente para el inversor realizado en Simulink.....	77
Figura 3.37: Simulación de V_{grid} , V_{con} , I_{grid} , I_{dq} del inversor trifásico realizado en Simulink.....	79
Figura 3.38: Esquema final del Inversor realizado en Simulink.....	80
Figura 3.39: Diseño del controlador de voltaje del inversor realizado en Simulink.....	81
Figura 3.40: Simulación de V_{grid} , V_{conv} , I_{grid} , I_{dq} , VDC del Inversor realizado en Simulink.....	83
Figura 4.1: Unión de los tres convertidores realizado en Simulink.....	85
Figura 4.2: Simulación de V_{grid} , V_{conv} , I_{grid} , I_{dq} , VDC aplicando perturbaciones en la corriente que inyecta el panel y cambio de: referencia en el voltaje V_i . Hecho en Simulink.....	86
Figura 4.3: Simulación de V_{grid} , V_{conv} , I_{grid} , I_{dq} , VDC aplicando perturbaciones en la corriente que inyecta el panel y cambio de referencia en V_i y cambio de referencia en la corriente de la batería. Hecho en Simulink.....	88
Figura 4.4: Esquema del sistema usando un controlador principal.....	89

INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, el mundo ha requerido de energía eléctrica y el ser humano ha propuesto la utilización de diversos tipos de energía no renovables. Cabe destacar que la utilización de estos recursos energéticos ha ocasionado un gran impacto positivo y negativo a nuestra sociedad. La utilización de fósiles transformados hoy en día a petróleo, la energía eléctrica proveniente de inmensas plantas, la energía proveniente de reacciones químicas, etc., han contribuido al avance de generación de energía para nuestra comunidad. Como consecuencia a esta actividad mundial, el exceso de la utilización de estas fuentes de energía ha ocasionado grandes y fuertes daños a nuestro planeta tierra y esto se ve reflejado en los diversos problemas climáticos que ha sufrido.

Sin embargo, el ser humano ha olvidado un tipo de energía natural que el universo ofrece y lo más importante es que al utilizarla como fuente de energía, reduciría los impactos medioambientales. Hoy en día, existen los paneles fotovoltaicos que se encargan de receptar la luz solar, la cual puede ser usada como entrada a un circuito de potencia, el cual se encargará de producir la energía necesaria para alimentar una red. La luz solar es un tipo de energía renovable que al pasar por un panel fotovoltaico, este transforma esa cantidad de luz en energía eléctrica. El convertidor regula el voltaje del banco de paneles dependiendo del MPPT. Y como último paso, el inversor es utilizado para transformar este voltaje DC a una onda sinusoidal a una cierta frecuencia, para conectarse a una red y entregar potencia a la misma dependiendo de los acuerdos económicos a los cuales se haya llegado con la empresa eléctrica.

CAPÍTULO 1

Energía Renovable y Motivación

Este capítulo fue creado con el propósito de introducir al lector a los conceptos básicos de energía renovable, específicamente la energía solar. Así como también la motivación para realizar este trabajo y el alcance del proyecto.

1.1 Energía Renovable

Son fuentes de abastecimiento que preservan el medio ambiente. Lo que no significa que no ocasionen efectos negativos sobre el entorno, pero éstos son menores si los comparamos con los impactos ambientales de las energías convencionales (combustibles fósiles: petróleo, gas y carbón; energía nuclear, etc.) y además son casi siempre reversibles. Según un estudio realizado por Mónica Ortega Licenciada en Ciencias Ambientales sobre los "Impactos Ambientales de la Producción de Electricidad" el impacto ambiental en la generación de electricidad de las energías convencionales es 31 veces superior al de las energías renovables.

Cabe mencionar que lo que produce impacto ambiental en la generación de energía renovable no es en si el tipo de energía sino los componentes necesarios para su control y almacenamiento como por ejemplo baterías, dispositivos electrónicos, etc.

Como ventajas medioambientales importantes podemos destacar la no emisión de gases contaminantes como los resultantes de la combustión de combustibles fósiles, responsables del calentamiento global del planeta (CO_2) y de la lluvia ácida (SO_2 y NO_2) y la no generación de residuos peligrosos de difícil tratamiento y que suponen durante generaciones una amenaza para el medio ambiente como los residuos radiactivos relacionados con el uso de la energía nuclear.

Otras ventajas a señalar de las energías renovables son su contribución al equilibrio territorial, ya que pueden instalarse en zonas rurales y aisladas, y a la disminución de la dependencia de suministros externos, ya que las energías renovables son autóctonas, mientras que los combustibles fósiles sólo se encuentran en un número limitado de países.

Existen varios tipos de energías renovables como son: biomasa, eólica, hidráulica, geotérmica y la solar que es el tipo de fuente de energía que se trata en esta propuesta.

1.2.1 Energía Solar

La energía solar se fundamenta en el aprovechamiento de la radiación solar para la obtención de energía que podemos aprovechar directamente en forma de calor o bien podemos convertir en electricidad.

La energía solar fotovoltaica permite transformar en electricidad la radiación solar a través de los paneles fotovoltaicos. La electricidad producida puede usarse de manera directa (por ejemplo para sacar agua de un pozo o para regar mediante un motor eléctrico), o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. Incluso es posible inyectar la electricidad sobrante a la red general, obteniendo un importante beneficio.

La energía solar fotovoltaica tiene numerosas aplicaciones, por ejemplo funcionamiento de aparatos de consumo pequeño, calculadoras, relojes, electrificación de viviendas o núcleos de población aislados, señalizaciones terrestres y marítimas, comunicaciones o iluminación pública.

La conversión de la energía solar a eléctrica conlleva a la utilización de un mecanismo llamado panel fotovoltaico.

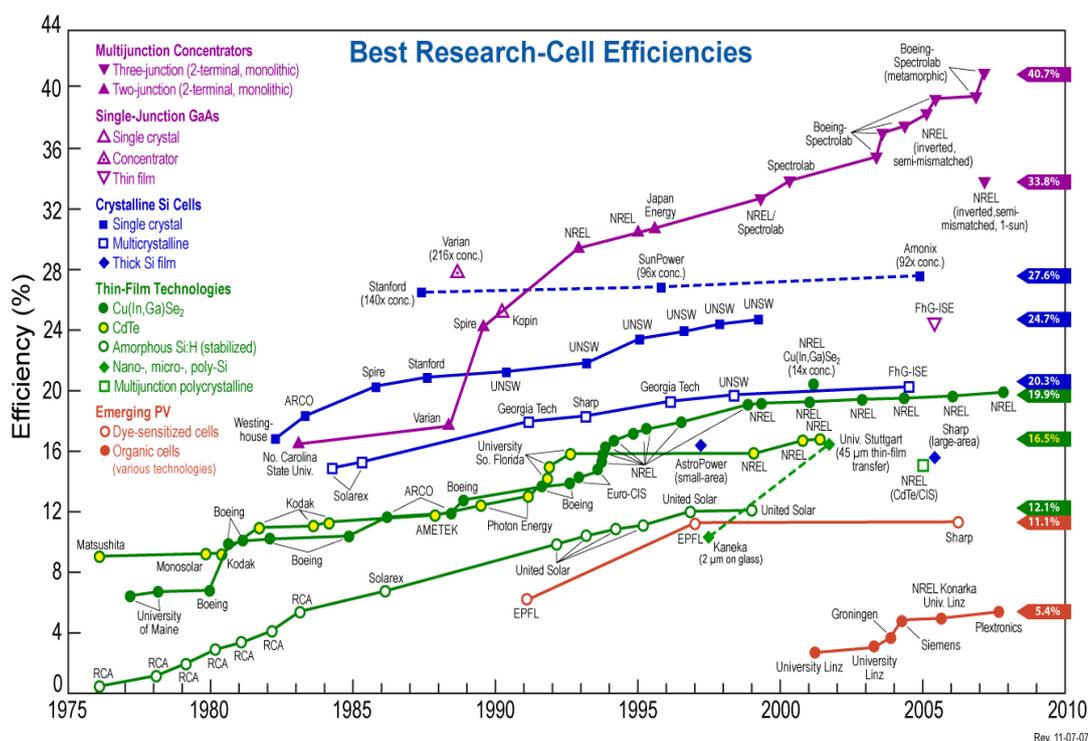


Figura 1.1: Variación de la eficiencia de los paneles fotovoltaicos en función de los años. Fuente: EEE98-RES

La Figura 1.1 representa la eficiencia de los paneles fotovoltaicos a través del tiempo. Las diferentes curvas que se muestran en la imagen, son de distintos tipos de paneles solares, que varían en el nivel de dopaje del panel.

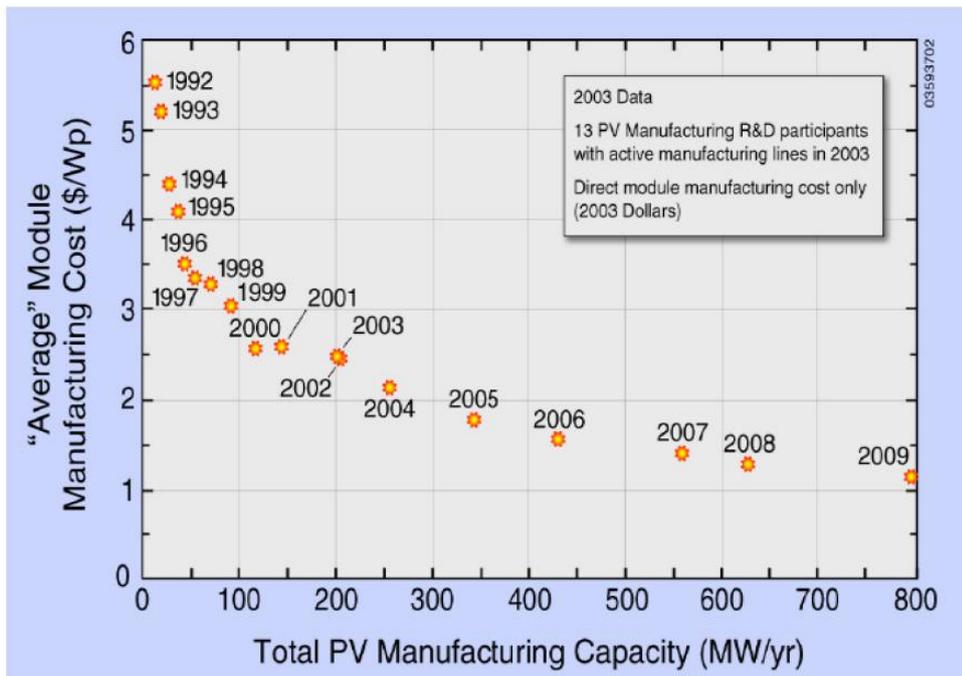


Figura 1.2: Costo de manufactura de un PV por mega vatio por año. Fuente: EEE98-RES

En la Figura 1.2 se observa la cantidad de dinero invertido para la construcción de paneles fotovoltaicos con relación a la potencia entregada por año. Cabe resaltar que esta curva ha venido decreciendo desde los últimos 17 años en forma de hipérbola equilátera.

1.3 Propuesta de proyecto

Con la breve descripción sobre la energía solar y sus aplicaciones a la ingeniería, el grupo de trabajo planteó la siguiente propuesta, basándose en las ventajas ambientales que ofrece este tipo de energía renovable.

La propuesta del proyecto comenzó con una preocupación de la contaminación que sufre el medio ambiente y porque las fuentes de energía no renovables se están extinguiendo. Es por esta razón que se seleccionó la energía solar como suministro de potencia al convertidor estático.

Para el proyecto propuesto se utilizarán los conceptos previamente analizados en este capítulo para el diseño de un sistema de generación de energía, el cual a breves rasgos consta de las siguientes partes: paneles fotovoltaicos, los cuáles transforman la energía solar a energía eléctrica. La salida del sistema de paneles se conecta a un convertidor BOOST que eleva, regula y filtra el voltaje DC entregado por el arreglo de paneles de 200VDC A 520VDC aproximadamente, este convertidor utiliza un transformador de alta frecuencia con el objetivo de producir aislamiento. De la línea de 520VDC, se conecta un convertidor DC-DC BUCK para cargar baterías, y también se conecta un inversor trifásico el cuál proporcionará energía a la red trifásica conectada.

En la Figura 1.3 se muestra un bosquejo general de la propuesta de proyecto.

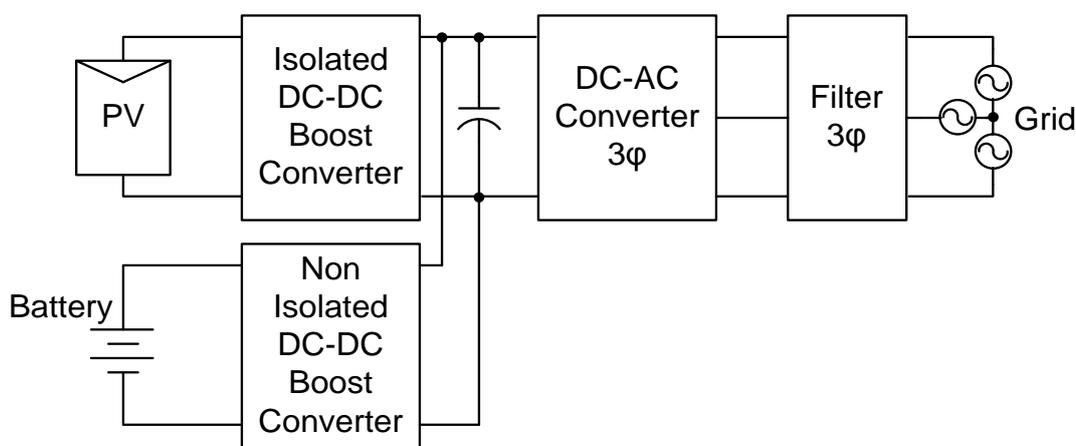


Figura 1.3: Bosquejo general de la propuesta de proyecto

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se introduce un marco teórico sobre paneles fotovoltaicos, baterías, convertidores. Además se mencionarán los programas que se utilizarán para el diseño de los convertidores (SimPowerSystem, SisoTool, MatLab, Simulink).

2.1 Panel Fotovoltaico



Figura 2.1: Bloque de paneles fotovoltaicos.

Fuente: <http://taringa.net/posts/info/5325504/Paneles-Solares.html>

Los paneles fotovoltaicos representan un elemento clave para la utilización de la energía solar, ya que debido a la inserción de este mecanismo, podemos transformar la energía solar en energía eléctrica y así poder manipularla a conveniencia.

2.1.1 Principio de Funcionamiento

El funcionamiento de los paneles se basa en el efecto fotovoltaico. Este efecto se produce cuando sobre materiales semiconductores convenientemente tratados incide la radiación solar produciéndose electricidad.

Los paneles solares están formados por una serie de células fotovoltaicas, que debido a su distribución dentro del panel, son capaces de generar corriente eléctrica con ayuda de una circuitería externa.

Cuando el conjunto queda expuesto a la radiación solar, los fotones contenidos en la luz transmiten su energía a los electrones de los materiales semiconductores que pueden entonces romper la barrera de potencial de la unión P-N y salir del semiconductor a través de un circuito exterior, produciéndose así corriente eléctrica.

El modulo más pequeño de material semiconductor con unión P-N y por lo tanto con capacidad de producir electricidad, es denominado célula fotovoltaica. Estas células fotovoltaicas se combinan de determinadas maneras para lograr la potencia y el voltaje deseados. Este conjunto de células sobre el soporte adecuado y con los recubrimientos que le protejan convenientemente de agentes atmosféricos es lo que se denomina panel fotovoltaico.

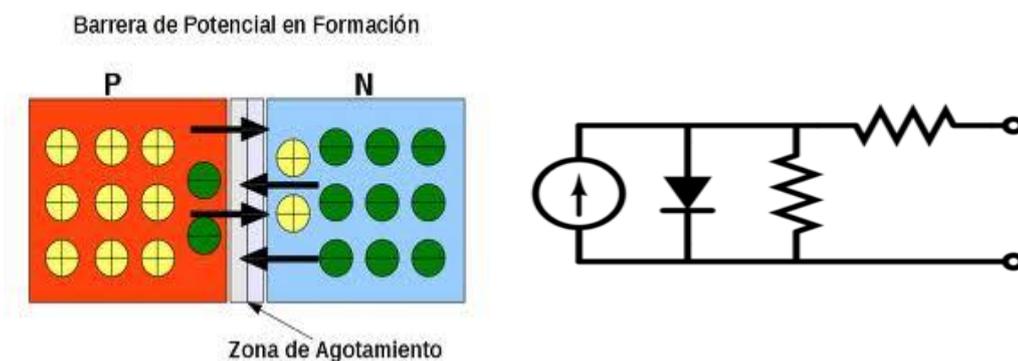


Figura 2.2: Estructura interna de una celda fotovoltaica

2.1.2 Lista de Aplicaciones de los Paneles Fotovoltaicos

- Estaciones repetidoras de microondas y de radio.
- Electrificación de pueblos en áreas remotas (Electrificación rural).
- Instalaciones médicas en áreas rurales.
- Corriente eléctrica para casas de campo.
- Sistemas de comunicaciones de emergencia.
- Sistemas de vigilancia de datos ambientales y de calidad del agua.
- Faros, boyas y balizas de navegación marítima.
- Bombeo para sistemas de riego, agua potable en áreas rurales y abrevaderos para el ganado.
- Balizamiento para protección aeronáutica.
- Sistemas de protección catódica.
- Sistemas de desalinización.
- Vehículos de recreo.
- Señalización ferroviaria.
- Sistemas para cargar los acumuladores de barcos.
- Fuente de energía para naves espaciales.
- Postes SOS (Teléfonos de emergencia de carretera).

2.2 Baterías

Los paneles fotovoltaicos son utilizados para recibir la luz solar pero ¿qué sucede cuando no hay presencia de luz solar? ¿Qué podemos hacer para seguir entregando energía sin usar la que normalmente usamos y sin usar el panel fotovoltaico? Las baterías son una opción de almacenamiento de energía durante las noches.

Las baterías son dispositivos que almacenan energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo logra repetirse por un determinado número de veces. Se lo considera como un generador eléctrico secundario; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante un proceso de carga.

2.2.1 Principio de Funcionamiento

El funcionamiento de un acumulador o batería está basado esencialmente en un proceso reversible llamado reducción-oxidación (también conocida como redox), un proceso en el cual uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro se reduce (gana electrones); es decir, un proceso cuyos componentes no resulten consumidos ni se pierdan, sino que meramente cambian su estado de oxidación, que a su vez puedan retornar al estado primero en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son, en el caso de los acumuladores, el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente, igualmente externa, durante la carga.

2.2.2 Tipos de baterías

- Acumulador de plomo (Pb).
- Batería alcalina.
- Baterías alcalinas de manganeso.
- Baterías de níquel y cadmio.
- Baterías de níquel-hidruro metálico.
- Baterías de iones de litio.
- Baterías de polímero de litio.
- Pilas de combustible
- Condensador de alta capacidad.

2.3 Convertidores

En el proyecto se utilizan dos tipos de convertidores DC-DC, los cuales pueden ser: reductor (BUCK) y elevador (BOOST). También existe el convertidor DC-AC o también llamado inversor. Convertidor AC-DC o también llamado rectificador y finalmente convertidor AC-AC que puede ser elevador o reductor, este puede tener distintos nombres dependiendo del principio electrónico que se esté utilizando para producir este efecto. Para efectos de análisis de este proyecto, se enfocará en el convertidor DC-DC y en el convertidor DC-AC, ya que son los que se aplicarán.

Las simulaciones que aparecen en el capítulo 2, fueron realizadas con un DC-Link de 400VDC, este valor es un valor aproximado, en el capítulo 3 se realizara un análisis para determinar el valor exacto de dicho voltaje.

2.3.1 Ciclo de Trabajo

El ciclo de trabajo, es una medida de la cantidad de tiempo, en que un dispositivo se energiza, o se enciende, expresada como un porcentaje del ciclo completo de encendido/apagado, de tal dispositivo.

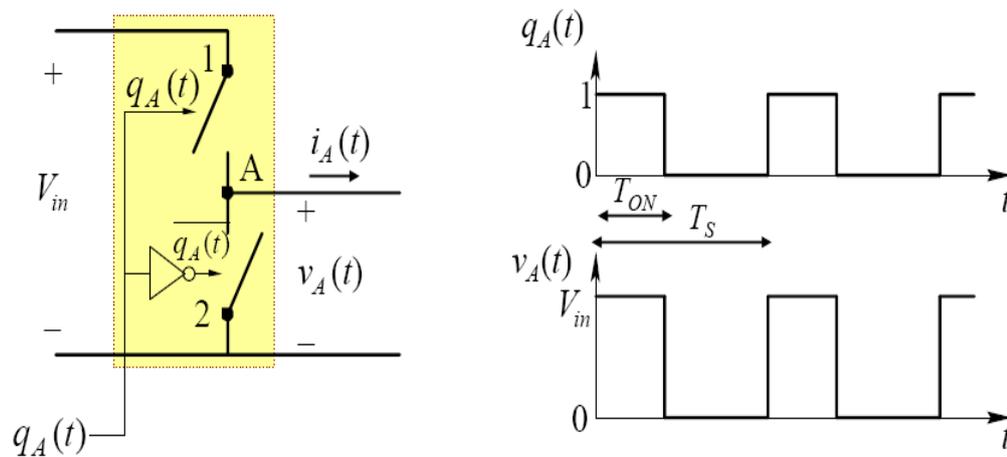


Figura 2.3: Esquema de un convertidor básico y ciclo de trabajo

La señal $q_A(t)$ es enviada a los tiristores y es la que indica el estado de cada uno. El tiristor 1 se enciende cuando $q_A(t)=1$ y el tiristor 2 se enciende cuando $q_A(t)=0$, caso contrario, se apagan. La señal $v_A(t)$ indica la salida del inversor que es la misma, en periodo y tiempo de encendido (T_{ON}), que $q_A(t)$, pero varía en amplitud. La amplitud de $q_A(t)$ varía entre 0 y 1 y la amplitud de la señal $v_A(t)$ varía entre 0 y el voltaje de entrada al convertidor (V_{IN}).

V_{in} : Voltaje de entrada.

$v_A(t)$: Voltaje en la salida.

$q_A(t)$: Voltaje de 0 o 1 aplicado a los interruptores para encenderlos o apagarlos.

$i_A(t)$: Corriente de salida.

T_{ON} : Tiempo de encendido del interruptor.

T_s : Tiempo de encendido más tiempo de apagado. Un ciclo.

$d = \frac{T_{ON}}{T_s}$: Ciclo de trabajo del switch.

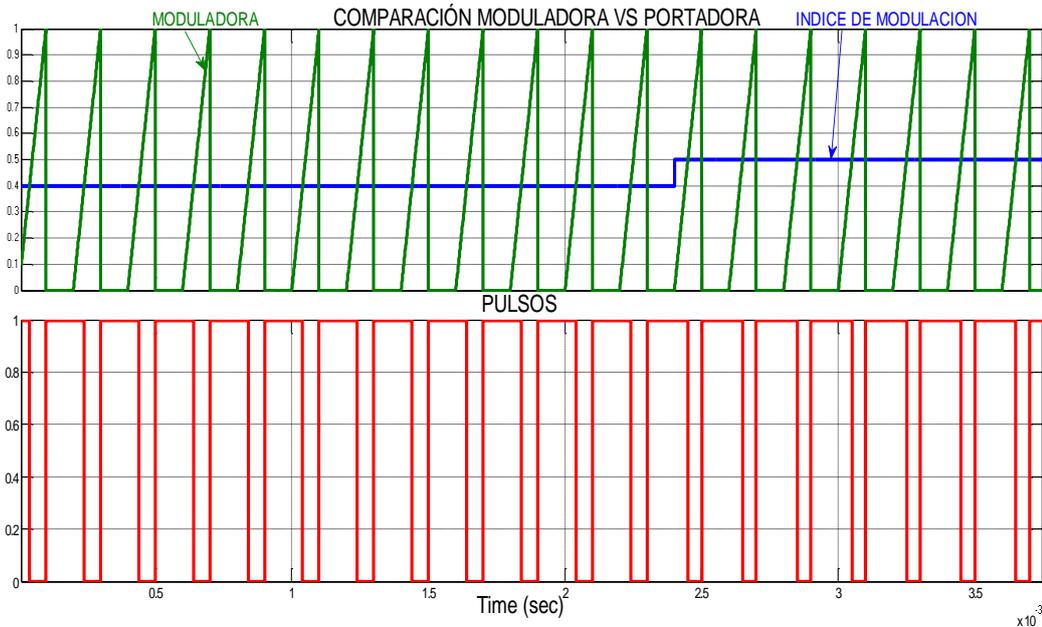


Figura 2.4: Simulación de la comparación Moduladora Vs Portadora en Simulink

En la Figura 2.4, se comparan dos señales para generar los pulsos que van a los tiristores. Las dos primeras señales corresponden a la señal moduladora (índice de modulación) y la segunda señal corresponde a la portadora (onda triangular). Como resultado obtenemos la señal cuadrada que es la que activa los tiristores.

2.3.2 Convertidor BOOST DC-DC no aislado

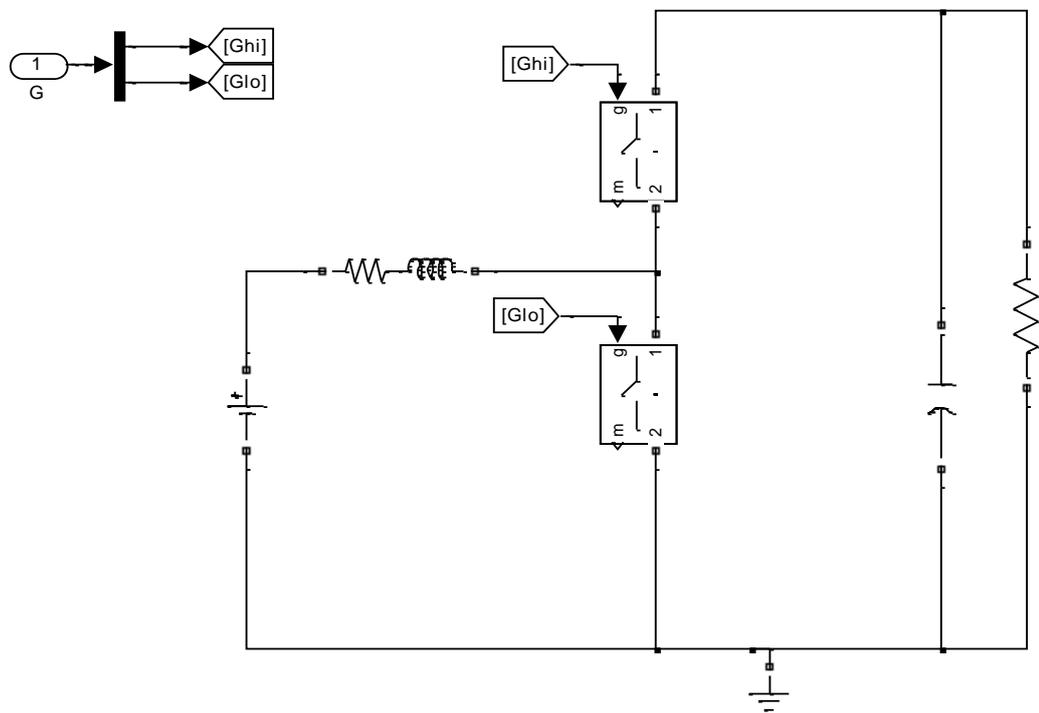


Figura 2.5: Esquema del convertidor BOOST DC-DC no aislado usando Simulink

La Figura 2.5 representa un convertidor DC-DC, este convertidor puede usarse como BOOST (elevador de voltaje) o como BUCK (reductor de voltaje) tan solo con variar el índice de modulación. El convertidor funciona de la siguiente manera:

En T_{ON} se cierra el switch de abajo y se abre el switch de arriba, entonces el inductor está siendo cargado en ese tiempo. En T_{OFF} se cierra el switch de arriba y se abre el switch de abajo y toda la energía que almacena el inductor en T_{ON} la libera hacia el capacitor durante la etapa T_{OFF} .

