

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MODELO Y SIMULACIÓN DE UN GENERADOR
UNDIMOTRIZ TIPO OSCILADOR DE ARQUÍMEDES
Y SU SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA.

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA

Presenta:

Luis Antonio González Sánchez

Director de Tesis:

Dr. Norberto García Barriga

Junio 2012

*Con todo mi amor y esfuerzo a mis Padres, a mi novia y
mis Hermanos.*

Agradecimientos

Primeramente quiero darle gracias a Dios, por haberme puesto en mi camino a la gente que me ayudo a realizar esta tesis y a fortalecer mi corazón e iluminar mi mente.

Deseo expresar mi gratitud a mi Familia que siempre estuvo apoyandome en todo momento.

A mi novia y fiel compañera Yvette que siempre me apoyo y me dio la fuerza necesaria para lograr esta tesis.

Al Dr. Norberto Gracia Barriga por su apoyo, consejos y confianza que ha brindado durante el desarrollo de esta tesis.

Agradesco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, por el soporte económico brindado para la realización de este trabajo de investigación.

A los sinodales, Dr. Juan Anzures Marín, Dra. Elisa Espinosa Juárez, Dr. Manuel Madrigal Martínez y al Dr. J. Jesús Rico Melgoza, por sus valiosas aportaciones y sugerencias.

Al M.I. Isidro Lazaro Castillo, por su amistad, confianza y apoyo.

A todos los amigos que hice durante el período de estudios de la maestría, gracias por su ayuda, amistad. y los momentos buenos que compartieron conmigo.

Resumen

En esta tesis se presenta la simulación y análisis de un generador undimotriz (GU) tipo oscilador de Arquímedes y su sistema de conversión de energía. El oscilador de Arquímedes consiste de un cilindro hueco y un flotador. Mientras que el cilindro se encuentra lleno de aire y anclado al suelo marino, el flotador se mueve verticalmente. Cuando se aproxima una ola, el flotador se hunde debido al incremento del peso de la columna de agua, al mismo tiempo que la presión del aire en el cilindro se incrementa. Cuando el valle de la ola se encuentra arriba del oscilador de Arquímedes el peso de agua se decrementa y el flotador sube por la presión del aire en el interior del cilindro. Esta energía de la ola se puede convertir a energía eléctrica mediante el uso de generadores lineales de imanes permanentes. Este generador oscila al acoplar su traslador con el flotador del oscilador de Arquímedes y, por ende la dirección y velocidad del movimiento del traslador varia. Como consecuencia, la frecuencia y magnitud del voltaje inducido, corrientes del estator y la potencia de salida del generador también varían. Esta característica del generador lineal de imanes permanentes no permite la conexión directa con el sistema eléctrico de potencia. Por lo tanto, se requiere incorporar una etapa de acoplamiento que permita integrar el GU al sistema de potencia.

El modelo de generador lineal de imanes permanentes se implementa en este trabajo en el marco de referencia ABC usando tres ecuaciones diferenciales ordinarias. La dinámica de la parte mecánica asociada al oscilador de Arquímedes se modela usando un par de ecuaciones diferenciales que representan la posición y velocidad del flotador. Debido a que la potencia de salida del GU fluctúa como consecuencia de la variación de la frecuencia y amplitud del voltaje de salida del generador, se implementa una etapa basada en electrónica de potencia para acoplar el GU con la carga eléctrica. En este trabajo se implementa esta etapa utilizando un rectificador trifásico de diodos y un inversor trifásico con esquema de conmutación PWM. El sistema de control del inversor PWM consta de controladores PI, los cuales se sintonizan utilizando el método de Bode analítico y modelos de pequeña señal. La implementación del generador undimotriz, los convertidores de electrónica de potencia y el sistema de control se realiza en el programa Matlab Simulink. Se presentan casos de estudio con grupos de GU acoplados en paralelo. El arreglo de 3 GUs presenta mejoras en la distorsión armónica comparando con el esquema basado únicamente dos GUs. Los resultados reportados en esta tesis demuestran que el nivel de distorsión armónica total se encuentran por debajo de 2.0 %.

Abstract

The simulation and analysis of a wave energy generator (WEC) based on an Archimedes Wave Swing (AWS) and its energy conversion system is presented in this thesis. The Archimedes Wave Swing oscillator consists of a hollow cylinder and a floater and the cylinder is filled with air and fix to the sea bottom, the floater moves vertically. When a wave approaches, the float sinks due to increased of the weight of the water column, while the air pressure in the cylinder increases. If the valley of the wave is above the Archimedes oscillator the weight of water is decreased and moves up by the pressure on the air inside the cylinder. This wave energy can be converted to electric power by using linear permanent magnet generators. This generator reciprocates when its translator is coupled to the floater of the Archimedes Wave Swing and, as a consequence, the direction and speed of the motion of the translator vary. As a result, the frequency and magnitude of the induced voltage, stator currents and the output power of the generator also vary. This feature of the linear permanent magnet generator avoids the direct connection with the power system electric. Therefore, it is necessary to incorporate a coupling stage that allows to integrate the WECs to the power system.

The wave energy converter (WEC) comprises a permanent magnet linear generator, which is modeled in the ABC frame of reference using three ordinary differential equations. The motion equation of the Archimedes Wave Swing is modeled with a set of two ordinary differential equations that represent position and velocity of the translator. Since the output power of the WEC fluctuates due to the variation of the generator output voltage in terms of amplitude and frequency, a power electronics stage for coupling the WEC system to the isolated load is required. In this work, a three-phase bridge diode rectifier and a three-phase PWM inverter are implemented. The control system of the PWM inverter is designed using the Analytical Bode method and small signal models. The WEC system, power electronic converters and control system are implemented in MatLab/Simulink. Case studies involving groups of WECs operated in parallel are reported. Improvements on the power quality of a system consisting of three AWSs connected in parallel with respect to a configuration with only two AWSs are presented. The total harmonic distortion reported in this work using three WECs operated in parallel is below 2.0 %.

Índice general

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xv
Lista de Tablas	xix
Nomenclatura y Abreviaciones	xxi
Publicaciones	xxiii
1. Introducción	1
1.1. Revisión del estado del arte	2
1.2. Objetivo general	6
1.2.1. Objetivos particulares	6
1.3. Justificación	7
1.4. Metodología	8
1.5. Descripción de capítulos	10
2. Definición del problema	11
2.1. Esquema general del sistema de generación undimotriz	11
2.1.1. Principio de funcionamiento del oscilador de Arquímedes	12
2.1.2. Principio de funcionamiento del generador lineal	14
2.1.3. Olas oceánicas	16
2.1.4. Clasificación de generación de energía de los océanos	18
2.1.5. Clasificación de convertidores undimotrices	19
2.1.6. Generadores lineales	20
2.2. Topologías de parques de generación conectado a la red eléctrica	22
2.3. Sumario	27
3. Generador de Energía Undimotriz	29
3.1. Modelado del GU en el marco de referencia ABC	29
3.1.1. Ecuaciones del oscilador de Arquímedes	29
3.1.2. Caracterización de la componente F_{wave}	30

3.1.2.1. Representación espectral de las olas aleatorias . . .	32
3.1.3. Ecuaciones del generador lineal	34
3.2. Implementación en Simulink	36
3.2.1. Convertidor GU conectado a una carga resistiva	36
3.2.2. Convertidor GU conectado a una carga resistiva-inductiva .	38
3.2.3. Convertidor GU con carga resistiva-capacitiva	41
3.3. Conclusiones	44
4. Convertidores de Electrónica de potencia	47
4.1. Sistema de generación undimotriz con interface de electrónica de potencia	48
4.2. Control de voltaje	48
4.2.1. Modelo promediado de un inversor en coordenadas ABC . .	50
4.2.2. Linealización del convertidor reductor CD-CD	53
4.2.3. Diseño del lazo de control	54
4.2.4. Estrategia de diseño: compensador sintonizado con el método Bode analítico	55
4.3. Implementación del sistema de control en Simulink	60
4.4. Respuesta del sistema ante un cambio de referencia de voltaje . . .	61
4.5. Conclusiones	63
5. Casos de estudio	65
5.1. Caso de estudio 1. Dos generadores conectados en paralelo	65
5.1.1. Análisis de armónicos en el caso de estudio 1	67
5.1.2. Respuesta del sistema GU con una reducción de 10 % de la fuerza de la entrada	70
5.1.3. Respuesta del sistema GU con una reducción de 10 % en la carga	71
5.2. Caso de estudio 2. Tres generadores conectados en paralelo	73
5.2.1. Análisis de armónicos en el caso de estudio 2.	75
5.2.2. Respuesta del sistema GU con una reducción de 10 % en la fuerza de la ola	77
5.2.3. Respuesta del sistema con 3 GUs y reducción de la carga en 10 %	80
5.3. Conclusiones	80
6. Conclusiones y trabajos futuros	83
6.1. Conclusiones	83
6.2. Trabajos Futuros	84
 Apéndice A	 87
Apéndice B	89