La ecuación para determinar la relación entre V_i y V_o con el índice de modulación se realiza de la siguiente forma:

Inicialmente determinamos las ecuaciones de voltaje según los tiempos de encendido y apagado de los tiristores.

Q1: tiristor superior

Q2: tiristor inferior

$T = T_{ON} + T_{OFF}$: periodo

$T_{ON} = dT$: Tiempo que está encendido Q1.

$T_{OFF} = (1-d) T$: Tiempo que pasan encendidos Q2.

d : índice de modulación. Este valor varía entre 0 y 1.

Para $T_{ON} = dT$

$$V_i = VL$$

$$V_i = L \frac{di}{dt}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_i}{L}$$

$$\Delta i_{LON} = \int_0^{dT} \frac{V_i}{L} dt = \frac{V_i * d * T}{L}$$

Para $T_{OFF} = (1-d) T$

El tiristor Q1 se enciende, mientras que Q2 se apaga. Entonces tenemos lo siguiente:

$$V_i - VL + V_p = 0$$

$$VL = V_i - V_p$$

$$L \frac{di}{dt} = V_i - V_p$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_i - V_p}{L}$$

$$\Delta i_{LOFF} = \int_0^{(1-d)T} \frac{V_i - V_p}{L} dt$$

$$\Delta i_{LOFF} = \frac{V_i - V_p}{L} (1-d)T$$

Como la energía promedio almacenada en un inductor en un periodo es igual a cero, tenemos lo siguiente:

$$\Delta i_{LON} + \Delta i_{LOFF} = 0$$

$$\frac{V_i}{L}dT + \frac{V_i - V_p}{L}(1-d)T = 0$$

$$V_i d + (V_i - V_p)(1-d) = 0$$

$$V_i d + V_i - V_i d - V_p + V_p d = 0$$

$$V_i - V_p + V_p d = 0$$

$$V_p(d-1) = -V_i$$

$$\frac{V_p}{V_i} = \frac{1}{1-d}$$

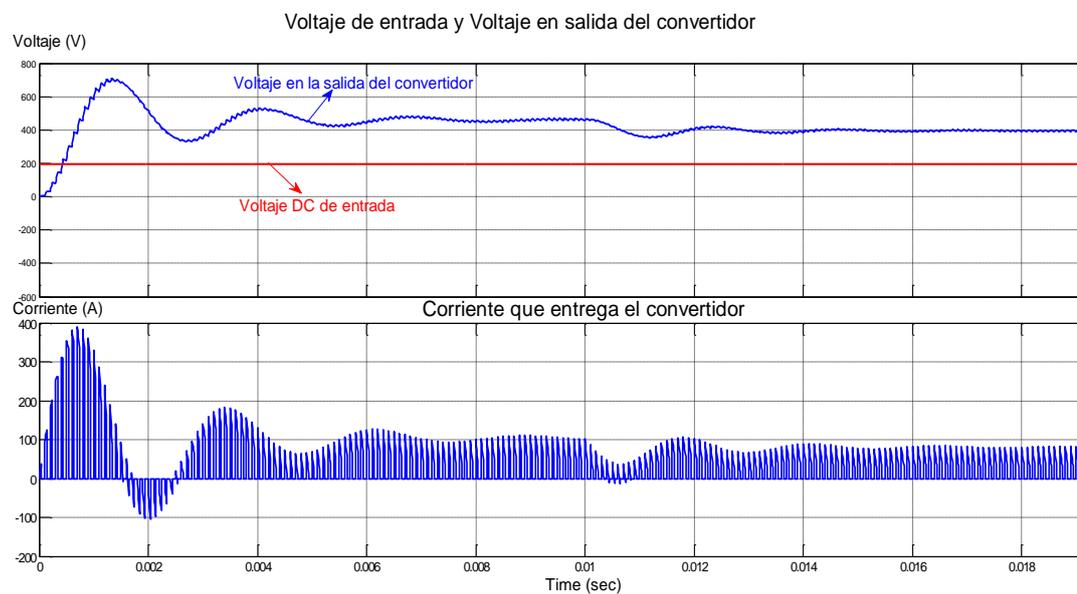


Figura 2.6: Simulación de los voltajes de entrada y salida del convertidor BOOST no aislado en Simulink

En la Figura 2.6, en el primer plot se observa el voltaje DC proveniente de una batería y el voltaje a la salida del convertidor el cual se estabiliza en 400VDC después de 12ms. Cabe recalcar que más adelante se definirá matemáticamente el voltaje exacto que debe tener el DC-Link. Debido a que el voltaje de la salida es mayor que el de entrada, el convertidor está funcionando como BOOST.

2.3.3 Convertidor BOOST DC-DC aislado

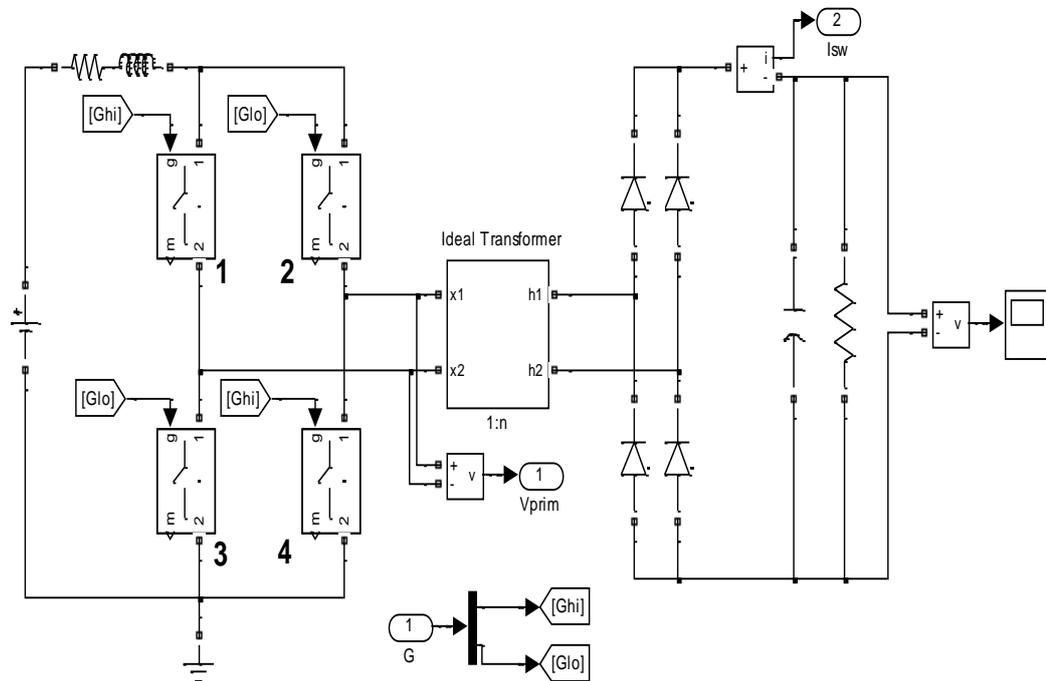


Figura 2.7: Circuito del convertidor BOOST DC-DC aislado en Simulink

La Figura 2.7 muestra el convertidor DC-DC BOOST aislado. La señal proveniente de la fuente de voltaje, que es una señal DC, es convertida en AC gracias al puente de cuatro tiristores ($Q1$, $Q2$, $Q3$ y $Q4$). La señal $q_A(t)$ es aplicada a todos los tiristores durante la primera parte del ciclo, mientras que la señal $q_A(t)$ negada es aplicada a los tiristores $Q1$ y $Q4$ en el resto del ciclo.

El segundo puente, que está conformado por cuatro diodos, convierte la señal AC que proviene del lado del secundario del transformador para conseguir una señal DC. El objetivo de colocar un transformador es para que sirva de aislamiento. La relación de vueltas es de 1:1. El flujo de potencia se realiza en un solo sentido. Para este convertidor la potencia va desde la fuente DC hacia la salida del convertidor, esto se debe a que

existe un puente rectificador de diodos en el lado del secundario del transformador.

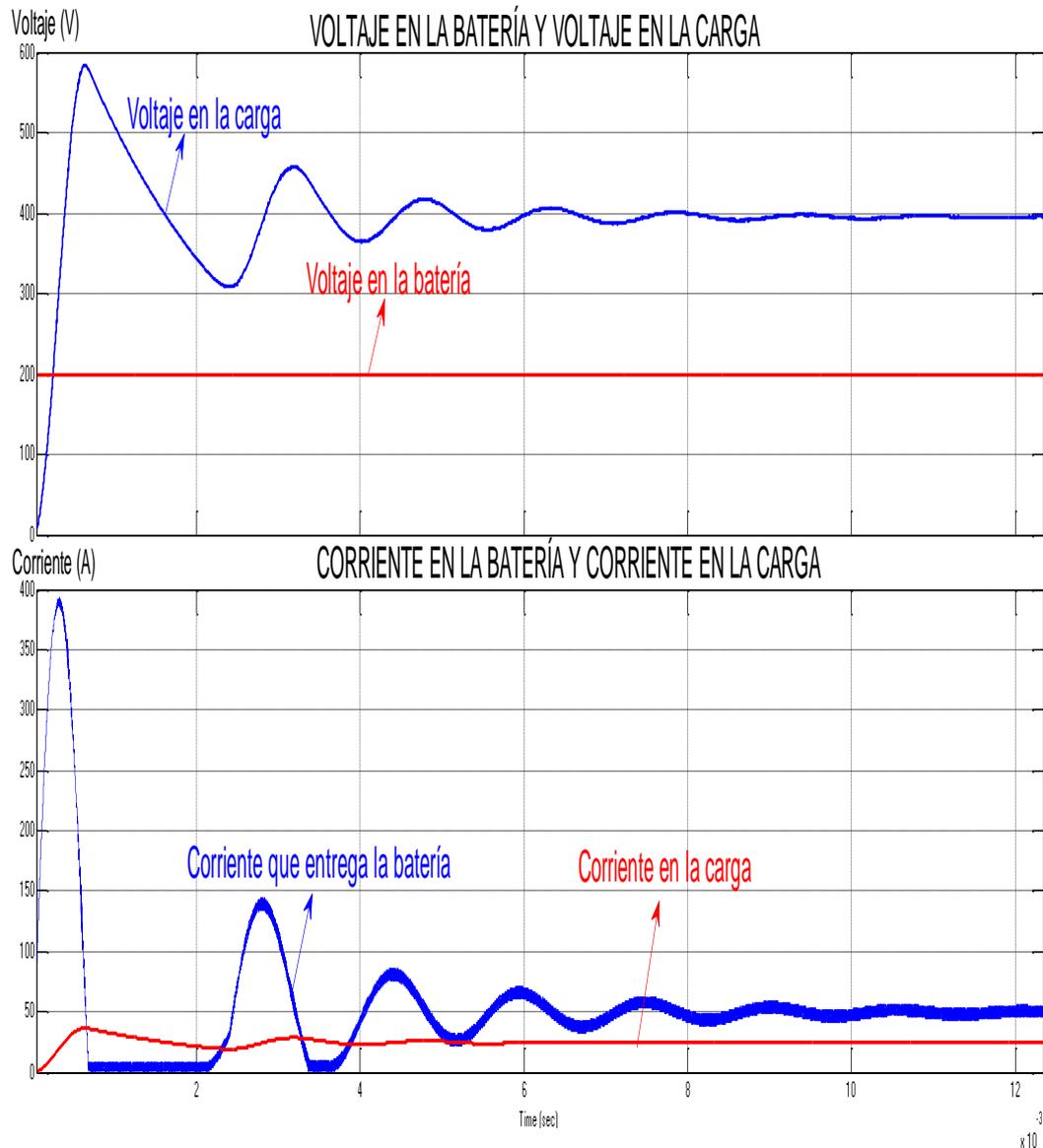


Figura 2.8: Simulación de corriente y voltaje en la batería y en la carga usando Simulink

En la Figura 2.8 se muestra el voltaje en la carga y la corriente en la carga se estabilizan después de 6ms. La corriente que entrega la batería se estabiliza después de 8ms. En el arranque, el voltaje en la carga se dispara hasta casi 600VDC, debido a esto, la corriente en la batería se dispara hasta un valor

aproximado de 400A, estos datos habrá que tomarlos en cuenta en el dimensionamiento.

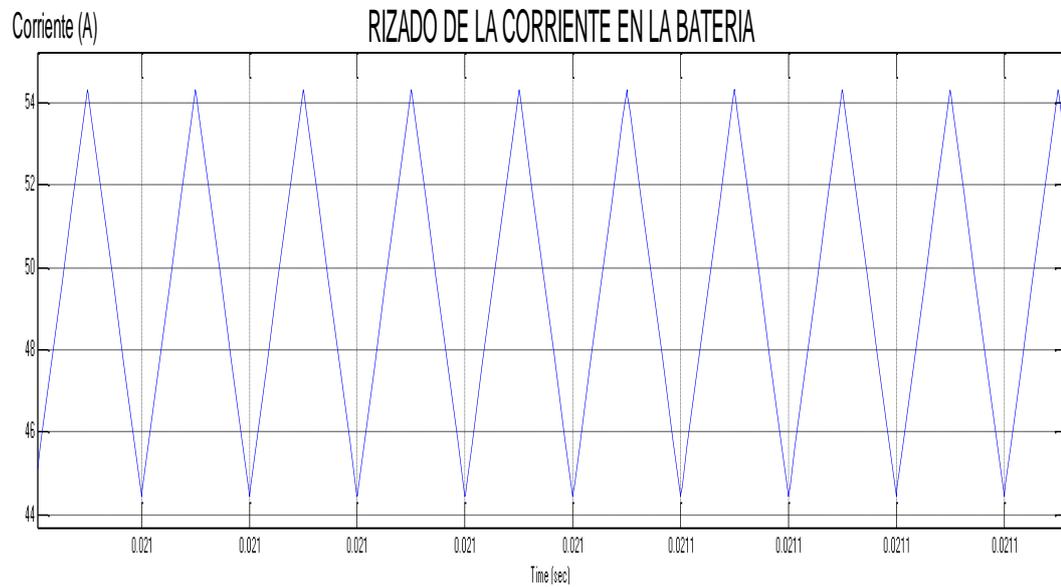


Figura 2.9: Rizado de la corriente en la batería usando Simulink

La Figura 2.9 muestra el rizado en la corriente que entrega la batería oscila entre 46A y 54A, esto marca una corriente diferencial de 8A. En porcentaje de rizado tenemos un 16%.

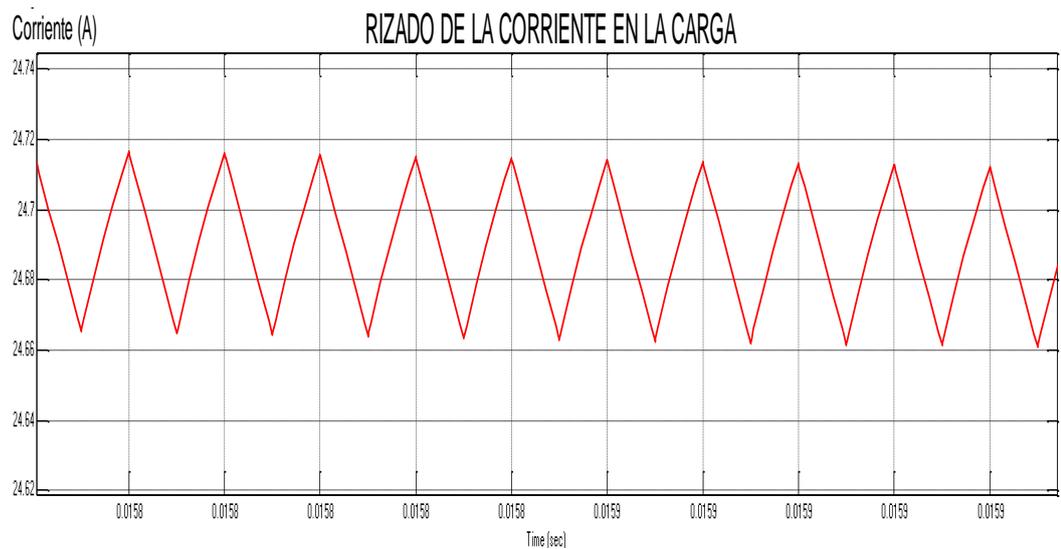


Figura 2.10: Simulación del rizado de la corriente en la carga usando Simulink

La Figura 2.10 muestra el rizado de la corriente de la carga. El valor de este rizado oscila entre 24.67A y 24.71A, esto marca un valor de corriente aproximado de 0.4A. El porcentaje de rizado por ende es de 1.6%, lo cual es menor a la especificación (3%).

Como estamos utilizando un transformador con objetivo de aislar eléctricamente las redes, y además el número de vueltas del primario no necesariamente debe ser igual al número de vueltas del secundario, la ecuación final quedaría expresada de la siguiente forma:

$\frac{V_p}{V_i} = \frac{n}{1-d}$; Donde n : relación de vueltas del primario al secundario.

2.3.4 Inversor Trifásico

Una vez que el voltaje del panel pase por el convertidor BOOST DC-DC, este voltaje pasa por un inversor trifásico el cual es conectado a la red. El inversor trifásico sensa la energía almacenada en el capacitor DC-Link, el cual es: $E_c = \frac{1}{2}CV^2$

donde:

V : voltaje del capacitor

C : valor de capacitancia en el DC-Link

Si la energía almacenada del capacitor DC-Link es mayor a la energía de referencia, este suministra energía a la red. En caso que sea menor, el inversor no suministra potencia a la red, ya que descargaría el capacitor y el convertidor del panel fotovoltaico se vería afectado debido a que no hay suficiente

voltaje para polarizar el banco de paneles. Por esta razón el capacitor no debe descargarse.

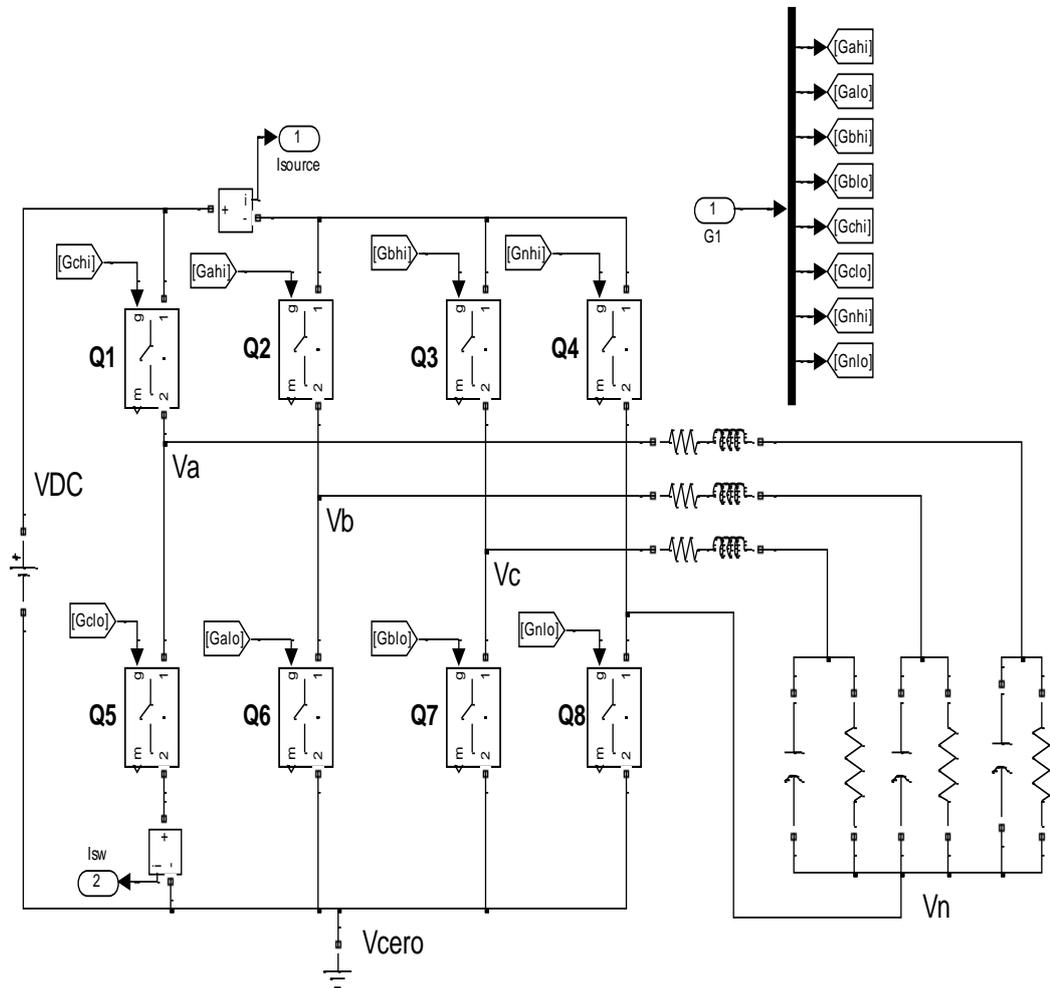


Figura 2.11: Circuito del Inversor Trifásico realizado en Simulink

La Figura 2.11 muestra el inversor trifásico utilizado en el proyecto. En este circuito se utiliza una cuarta ramal para realizar la conexión en el neutro. En este tipo de convertidor se varía la amplitud del índice de modulación trifásica para poder controlar el voltaje en el capacitor encargado del DC-Link. Cabe recalcar que el inversor puede suministrar potencia a la red o enviar potencia al banco de baterías.

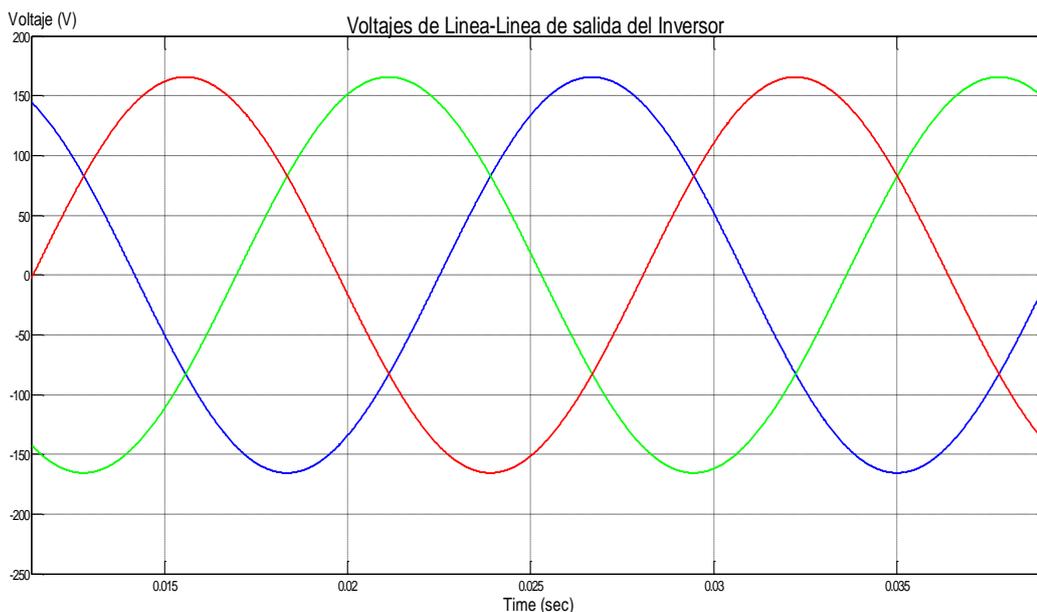


Figura 2.12: Simulación de los Voltajes de Línea a Línea del inversor realizados en Simulink

Una vez realizado el circuito electrónico del inversor trifásico, se procede a analizar las señales de salida del inversor que en un futuro se las utilizará para conectarlos a la red (Figura 2.12). Esta imagen muestra las señales a la salida del inversor. Las señales de voltaje generadas por el inversor y las señales provenientes de la red no están sincronizadas, ya que existe un desfase entre ellas dependiendo si se quiere suministrar o consumir potencia. Si la señal de voltaje de salida del inversor esta adelantada con respecto a la señal de voltaje de la red, el inversor suministra potencia a la red, caso contrario se consume potencia de la red.

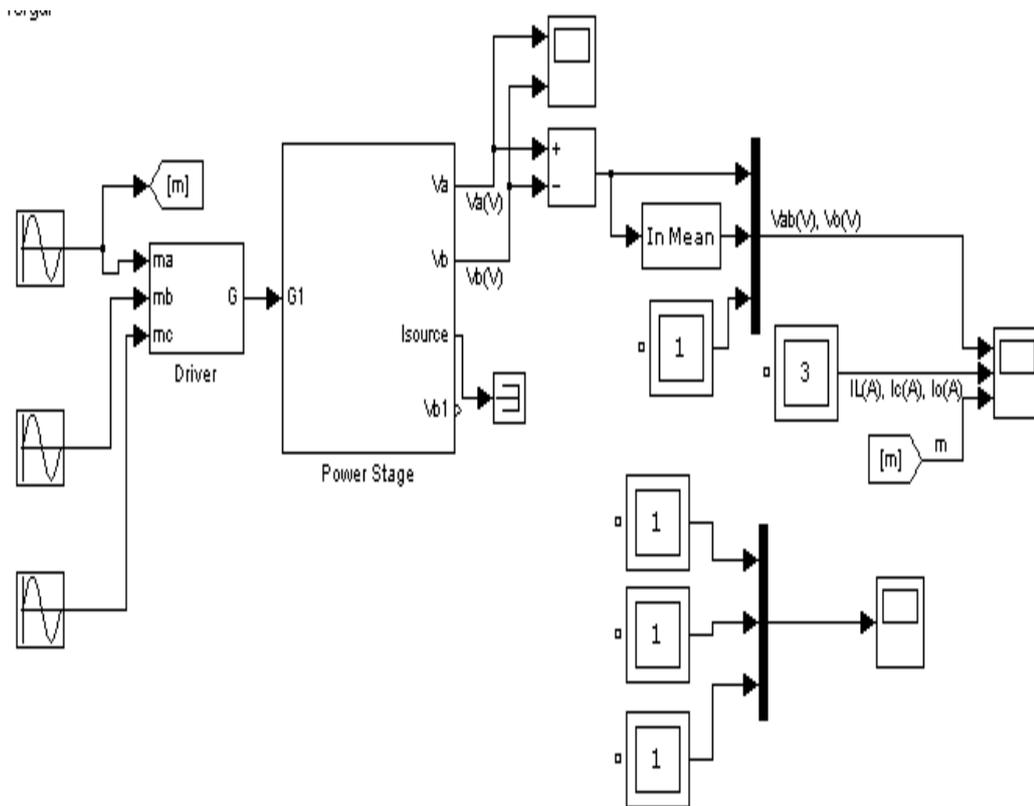


Figura 2.13: Esquema general del Inversor realizado en Simulink

Para poder generar estas señales, debemos considerar las señales iniciales y portadoras. Las ondas senos desde un inicio tienen que ser señales desfasadas entre sí 120° (Figura 2.13).

Una vez generadas estas señales, se deben generar los disparos que irán conectados a los IGBTs que producirán la conmutación.

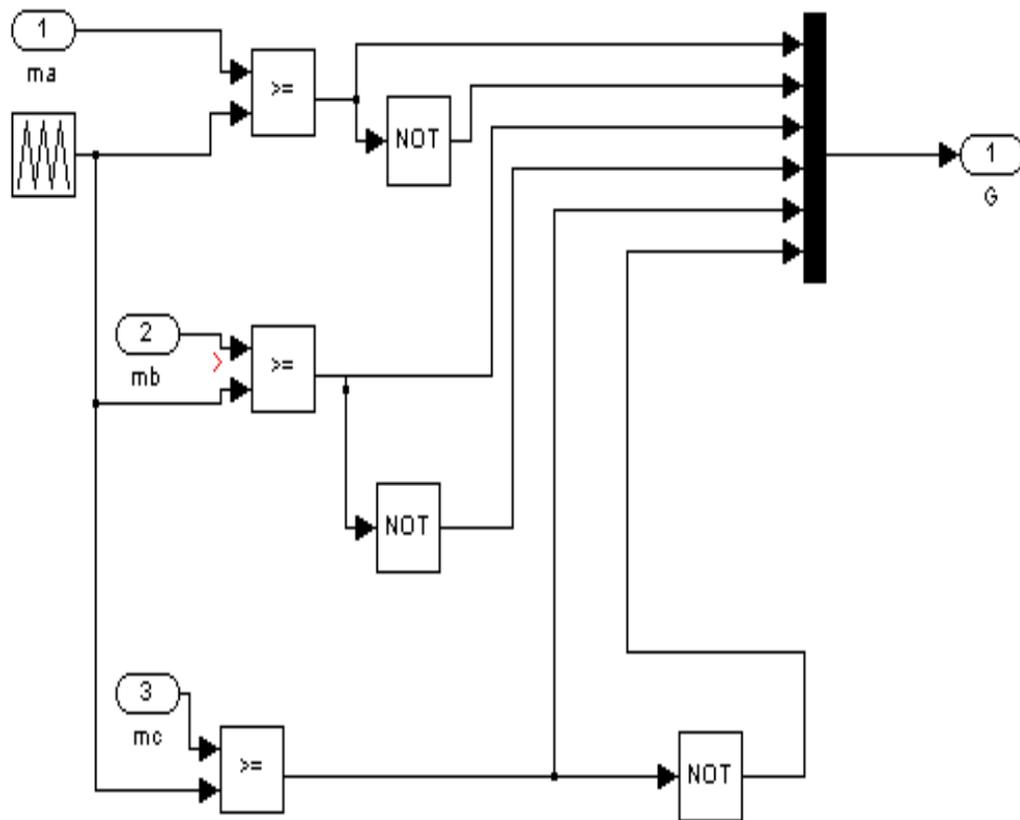


Figura 2.14: Generación de pulsos para los tiristores del inversor. Se tiene 3 moduladoras sinusoidales que se comparan con una portadora triangular. Hecho en Simulink

La entrada 1, 2 y 3 representan las señales sinusoidales que se utilizarán para poder realizar la comparación con la portadora que es una señal triangular. Se generan seis disparos los cuales llegan a los distintos IGBTs para poder crear las tres señales a una amplitud 20% más de la señal de entrada DC al inversor, es decir la señal proveniente del convertidor BOOST (Figura 2.14).

2.3.4.1 Generación de los pulsos de los tiristores

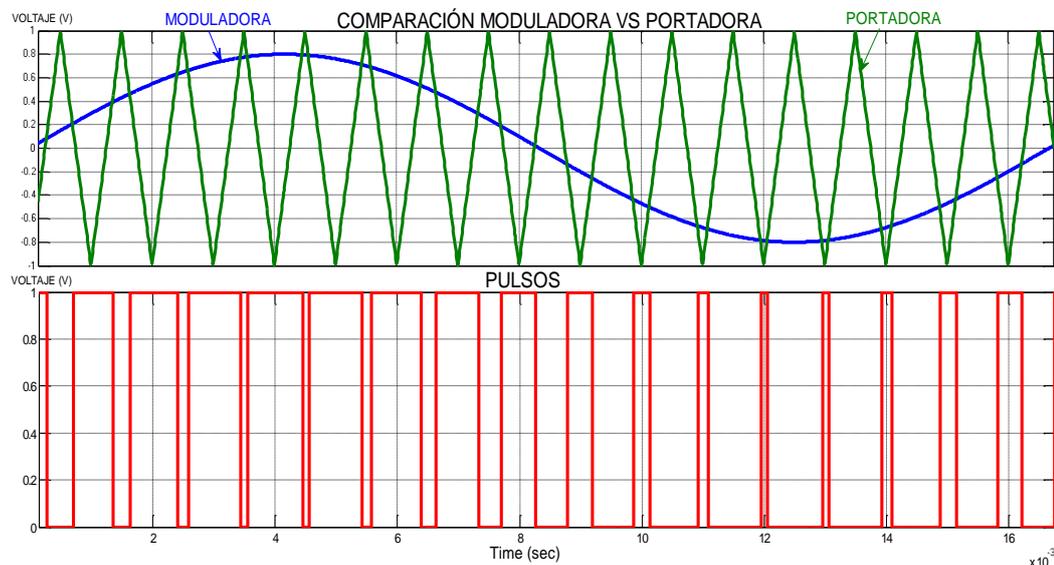


Figura 2.15: Simulación de la comparación de la moduladora $m_A(t)$ con la portadora, realizado en Simulink

En el primer plot de la Figura 2.15, se observa la comparación entre la señal moduladora de la fase A y portadora, que es la misma para las tres fases. Cuando la señal moduladora es mayor que la portadora, se generan los pulsos en el tiristor 1, esta misma señal pero negada es la señal que llega al tiristor 4. Para la fase b y c es exactamente igual solo que sus señales moduladoras están desfasadas 120° , la señal portadora es exactamente igual.

2.3.4.2 Ecuaciones del Inversor Trifásico

Basados en la Figura 2.11, se tienen las siguientes ecuaciones para los voltajes de salida en el inversor:

$$\bar{V}_a = \frac{V_{DC}}{2} + m_A \frac{V_{DC}}{2} \sin(\omega t + \theta)$$

$$\bar{V}_b = \frac{V_{DC}}{2} + m_A \frac{V_{DC}}{2} \sin(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$\bar{V}_c = \frac{V_{DC}}{2} + m_A \frac{V_{DC}}{2} \sin(\omega t + \theta + \frac{2\pi}{3})$$

$$\bar{V}_{ab} = \bar{V}_a - \bar{V}_b = m_A \frac{\sqrt{3}}{2} V_{DC} \sin(\omega t + \theta + \frac{\pi}{6})$$

$$\hat{V}_{ab} = \hat{V}_{conv} = 0.866 m_A V_{DC}$$

$$V_N = \frac{V_{DC}}{2}$$

Donde:

V_a, V_b, V_c : Voltajes en los tiristores

V_N : Voltaje en el neutro

w : frecuencia de conmutación

V_{DC} : Voltaje en el DC-Link

$m_A(t)$: Moduladora de la fase A.

Θ : desfase inicial

V_{conv} : voltaje que entrega el convertidor

V_{ab} : voltaje de Línea a Línea del convertidor

2.4 Transformada *abc-dq0*

Para este tema, se muestra un extracto del artículo "Entendiendo la Transformada de Park" de Francisco Gonzales, ya que es teoría principal para la elaboración del proyecto.

Esta transformada consiste en convertir los valores trifásicos abc que son variables sinusoidales en el tiempo a valores constantes $dq0$. El vector con las componentes del nuevo sistema de referencia $[X_r]$ se obtiene multiplicando el vector de coordenadas trifásicas por la matriz de transformación $[T]$.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [x_r] = [T] \cdot [x] = [T] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

Figura 2.16: Obtención de la de la Matriz $abc-dq0$

2.4.1 Objetivo de la Transformada

- Tener vectores fijos en el tiempo en un sistema de referencia.
- Transformación desde el sistema coordenado estacionario abc a un sistema coordenado estacionario $\alpha\beta\gamma$ para luego pasar al sistema giratorio.

2.4.2 Transformada $abc-\alpha\beta\gamma$

El espacio temporal se puede representar mediante tres ejes ortogonales a, b, c . Cualquier magnitud trifásica se puede definir a través de sus coordenadas $X_a(t), X_b(t), X_c(t)$ sobre ejes, de modo que a cada valor de la variable t le corresponda un punto concreto, definiendo así un vector espacial $S(t)$ que tiene como origen el origen de coordenadas.

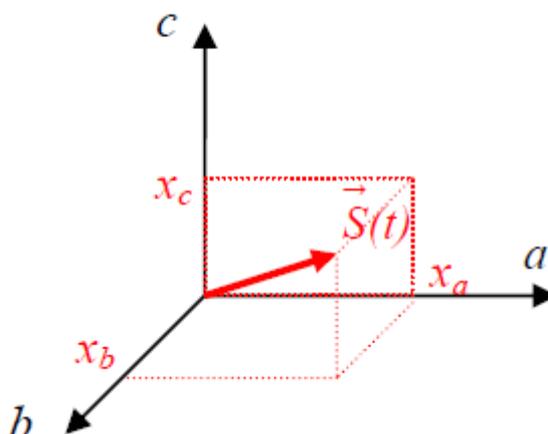


Figura 2.17: Descomposición del Vector S en plano 3D

Todo vector se puede descomponer como suma de vectores (ver Figura 2.17). Resulta útil descomponer el vector espacial $S(t)$ como suma de dos vectores perpendiculares, $S'(t)$ y $H(t)$, donde $H(t)$ es un vector formado por componentes homopolares $h(t)$ iguales. $S(t) = S'(t) + H(t)$, donde:

$$S'(t) = \begin{bmatrix} x'(t) \\ y'(t) \\ z'(t) \end{bmatrix}, \quad H(t) = \begin{bmatrix} h(t) \\ h(t) \\ h(t) \end{bmatrix}$$

Figura 2.18: Nuevas componentes del Vector S

Estos dos vectores que se observan en la Figura 2.18 permiten definir una nueva base de coordenadas: La dirección $[1,1,1]^T$ en coordenadas abc del vector $H(t)$ define el eje γ del nuevo sistema, mientras que el vector $S'(t)$, puesto que es perpendicular a $H(t)$, estará contenido un plano denominado π , perpendicular al eje γ y definido por los ejes $\alpha\beta$, siendo α la proyección del eje a en el plano π .

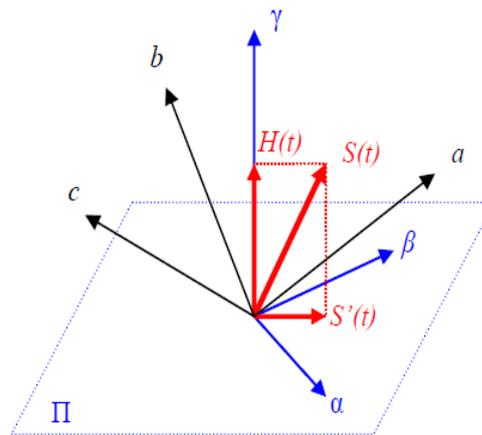


Figura 2.19: Componentes del Vector $S'(t)$ y $H(t)$ en el plano π

Si se considera un sistema trifásico simétrico y equilibrado, se puede demostrar que las corrientes y tensiones trifásicas del sistema se pueden representar mediante un vector espacial de módulo constante que gira a velocidad constante en el plano π . En primer lugar se define una tensión trifásica $v(t)$ cuyas componentes a , b , c son tensiones sinusoidales simétricas y equilibradas.

$$v(t) = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\max} \cdot \cos(\omega t) \\ V_{\max} \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{\max} \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}, \quad \text{donde} \quad v_a + v_b + v_c = 0$$

Figura 2.20: Voltajes de la red

Para deducir la trayectoria que describe el vector $v(t)$ (Figura 2.20) en el plano, es útil realizar un cambio de base de los ejes abc a $\alpha\beta\gamma$ mediante la aplicación de la matriz de cambio de base $[T]_{abc-\alpha\beta\gamma}$.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = [T]_{abc/\alpha\beta\gamma} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \text{donde} \quad T_{abc/\alpha\beta\gamma} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\|T_{abc/\alpha\beta\gamma}\| = 1;$$

$$T_{abc/\alpha\beta\gamma}^{-1} = T_{abc/\alpha\beta\gamma}^T$$

Figura 2.21: Matriz de Transformación $[T]_{abc-\alpha\beta\gamma}$

Sustituyendo en el sistema mostrado en la Figura 2.21 las componentes de $v(t)$, se puede determinar $v(t)$ en el nuevo sistema de coordenadas.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = [T]_{abc/\alpha\beta\gamma} \cdot \begin{bmatrix} V_{\max} \cdot \cos(\omega t) \\ V_{\max} \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ V_{\max} \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} =$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{\max} \cdot \begin{bmatrix} V_{\max} \cdot (\cos(\omega t) - \frac{1}{2} \cos(\omega t - 2\pi/3) - \frac{1}{2} \cos(\omega t + 2\pi/3)) \\ \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_{\max} \cdot (\cos(\omega t - 2\pi/3) - \cos(\omega t + 2\pi/3)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_{\max} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Figura 2.22: Matriz de Transformación $[T]_{abc-\alpha\beta\gamma}$ sin eje 0

A partir de las ecuaciones de la Figura 2.22 se puede deducir que la tensión trifásica $v(t)$ sigue una trayectoria circular de radio $\rho = V_{\max} \sqrt{3/2}$ y velocidad angular constante ω sobre el plano Π .

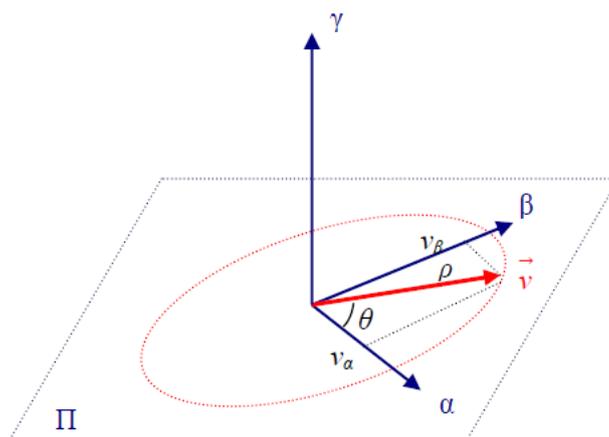


Figura 2.23: Representación de la trayectoria del vector $v(t)$ sobre el plano π

Vectores espaciales permanezcan fijos, de tal forma que en un régimen permanente sean constantes. (V y I).

Nueva referencia
D-Q-0

Plano π

Velocidad w

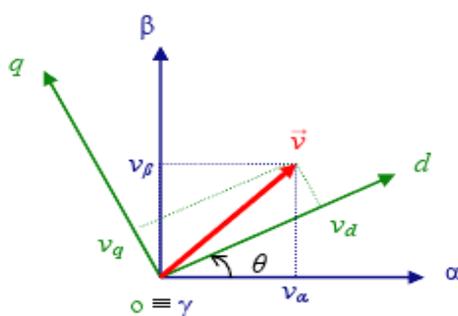


Figura 2.24: Componentes del vector $v(t)$ en el plano $dq0$

A partir del ángulo θ de rotación de los ejes dq , se puede definir la matriz $[T]_{\alpha\beta\gamma-dq0}$ que permite el cambio de base de $\alpha\beta\gamma-dq0$.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = [T]_{\alpha\beta\gamma/dqo} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix}, \text{ donde } T_{\alpha\beta\gamma/dqo} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\|T_{\alpha\beta\gamma/dqo}\| = 1;$$

$$T_{\alpha\beta\gamma/dqo}^{-1} = T_{\alpha\beta\gamma/dqo}^T$$

$$T = T_{\alpha\beta\gamma/dqo} \cdot T_{abc/\alpha\beta\gamma} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Figura 2.25: Matriz de Transformación $[T]_{abc-dq0}$

Como el sistema es balanceado, no tenemos eje 0, entonces la matriz de la transformada se reduce a una matriz de 2x3 que es la siguiente:

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

2.5 Máxima extracción de energía (MPPT)

El MPPT max power point tracking, seguidor del punto de máxima potencia es una técnica mediante la cual se busca maximizar el rendimiento de los paneles solares regulando el voltaje de los mismos, para lo cual se mide la corriente y el voltaje que suministra el banco de paneles fotovoltaicos

(algunos funcionan con sensores que monitorizan radiación y temperatura,), dichos valores son analizados por el controlador principal, y luego este indica la referencia de voltaje que el convertidor BOOST de los paneles debe fijar a los mismos para obtener la máxima potencia. Por ejemplo: cuando la temperatura de los paneles aumenta, decae la tensión que es capaz de suministrar el modulo, pero al mismo tiempo aumenta también la corriente (en menor medida), de modo que si este control disminuye la referencia de tensión, provocando una subida de la intensidad, mantenemos constante la potencia de salida del panel. Cuanto mayor es la diferencia entre el voltaje del convertidor y el V_{mp} (El V_{mp} del panel es el voltaje en donde el producto de la corriente y el voltaje es mayor) del módulo, se desperdicia más cantidad de energía.

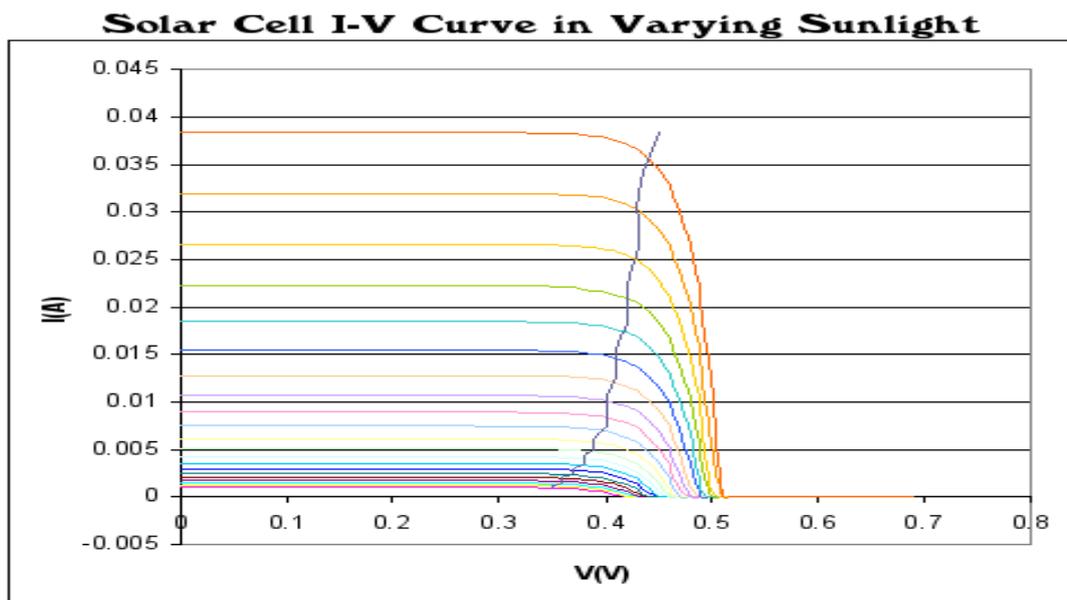


Figura 2.26: Curva Corriente Vs Voltaje (MPPT)

2.5.1 Ventajas MPPT

- Detección del punto de potencia pico.
- Barrido rápido de toda la curva $I-V$.
- Reconocimiento de varios picos de potencia durante períodos de sombra o en instalaciones combinadas de grupos de paneles fotovoltaicos.

- Excelente respuesta a la salida del sol y con bajo nivel de irradiación solar.
- Técnica de seguimiento de carga que reduce al mínimo las pérdidas de energía.
- Bajo consumo energético.

2.6 Herramientas utilizadas

Para la realización de la presente se utilizó las herramientas SisoTool, Simulink y SimPowerSystem, los cuales son proporcionados por MatLab.

2.6.1 MatLab

MATLAB (abreviatura de *Matrix Laboratory*, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las *cajas de herramientas (toolboxes)*; y las de Simulink con los *paquetes de bloques (blocksets)*.

2.6.2 SisoTool

SisoTool es una herramienta perteneciente al programa MatLab, el cual ayuda a diseñar un controlador para cada una de las plantas presentes en el proyecto. Según el bosquejo del proyecto realizado al final del capítulo 1, la propuesta se divide en 2 partes principales: el convertidor y el inversor. Para poder manipular las variables de control de cada sub-sistema (ya sea corriente o voltaje) de forma correcta, debemos diseñar un controlador para cada parte, de forma independiente y también de forma en el cual todos trabajen para logran un solo objetivo. Ya que el sistema puede llegar a ser inestable, la herramienta SisoTool ayuda a observar el comportamiento de la planta antes y después de la inserción de un controlador.

2.6.3 SimPowerSystem

Es una herramienta dedicada a realizar diseños electrónicos dentro de MatLab, en donde los valores de dichos componentes pueden ser codificados. Para la realización del proyecto, aparte del diseño de controladores, se necesita generar estas señales de control. La mayoría de estos parámetros son valores de resistencia, capacitancia e inductancia previamente descritas. SimPowerSystem ofrece la facilidad de crear diseños electrónicos, proporcionando diferentes partes y esquemas que ayudan a crear el circuito final de potencia.

2.7 Técnica K_Factor

Es la técnica mediante la cual se selecciona entre tres tipos de funciones de transferencia para el diseño de los controladores del convertidor del banco de baterías, del banco de paneles y del inversor, dependiendo de la función de transferencia de la planta, el ancho de banda deseado y el

margen de fase deseado. Las funciones de transferencia pueden ser: Tipo integrador $1/s$, en caso de que se tenga un margen de fase menor a 0 ; $K(1+s/w_z)/s(1+s/w_p)$ en caso de que se tenga un margen de fase mayor a 0 pero menor que 90 y $K(1+s/w_z)^2/s(1+s/w_p)^2$ y en caso de que se tenga un margen de fase mayor a 90 .

Tipo de control	Margen de fase de elevación	Función de Transferencia	Gráfico
I	$\leq 0^\circ$	$G_c(s) = \frac{Kc}{s}$	
II	$> 0 \text{ AND } < 90^\circ$	$G_c(s) = \left(\frac{Kc}{s}\right) \left(1 + \frac{s}{w_z}\right) \left(1 + \frac{s}{w_p}\right)$	
III	$> 90^\circ$	$G_c(s) = \frac{Kc}{s} \left(1 + \frac{s}{w_z}\right)^2 \left(1 + \frac{s}{w_p}\right)$	

CAPÍTULO 3

DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES Y DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

En el proyecto se utilizará tres convertidores. El primer convertidor une el banco de paneles fotovoltaicos con el DC-Link, el objetivo de este convertidor es regular el voltaje de polarización del bloque de paneles, este voltaje no es fijo, varía según el MPPT, su valor máximo puede llegar a ser de 200VDC, ya que de esta forma se llega a la potencia máxima del sistema. El siguiente convertidor es el que une el banco de baterías con el DC-Link. El flujo de potencia en este convertidor puede ser en ambos sentidos ya que el banco de baterías pueden suministrar potencia o consumir potencia para el caso en el que se deban cargarlas. Finalmente está el inversor donde el flujo de potencia puede ser en ambos sentidos, ya sea para suministrar potencia a la red o para cargar el banco de baterías. Para entregar potencia activa a la red se varía el desfase entre el voltaje que entrega el convertidor y el voltaje de la red. Si el voltaje de salida del convertidor adelanta al voltaje de la red, entonces el flujo de potencia va desde la salida del inversor hacia la red, caso contrario el flujo de potencia va desde la red hacia el inversor. Para variar el flujo de potencia reactiva se varía la amplitud del voltaje de la salida del inversor. Si la amplitud del voltaje de salida del inversor es mayor que la amplitud del voltaje de la red, entonces el inversor entrega potencia a la red, caso contrario, la red entrega potencia reactiva.

En este capítulo se dimensionan cada uno de los elementos de control y fuerza que se utilizarán en el proyecto en base a voltajes directos que soportan, voltajes inversos pico, corrientes nominales, corrientes pico. Los principales elementos son: banco de baterías, banco de paneles fotovoltaicos, tiristores del convertidor BOOST, tiristores del inversor, capacitor del DC-Link, inductancias entre las salidas del inversor y la red, diodos. Este dimensionamiento se basa en cálculos matemáticos y simulaciones.

Se van a realizar simulaciones en lazo abierto y se obtendrán 3 valores de capacitancia por cada convertidor. Se colocará una resistencia equivalente a la carga que ven los convertidores para efectos de cálculo del valor de capacitancia. Luego de realizar dichos cálculos, se escoge el mayor entre los tres valores para el dimensionamiento del DC-Link.

3.1 Criterios a tomar en cuenta para el diseño de los controladores que se usarán en el proyecto

Para realizar este tipo de controlador se debe considerar los siguientes parámetros:

- Para el controlador de la batería y el controlador del panel fotovoltaico, se escoge un ancho de banda entre 100Hz y 300Hz.
- En el inversor se tienen dos controladores en cascada, uno para controlar corriente y otro para controlar voltaje. El ancho de banda del controlador de corriente debe ser una década mayor al ancho de banda del controlador externo. Se escoge un ancho de banda para el controlador de corriente 1KHz.
- Se escoge un margen de fase de 60°.

- Los polos y los ceros que se observan en el gráfico de las trayectorias de las raíces deben encontrarse a la izquierda del eje complejo para que el sistema sea estable. Si los polos y ceros se encuentran sobre el eje, el sistema es oscilatorio. Si los polos y ceros se encuentran a la derecha del eje complejo, el sistema se vuelve inestable.
- Si la ganancia de la planta (G_p) es negativa, la ganancia del controlador también debe ser negativa (G_c).