Apéndice C	91
Apéndice D	93
Apéndice E	95
Apéndice F	97
 Bibliografía	 101

Lista de Figuras

1.1. Consumo de energía a nivel internacional en el año 2009.	2
1.2. Capacidad total instalada de generación en México hasta el año 2010	3
1.3. Potencia promedio anual estimada a nivel mundial en kW/m por medio de generación undimotriz.	9
2.1. Esquema general del sistema de conversión undimotriz.	12
2.2. Oscilador de Arquímedes: (a).- Posición de reposo y (b).- movimiento del oscilador con el efecto de las olas.	13
2.3. Detalle de los elementos que integran el generador undimotriz. . . .	14
2.4. Elementos del generador lineal.	15
2.5. Efecto de la posición y velocidad del traslador: (a) ubicación del traslador respecto del estator (b) posición del traslador (c) velocidad del traslador y (d) voltaje inducido.	17
2.6. Características básicas de la ola.	18
2.7. Funcionamiento básico de convertidores undimotrices: a).- oscilador de Arquímedes, b).- convertidor de columna de agua, c).- sistema Pelamis y d).- convertidor Dragón.	21
2.8. Estructura básica del convertidor de ola: (a).- sistema de generación con esquema rotatorio y (b).- sistema de generación con esquema lineal.	22
2.9. Topologías de GUs con generadores lineales: (a).-Sistema de energía de punto flotante, (b).-Sistema de energía de punto flotante con estructura, (c).-Sistema de energía de punto flotante con compuerta de placa sumergida y (d).-Sistema de energía de punto flotante con recipiente sumergido lleno de aire.	23
2.10. Estructura del parque de generación con GUs con topologías de velocidad variable individual: (a).- Topología de parque de GUs con transformador individual y (b).- Topología de parque de GUs con transformador común.	24
2.11. Estructura del parque de generación con GUs con topología de velocidad individual variable y una terminal de conexión común: a).- Esquema de conexión con transformador individual y con convertidores CD-CD, b).- Esquema de conexión con transformador individual sin CD-CD y c).- Esquema de conexión en estrella con plataforma terminal	25

2.12. Estructura del parque de generación de velocidad individual variable y terminal de transmisión CD en alto voltaje: a).-Esquema de conexión con transmisión en CD, b).- Esquema de conexión en estrella con un convertidor CD-CD con transmisión en CD y c).- Conexión en estrella equipado con convertidores CD-CD con plataforma.	26
3.1. Creación de la ola: (a).- El viento fricciona con la superficie del agua y provoca micro-olas, (b).- El viento que continua soplando en la misma dirección aumentando la superficie para que el viento las siga haciendo crecer y (c).- Las olas seguirán creciendo mientras se mantenga el viento en la misma dirección.	31
3.2. Espectros de potencia en función de la frecuencia para los sitios Pico y South Uist.	32
3.3. Espectros de densidad de Pierson-Moskowitz 1964.	33
3.4. Implementación en Simulink del GU:(a).- Ecuaciones diferenciales de la dinámica de la parte mecánica (Ecuación 3.1 y 3.2) (b).- Ecuación (3.11) y (c).- Implementación de la ecuación (3.10).	37
3.5. Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva: (a).- posición del flotador, (b).- velocidad del flotador, (c).- corrientes en el estator en el marco de referencia dq0 y (d).- corrientes del estator en el marco de referencia ABC	39
3.6. Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva: , (a).- voltaje inducido en el marco de referencia abc, (b).- voltaje inducido en el marco de referencia dq0 y (c).- potencia en la carga.	40
3.7. Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva inductiva: (a).- posición del flotador, (b).- velocidad del flotador, (c).- corrientes en el estator en el marco de referencia dq0 y (d).- corrientes del estator en el dominio ABC.	42
3.8. Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva inductiva: (a).- voltaje inducido en el dominio ABC, (b).- voltaje inducido en el dominio dq0 y (c).- potencia en la carga.	43
3.9. Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva-capacitiva: (a).- posición del flotador, (b).- velocidad del flotador, (c).- corrientes en el estator en marco dq0 y (d).- corrientes del estator en el marco ABC.	45
3.10. Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva-capacitiva: (a).- voltaje inducido en el marco ABC, (b).- voltaje inducido en el marco dq0 y (c).- potencia en la carga.	46
4.1. Sistema de generación undimotriz acoplado a un sistema eléctrico.	49
4.2. Sistema de control de lazo cerrado.	49
4.3. Esquema de control del inversor alimentando una carga aislada.	50
4.4. Representación del inversor trifásico con interruptores bidireccionales.	51

4.5. Modelo promediado del inversor trifásico, filtro y carga en el dominio de las fases.	52
4.6. Esquemático del ciclo de trabajo.	52
4.7. Modelo promediado del inversor trifásico con filtro de segundo orden y carga resistiva en el marco de referencia dq0.	53
4.8. Linealización de un convertidor reductor CD-CD en el modo de conducción continuo: a).-modelo promediado y b).- modelo de pequeña señal.	54
4.9. Diagrama de bloques del sistema de pequeña señal con lazo de retroalimentación.	56
4.10. Respuesta en lazo abierto.	57
4.11. Respuesta de lazo abierto del sistema.	59
4.12. Respuesta del controlador PI.	60
4.13. Respuesta de lazo abierto de la planta y el controlador: (a).- Ubicación de polos-ceros. y (b).- respuesta de lazo abierto en la frecuencia.	61
4.14. Respuesta en la frecuencia en lazo cerrado del sistema.	62
4.15. Inversor trifásico PWM con control de voltaje.	62
4.16. Sistema de control del inversor trifásico	63
4.17. Respuesta del sistema ante cambio de referencia. (a).-Señal de referencia del control, (b).- Voltaje fase a fase de la carga, (c).- Voltaje de fase a fase en la carga en el instante del cambio de referencia, (d).- Voltaje rms de fase a fase, y (e).- índice de modulación.	64
5.1. Diagrama esquemático del sistema de generación para el caso de estudio 1.	66
5.2. Sistema de generación con dos GUs:(a).- Fuerza de la ola (b).- voltaje de fase a fase en el GU 1 (c).- voltaje de fase a fase en el GU 2 (d).- voltaje en el nodo vrec1 (e).- voltaje en el nodo vrec2 y (f).- voltaje en el nodo vuni.	68
5.3. Sistema de generación con dos GUs: (a).- Voltaje en el nodo vcd (b).- 1 (c).- voltaje en el nodo Vcfv y (d).- voltaje en el nodo vcarga.	69
5.4. Contenido armónico del caso de estudio 1 (a).- voltaje en el bus de CD, (b).- voltaje de fase a fase en terminales del inversor y (c).- voltaje de fase a fase en la carga.	70
5.5. Sistema de generación con 2 GUs y variación de la fuerza de entrada: (a).- Fuerza de la ola (b).- voltaje de fase a fase en el CEU1 (c).- voltaje en el bus de CD (d).- voltaje fase a fase del inversor (e).- voltaje en la carga y (f).- índice de modulación.	72
5.6. Sistema de generación con 2 GUs y variación de la carga (a).- magnitud de la resistencia de carga (b).- voltaje de fase a fase en el GU 1 (c).- voltaje en el bus de CD (d).- voltaje fase a fase del inversor (e).- voltaje en la carga y (f) índice de modulación.	74
5.7. Diagrama esquemático del sistema de generación para el caso de estudio 2.	75