3.2 Parámetros Generales

Es importante definir el voltaje nominal al cual va a operar el DC-Link ya que sin este valor no se pueden dimensionar los convertidores, entonces: el sistema puede entregar hasta 10KW de potencia trifásica a 120Vrms de línea a neutro, entonces, la potencia por fase va a ser igual a 10KW/3 y eso es igual a 3.3KW. La corriente que pasa por cada fase es:

$$I_L = \frac{P_{phase}}{V} = \frac{3.3KW}{120} = 27.775A$$

El voltaje que cae en el inductor que uno el inversor con la red es:

$$V_L = (j\omega L)I_L = (2\pi fL)I_L = 2\pi(60)(10^{-3})(27.775) = 104.7093V_{rms}$$

$$V_{L_pico} = \sqrt{2}V_L = 148.679V_{pico}$$

$$V_{GRID_pico} = \sqrt{2}V_{rmsLN} = \sqrt{2}(120V_{rmsLN}) = 170V_{LN_pico}$$

$$V_{CON_MAX} = \sqrt{V_{L_pico}^2 + V_{GRID_pico}^2} = \sqrt{(148.679)^2 + (170)^2} = 225.45V$$

$$V_{L_pico} = \sqrt{2}V_L = 148.679V_{pico}$$

$$Asumiendo_m = 0.867$$

$$V_{CON_MAX} = m \frac{V_{DC}}{2} \rightarrow V_{DC} = \frac{2V_{CON_MAX}}{m} = \frac{2(225.45)}{0.867} = 520V_{DC}$$

Se escogió el índice de modulación de 0.867 aproximadamente ya que en caso de que el sistema presente una perturbación, el controlador pueda elevar el índice hasta 1 para así alcanzar el estado estable.

3.3 Diseño del convertidor del panel fotovoltaico

Para tener como referencia los datos de placa de un panel fotovoltaico comercial, se utilizó los datos de placa de la compañía SUNPOWER: Cada panel tiene 72 celdas (6 filas y 12 columnas).

- Voltaje del panel = 39,8V.
- Potencia = 215W.
- Corriente = 5,4A.

Para el panel fotovoltaico:

- Se necesitarán 50 paneles para obtener la misma potencia nominal de 10KW del sistema de generación.
- Se colocarán 10 ramales en paralelo. Cada ramal consta de 5 paneles en serie. Con lo cual tenemos:

$$V_{ramal} = 5V_{panel} = 5(39.8V) = 200Vdc$$

- La corriente de cada ramal es de 5.4A. entonces la corriente total sería:

$$I_{total} = 10I_{ramal} = 10(5.4A) = 54A$$

3.3.1 Convertidor del Panel Fotovoltaico

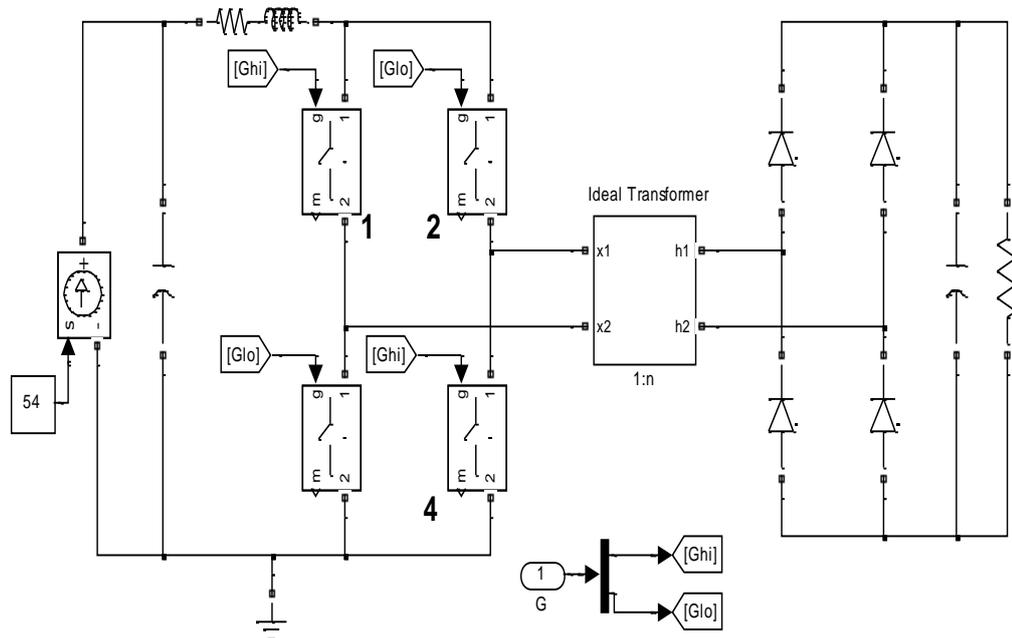


Figura 3.1: Convertidor del Panel Fotovoltaico realizado en Simulink

El siguiente convertidor está formado por cuatro tiristores (Figura 3.1), un transformador ideal y un inductor. Es importante mencionar que el elemento más importante de este convertidor es el inductor, debido a que todo inductor se opone a los cambios bruscos de corriente. Con el juego de tiristores ocasionamos cambios bruscos de corriente y este inductor invierte su polaridad e intenta mantener una corriente en el mismo sentido en el que estaba circulando antes del cambio brusco. Esto permite así que se pueda elevar el voltaje en el otro lado del convertidor.

Para efecto del cálculo del capacitor DC-Link, se va a colocar una carga equivalente a 10KW.

$$P = \frac{V_{dc}^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_{dc}^2}{P} = \frac{(520)^2}{10000W} = 27.04\Omega$$

3.3.1.1 Transformador Ideal

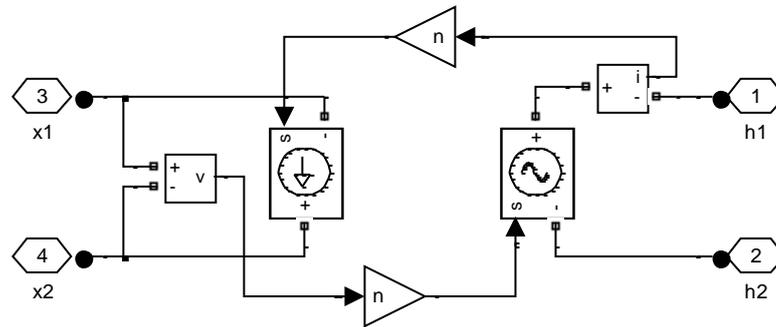


Figura 3.2: Circuito del Transformador Ideal hecho en Simulink

Para efectos de que la simulación corra más rápido, se elaboró un transformador ideal en MatLab (Figura 3.2), el cual sigue las ecuaciones básicas de todo transformador. En la figura se puede apreciar el funcionamiento del transformador.

3.3.2 Simulación del Convertidor BOOST del Panel Fotovoltaico

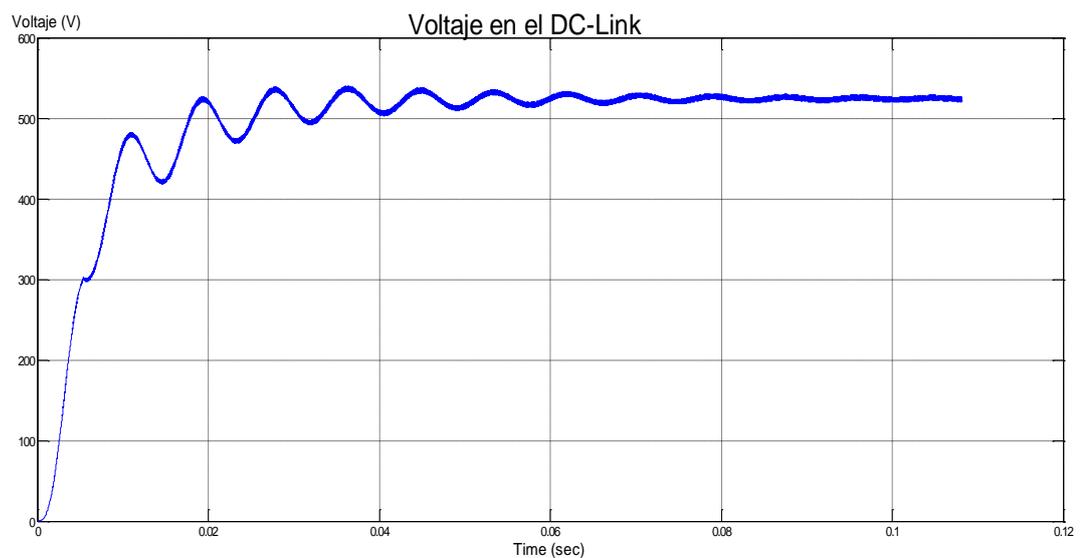


Figura 3.3: Simulación del Voltaje en el DC-Link, usando Simulink

Para efectos de dimensionar el capacitor DC-Link, se le añade en paralelo una resistencia equivalente a la carga que ve el convertidor. Cabe recalcar que los 520VDC en el capacitor DC-Link no son controlados por este convertidor (Figura 3.3).

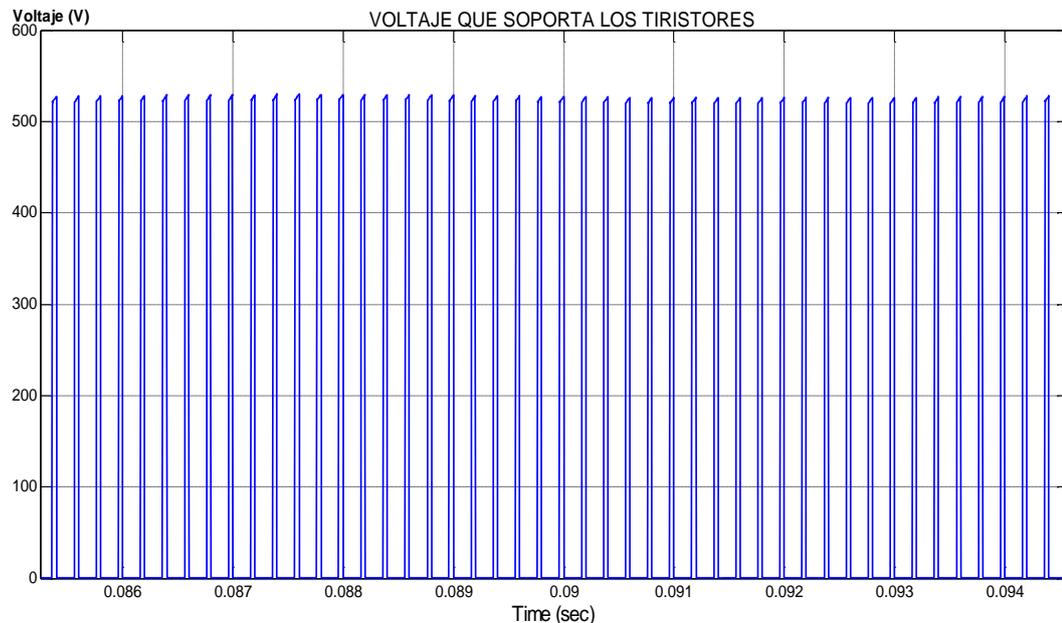


Figura 3.4: Simulación del Voltaje Máximo que soporta cada tiristor, usando Simulink

La Figura 3.4 muestra el voltaje máximo que soporta cada tiristor del convertidor de paneles fotovoltaicos. El voltaje directo e inverso que soporta debe ser igual o superior a 520VDC.

3.3.2.1 Cálculo del Inductor

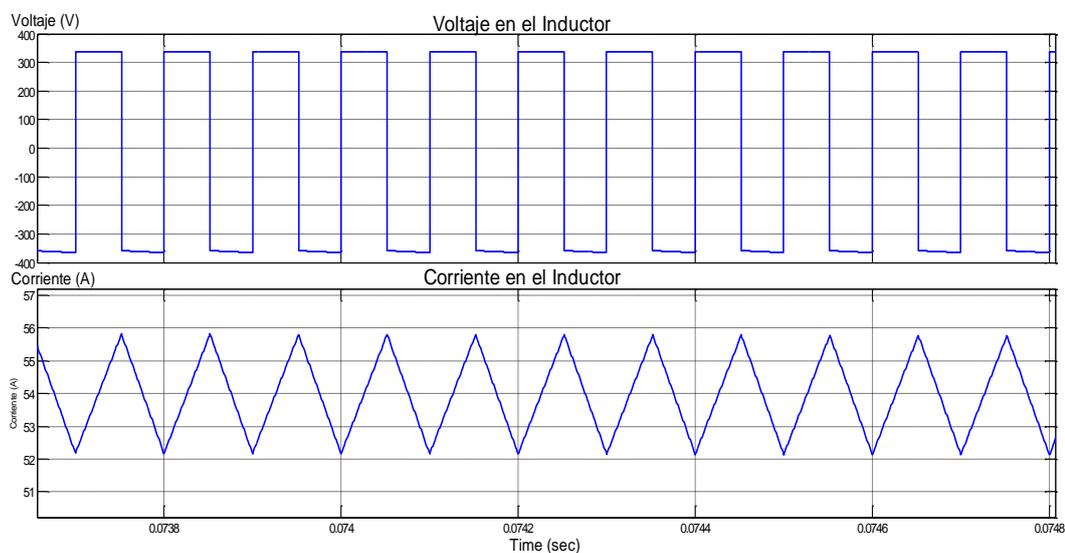


Figura 3.5: Simulación de la corriente de rizado y voltaje en el inductor realizado en Simulink

En la Figura 3.5, el plot mostrado indica los voltajes máximo y mínimo del inductor. De esta gráfica obtenemos que el $V_{max} = 201V$ y $V_{min} = -217V$, ambos para el peor caso.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\Delta I = \frac{1}{L} \int V_L dt$$

$$\Delta I = \frac{1}{L} (\Delta V_L) \Delta t$$

$$\Delta t = \frac{T_s}{2}$$

$$L = \frac{\Delta V_{L_MAX} * T_s}{\Delta I * 2}$$

$$\Delta V_L = 200V$$

$$T_s = 1/(10 * 10^3)$$

$$L = \frac{(200)}{2.7} * \frac{1}{2 * 10 * 10^3} = 3.7 * 10^{-3} H$$

Con este valor de inductancia se procede a realizar simulaciones para poder obtener los valores de corriente y voltaje deseado. Sin embargo, alrededor de este valor de inductancia se encuentra el punto de operación óptimo.

3.3.2.2 Cálculo del Capacitor en el DC-Link

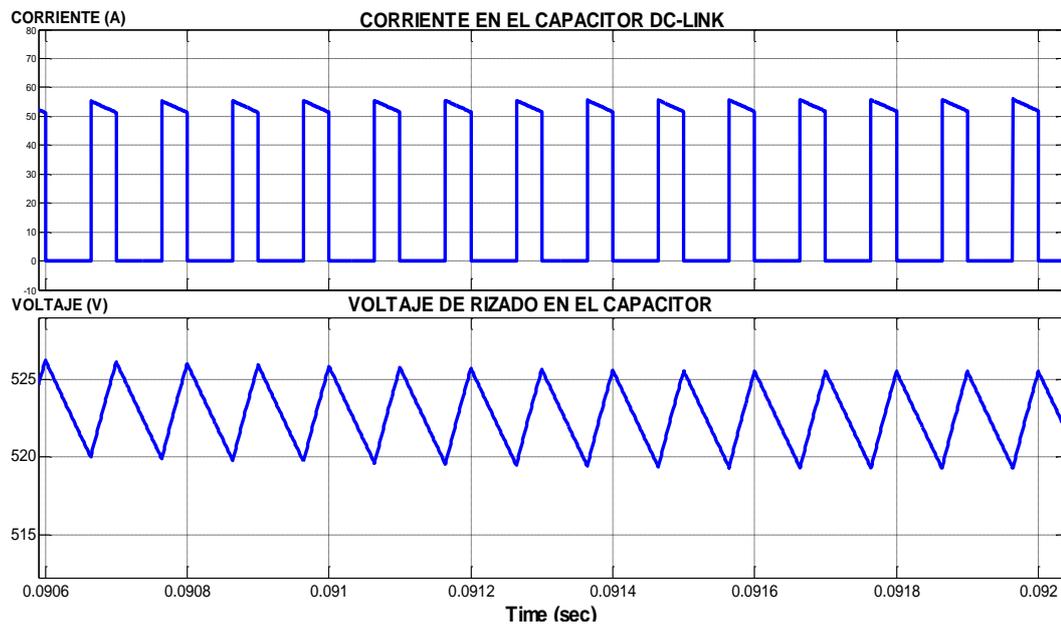


Figura 3.6: Simulación del voltaje de rizado y corriente en el capacitor DC-Link realizado en Simulink

La Figura 3.6 muestra el rizado en el voltaje del DC-Link, el cual tiene un rizado de 7.5V que en porcentaje representa al 1.4%.

Usando I_{max}

$$V_c = \frac{1}{C} \int I_c \delta t$$

$$C = \frac{1}{V_c} \int I_c \delta t$$

$$C = \frac{\Delta I}{\Delta V_c} T_{on}$$

$$T_{on} = 0.00004s$$

$$C = \frac{55A}{7.5V} 0.00004 = 0.29mF$$

3.3.2.3 Cálculo del capacitor del Panel Fotovoltaico

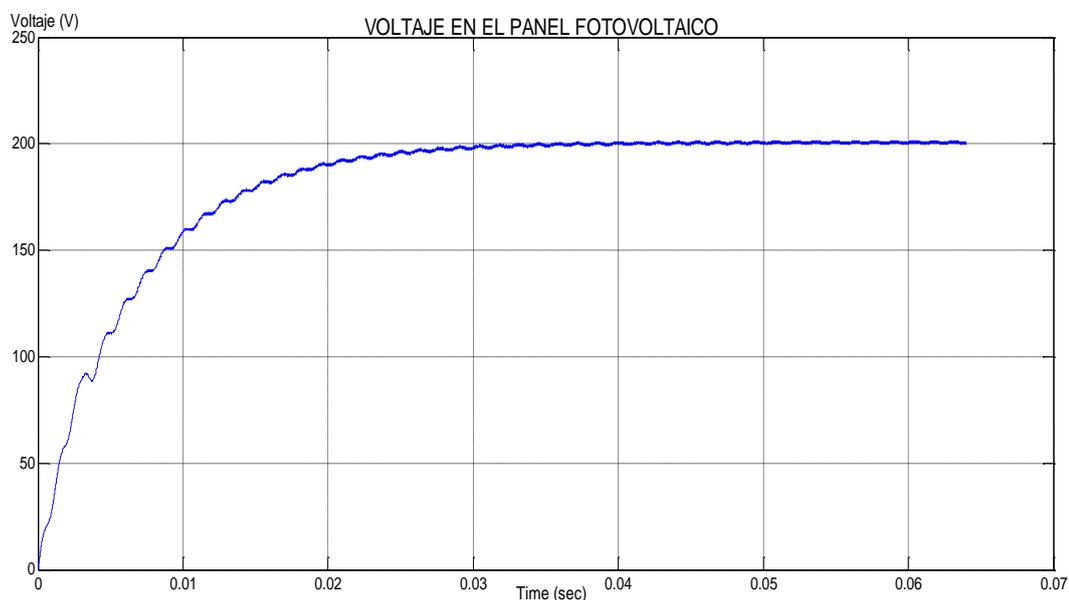


Figura 3.7: Simulación del Voltaje en el panel fotovoltaico realizado en Simulink

La Figura 3.7 muestra el voltaje de 200VDC que se fijan en el banco de paneles fotovoltaicos. Este voltaje es necesario para polarizar el banco de paneles fotovoltaicos ya que así se vuelve más eficiente. El banco de paneles fotovoltaicos sólo suministra corriente al sistema.

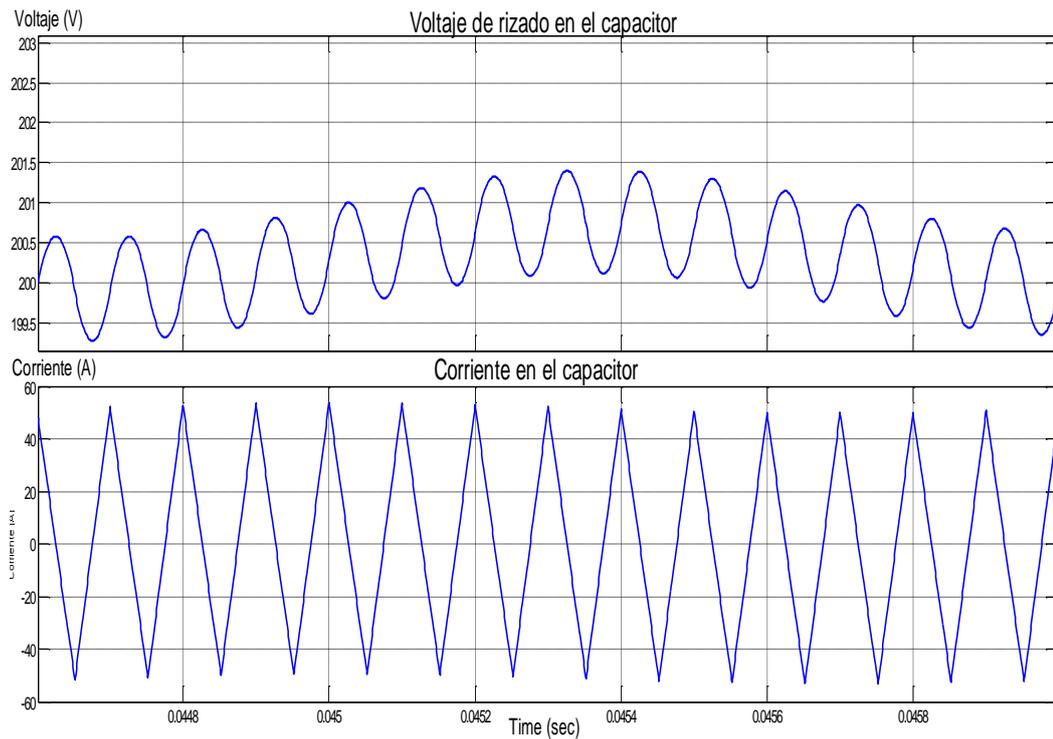


Figura 3.8: Voltaje de rizado y corriente en el capacitor realizado en Simulink

En la Figura 3.8 se puede observar el rizado en el voltaje del panel fotovoltaico. El rizado es de 1.5V. Con estos valores se obtiene un porcentaje de rizado de 0.75%.

$$V_c = \frac{1}{C} \int I_c \delta t$$

$$C = \frac{1}{V_c} \int I_c \delta t$$

$$C = \frac{\Delta I}{\Delta V_c} T_{on}$$

$$T_{on} = 0.00004s$$

$$C = \frac{106A}{1.5V} \frac{0.00005s}{2} = 1.77mF$$

3.3.2.4 Diseño del Controlador

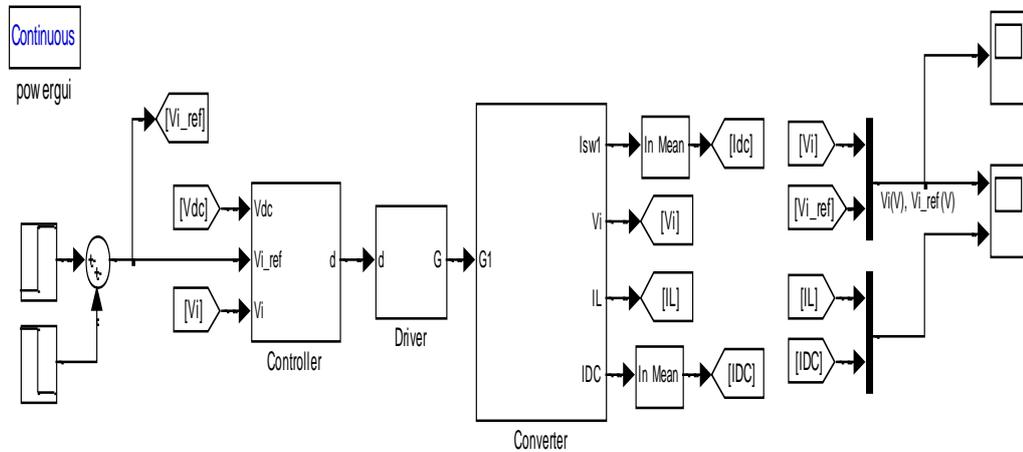


Figura 3.9: Esquema total del convertidor y controlador del panel fotovoltaico realizado en Simulink

En la Figura 3.9 se observa el diagrama principal convertidor del panel fotovoltaico con su respectivo controlador. La señal de referencia (V_{ref}) consta de dos señales de pulso para poder variar su valor y así ver si el controlador sigue a la referencia. El siguiente bloque es el controlador del sistema, el cual recibe la señal de voltaje V_i (voltaje del banco de paneles) y como salida del controlador, se tiene el índice de modulación que va hacia el driver, que es el que comanda los tiristores del convertidor.

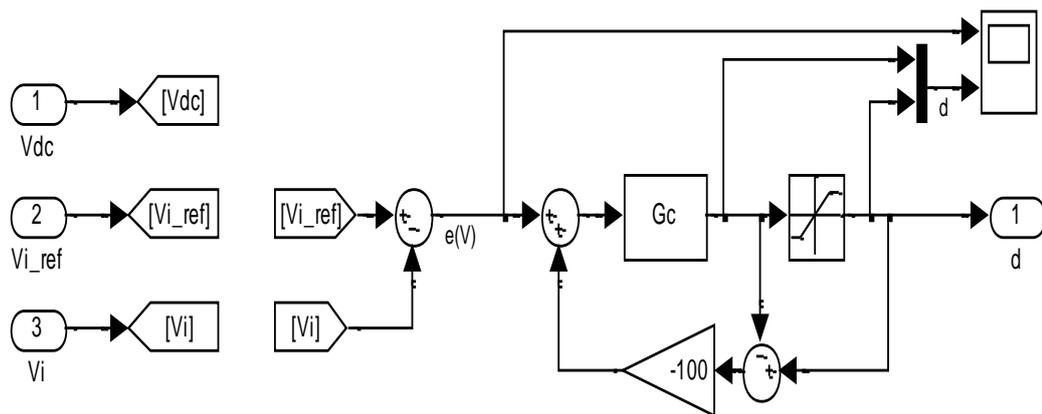


Figura 3.10: Bloque controlador del Panel Fotovoltaico realizado en Simulink

La Figura 3.10 representa el bloque controlador, el cual recibe la señal V_i y la señal V_{ref} que son comparadas para obtener un error ($e(V)$). Esta señal ingresa al controlador, y este varía el índice de modulación. Se adicionó un bloque de saturación para proteger la planta. También se añadió un lazo *anti-windup* el cual actúa solamente cuando el controlador está sobre-modulando, con el objetivo de que en caso de que el controlador sea mucho más rápido que la planta, este no se sature y regrese rápido a su rango de operación de índice de modulación que es entre 0 y 1. Cabe mencionar que para el diseño del controlador se fijó el enlace DC debido a que el inversor regula el voltaje en este capacitor.

La función de transferencia de la planta se la obtiene de la siguiente forma:

$$Gp_{-pv} = \frac{-Vdc_{-ref}(wn^2)}{s^2 + \frac{s}{Tau} + wn^2}$$

Donde:

$RL = 0.1$: Resistencia del inductor en ohmios

$L = 3000 * 10^{-6}$: Inductancia in Henrios

$C = 200 * 10^{-6}$: Capacitancia en Faradios

$Vi_{ref} = 200$: Voltaje de referencia del banco de paneles fotovoltaicos

$VDC_{ref} = 520$: Voltaje de referencia en el DC-Link

$fs = 10^3$: Frecuencia de conmutación en Hz

$Ts = 1/fs = 10^{-4}$: periodo de conmutación en segundos

$Wn = 1/sqrt(L * C) = 577.3503$: Frecuencia natural de oscilación

$Tau = L/RL = 0.0300$: Constante de tiempo

$n = 1$: Relación de vueltas del transformador

$$Gp_{-pv} = \frac{-1.333 * 10^8}{1.245 * 10^{-8} s^3 + 0.0002232 s^2 + s}$$

La función de transferencia obtenida para el controlador mediante la técnica del k-factor para un ancho de banda de 200Hz y un margen de fase de 60° es:

$$G_{c_pv} = \frac{-7.44 * 10^{-6} s^2 - 0.002622 s - 0.231}{1.245 * 10^{-8} s^3 + 0.0002232 s^2 + s}$$

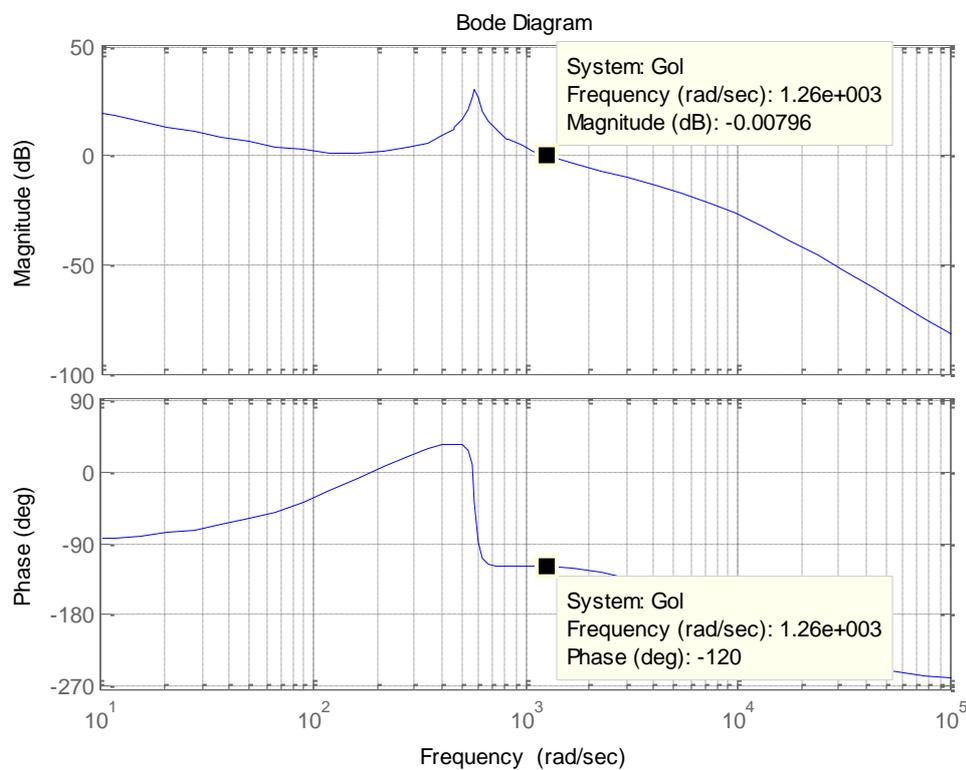


Figura 3.11: Respuesta de Magnitud y Margen de fase del controlador del PV realizado con SisoTool

El valor que se obtiene en el eje de frecuencia cuando la gráfica de magnitud corta en 0dB es de $1260 \frac{rad}{seg}$ (Figura 3.11). Transformando el

valor a frecuencia en Hz se obtiene:

$$\frac{1260 \frac{rad}{seg}}{2\pi rad} = 200Hz. \text{ Este valor es el ancho de}$$

banda que se fija para el controlador.

Para determinar el margen de fase, se ubica en el corte con 0dB, y en la gráfica de margen de fase se observa que el margen de fase para la frecuencia de $1260 \frac{rad}{seg}$, se tiene un margen de fase de 120° . El margen de fase del controlador es $-120^\circ - (-180^\circ) = 60^\circ$.

En la gráfica de Bode se observa un pico a una frecuencia aproximada de 573Hz. Esto se debe a que aparecen dos ceros a una frecuencia aproximada de 170Hz. Estos ceros son contrarrestados al aparecer dos polos cercanos a ellos. Por eso ocurre el pico, ya que los polos hacen que la gráfica decaiga.

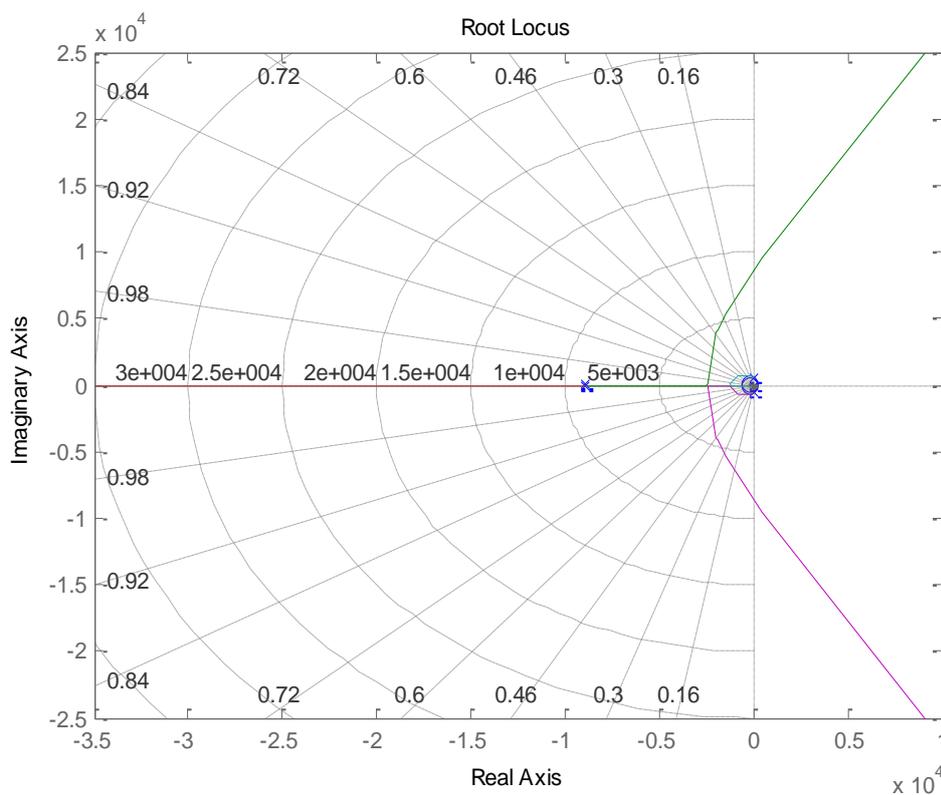


Figura 3.12: Trayectoria de la raíces del controlador del PV realizado en SisoTool

La Figura 3.12 muestra la trayectoria de la raíces. Para obtener los polos en lazo cerrado, hay que ubicar en la gráfica la ganancia igual a 1. Esto se hace para cada uno de los lugares geométricos de las raíces. Los polos de lazo cerrado están ubicados en:

- $-1.1550 \cdot 10^4$
- $-0.5188 \cdot 10^4$
- $(-0.0586 + 0.0709i) \cdot 10^4$
- $(-0.0586 - 0.0709i) \cdot 10^4$
- $-0.0049 \cdot 10^4$

Los polos se encuentran a la izquierda del eje complejo, lo cual nos indica que el sistema es estable.

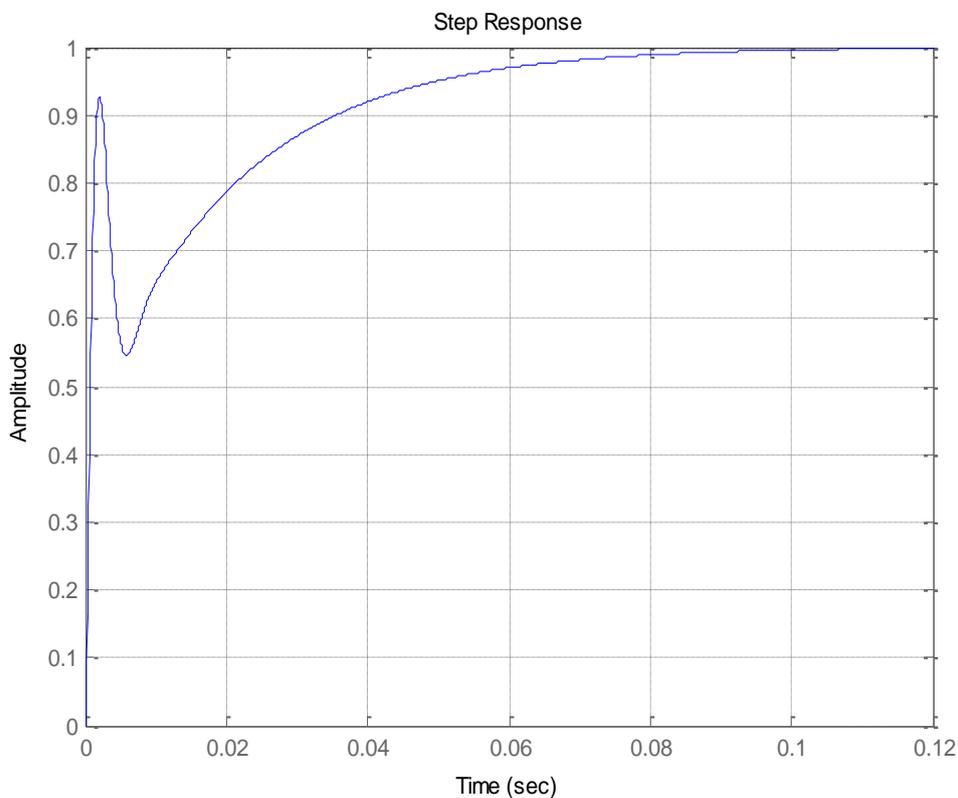


Figura 3.13: Respuesta del controlador del PV a una entrada paso hecho en SisoTool

En la Figura 3.13 se muestra la respuesta del sistema ante una entrada escalón. La presencia de esta perturbación antes de estabilizarse es debida a que los ceros están próximos a los polos dominantes, es decir tantos polos y ceros se acercan mucho al origen y por ende afectan en la respuesta del controlador.

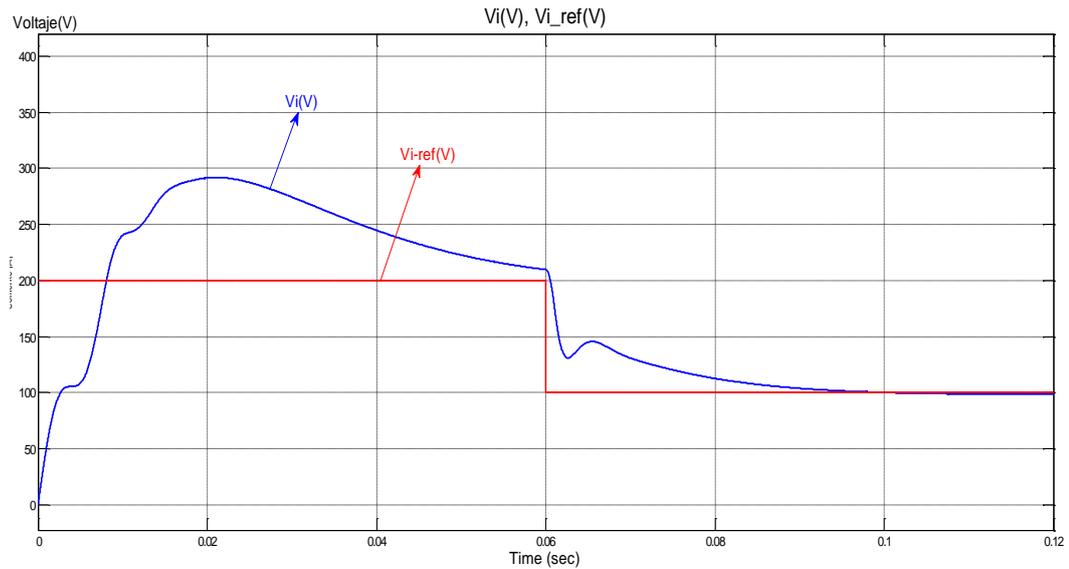


Figura 3.14: Comparación entre $V_i(V)$ y $V_{i_ref}(V)$ realizado en Simulink

En Figura 3.14 se puede apreciar que a pesar de que la referencia decrece abruptamente de 200V a 100V, la señal V_i la sigue inmediatamente pero sin sobrepasarlo, es decir que la velocidad de respuesta del controlador es la apropiada. No es ni muy rápido ni muy lento.

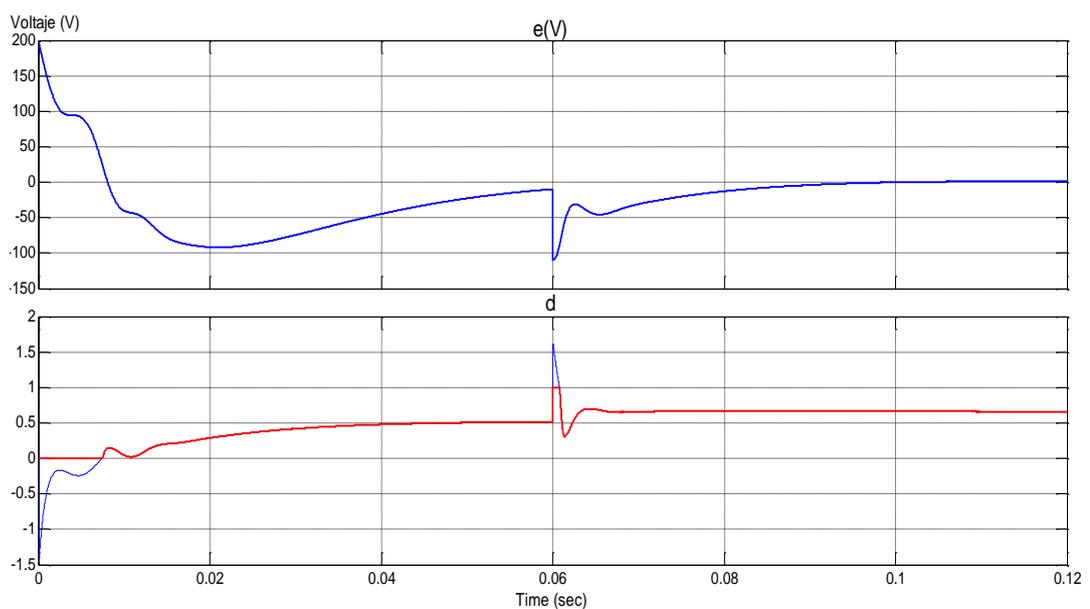


Figura 3.15: Error en la señal de voltaje $V_i(V)$ y variación de d hecho en Simulink

En la Figura 3.15 se puede ver como el error se estabiliza hasta ser cero. Cuando hay el cambio abrupto de la señal de referencia, es decir baja de 200V a 100V, se puede apreciar una sobre-modulación del controlador, ya que el índice de modulación d se eleva a 1.6, cuando su rango de operación es de 0 a 1. Esto no es malo ya que en la práctica no van a haber cambios abruptos de voltaje y además hubo sobre-modulación pero no tanta.

3.4 Diseño del Convertidor de la Batería

El voltaje nominal de la batería es de 12VDC.

Conectaremos 17 baterías en serie para obtener 204VDC.

$$V_{TOTAL_BAT} = (17)(12Vdc) = 204VDC$$

3.4.1 Convertidor del Banco de Baterías

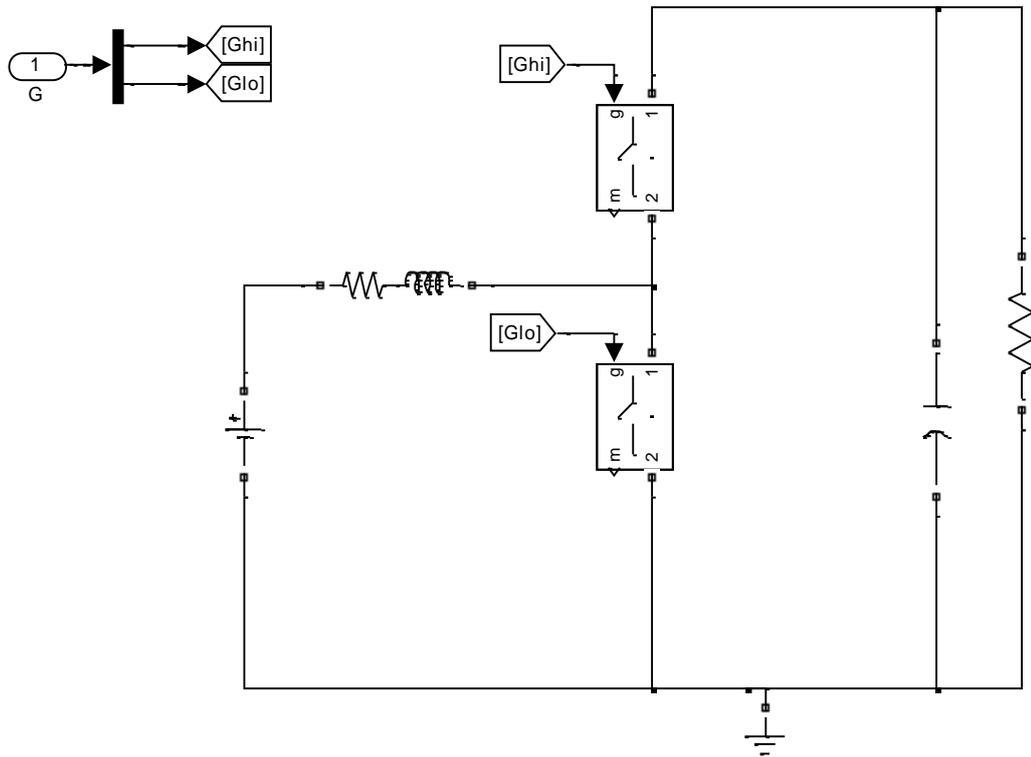


Figura 3.16: Circuito electrónico del convertidor BOOST del banco de baterías realizado en Simulink

Este convertidor tiene dos etapas (Figura 3.16): en la primera etapa funcionará como convertidor BOOST debido a que eleva el voltaje DC del banco de baterías de 200VDC a 520VDC que es el voltaje del DC-Link, esto cuando las baterías están suministrando potencia. La segunda función es cargar las baterías. En este caso el convertidor funciona como un convertidor BUCK, ya que reduce el voltaje del DC-Link que es de 520VDC a 200VDC.

3.4.1.1 Simulación del Convertidor de Baterías

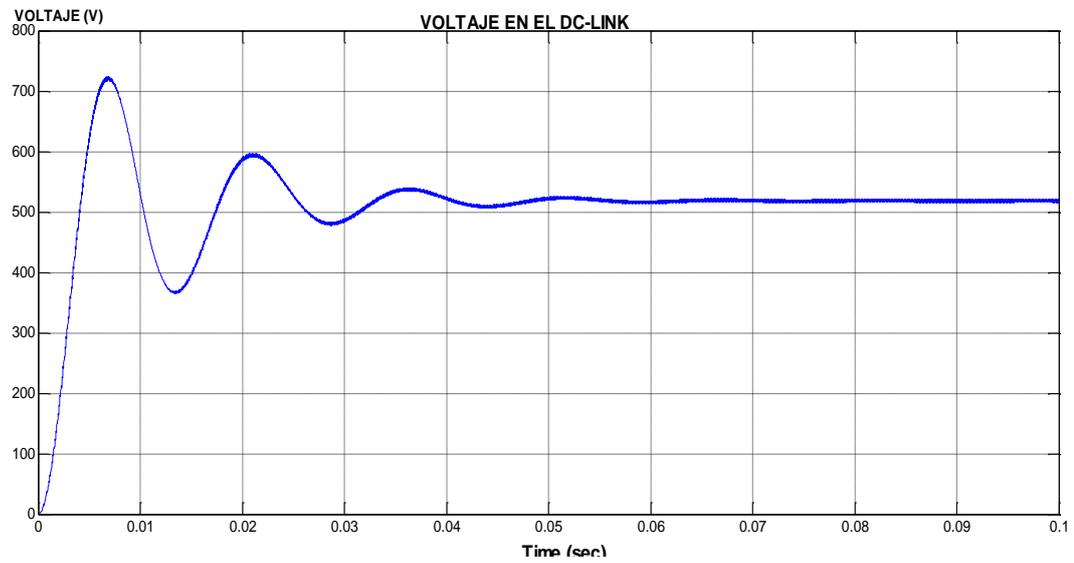


Figura 3.17: Simulación del voltaje en el DC-Link hecho en Simulink

La Figura 3.17 muestra el voltaje de salida de 520VDC del convertidor BOOST de Baterías. El sistema mostrado se estabiliza al cabo de 5ms transcurridos. Este voltaje generado en el convertidor BOOST va hacia el capacitor DC-Link.

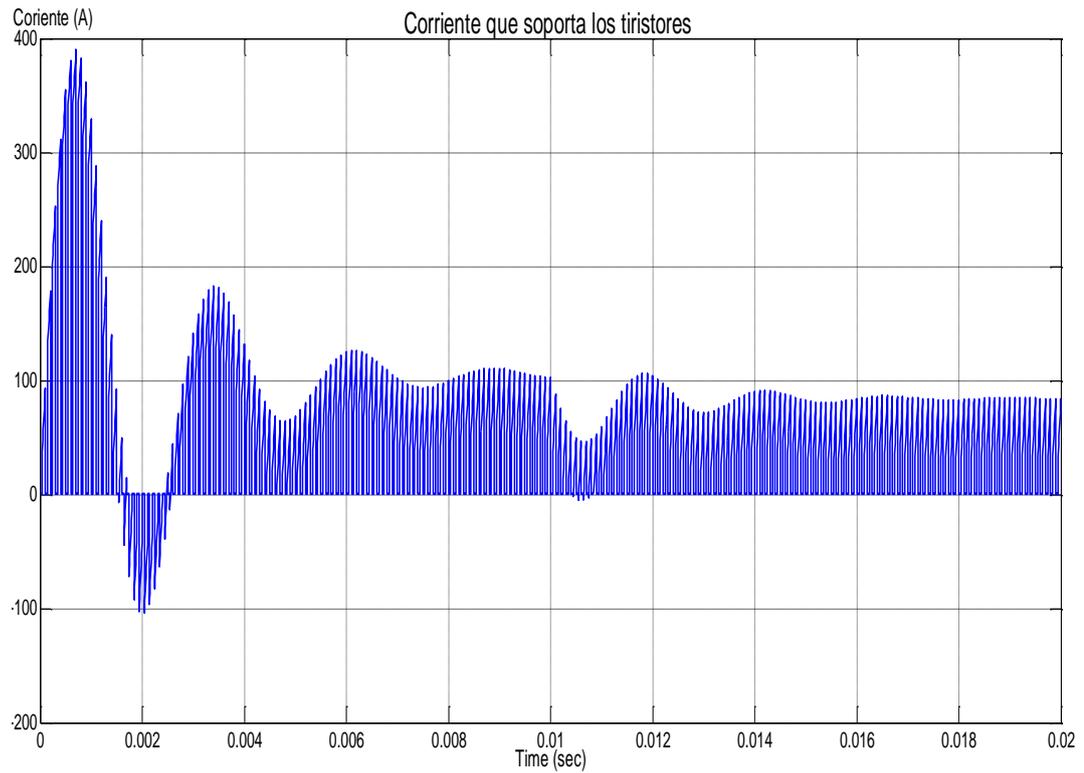


Figura 3.18: Simulación de la corriente que soporta cada tiristor. Realizado en Simulink

La Figura 3.18 muestra la corriente máxima que soporta cada tiristor. Esta corriente es de aproximadamente 400A. La corriente nominal para cada tiristor es de aproximadamente 90A.