5.8. Sistema de generación con tres GUs:(a).- Fuerza de la ola (b).- voltaje de fase a fase en el GU 1 (c).- voltaje de fase a fase en el GU 2 (d).- voltaje en el capacitor de acoplamiento (e).- voltaje fase a fase del CFV (f).- voltaje en la carga y (g).- índice de modulación. .	76
5.9. Contenido armónico para el caso de estudio 2: (a).- voltaje en el bus de CD (b).- voltaje de fase a fase en terminales del inversor (c).- voltaje de fase a fase en la carga.	78
5.10. Sistema de generación con 3 GUs y variación de la fuerza de entrada (a).- Fuerza de la ola (b).- voltaje de fase a fase en el generador 1 (c).- voltaje de corriente directa en el capacitor (d).- voltaje de fase a fase en el inversor (e).- voltaje en la carga fase a fase y (f).- índice de modulación	79
5.11. Sistema de generación con 3 GUs y variación de la carga (a).- magnitud de la resistencia de carga (b).- voltaje de fase a fase en el GU 1 (c).- voltaje en el capacitor de acoplamiento (d).- voltaje fase a fase del CFV (e).- voltaje en la carga y (f).- Índice de modulación. .	81
6.1. Modelo promediado del inversor trifásico, filtro y carga en el dominio de las fases.	98

Lista de Tablas

1.1. Programas de la Secretaría de Energía para el incremento de la penetración de energías renovables en el sistema eléctrico.	9
5.1. Distorsión armónica total del sistema de conversión con 2 generadores.	71
5.2. Distorsión armónica total del sistema de conversión con 3 generadores.	77

Nomenclatura y Abreviaciones

Nomenclatura

v	Velocidad lineal
x	Desplazamiento lineal
β_g	Coefficiente de amortiguamiento del generador lineal
β_w	Coefficiente de amortiguamiento hidrodinámico del OOA
m_{tot}	Masa total del flotador y generador lineal
k_s	Constante de resorte del OOA
F_{wave}	Suma de fuerzas actuando sobre el flotador
ψ_{PMabc}	Vector de enlaces de flujo del circuito del estátor

Abreviaciones

PID	Proporcional Integral Derivativo
BT	Baja Tensión
MT	Media Tensión
AT	Alta Tensión
OOA	Oscilador de Ola de Arquímedes
GU	Generador Undimotriz
PRD	Puente Rectificador de Diodos
CDAV	Corriente Directa en Alto Voltaje
MCI	Modelo de Control Interno
CFV	Convertidor de Fuente de Voltaje
PWM	Modulación de Ancho de Pulso (Por sus siglas en inglés)
CD	Corriente Directa
CA	Corriente Alterna
GLIP	Generador Lineal de Imanes Permanentes

Publicaciones

L. Antonio Gonzalez y N. Garcia,”Simulación de un Sistema de Conversión de Energía Basado en un Oscilador de Olas de Arquímedes Utilizando Simulink”, IEEE XIII Reunión de Otoño de Potencia de Electrónica y Computación, ROPEC 2011 Morelia, 9-11 Noviembre, 2011. págs 1-4.

Capítulo 1

Introducción

A pesar que la idea básica para extraer energía de las olas es relativamente antigua y el diseño del primer dispositivo de energía por olas data de hace algunas décadas, es hasta los últimos años que se han realizado intentos para explotar comercialmente este tipo de energía renovable. Sin embargo, la integración de generadores undimotrices en las redes eléctricas de potencia representa un reto significativamente diferente a la integración de la mayoría de las tecnologías de energía renovable tales como la eólica, solar fotovoltaica, biomasa e hidroeléctrica. Dejando de lado las diferencias fundamentales de las distintas fuentes de energía, existen diferencias en términos de escalabilidad y costos de inversión. La mayoría de las tecnologías mencionadas previamente han observado un proceso de maduración y evolución. Por ejemplo, el desarrollo de las tecnologías de generación eólica se ha incrementado gradualmente desde niveles de generación distribuida de pequeña escala hasta grandes parques de generación y con una tendencia creciente hacia el emplazamiento de instalaciones de generación de gran escala ubicadas mar adentro. De esta manera, se ha podido generar conocimiento valioso durante la integración de plantas de generación eólica al sistema eléctrico. Evidentemente, la integración de generadores undimotrices a la red eléctrica no seguirá una ruta de desarrollo similar. El estado actual del desarrollo de las GUs se encuentra en la etapa de diseño y construcción de prototipos a escala y la operación de las primeras pequeñas granjas de generación emplazadas en el mar con conexión a la red. Por lo tanto, existen actualmente un gran número de retos que se deben de abordar, tales como la integración a la red de los GUs y sus interacciones con las redes eléctricas.

En la Figura [1.1](#) se muestra el consumo de energía a nivel mundial, en donde

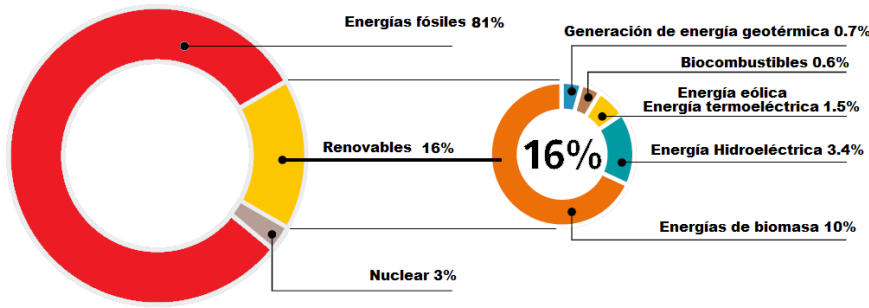


Figura 1.1: Consumo de energía a nivel internacional en el año 2009.

se puede observar que el 81 %, 16 % y el 3 % esta asociado al consumo de combustibles fósiles, energías renovables y energía nuclear, respectivamente [Cruz 2008]. Las energías renovables son muy importantes hoy en día ya que permiten reducir el consumo de combustibles fósiles y eliminar el calentamiento global. La generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables se puede obtener de distintas fuentes tales como energía solar, energía eólica, energía marina, energía hidráulica y geotérmica. Si bien existen actualmente tecnologías maduras y bien desarrolladas tales como la generación eólica e hidráulica, la generación por medio de la energía de los mares y océanos se encuentra en una etapa que amerita el financiamiento de proyectos de investigación.

Con respecto al caso de México la capacidad total instalada hasta agosto de 2010 para la generación de energía eléctrica era de 60,795 MW. La mayor parte era aportada por plantas termoeléctricas con un total de 43,231 MW ó 71 % del total de la capacidad instalada. Según datos del Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovable de la Secretaria de Energía [SENER2 2007], se cuenta con una capacidad instalada de fuentes renovables de 2,365 MW, lo cual equivale al 4 % (ver Figura 1.2).

1.1. Revisión del estado del arte

Existen en la actualidad varios campos de investigación que se pueden explorar respecto a la introducción de sistemas de generación undimotriz en los sistemas eléctricos de potencia. Las principales áreas de investigación identificadas son: *i*) diseño y construcción de sistemas de conversión mecánica, *ii*) diseño y construcción de generadores lineales, *iii*) desarrollo de sistemas de control y *iv*) diseño y

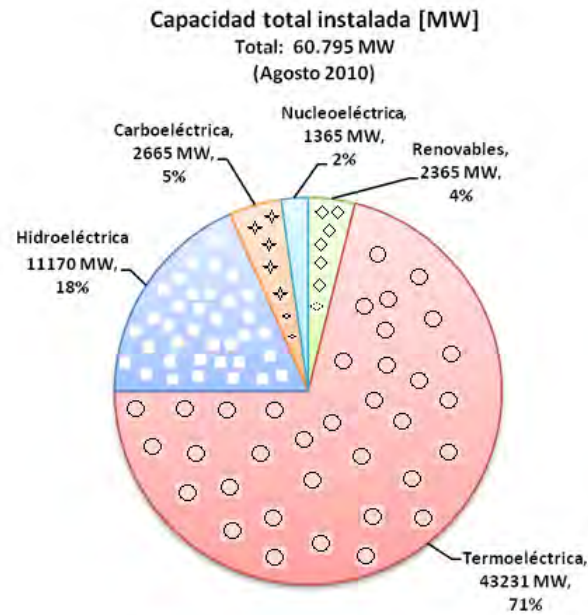


Figura 1.2: Capacidad total instalada de generación en México hasta el año 2010

construcción de convertidores de electrónica de potencia.

Una parte importante de las contribuciones al estado del arte se refieren al modelado del sistema de conversión y su acoplamiento al sistema eléctrico. En [Feng Wu 2008] se presenta el modelado de un generador de energía undimotriz (GU) del tipo Oscilador de Arquímedes acoplado a una red eléctrica por medio de un convertidor de electrónica de potencia. Este arreglo permite desacoplar las frecuencias de operación del GU y de la red eléctrica. La etapa de electrónica de potencia esta conformada de dos convertidores de fuente de voltaje (CFV) y un capacitor de acoplamiento. El primer CFV trabaja como rectificador y tiene como objetivos extraer la máxima potencia de la ola y minimizar las pérdidas del generador. La técnica de control que utiliza el convertidor rectificador se basa en modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés). Además, el sistema de control hace uso del marco de referencia $dq0$ y controladores PI. El segundo CFV operado en modo inversor tiene la función de mantener constante tanto la magnitud y frecuencia del voltaje en las terminales de salida y la potencia activa entregada a la red. El sistema de control del segundo CFV se basa en controladores PI y modulación PWM.

Por su parte, en [da Costa 2007] se presenta la aplicación de un sistema de control de modelo interno (CMI) a un prototipo de un oscilador de Arquímedes localizado en Portugal. Este sistema de control hace uso del modelo de una planta, la inversa de la planta y un filtro para proponer la función del controlador. El

control CMI permite anular perturbaciones y reducir el error de alta frecuencia. Los resultados comparativos respecto a la potencia entregada por el oscilador de Arquímedes sin un sistema de control arrojan que un controlador PI convencional tiene una eficiencia de 172 %, mientras que el control CMI provee 531 % de eficiencia.

En otra contribución se presentan diferentes topologías de conexión de generadores undimotrices utilizando enlaces de CA y CD en alto voltaje [czech 2009]. Las topologías que se presentan involucran la conexión en serie y paralelo de los GUs. Además, en este documento se presenta el modelo de un rectificador trifásico implementado con IGBTs y se determinan las pérdidas de los dispositivos de electrónica de potencia. En este trabajo se reportan las pérdidas generadas por los dispositivos y los costos de generación de energía de las diferentes topologías de conexión.

En [Wu 2009] se presenta la aplicación de sistemas de conversión undimotriz en conjunto con sistemas de almacenaje de energía en baterías. Los sistemas de almacenaje de energía incorporados al convertidor *back to back* del sistema de conversión permite cumplir con los requerimientos de los códigos de red que se desarrollen para la integración de este tipo de generación a la red de potencia. En la actualidad, no existen códigos de red para la integración de generación undimotriz al sistema eléctrico. Sin embargo, es posible que dichos códigos de red se basen en los códigos de red ya existentes para las plantas de generación eólica. El banco de baterías se agrega al sistema de generación por medio de un convertidor CD-CD. La incorporación del convertidor CD-CD presenta mejoras en cuanto a la calidad de la energía y a la potencia entregada al sistema. El sistema de control del convertidor CD-CD conectado al banco de baterías y al convertidor *back to back* están basados en controladores PI.

En [das 2006] se presenta la operación conjunta de más de un GU basado en osciladores de Arquímedes conectado a una red eléctrica. La etapa de electrónica de potencia consiste de un puente trifásico de diodos, un filtro de segundo orden y un CFV que trabaja como inversor trifásico. Además, se incorpora un convertidor CD-CD para regular el voltaje en el bus de CD. Se utiliza el paquete de simulación PSCAD/EMTDC para evaluar el desempeño del sistema propuesto. Se reportan casos de estudio en donde se utilizan dos GU acoplados en paralelo pero no se analiza la operación con un mayor número de unidades de conversión en paralelo. De acuerdo a los resultados se obtienen beneficios en la potencia de salida y se

cumple con el nivel máximo de 5 % de distorsión armónica total recomendado por el estandar IEEE-519.

Por otra parte, existen diversas alternativas para extraer la máxima potencia de un dispositivo generador de energía undimotriz mediante el control de las variables hidrodinámicas. En [García 2010] se detallan los parámetros que se pueden controlar en un sistema de generación de energía undimotriz, los cuales determinan en gran medida la cantidad de energía extraíble de la ola. Se propone una estrategia de control óptimo cuyo objetivo es hacer coincidir el movimiento del dispositivo flotador con las características de la ola que inciden en dicho flotador. Explica también que el control de los sistemas mecánicos auxiliares permiten conseguir las condiciones hidrodinámicas óptimas. Este documento propone una estrategia generalizada que permite la optimización de la extracción de energía de las olas regulares haciendo operar el flotador en resonancia con la ola incidente. Las condiciones hidrodinámicas del GU se hacen coincidir con las condiciones instantáneas de las olas regulares a través de la fuerza electromagnética ejercida por el generador. Las condiciones óptimas se obtienen al controlar la fuerza que el generador aplica al sistema oscilante. Mediante el uso de convertidores de electrónica de potencia con control bidireccional del flujo de potencia, la frecuencia de resonancia del dispositivo oscilante se puede modificar.

En otro trabajo se propone un sistema de control óptimo para un convertidor con topología *back to back* aplicado al GU tipo oscilador de Arquímedes [Feng Wu 2009]. El sistema de control del CFV que opera como rectificador regula el amortiguamiento y la rigidez del oscilador de Arquímedes, con lo cual se controla la resonancia del flotador con respecto a la ola. Además, en esta contribución se incorpora un sistema de control para regular el voltaje en el capacitor en el enlace de CD de la topología *back to back*. De esta manera, se reducen las fluctuaciones en la entrada del segundo CFV que opera como inversor. Este artículo presenta resultados comparativos del funcionamiento del GU con y sin el control de voltaje en el capacitor de enlace de CD. La energía promedio del GU es de 88kW y con el enfoque de control de la rigidez del oscilador se incrementa a 100kW, lo cual representa un 14.3 % adicional en la energía inyectada al sistema.

La generación undimotriz jugará un papel relevante en los esfuerzos para reducir las emisiones contaminantes producidas por la industria de la energía. Sin embargo, las tecnologías de energía undimotriz requieren aún, en la mayoría de los casos, un considerable esfuerzo de investigación. El desarrollo de proyectos de generación undimotriz permitirá entender e identificar las posibles oportunidades y

retos asociados a la integración de tales sistemas de generación y sus interacciones con las redes eléctricas de potencia. Tales investigaciones son esenciales tanto en términos cuantitativos como cualitativos con el objeto de garantizar la adecuada planeación y operación de dichos sistemas.

En este trabajo de tesis se presenta el modelado y análisis en el marco de referencia ABC de un sistema de generación undimotriz. El sistema de generación alimenta una carga trifásica balanceada a través de una etapa de electrónica de potencia. Dicha etapa permite regular el voltaje de salida del sistema de generación, el cual presenta características de amplitud y frecuencia variables. Además, se diseña un sistema de control de lazo cerrado que permite regular el voltaje en la carga trifásica. Se analiza la operación en paralelo de dos y tres unidades de generación de energía undimotriz en términos de regulación de voltaje, regulación de frecuencia y distorsión armónica total.