3.4.1.2 Cálculo del Inductor

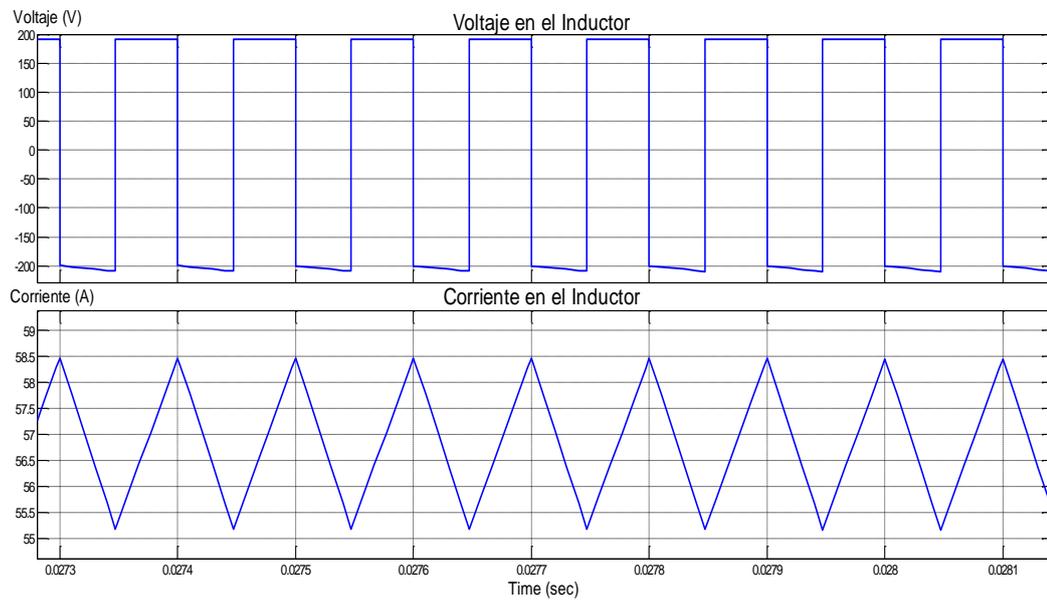


Figura 3.19: Simulación de voltaje y rizado de corriente en el inductor hecho en Simulink

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\Delta I = \frac{1}{L} \int V_L dt$$

$$\Delta I = \frac{1}{L} (\Delta V_L) \Delta t$$

$$\Delta t = T_{ON}$$

$$L = \frac{\Delta V_{L_MAX} * T_{ON}}{\Delta I * 2}$$

$$\Delta I = 10\% I_{no\ min\ al}$$

$$I_{no\ min\ al} = 54A$$

$$\Delta V_L = V_{L_MAX} - V_{L_MIN}$$

$$V_{L_MAX} = 201V$$

$$V_{L_MIN} = -217V$$

$$T_{ON} = 0.00004s$$

$$L = \frac{(201 - (-200))}{0.1 * 54} * 0.00004 = 2.9 * 10^{-3} H$$

3.4.1.3 Cálculo del Capacitor

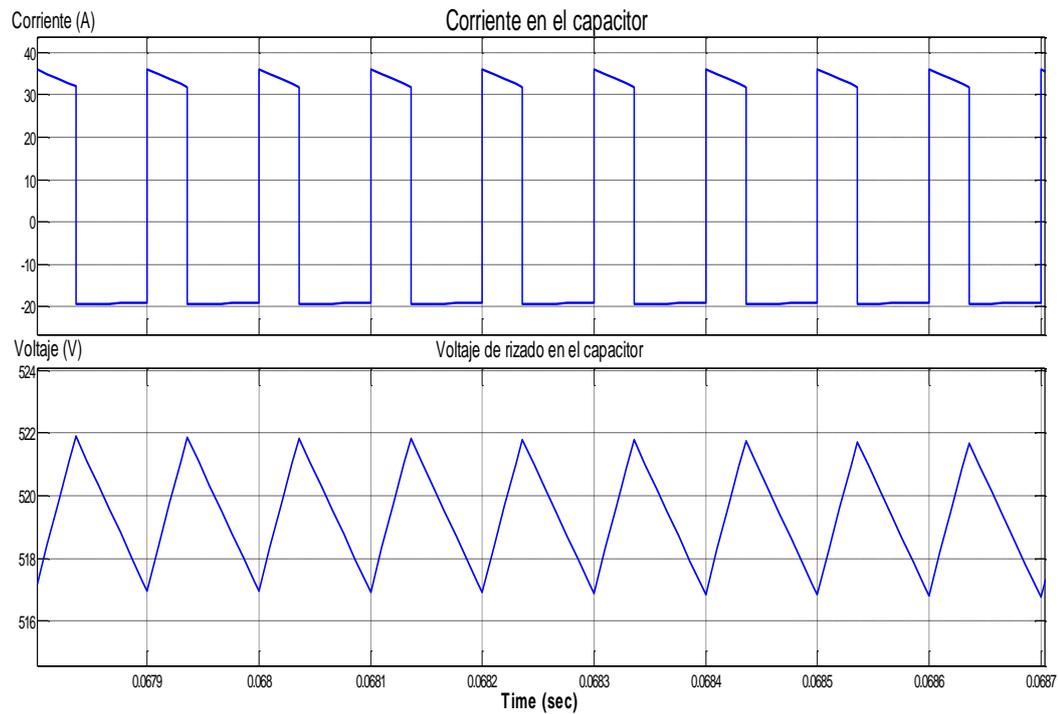


Figura 3.20: Simulación de corriente y rizado de voltaje en el capacitor DC-Link realizado en Simulink

La Figura 3.20 muestra el rizado de la señal de voltaje en el DC-Link. El rizado es de 5V. Con lo cual el porcentaje de rizado es de $(5V/520)*100\%$, igual a 1%.

$$V_c = \frac{1}{C} \int I_c \delta t$$

$$C = \frac{1}{V_c} \int I_c \delta t$$

$$C = \frac{\Delta I}{\Delta V_c} T_{on}$$

$$T_{on} = 0.00004s$$

$$C = \frac{36A}{5V} 0.00004s = 0.288mF$$

3.4.1.4 Diseño del controlador

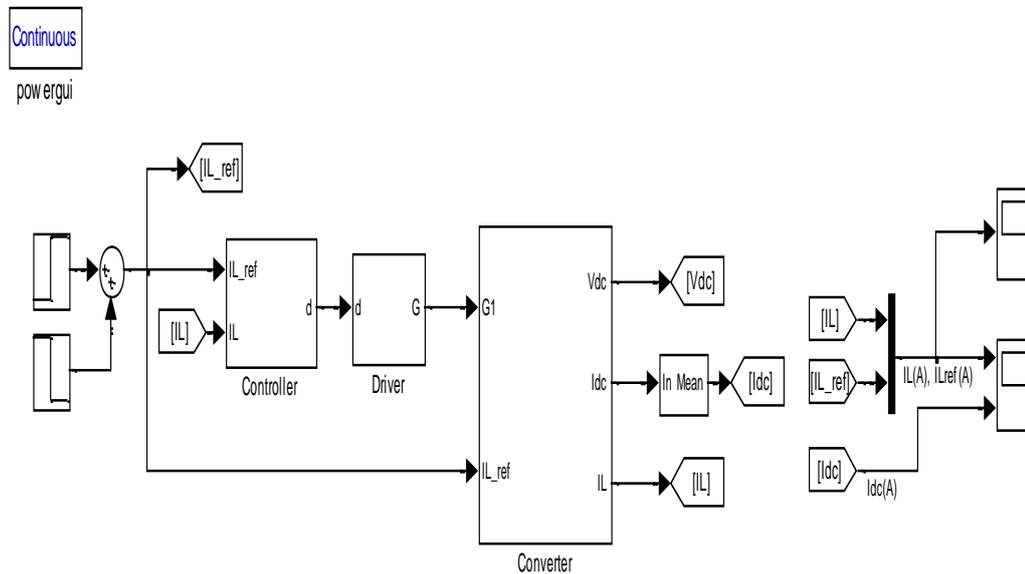


Figura 3.21: Esquema total del convertidor y controlador del banco de baterías realizado en Simulink

En la Figura 3.21 se observa el diagrama principal convertidor del banco de baterías con su respectivo controlador. La señal de referencia (I_{ref}) consta de dos señales de pulso para poder variar su valor y así ver si el controlador sigue a la referencia. El siguiente bloque es el controlador del sistema, el cual recibe la señal de corriente IL (corriente que consume o suministra el banco de baterías) y como salida del controlador, se tiene el índice de modulación que va hacia el driver, que es el que comanda los tiristores del convertidor.

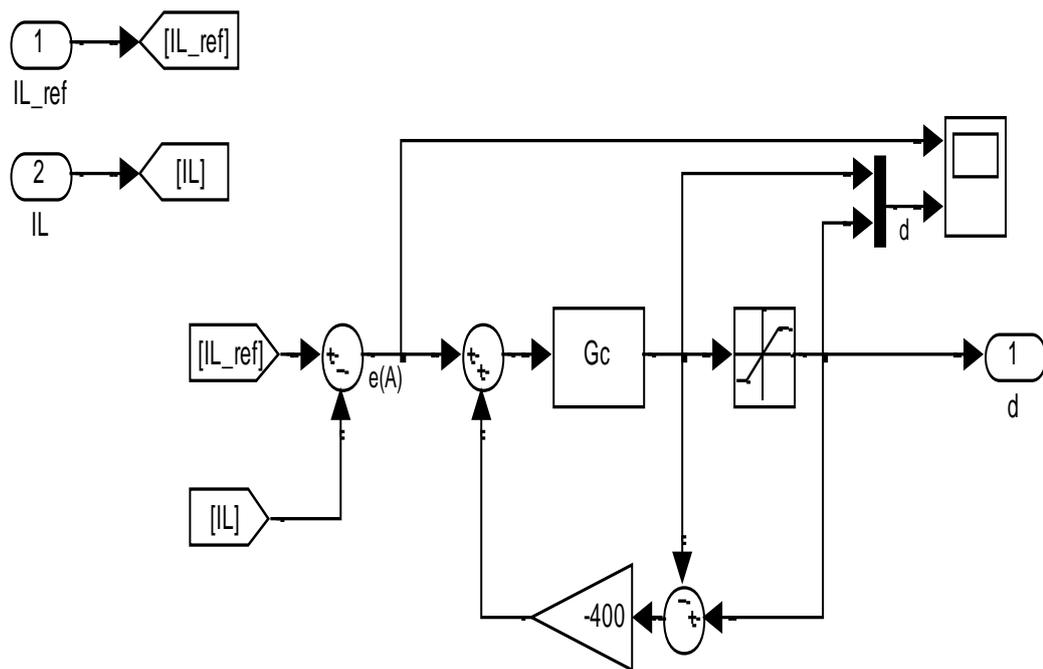


Figura 3.22: Esquema del controlador del banco de baterías

La Figura 3.22 representa el bloque controlador, el cual recibe la señal IL y la señal I_ref que son comparadas para obtener un error ($e(A)$). Esta señal ingresa al controlador, y este varía el índice de modulación. Se adicionó un bloque de saturación para proteger la planta. También se añadió un lazo *anti-windup* el cual actúa solamente cuando el controlador está sobre-modulando, con el objetivo de que en caso de que el controlador sea mucho más rápido que la planta, este no se sature y regrese rápido a su rango de operación de índice de modulación que es entre 0 y 1.

La función de transferencia de la planta es:

$$G_{p_bat} = \frac{-V_{dc_ref} / L}{s}$$

Donde:

$RL = 0.1$: Resistencia del inductor en Ohmios

$L = 300010^{-6}$; Inductancia en Henrios

$IL_{ref} = 54$; Corriente que entrega o consume el banco de baterías

$Vi_{ref} = 200$; Voltaje del banco de baterías

$VDC_{ref} = 520$; Voltaje del DC-Link

$fs = 10^3$; frecuencia de conmutación en Hz

$Ts = 1/fs$; Periodo de conmutación en segundos

$wn = 1/\sqrt{L * C} = 577.3503$ Frecuencia natural de oscilación

$Tau = L/RL = 0.0300$ Constante de tiempo

$$Gp_{bat} = \frac{-1.33 * 10^5}{s}$$

La función de transferencia obtenida para el controlador mediante la técnica del k-factor para un ancho de banda de 200Hz y un margen de fase de 60 grados es:

$$Gc_{bat} = \frac{-0.009425 s - 3.173}{0.0002132 s^2 + s}$$

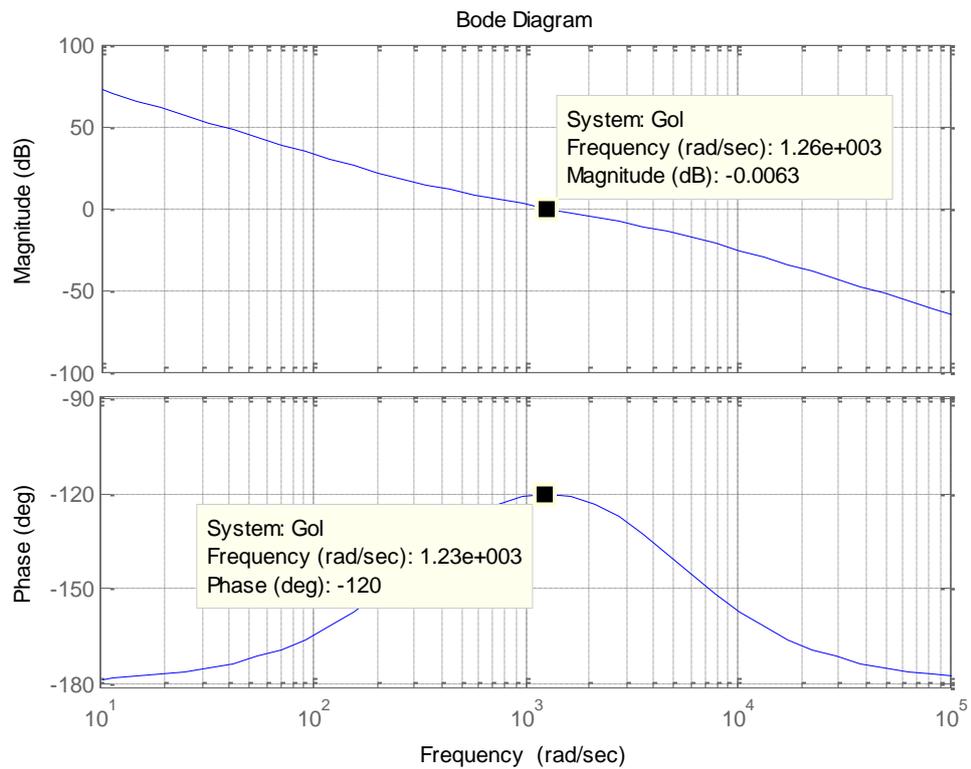


Figura 3.23: Respuesta de Magnitud y Margen de fase del controlador de banco de baterías realizados en con SisoTool

En la Figura 3.23 se muestra el diagrama de Bode de la magnitud y fase de la ganancia en lazo abierto. En ella se observa que el corte con 0dB ocurre en $1273 \frac{rad}{seg}$. Entonces dividiendo

para 2π para obtener la frecuencia en Hz:

$$\frac{1273 \frac{rad}{seg}}{2\pi rad} = 200Hz \text{ que es el ancho de banda}$$

especificado para el controlador.

El margen de fase se obtiene restando el valor que se obtiene en $1273 \frac{rad}{seg}$, pero esta vez ubicado en la gráfica de fase. En ella se observa que el valor de fase es aproximadamente -120° . Entonces el margen de fase es $-120^\circ - (-180^\circ) = 60^\circ$.

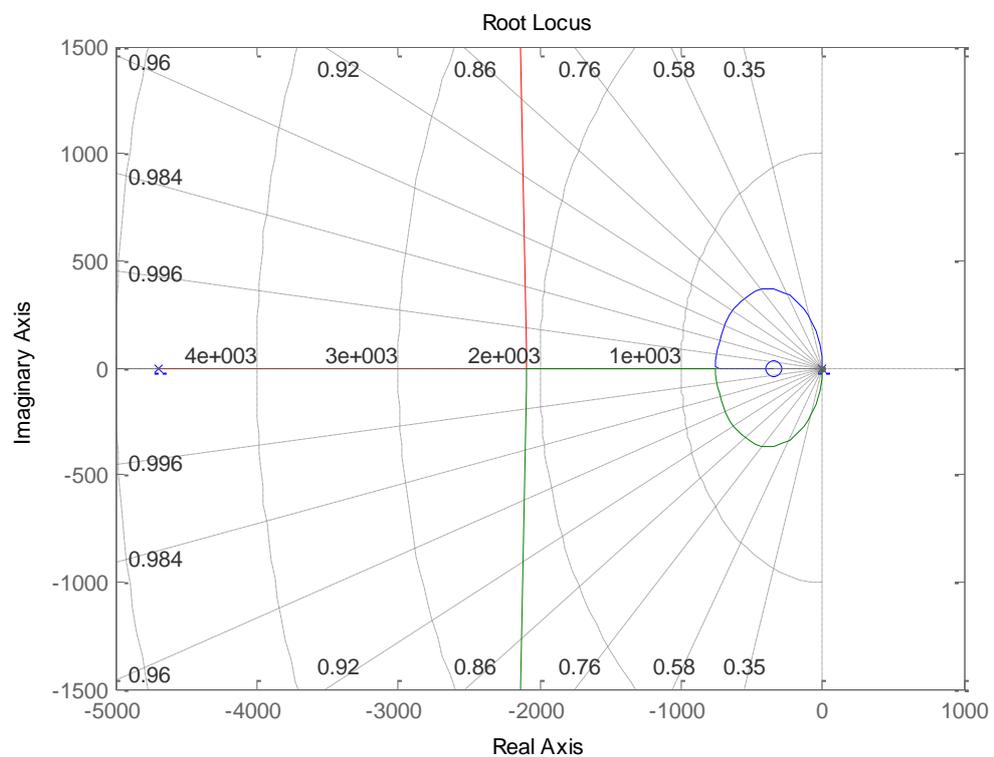


Figura 3.24: Trayectoria de las raíces del controlador de baterías

Al ubicar la ganancia igual a 1 en la trayectoria de las raíces (Figura 3.24), los polos en lazo cerrado son:

- $-2.8860 \cdot 10^3$
- $-1.2566 \cdot 10^3$
- $-0.5472 \cdot 10^3$

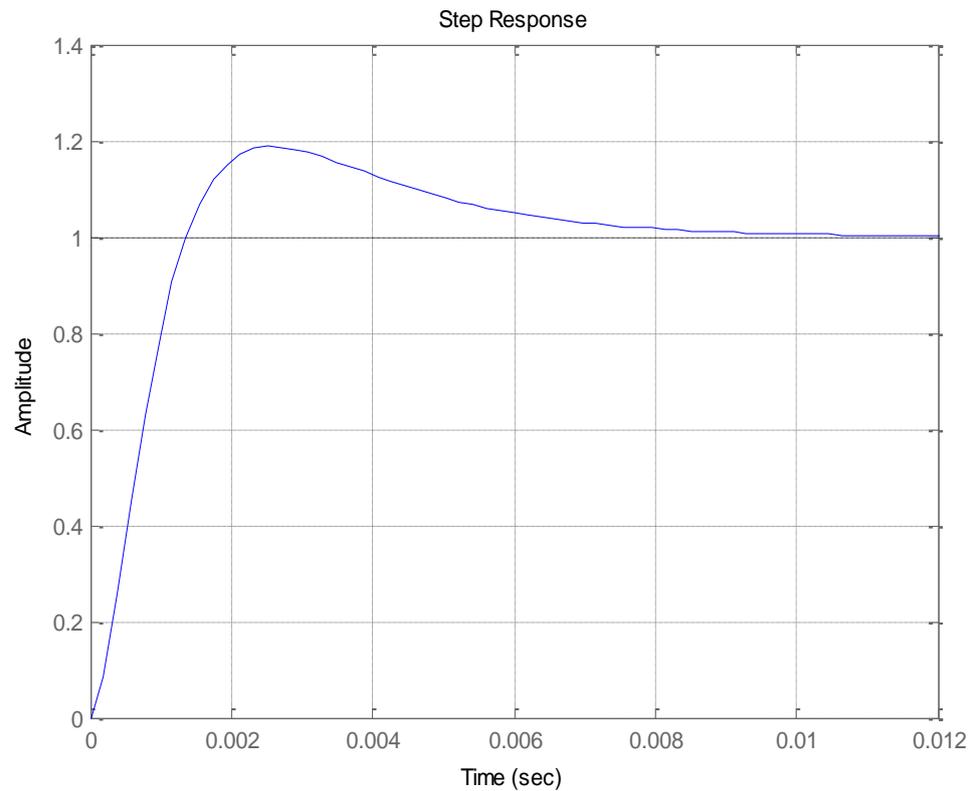


Figura 3.25: Respuesta del controlador de baterías ante una entrada paso hecho en SisoTool

La Figura 3.25 muestra la respuesta del sistema a una entrada paso. Cabe destacar que la respuesta es muy buena ya que el controlador usado para este convertidor es un integrador, por lo que en estado estable, el sistema se estabilizará en 1 debido al polo del controlador.

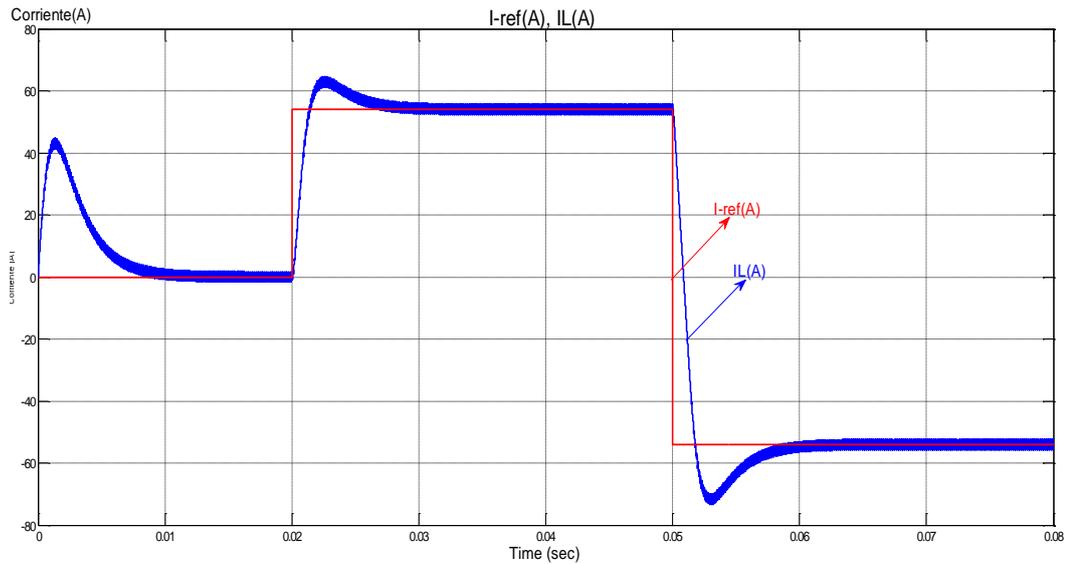


Figura 3.26: Comparación entre IL e $I\text{-ref}$ realizado en Simulink

En la Figura 3.26 se puede apreciar que a pesar de que la referencia decrece abruptamente de 54A a -54A, la señal IL sigue inmediatamente a la referencia pero sin sobrepasarlo abruptamente, es decir que la velocidad de respuesta del controlador es la apropiada. No es ni muy rápido ni muy lento.

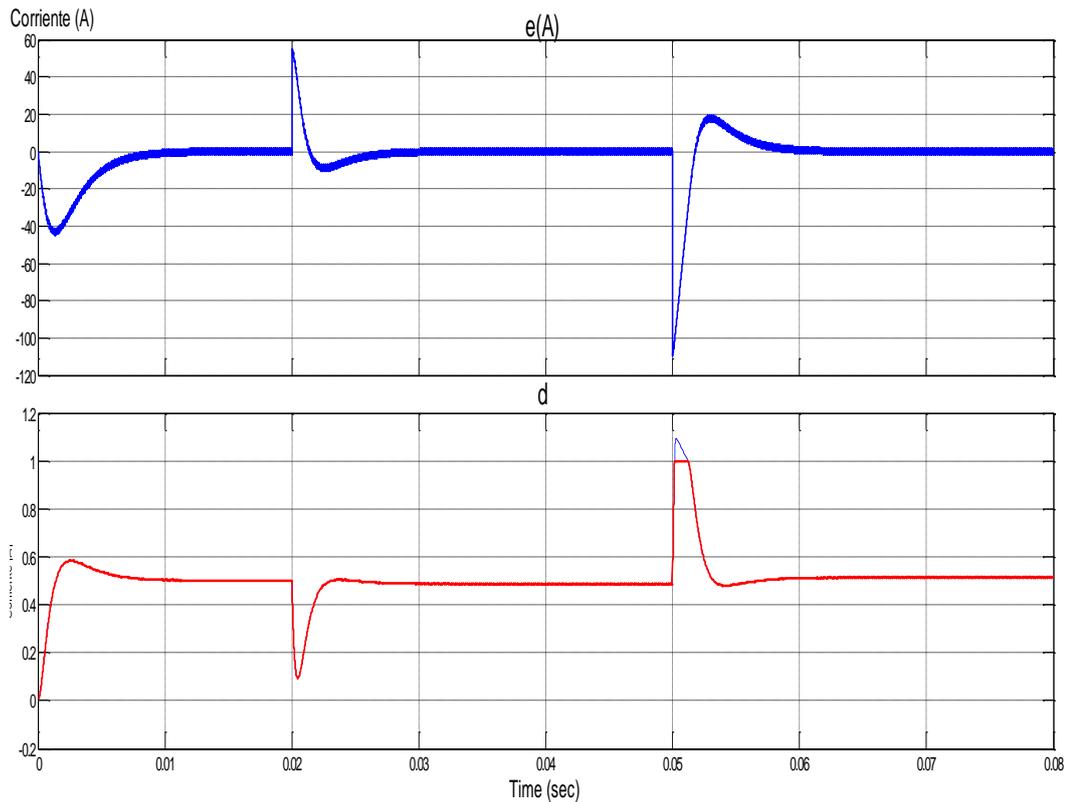


Figura 3.27: Simulación del error de corriente en IL y variación de d hecho en Simulink

En la Figura 3.27 se puede ver como el error se estabiliza hasta ser cero. Cuando hay el cambio abrupto de la señal de referencia, es decir baja de 54A a -54A, podemos apreciar una sobre-modulación del controlador, ya que el índice de modulación d se eleva a 1.1, cuando su rango de operación es de 0 a 1. Esto es excelente ya que a pesar de haber habido tremendo cambio de corriente nominal suministrando potencia a corriente nominal consumiendo potencia, a duras penas hay una sobre-modulación del 10%.

3.5.1 Diseño del Inversor Trifásico

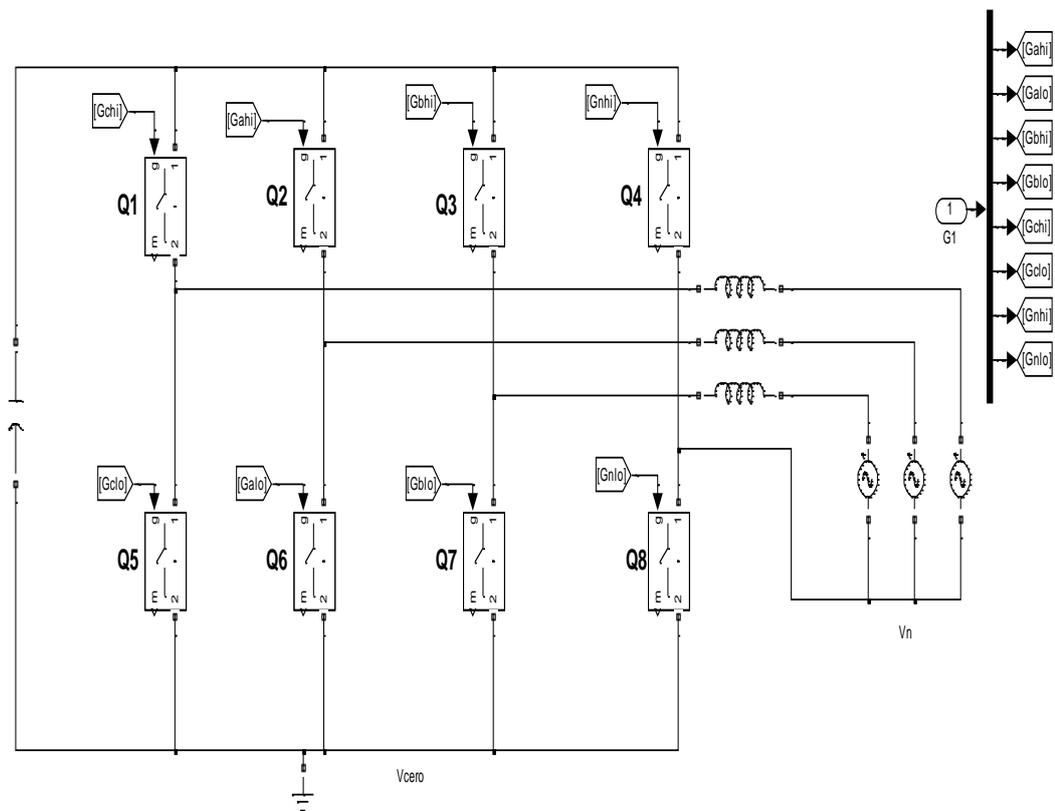


Figura 3.28: Circuitería del inversor trifásico realizado en Simulink

El inversor genera en la salida una señal trifásica balanceada que se conecta a la red trifásica a través de inductores. Dependiendo de la energía almacenada en el capacitor DC-Link, que es $E = \frac{1}{2}CV^2$, el convertidor suministra o no potencia a la red, es decir si la energía almacenada por el capacitor DC-Link es superior a la energía de referencia o de Set-Point, el convertidor suministra potencia a la red, en caso de que sea menor, no suministra potencia a la red. La Figura 3.28 muestra el circuito del inversor trifásico

El inversor consta de dos controladores. El primero regula el voltaje de entrada, es decir el voltaje del DC-Link, en 520VDC,

para lo cual recibe como entrada el voltaje en el capacitor DC-Link, e internamente, calcula la energía en el capacitor, y como salida se tiene la corriente de referencia I_{d_ref} . El segundo controlador recibe como entrada I_{grid} , que es la corriente que se está inyectando o consumiendo de la red, además recibe I_{q_ref} que es seleccionada por el usuario, e I_{d_ref} que proviene de la salida del controlador de voltaje, y tiene como salida el índice de modulación trifásico m .

El objetivo de realizar el análisis en lazo abierto es ver las corrientes que soportan los tiristores, generación de pulsos a los tiristores y que los voltajes de salida del inversor sean sinusoidales y de igual magnitud y fase que los de la red.

3.5.1.1 Simulación de la comparación entre Moduladora y Portadora para la generación de pulsos

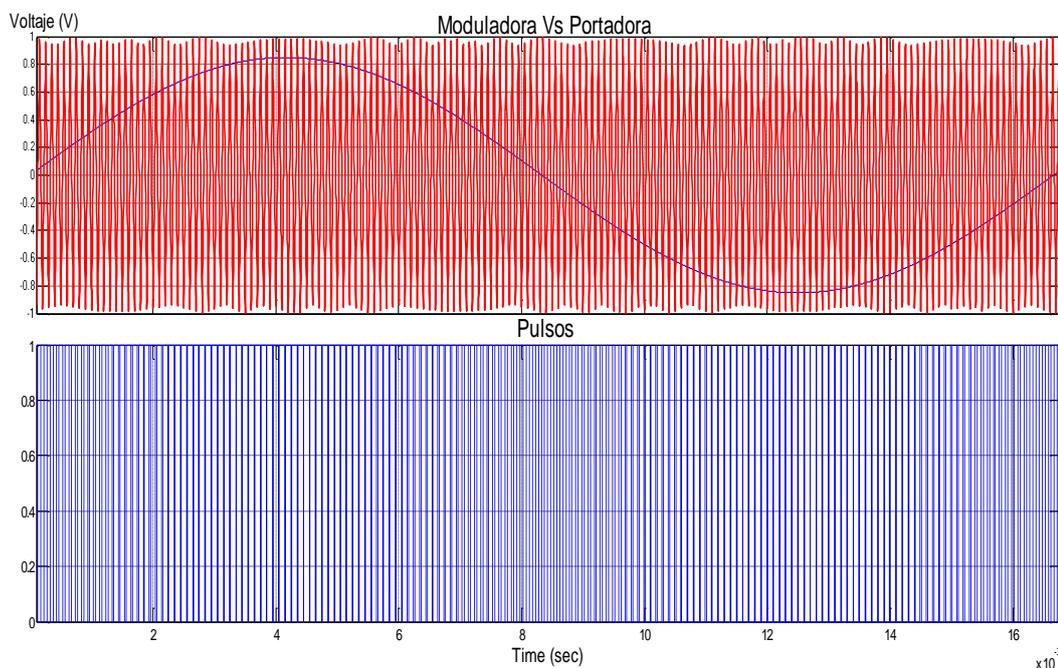


Figura 3.29: Simulación de los pulsos a los tiristores a partir de las ondas moduladoras y portadora realizados en Simulink

En la Figura 3.29, el primer plot de la gráfica muestra la señal $ma(t)$, una onda sinusoidal, que es la señal moduladora de la fase A (color azul) y la portadora, que es una señal triangular (color rojo). Ambas señales tienen una amplitud que varía entre -1 y 1. Estas señales se comparan para generar los pulsos a los tiristores. Esta señal se la observa en el segundo plot.

3.5.1.2 Simulación de la corriente que soporta cada tiristor

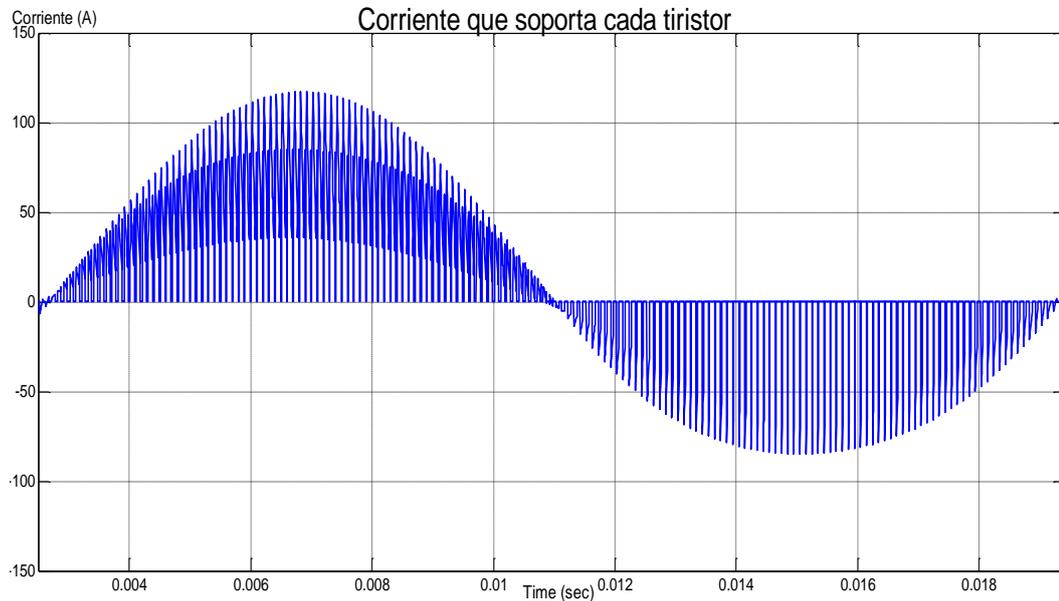


Figura 3.30: Simulación de la corriente que soporta cada tiristor realizado en Simulink

La señal que se observa en la Figura 3.30 es la corriente que pasa por cada uno de los tiristores. Entonces la corriente máxima que debe soportar cada uno de los seis tiristores del inversor es de 125A.

3.5.1.3 Simulación de los voltajes de salida del Inversor Trifásico de línea a línea

Se obtienen ondas sinusoidales debido a que el promedio, ciclo por ciclo, de la salida del inversor, es una onda sinusoidal.



Figura 3.31: Simulación de los Voltajes de Línea-Línea de salida del Inversor, hecho en Simulink

La Figura 3.31 muestra los voltajes de línea a línea que entrega el inversor. El voltaje pico-pico es de 288V. Entonces tenemos

$$\frac{288V}{\sqrt{2}\sqrt{3}} = 117V_{LN_RMS}$$

3.5.1.4 Simulación de los voltajes de salida del inversor de línea a neutro

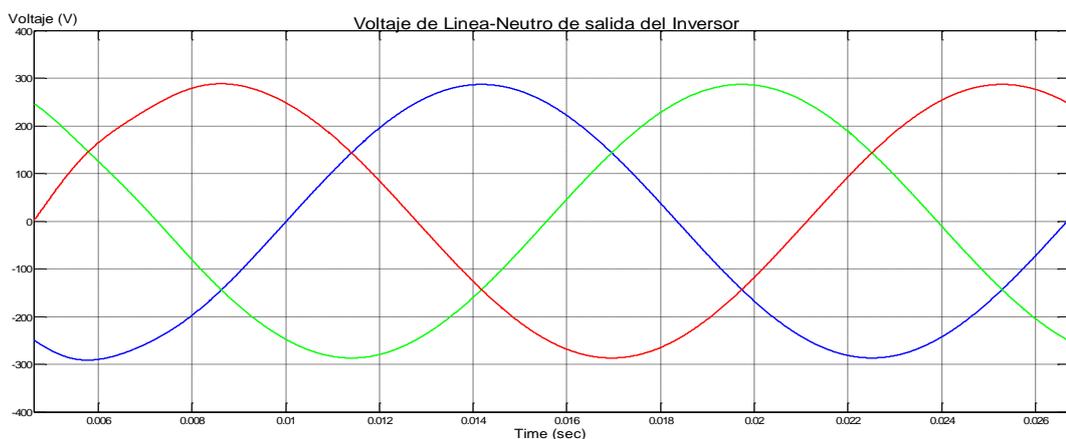


Figura 3.32: Simulación de los voltajes de Línea-Neutro de salida del inversor realizado en Simulink

La Figura 3.32 muestra los voltajes de línea-neutro de salida del inversor. El voltaje pico es de aproximadamente de 178V. Entonces

$$\text{tenemos } \frac{178V}{\sqrt{2}} = 126V_{LN_RMS}$$

3.5.1.5 Simulación del Voltaje en el DC-Link

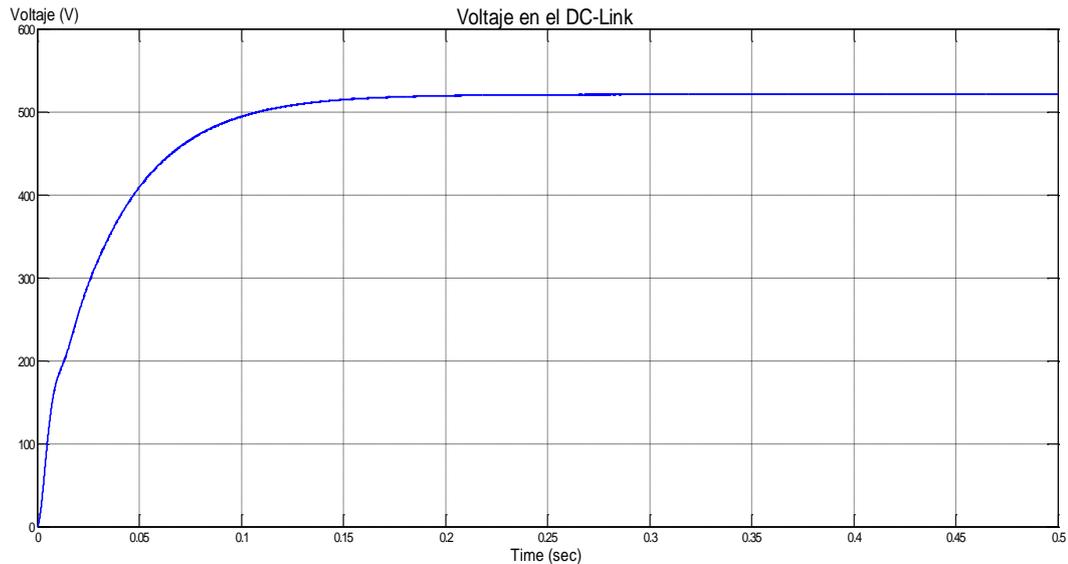


Figura 3.33: Simulación del voltaje en el DC-Link realizado en Simulink

La Figura 3.33 muestra el voltaje en el DC-Link. Cabe destacar que el rizado de este voltaje es menor al 0.1%, por lo que no se aprecia mayor diferencia en la gráfica. La condición inicial del capacitor es de 0VDC y el inversor se encarga de cargarlo hasta su voltaje nominal.

El análisis de lazo cerrado consta de dos etapas, la primera etapa para dimensionar el controlador interno, en el cual se reemplaza el capacitor DC-Link por una fuente de voltaje. La segunda etapa sirve para realizar el diseño del

controlador externo, previamente analizado el controlador interno.

3.5.2 Diseño del controlador interno

Para efectos de poder dimensionar el controlador de lazo interno, se coloca una fuente de 520VDC en el DC-Link, en vez de un capacitor. Vale la pena recalcar que el modo de operación de este inversor es con un capacitor y no con una batería y que solo para efecto de prueba del controlador interno, se le añadió la batería.

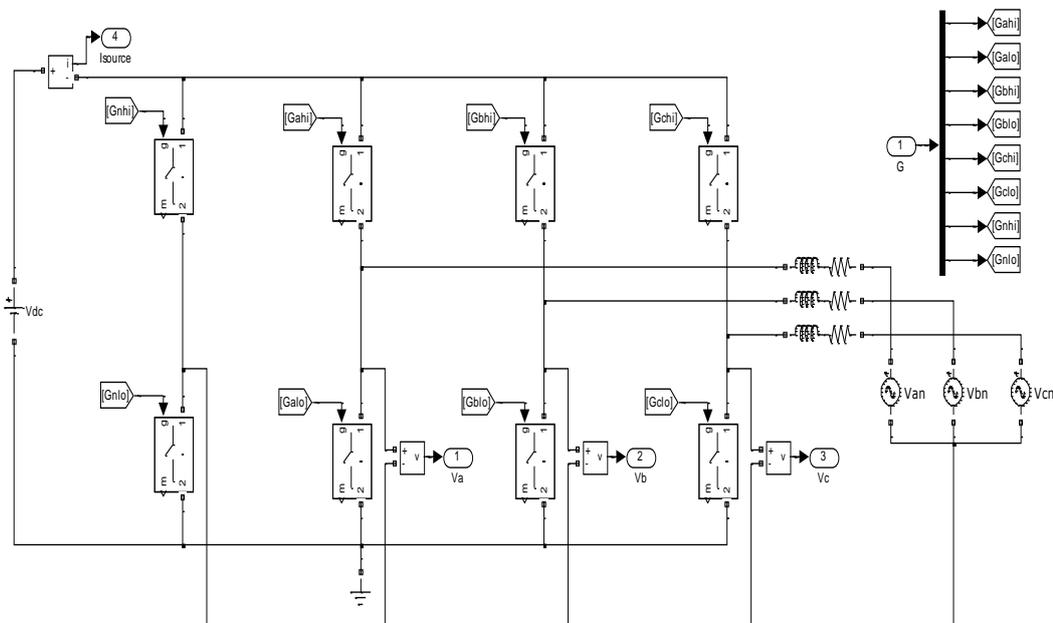


Figura 3.34: Circuito del inversor utilizado para diseñar el controlador interno realizado en Simulink

La Figura 3.34 muestra el inversor trifásico con una batería en la entrada. Este inversor consta de 4 piernas. Las piernas 2, 3 y 4 representan cada una de las tres fases del inversor, mientras que la primera pierna, se la utiliza para generar el neutro. Vale recalcar mencionar que otra forma de obtener el neutro hubiera

vido, en vez de agregar la cuarta pierna, agregar otra fuente en serie a la que ya se tiene. Y el punto de unión entre las dos fuentes sería el neutro. El inversor se conecta a la red a través de impedancias.

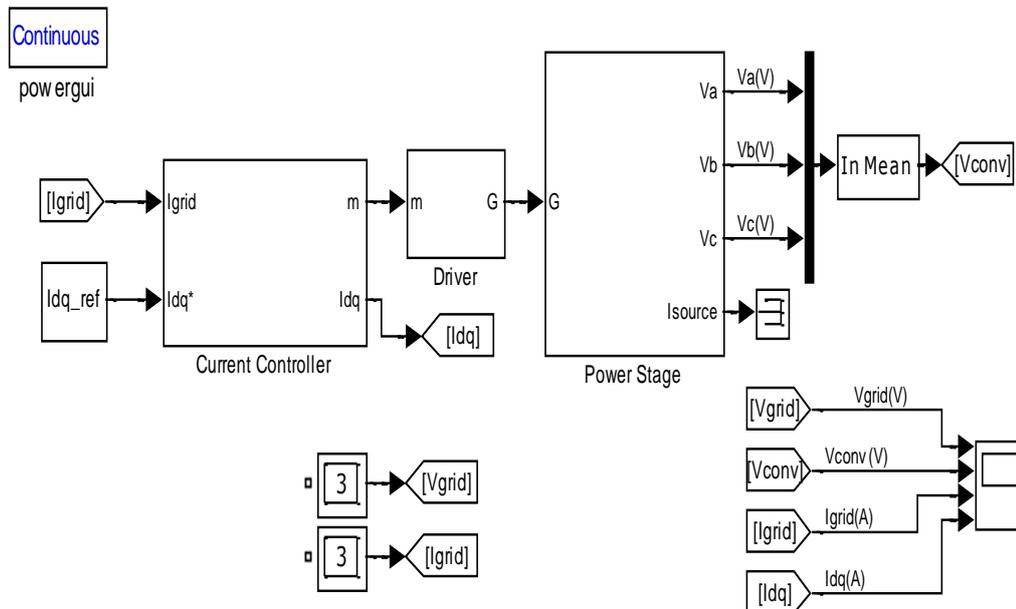


Figura 3.35: Controlador de corriente para el inversor realizado en Simulink

La Figura 3.35 muestra el esquema general de bloques de este inversor, este consta de un bloque controlador de corriente, el cual recibe la corriente de la red y las corrientes Id e Iq de referencia, y tiene como salida el índice de modulación trifásico. El índice de modulación m va hacia el driver que es el encargado de generar los pulsos a convertidor.

$$\bar{e} = L \frac{\partial \bar{i}}{\partial t} + R\bar{i} + \bar{V}$$

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} : \text{ Voltajes que entrega el inversor}$$

$$\bar{e} = \begin{bmatrix} ea \\ eb \\ ec \end{bmatrix} : \text{ Voltajes de la red}$$

$$\bar{i} = \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} : \text{ Corriente que suministra o entrega el inversor}$$

Una vez manipulada matemáticamente se tiene:

$$\bar{T}\hat{V}_{grid} = L\bar{T} \frac{\partial \bar{i}}{\partial t} + R\bar{T}\bar{i} + \bar{T}\bar{V}_{inv}$$

$$L \frac{\partial id}{\partial t} = \hat{V}_{grid} - Rid - Vd_{inv} + \omega Liq$$

$$L \frac{\partial iq}{\partial t} = -Riq - Vq_{inv} - \omega Lid$$

De donde se tiene las siguientes funciones de transferencia para las corrientes I_d e I_q :

$$Gp_inv_i = \frac{Id(s)}{Vconv_d(s)} = -\frac{1}{sL+R}$$

$$Gp_inv_i = \frac{Iq(s)}{Vconv_q(s)} = -\frac{1}{sL+R}$$

La función de transferencia obtenida para el controlador mediante la técnica del k-factor para un ancho de banda de 1KHz y un margen de fase de 60 grados es:

$$Gc_inv_i = \frac{62.83S + 1.065e005}{4.292e-005S^2 + S}$$

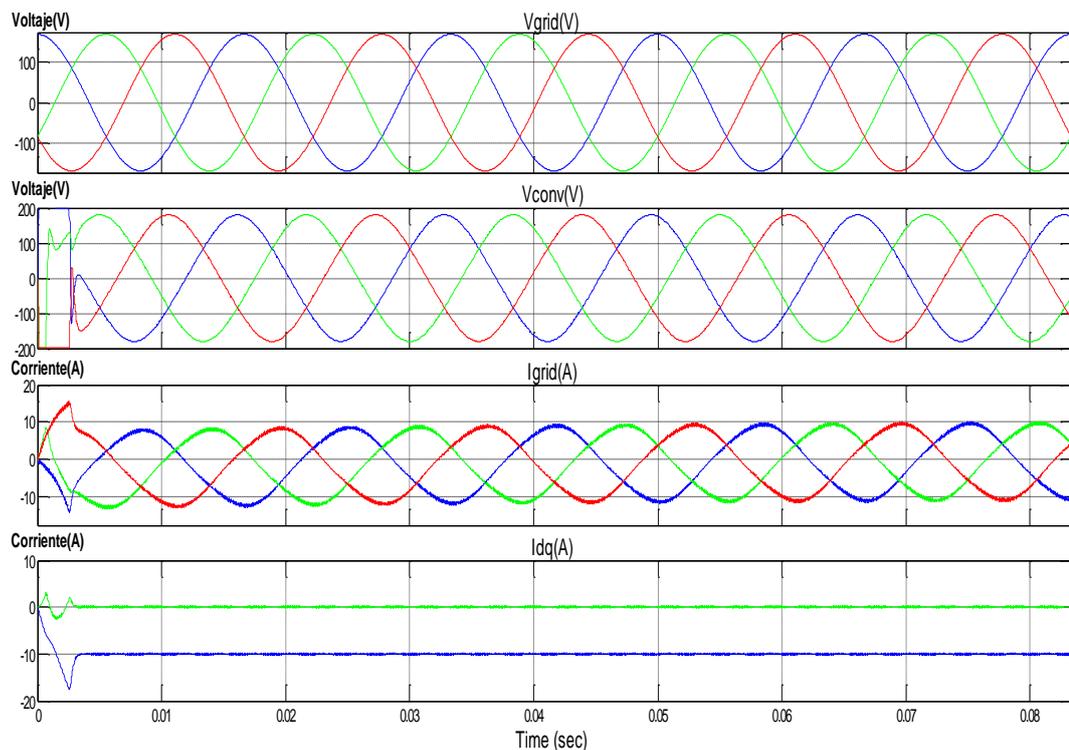


Figura 3.37: Simulación de V_{grid} , V_{con} , I_{grid} , I_{dq} del inversor trifásico realizado en Simulink

En este controlador (Figura 3.37) las corrientes I_d e I_q tienen valores de referencias (I_{d_ref} e I_{q_ref}), es decir el usuario selecciona estos

valores ya que tenemos una fuente de voltaje en el DC-Link que para efectos de simulación, nos suministra toda la potencia que queramos. Para esta simulación, se escogió una corriente I_q de 0A y la corriente I_d en 10A. Vale recalcar, que en el convertidor de dos controladores en cual detallaremos más adelante, I_q es fijada por el usuario, pero I_d depende de la energía que ingresa al capacitor.

3.5.3 Diseño del controlador externo

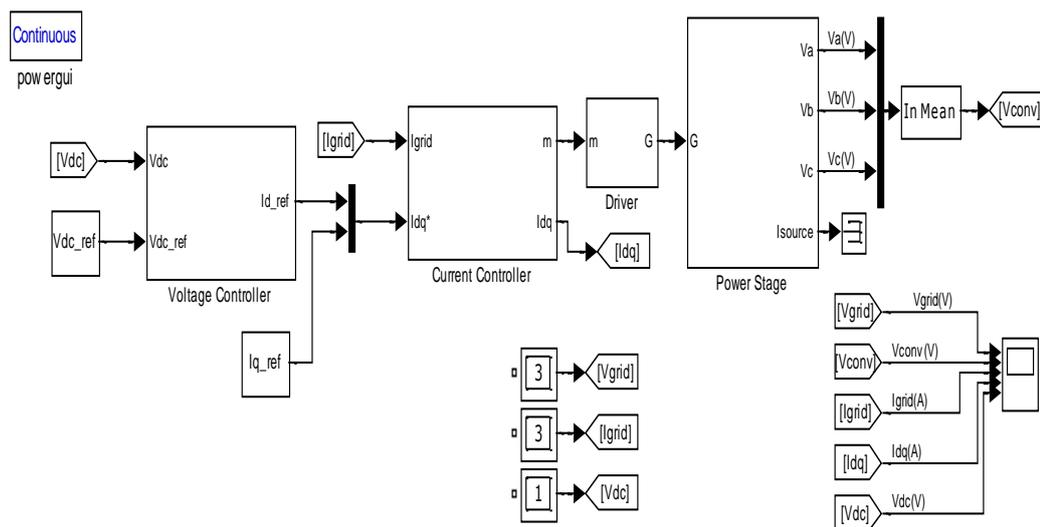


Figura 3.38: Esquema final del inversor realizado en Simulink

En la Figura 3.38 se muestra el esquema general del inversor y sus dos controladores. Los bloques controladores conforman un solo controlador en cascada. El primer bloque es el controlador de energía en el capacitor DC-Link, para esto se mide el voltaje en dicho capacitor y se aplica la fórmula $E_c = \frac{1}{2} CV^2$ y se compara con la energía de referencia, la cual es

$E_{c_ref} = \frac{1}{2} C (V_{ref})^2$. Como salida de este controlador, se tiene I_{d_ref} , que es la corriente de referencia para el siguiente controlador.

El próximo bloque es el controlador de corriente, el cual recibe I_{d_ref} que proviene del controlador de voltaje e I_{q_ref} , que es una corriente seleccionada por el usuario, en el dominio “*abc*”. Estas corrientes se transforman al dominio “*dq*”. Vale la pena mencionar que no hay componente “0” en la transformación de las corrientes debido a que el sistema es balanceado. En este bloque se realiza la comparación entre las corrientes I_{d_ref} e I_{d_grid} y también la comparación entre I_{q_ref} e I_{q_grid} , para poder generar el índice de modulación trifásico, que es el que comanda a los tiristores en el inversor. Cabe destacar que el controlador de corriente es más rápido que el controlador de voltaje. Esto se debe a que el voltaje en el capacitor varía lentamente con respecto a la corriente que circula en el inversor. Para esto, el ancho de banda del controlador de corriente es una década mayor que el ancho de banda del controlador de voltaje.

Si el voltaje del convertidor adelanta al voltaje de la red, entonces el inversor suministra potencia activa a la red, en caso contrario, el convertidor consume potencia activa de la red. Si las amplitudes de los voltajes del inversor son mayores que las amplitudes de los voltajes de la red, entonces el inversor suministra potencia reactiva a la red, caso contrario, el inversor consume potencia reactiva de la red.

3.5.3.1 Controlador de voltaje

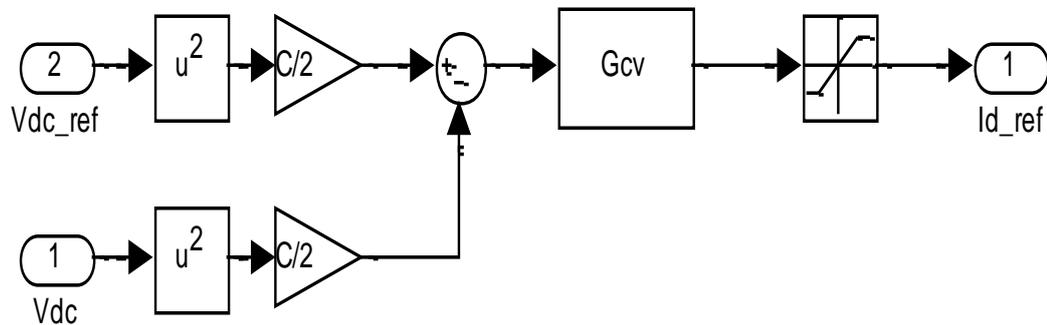


Figura 3.39: Diseño del controlador de voltaje del inversor realizado en Simulink

La Figura 3.39 muestra los bloques internos que conforman el controlador de voltaje. En ella observa que la energía contenida en el capacitor DC-Link es comparada con una energía de referencia. Dicha comparación genera un error y es llevada al controlador de voltaje, el cual genera una salida que pasa por un bloque de saturación que va desde -60A a 60A para luego generar la corriente de salida I_{d_ref} .