1.2. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es la simulación y análisis de un sistema de generación de energía undimotriz basado en un oscilador de Arquímedes. El análisis y la simulación se realiza usando el marco de referencia del tiempo, el cual permite incorporar las no linealidades propias de los sistemas de generación undimotrices. La integración del generador undimotriz esta basado en una etapa de electrónica de potencia con controladores PWM. El sistema de control se diseña en base a controladores PI usando en el método bode analítico y modelos de pequeña señal para regular el voltaje en la carga aislada. De esta manera, es posible realizar estudios de calidad de la energía del sistema de generación undimotriz. Esta investigación sentará las bases de futuras investigaciones en el área de generación undimotriz en esta institución.

1.2.1. Objetivos particulares

Los objetivos particulares de esta tesis son los siguientes:

- Implementar las ecuaciones diferenciales ordinarias asociadas al convertidor undimotriz tipo oscilador de Arquímedes en el paquete de simulación Simulink.

- Desarrollar el sistema de ecuaciones de la etapa de electrónica de potencia para acoplar el sistema de generación con la carga trifásica aislada.
- Diseñar la etapa de control que permita mantener constante el voltaje de alimentación de la carga.
- Analizar la operación en paralelo de múltiples unidades GUs para mejorar la calidad de energía suministrada a la carga aislada.
- Determinar la calidad de suministro de energía a la carga aislada en términos de regulación de voltaje y distorsión armónica.

1.3. Justificación

Las energías contenidas en los océanos en la forma de olas y mareas representan una fuente de energía de gran importancia si se considera que el 70 por ciento de la superficie del planeta lo constituye dichos océanos. En el contexto energético actual, los beneficios económicos de las energías renovables han adquirido creciente relevancia, ya que éstas contribuyen a reducir los riesgos asociados con la volatilidad de precios, a diversificar el portafolio energético, a reducir el impacto ambiental y a impulsar el desarrollo sustentable en el país. En este sentido, es especialmente relevante la contribución de estas fuentes de energía al desarrollo social en zonas rurales alejadas de la red eléctrica, en donde la energía convencional es económicamente inviable.

La Secretaría de Energía de México tiene contemplado proyectos para incrementar la penetración de energías renovables al sistema eléctrico, tal como se muestra en la Tabla 1.1. Se puede apreciar de esta tabla que existen programas del Gobierno Federal tales como la Estrategía Nacional de Energía [SENER1 2011], el Programa Sectorial de Energía [SENER2 2007] y el Programa Especial para el aprovechamiento de Energías Renovables, que proponen metas propias para participación de la generación de energía con fuentes renovables [SENER3 2007]. Además, recientemente fue promulgada la ley para el aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética con el objeto de incentivar este tipo de generación [SENER4 2010]. Aunque en la actualidad la Secretaría de Energía de México no tiene contemplado fomentar la generación de energía eléctrica con sistemas undimotrices, es importante desarrollar proyectos que aprovechen la energía de los océanos.

Por otra parte, nuestro país cuenta con 11,593 Km de litorales y costas que no han sido explotadas con fines de generación de energía eléctrica. La Figura 1.3 muestra la potencia estimada global anual en kW/m. Se puede apreciar que existe una franja en cada hemisferio en donde el potencial de generación undimotriz alcanza valores por arriba de 70kW/m [Cruz 2008]. Se puede observar en esta figura que se estima un potencial de 15-20kW/m en las costas mexicanas del Océano Pacífico, incrementándose a un potencial de 20-30kW/m en las costas de Baja California. Asimismo, se puede observar que el potencial promedio anual para el Golfo de México es de 5-10kW/m. Por lo anteriormente mencionado es necesario sumar esfuerzos políticos, económicos y académicos para apoyar a la investigación en este campo del conocimiento.

La energía undimotriz jugará un papel importante en los esfuerzos para reducir las emisiones de los agentes de efecto invernadero más comunes producidas por la industria de la energía. Los proyectos de energía undimotriz mostrarán, por lo tanto, un incremento importante de participación en la generación de energía eléctrica durante los próximos años. Sin embargo, la mayoría de las tecnologías de energía undimotriz se encuentran actualmente en proceso de desarrollo. Por lo tanto, se requiere un considerable esfuerzo de investigación y desarrollo tecnológico para lograr que esta opción de generación de energía madure y se integre en los sistemas eléctricos de potencia. En este sentido, este trabajo de tesis propone sentar las bases en el desarrollo de proyectos de generación undimotriz en esta institución. En esta tesis se implementarán modelos y herramientas de análisis reportados previamente en la literatura, las cuales, se utilizarán como base de futuros proyectos en esta área enfocados a entender e identificar las posibles oportunidades y retos asociados a este tipo de generación integrado a los sistemas eléctricos.

1.4. Metodología

El modelado de sistemas de conversión de energía undimotriz involucra diferentes dispositivos eléctricos, mecánicos y de electrónica de potencia. Estos dispositivos son representados en este trabajo por medio de ecuaciones diferenciales y ecuaciones algebraicas. El modelado de los convertidores de energía undimotriz se realiza en el marco de referencia ABC. La implementación y simulación digital de los modelos se realiza en el paquete de simulación Matlab/Simulink. El sistema de control se basa en controladores PI, en donde la sintonización de las constantes de los controladores PI se realizan con el método Bode Analítico. El modelo de

Tabla 1.1: Programas de la Secretaría de Energía para el incremento de la penetración de energías renovables en el sistema eléctrico.

Documento	Plazo	Metas
Estrategia Nacional de Energía	2009-2024	Incrementar la generación eléctrica con tecnologías limpias al 35 %
Programa Sectorial de Energía	2007-2012	Mayor participación de las energías renovables en la capacidad de generación de energía eléctrica de 23 a 26 %
Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables	2009-2012	Generación entre el 4.5 y 6.6 % del total nacional a partir de fuentes renovables de energía

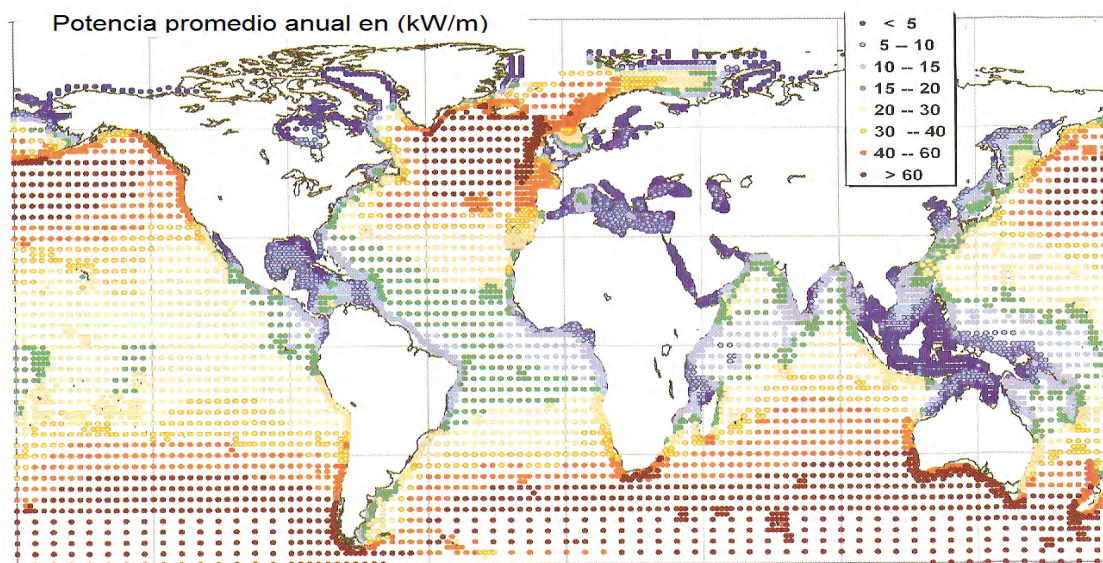


Figura 1.3: Potencia promedio anual estimada a nivel mundial en kW/m por medio de generación undimotriz.

los convertidores de electrónica de potencia involucrados en el sistema de control se realiza mediante representaciones de pequeña señal alrededor de un punto de operación. Los casos de estudio involucran grupos de convertidores de energía undimotriz operando en paralelo, de esta manera se mejora la calidad del suministro de energía a la carga aislada. Los casos de estudio presentados en este trabajo reportan la operación del sistema de generación undimotriz bajo condiciones nominales de operación y ante variaciones de la carga o las características de la ola. Además, se utiliza la Transformada Rápida de Fourier para analizar el contenido armónico de las diferentes formas de onda obtenidas en la etapa de generación, en la etapa de electrónica de potencia y en la carga.