Al final se tiene:

$$Gc_inv_v = \frac{I_d(s)}{V_{conv_d}(s)} = -\frac{1}{sL + R}$$

$$Gc_inv_v = \frac{I_q(s)}{V_{conv_q}(s)} = -\frac{1}{sL + R}$$

La función de transferencia obtenida para el controlador mediante la técnica del k-factor para un ancho de banda de 100Hz y un margen de fase de 60° es:

$$Gc_inv_v = \frac{2.464S + 414.8}{0.0004265S^2 + S}$$

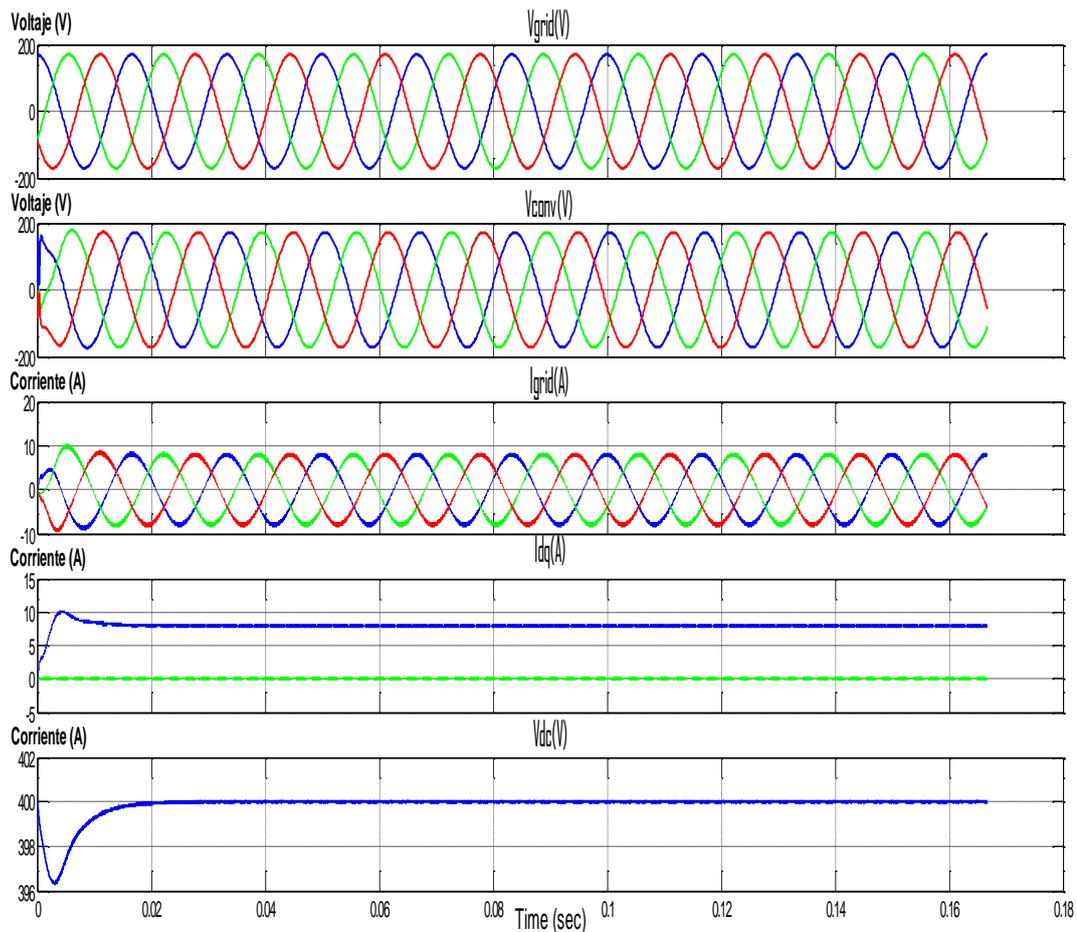


Figura 3.40: Simulación de V_{grid} , V_{conv} , I_{grid} , I_{dq} , V_{DC} del inversor realizado en Simulink

En la Figura 3.40, el primer plot muestra los voltajes de la red, desfasados 120° , con una amplitud de $170V_{LN-pico}$. El segundo plot muestra las señales de voltaje del inversor, las mismas que se desfasan 120° y tienen una amplitud de $170V_{LN-pico}$. El tercer plot muestra las corrientes de la red y están en fase con el voltaje de la red y tienen una amplitud de 8.4A. El cuarto plot indica las corrientes I_d e I_q de la red. El último plot muestra el voltaje en el DC-Link que es fijado en 520VDC.

Capítulo 4

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA UNIFICADO

Este capítulo consiste en verificar el funcionamiento correcto de los tres convertidores interconectados entre sí, así mismo hay que analizar y realizar una simulación general de todo el proceso, de tal forma que todos los controladores alcancen el estado estable. Especificar las reglas del sistema en conjunto, modos de operación, protección, arranque, contingencias, de donde viene la referencia de la batería y del PV.

4.1 Esquema del sistema completo

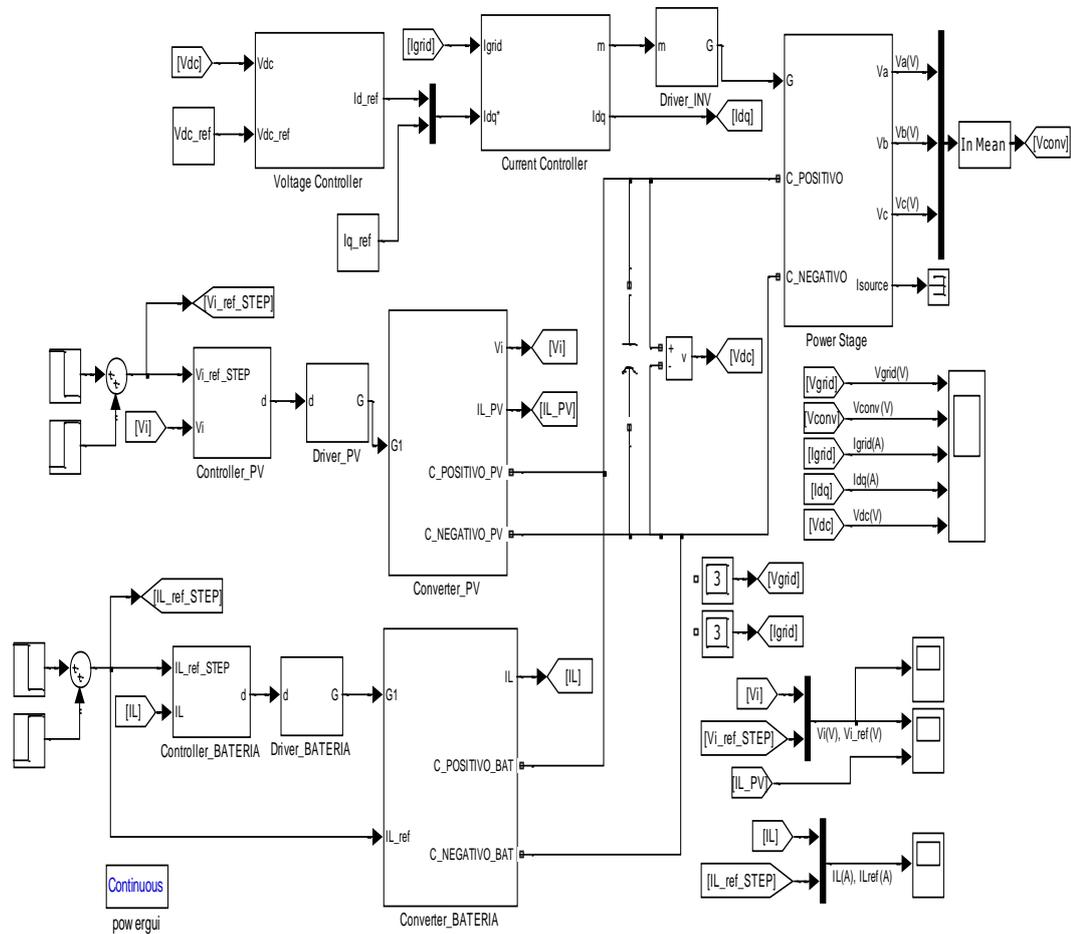


Figura 4.1: Unión de los tres convertidores realizado en Simulink

La figura 4.1 une los tres convertidores que se analizó en el capítulo tres por separado, la hipótesis que se planteó desde un inicio era diseñar estos convertidores por separado para después simularlos en conjunto y que alcancen el estado estable.

4.2 Simulaciones del sistema completo

A continuación se procederá a realizar dos simulaciones del sistema completo, donde se agregan perturbaciones y cambios de referencia en los controladores del convertidor del banco de baterías, convertidor del PV e inversor.

4.2.1 Simulación general cambiando valor de referencia de voltaje en el PV y agregando una perturbación en la corriente que inyecta el PV

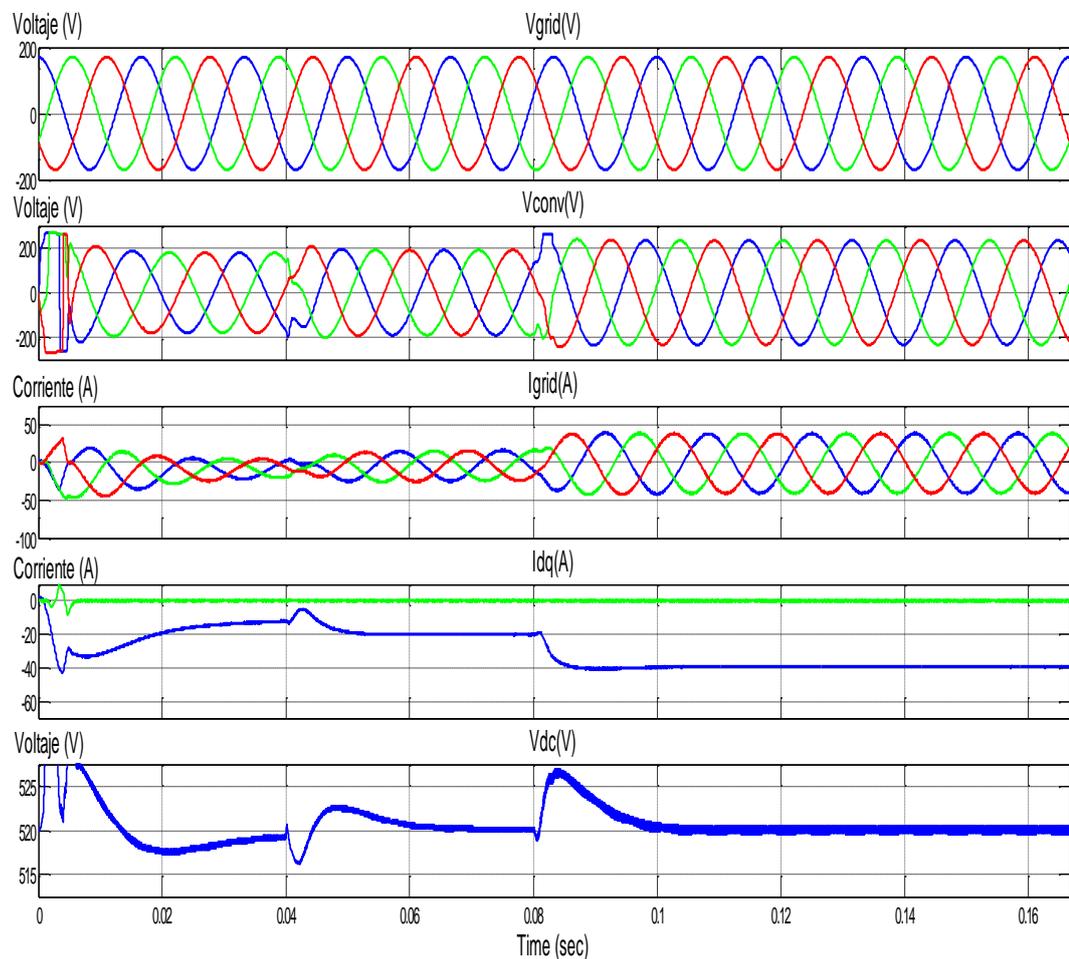


Figura 4.2: Simulación de V_{grid} , V_{conv} , I_{grid} , I_{dq} , V_{dc} aplicando perturbaciones en la corriente que inyecta el panel y cambio de referencia en el voltaje V_i . Hecho en Simulink

La Figura 4.2 tiene 5 sub-plots. El primer sub-plot representa el voltaje en la red. El segundo sub-plot representa el voltaje a la salida del inversor, vale la pena recalcar que este es el gráfico más importante y si este gráfico está bien, (es decir tenemos tres voltajes perfectamente sinusoidales, desfasados 120° entre sí) significa que todo el sistema funciona perfectamente. Cuando se añaden perturbaciones, estos voltajes se saturan pero inmediatamente se estabilizan. El tercer sub-plot indica la corriente que está entregando el inversor a la red o que está consumiendo de la red (dependiendo del índice de modulación trifásico), esta corriente es perfectamente sinusoidal debido a que el voltaje del convertidor también es sinusoidal. El cuarto sub-plot representa la corriente I_d e I_q , que son las transformaciones de la corriente I_{grid} pero en el dominio “dq”. El quinto sub-plot es el voltaje en el DC-Link, este voltaje también es importante, porque este es el que enlaza los tres convertidores.

Cabe mencionar que en esta simulación aplicamos una perturbación y un cambio de voltaje de referencia. La perturbación es de corriente de 0A a 54A (corriente nominal) en el panel fotovoltaico y el cambio de referencia de voltaje es de 100V a 200V. A pesar de que el sistema estuvo expuesto a estas perturbaciones, este se estabilizó.

4.2.2 Simulación general aplicando cambio de referencia en la corriente en el convertidor de la batería, cambio de referencia en el voltaje del PV y perturbación de corriente en el convertidor del PV

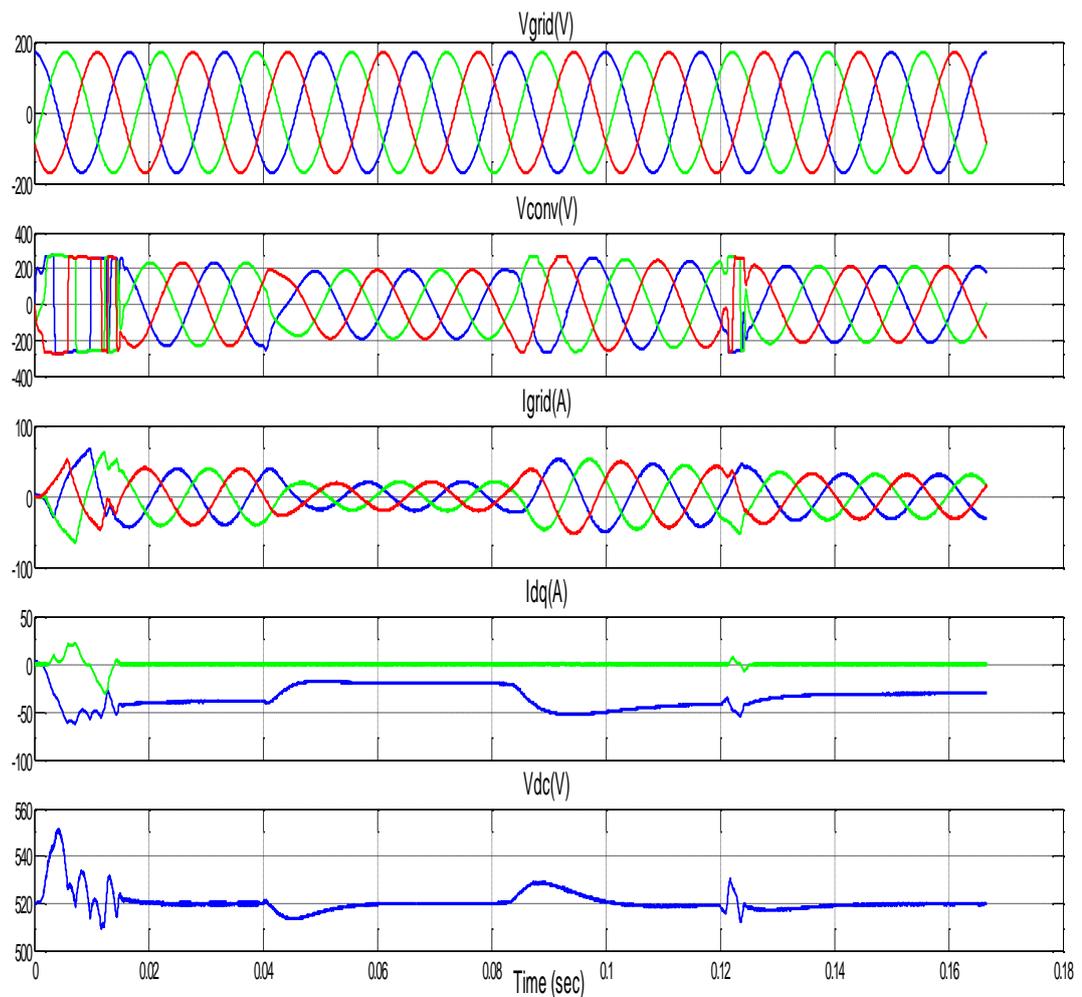


Figura 4.3: Simulación de V_{grid} , V_{conv} , I_{grid} , I_{dq} , V_{DC} aplicando perturbaciones en la corriente que inyecta el panel y cambio de referencia en el voltaje V_i y cambio de referencia en la corriente de la batería. Hecho en Simulink.

Se procedió a seguir realizando perturbaciones, en este caso se realizaron 3 (Figura 4.3). A los 4ms se aplica una perturbación de corriente en el controlador de la batería, decayendo desde 54A (corriente nominal) hasta 27A. A los 8ms se aplica otra

perturbación de corriente, pero esta vez en el controlador del panel fotovoltaico, este step de corriente va desde 0A hasta 27A. Y por último, a los 12ms se aplica una perturbación de voltaje en el controlador de voltaje en el panel fotovoltaico. Esta perturbación va desde 150V a 200V. Incluso, después de aplicar estas tres perturbaciones a diferentes tiempos, al final el sistema se estabiliza.

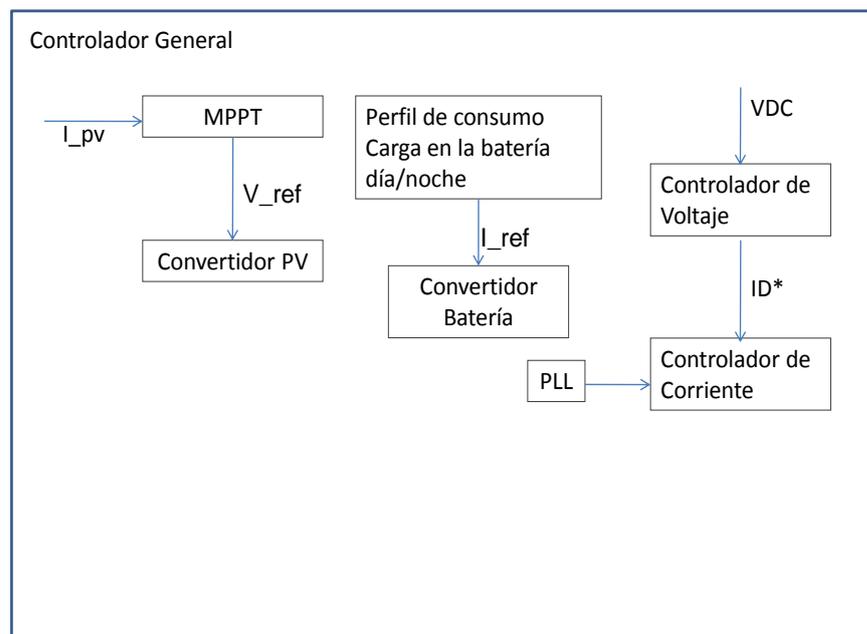


Figura 4.4: Esquema del sistema usando un controlador principal

En este proyecto se ha enfocado en el diseño de controladores analógicos, pero vale recalcar que existe un controlador maestro, el cual es lento, pero tiene muchas funciones. Vale mencionar que el funcionamiento del controlador principal debe estar sujeto a un acuerdo económico que se llegue con la empresa eléctrica. Llegar a un consenso de en las horas pico, la empresa eléctrica nos cancele un valor de $1.2 \cdot X$, donde X representa el valor en KW/h. En el caso de se puede vender

potencia a la red en las horas pico y se haya fijado el valor anterior, se requiere un medidor de luz que sea bidireccional.

4.3 Análisis de Contingencia

Es importante poder vender energía a la red, siempre y cuando se llegue a un acuerdo económico. En promedio vamos a consumir potencia de la red, pero la idea es consumir potencia cuando la demanda es baja y suministrar potencia cuando la demanda es alta. Es por esta razón que se realiza un análisis del funcionamiento del sistema para en el caso en que se llegue a un acuerdo con la empresa eléctrica y se realiza otro análisis para el caso en que no se llegue a un acuerdo. Además se explica la secuencia que debe seguir el sistema cuando existe una perturbación en la red.

4.3.1 Al momento de arrancar el sistema en caso de que no haya acuerdo con la empresa eléctrica

- Chequear condición inicial de voltaje en el capacitor DC-Link, este capacitor debe de estar cargado a voltaje nominal que es de 520VDC para que el sistema pueda arrancar. En caso de que no esté cargado, el controlador maestro debe de activar un circuito de carga inicial del capacitor pero abriendo el capacitor de los demás convertidores.
- Una vez que el capacitor DC-Link se encuentra cargado a voltaje nominal, el controlador maestro debe de activar el inversor, ya que el inversor es el controlador que regula el voltaje en el DC-Link, si este voltaje no es regulado, los otros dos convertidores no van a arrancar.
- Después de 1 minuto y es de día, el siguiente convertidor en activarse es el del PV. El controlador

principal se da cuenta si es de día o no, debido a una fotocélula y a un reloj propio, el convertidor trabaja de 7:30 hasta 17:30. Si la corriente promedio que entrega el PV es menor al 5 % de la corriente nominal es decir menor a 2.7A durante 5 minutos, se desconecta el convertidor del PV y se lo vuelve a activar después de 30 minutos.

- Después de 1 minuto se activa el convertidor de la batería. Se mide la corriente que entrega el PV, con lo cual obtenemos la potencia que suministra el panel, se mide la corriente que consume la casa, con lo cual obtenemos la potencia que consume la casa, la diferencia de potencia es la potencia que queda para suministrársela a las baterías, es decir el I_{ref_bat} es variable, siempre y cuando la batería este descargada.

4.3.2 Arranque del sistema en caso de que haya acuerdo con la empresa eléctrica

Se usa un programa que esté encargado de monitorear la demanda de potencia eléctrica tanto de la casa como el de la red. En función de estas variables, el programa mismo se encarga de decidir, cuando suministra potencia a la red o no y cuando lo hace desde el panel o de las baterías. Esta información es enviada al controlador principal.

4.3.3 Para apagar el sistema:

- Desconectar el convertidor del PV.
- Después de un minuto desconectar el convertidor de la Batería.
- Después de un minuto desconectar el inversor.

- Activar circuito de descarga del capacitor DC-Link (por seguridad)

4.3.4 Fallas en la red

En caso de falla en la red, o distorsión de la forma de onda de la misma se desconectan todos los convertidores del DC-Link y se abre la red del inversor a través de contactores, hasta que el controlador principal detecte que la red se ha estabilizado nuevamente.

En caso de que ocurra una perturbación tal que afecte significativamente el voltaje del capacitor DC-Link y esto a su vez cause una desestabilización de uno o más controladores, el controlador principal ordena el apagado y reseteo del sistema, luego lo arranca pero empieza a cargar el capacitor DC-Link hasta su valor nominal y comienza nuevamente el ciclo de arranque del cual se hablo en el apartado 4.5

4.4 Controlador Principal

Nuestro sistema de generación, necesita un administrador, que comande el encendido y apagado de los convertidores, que decida si el convertidor de las baterías consume o suministra potencia, que se dé cuenta si es de día o de noche, que tome en cuenta los convenios con la empresa eléctrica sobre el precio del Kilovatio hora. El controlador principal es el más importante de todos los controladores, ya que es el que regulara el voltaje en el banco de paneles dependiendo del MPPT con lo cual mejora la eficiencia de los mismos. También es el que indica el proceso de activación y desactivación del sistema. Es el que toma decisiones en caso de que la red local se caiga. Es el que indica cuando las baterías consumen o cuando suministran potencia, en base a un análisis estadístico de demanda de consumo eléctrico de la casa, de la red y de la tarifa de electricidad en horas pico y en horas no pico.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones de este proyecto son:

1. Al momento de diseñar los controladores de cada convertidor, se lo hizo mediante modelos matemáticos donde no se contemplan los efectos de las conmutaciones, se planteo la hipótesis de que si matemáticamente funcionaban estos controladores, al momento de simular el diagrama general con todos los convertidores conmutando a sus respectivas frecuencias, los controladores funcionarían y alcanzarían el estado estable bajo los efectos de dicha conmutación, esto se comprueba con el análisis y simulaciones del capítulo 4.
2. Durante las simulaciones nos dimos cuenta que si el capacitor del DC-Link no tenia carga inicial el sistema no arrancaba, es por esta razón que se necesita un circuito independiente que funcione solo en el arranque para que cargue al capacitor a su valor nominal (520VDC) y una vez cargado el capacitor se desconecte.
3. Debido a que los tres convertidores que estamos analizando ante una perturbación o ante un cambio de referencia responden correctamente es decir siguen a la referencia con un overshoot relativamente bajo y rápidamente, podemos concluir que la técnica del k_{factor} es completamente válida para el diseño de controladores de convertidores estáticos.
4. La corriente que inyecta el inversor a la red es sinusoidal y está en fase con el voltaje de la red, según las simulaciones. Comprueba que modulación es correcta
5. De las simulaciones se puede decir que el valor calculado para el enlace DC fue el apropiado, pues el voltaje que cae en el inductor incide en el voltaje máximo que puede salir del convertidor.

6. A medida que aumentan los valores de capacitancia del DC-Link o de inductancia en los inductores que conectan el inversor con la red, mejora el rizado en el voltaje DC-Link y en la corriente a través del inversor pero a cambio de eso hay mayores pérdidas y la respuesta de frecuencia de la planta es más lenta, según pruebas realizadas al momento de determinar cada uno de los componentes.

Las recomendaciones de este proyecto son:

1. Una limitación del proyecto es que funciona siempre y cuando haya energía en la red, ya que el inversor regula el voltaje en el capacitor DC-Link y si no hay red, este voltaje no puede ser regulado y se afectan los otros dos convertidores. Se podría hacer que el sistema funcione desconectado de la red, para lo cual hay que hacer cambios en el controlador de las baterías para que no solo regule la corriente que consume o suministra el banco de baterías sino también para que controle el voltaje en el DC-Link. Este cambio es muy fácil pero no abarca en nuestro proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Pierre Sabaty, Robert; Arquitectura Solar: Concepto, cálculo y ejecución de edificaciones solares; Primera Edición; 1982
- Fink, Donald; Wayne, Beaty; Manual de Ingeniería Eléctrica; Décima tercera edición; Mc Graw Hill; Tomo 1; Mexico; 1996
- Fink, Donald; Wayne, Beaty; Manual de Ingeniería Eléctrica; Décima tercera edición; Mc Graw Hill; Tomo 2; Mexico; 1996
- Boylestad, Robert; Nashelsky, Louis; Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos; Octava edición; Pearson Education; Mexico; 2003
- Gonzalez-Longatt, Francisco M.; ENTENDIENDO LA TRANSFORMACIÓN DE PARK; Junio 2004 1

Internet

- Ortega Mónica; Licenciada en Ciencias Ambientales; Tema: Energías Renovables; Disponible en:

<http://www.enbuenasmanos.com/articulos/muestra.asp?art=243>,
02/Octubre/2010

- Suni Solar S.A; con la energía de siempre a su alcance; Disponible en: http://www.sunisolar.com/index.php?option=com_portfolio&id=3&view=item, 15/Septiembre/2010
- Mihailovic, Zoran. **“Modeling and control design of VSI fed PMSM drive system with active load”**. Master Thesis, 1998. Disponible en: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-031899-212402/>, 16/Octubre/2010
- R. H. Park, **“Two-reaction theory of synchronous machines,”** *AIEE Transactions*, vol. 48, 1929, p.716., 29/Octubre/2010
- E. Clarke, **“Circuit Analysis of AC Power Systems”**. New York: Wiley, 1950, vol. I., 04/Octubre/2010