1.5. Descripción de capítulos

En el capítulo 2 se presentan las distintas alternativas de generación de energías renovables haciendo especial énfasis en la generación que aprovecha la energía del mar. Además, se presentan las diferentes topologías de parques de convertidores de energía undimotriz conectados a la red eléctrica.

En el capítulo 3 se presenta el modelado del oscilador de Arquímedes y del generador lineal que constituyen el GU. Además, se presenta la implementación de las ecuaciones diferenciales del GU usando Matlab/Simulink

En el capítulo 4 se presentan los convertidores de electrónica de potencia necesarios para realizar el acoplamiento de la parte de generación con la carga aislada. Así mismo, se presenta el diseño del sistema de control del inversor trifásico para regular el voltaje en terminales de la carga trifásica.

En el capítulo 5 se presentan casos de estudio con múltiples unidades de generación conectados en paralelo. Además, se reporta el desempeño del sistema de control y se comparan los resultados utilizando dos y tres unidades de generación en paralelo.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales de esta tesis y los trabajos futuros.

Capítulo 2

Definición del problema

En la actualidad, la emisión de gases contaminantes a la atmósfera ha provocado un cambio climático que afecta a los seres vivos y a los ecosistemas. La emisión de estos gases tiene su origen en distintas actividades del hombre, en donde una de ellas es la generación de energía eléctrica. Sin embargo, las energías renovables representan una alternativa para solucionar este problema. Además, el descenso en la producción de petróleo hace más evidente la necesidad de aplicar nuevas tecnologías para la generación de electricidad. La generación undimotriz es una opción viable para generar energía eléctrica sin contaminar el medio ambiente. La energía undimotriz seguramente se convertirá en el siguiente gran jugador en el campo de las energías renovables. Su alta densidad energética y su alta disponibilidad hacen la energía undimotriz más atractiva aún que la energía eólica. La predictibilidad de la fuente de energía undimotriz permite contar con pronósticos del recurso durante horas e incluso días que sería muy deseable contar para los operadores de parques eólicos. Además, tomando en cuenta que el 50 % de la población mundial vive cerca de océanos, esta proximidad de la fuente de generación a la carga lo hace una candidata ideal para cubrir la demanda energética en el futuro.

2.1. Esquema general del sistema de generación undimotriz

La Figura 2.1 muestra el esquema general del sistema de generación undimotriz. Los elementos que integran este sistema de generación son:

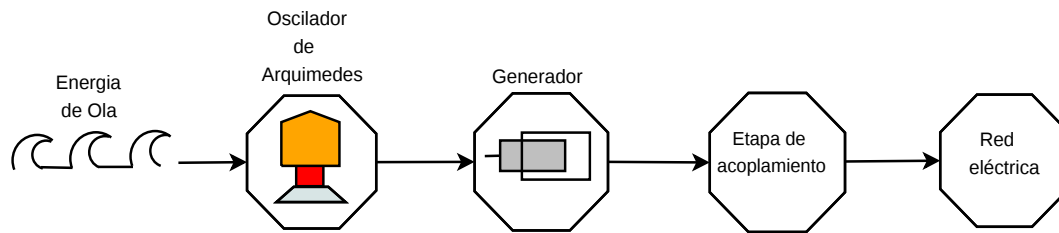


Figura 2.1: Esquema general del sistema de conversión undimotriz.

- **Oscilador de Arquímedes:** El oscilador de Arquímedes es el dispositivo que se encuentra anclado en el fondo del mar y realiza la conversión de energía de las olas en el océano en energía mecánica. La cantidad de energía mecánica producida está regida por la interacción entre la presión hidrodinámica en la superficie del cuerpo y el movimiento del oscilador de Arquímedes. Esta conversión se basa en la teoría hidrodinámica que describe la interacción entre fluidos de la superficie libre y los cuerpos flotantes.
- **Generador lineal:** El generador lineal se encarga de convertir la energía de las olas en energía eléctrica. El diseño del generador lineal contiene partes del tipo hidráulica, neumática y/o componentes eléctricos.
- **Etapa de acoplamiento:** En el caso de la generación de electricidad, que es a menudo el objetivo, la etapa de acoplamiento de energía está constituida por dispositivos de electrónica de potencia que permiten integrar el sistema de generación undimotriz al sistema eléctrico.
- **Red eléctrica:** Visto desde una perspectiva de suministro de energía, la última parte del sistema se dedica a la distribución y la entrega de energía del convertidor hacia un usuario o carga.

2.1.1. Principio de funcionamiento del oscilador de Arquímedes

La Figura 2.2 muestra la configuración básica de un oscilador de Arquímedes. Este dispositivo consiste de un cilindro hueco y un flotador. El cilindro contiene aire y se ancla al fondo del mar, mientras que el flotador se mueve verticalmente de acuerdo al movimiento de la ola. Cuando la ola se encuentra arriba del generador, el flotador se hunde debido al incremento de la columna de agua y la presión del aire en el cilindro se incrementa. Cuando el valle de la ola se ubica arriba del

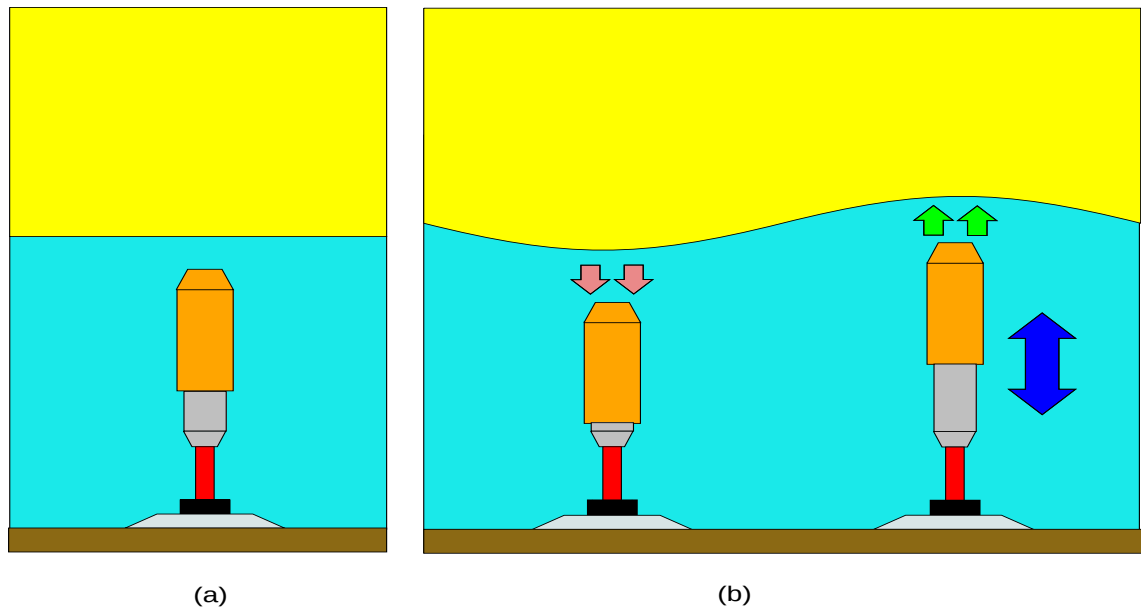


Figura 2.2: Oscilador de Arquímedes: (a).- Posición de reposo y (b).- movimiento del oscilador con el efecto de las olas.

generador, el peso de la columna de agua se reduce y el flotador se desplaza verticalmente hacia arriba debido a la presión del aire que se encuentra en el cilindro. El movimiento vertical del flotador en ambos sentidos permite extraer la energía de la ola y convertirla en energía mecánica. Debido a que el movimiento del flotador es vertical, se emplea un generador lineal de imanes permanentes (GLIP) para convertir la energía de la ola en energía eléctrica. En la Figura 2.3 se muestra el detalle de los elementos que constituyen el generador undimotriz. Se puede apreciar que el generador undimotriz posee un traslador, un flotador, un estator y un resorte. Se utiliza la representación de un resorte ya que el oscilador de Arquímedes se comporta como un sistema oscilatorio masa-resorte. El traslador es el dispositivo que tiene movimiento vertical. El traslador se mueve junto con la ola que incide sobre el flotador. En el traslador se encuentran instalados los imanes permanentes con polaridad intercambiada. Cuando se encuentra en movimiento el traslador se induce un voltaje en el estator. El voltaje inducido es debido que el traslador genera un campo magnético y el estator está fijo cortando las líneas magnéticas asociadas a los imanes permanentes. El movimiento oscilante de traslador provoca que dicho traslador tenga una posición en el espacio que varía con el tiempo tal como lo indica la gráfica del lado derecho de la Figura 2.3. En esta figura la posición del traslador se describe como una función seno. La posición del traslador depende de la fuerza de la ola que incida sobre el GU. Si el valle de la

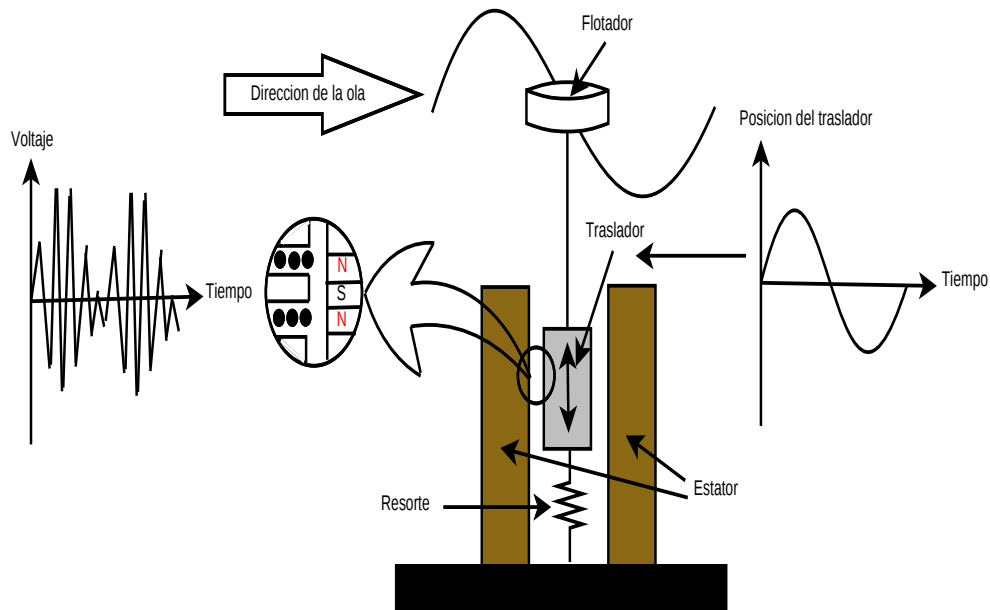


Figura 2.3: Detalle de los elementos que integran el generador undimotriz.

ola se encuentra incidiendo sobre el GU, el traslador se mueve verticalmente hacia arriba. Este movimiento es debido a que el aire dentro del cilindro se expande y empuja al traslador hacia la superficie, el cilindro del GU es representado en la Figura 2.3 como un resorte. Cuando la cresta de la ola incida sobre el GU, el traslador se mueve verticalmente hacia abajo debido a que la fuerza es mayor a la presión del aire contenida en el cilindro. El voltaje que genera el generador undimotriz en terminales es el que se muestra en el lado inferior izquierdo de la Figura 2.3. Las variaciones de amplitud y frecuencia es debido a que el voltaje inducido depende de la velocidad y la posición.

2.1.2. Principio de funcionamiento del generador lineal

En la literatura relacionada con la construcción de prototipos del oscilador de Arquímedes se han utilizado distintos tipos de generadores lineales entre los cuales se encuentran los siguientes: *i*) Generador de inducción sin hierro en el traslador, *ii*) generador de inducción con hierro en el traslador, *iii*) generador de reluctancia conmutada, *iv*) generador síncrono de imanes permanentes con devanado de espacio de aire y *v*) generador síncrono de imanes permanentes con hierro en el estator. Los generadores mencionados anteriormente se han comparado en términos de costos, construcción y pérdidas [Polinder 2005]. El generador que

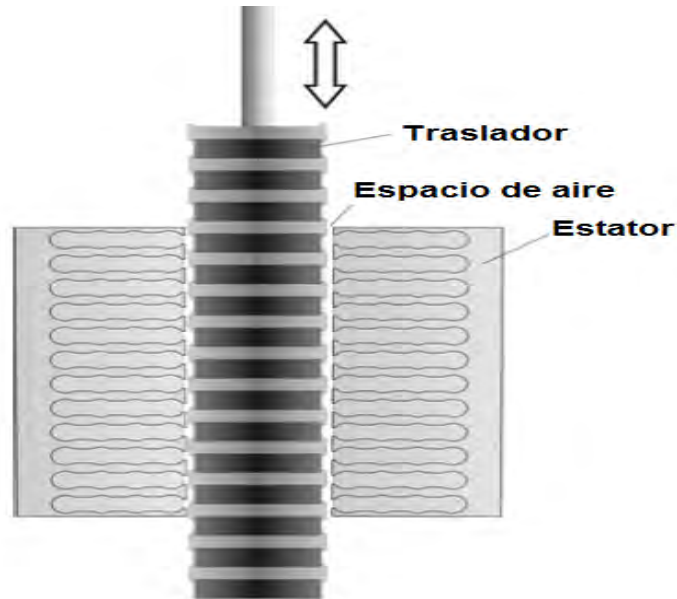


Figura 2.4: Elementos del generador lineal.

obtuvo mejor rendimiento en cuanto a costo y pérdidas eléctricas es el generador síncrono de imanes permanentes con hierro en el estátor. Es por ello que en esta tesis se implementan un generador lineal de este tipo en el marco de referencia ABC.

El generador lineal de imanes permanentes consta de dos partes principales: el traslador y el estator. El traslador es la parte que se mueve verticalmente y el estator es la parte estática anclado al fondo marino. Entre el traslador y el estator hay un pequeño espacio de aire. En la Figura 2.4 se muestra el esquemático de las partes principales que conforman el generador lineal de imanes permanentes, en el cual se puede observar que los imanes permanentes están instalados en el traslador.

La Figura 2.5 muestra la posición del traslador, la velocidad del traslador y el voltaje inducido en terminales del generador para la fase A. El voltaje inducido reportado en esta figura se obtiene con $\lambda = 0.5$. Además, se indica la forma de onda del voltaje inducido para distintas posiciones del traslador. En la Figura 2.5 inciso (a) muestra la posición física del traslador, en la cual se observa que tiene tres posiciones importantes para el análisis. El primer punto es el máximo positivo, el segundo punto es intermedio ó 0 y el tercer punto es el máximo negativo. En el inciso (b) de la Figura 2.5 se muestra la gráfica de posición del traslador, la cual se observa que se representa como una función coseno. La Figura 2.5 inciso (c) presenta la gráfica de velocidad, la cual se representa por una función seno. Por otra parte en la Figura 2.5 inciso (d) se presenta la gráfica del voltaje inducido,

en la cual se observa que es una forma de onda que varía en frecuencia y en amplitud. El primer punto a analizar de la Figura 2.5 se localiza en el punto t_1 . El traslador se encuentra en el punto máximo negativo y la velocidad del traslador es cero. En este punto la amplitud del voltaje inducido es cero mientras que la frecuencia es de 0 Hz. El segundo punto a analizar de la Figura 2.5 es en t_4 . En t_4 el traslador se encuentra en posición intermedio ó cero, la velocidad esta en su punto máximo negativo y el voltaje se encuentra en un punto cerca del máximo negativo. Por ultimo analizaremos el punto t_7 de la Figura 2.5. En t_7 la posición se encuentra en el maximo positivo, la velocidad es cero y el voltaje inducido es cero. La frecuencia del voltaje inducido en este punto es de 0Hz. Por lo que se observa en la Figura 2.5 en los diferentes instantes de tiempo se puede decir que la amplitud del voltaje inducido depende directamente de la velocidad del traslador mientras que el frecuencia de la forma de onda del voltaje inducido depende de la posición. Finalmente el voltaje inducido en el estator presenta variación tanto en amplitud y frecuencia.

2.1.3. Olas oceánicas

El origen de las olas se debe al viento, el cual a su vez surge debido al calentamiento de la superficie con la energía del sol. Es importante mencionar que el 3 % de la energía solar que llega a la superficie terrestre y se convierte en energía undimotriz. La cantidad de energía que se transmite al agua depende de la velocidad del viento y el periodo de tiempo durante el cual esté actuando. Se estima que la energía global que proporciona el oleaje sería suficiente para satisfacer el consumo eléctrico mundial, siendo dicho consumo del orden de 80000 TWh/año [IEA 2003].

La transferencia de energía del viento al agua se almacena en el oleaje y es capaz de viajar miles de kilómetros con pocas pérdidas de energía. Conforme las olas van acercándose a la costa, experimentan una pérdida de energía ya que empiezan a interactuar con el lecho marino. Sin embargo, ésta disipación de energía puede verse compensada por fenómenos como la refracción y la reflexión que conducen a la formación de zonas con concentraciones de energía. Algunos parámetros importantes para describir las olas se muestran en la Figura 2.6. Estos parámetros son: la altura, período y profundidad del medio en el que se están propagando.

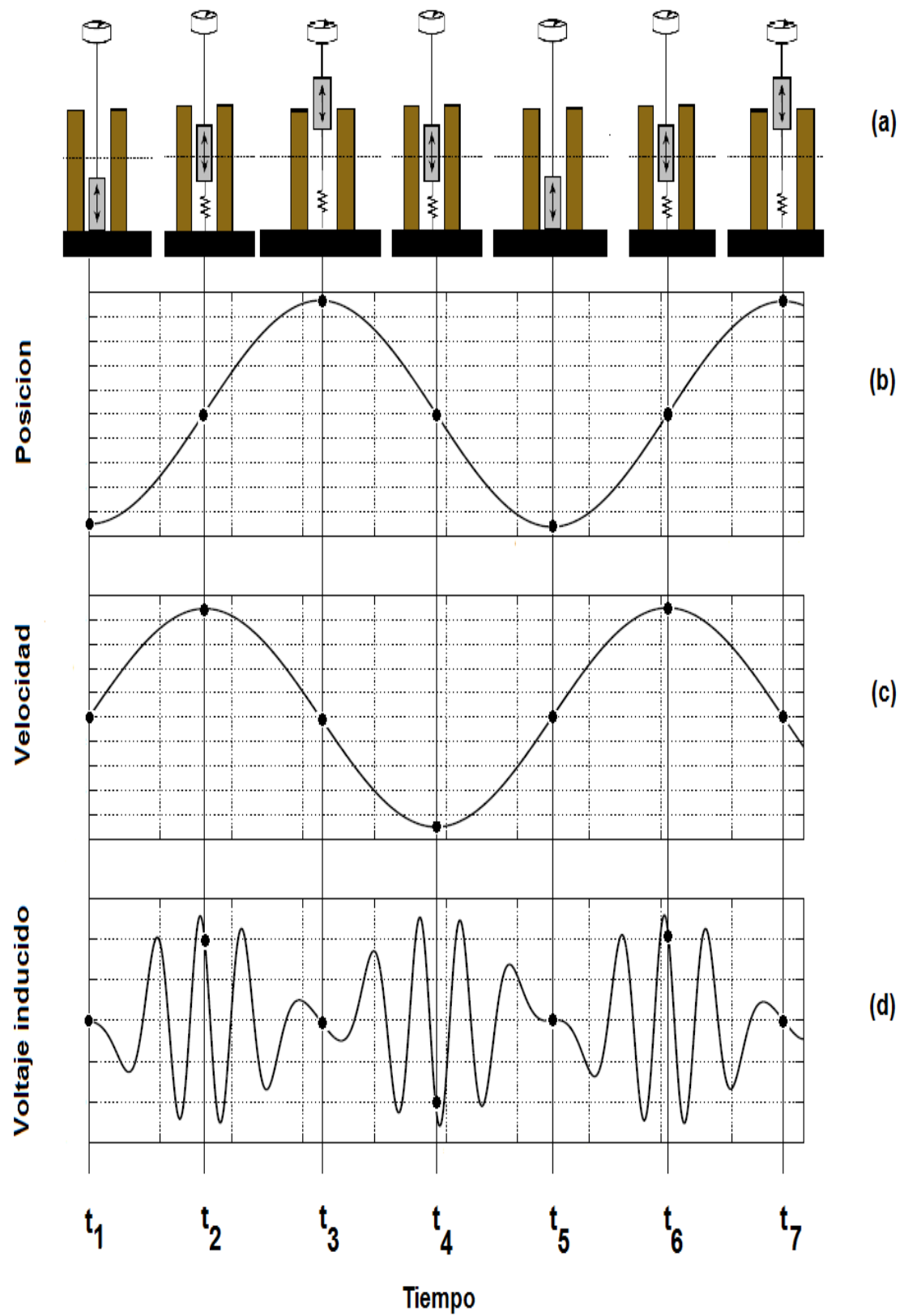


Figura 2.5: Efecto de la posición y velocidad del traslador: (a) ubicación del traslador respecto del estator (b) posición del traslador (c) velocidad del traslador y (d) voltaje inducido.

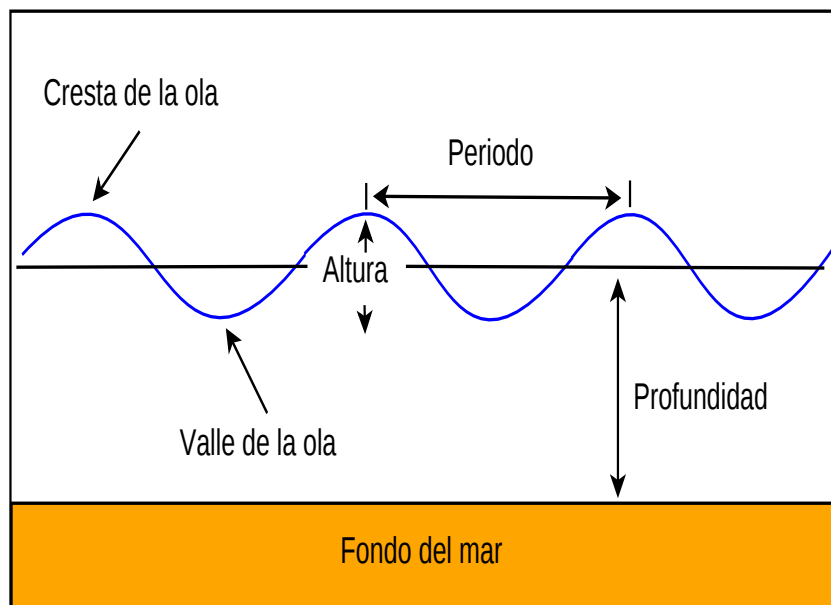


Figura 2.6: Características básicas de la ola.

2.1.4. Clasificación de generación de energía de los océanos

La clasificación de la energía en los océanos considera 5 fuentes diferentes, las cuales son [Chozas 2008]:

Energía de corriente marina: Este tipo de energía se obtiene del aprovechamiento de la energía cinética de las corrientes marinas. Las corrientes marinas se transforman en energía eléctrica por medio de turbinas especiales similares a las usadas en energía eólica. Estos tipos de generación necesitan convertidores de electrónica de potencia para conectarse a la red.

Energía mareomotriz: Este tipo de generación es similar a la generación hidroeléctrica. Consiste en almacenar agua del mar y controlar su paso a través de turbinas para generar electricidad.

Energía osmótica: La energía osmótica es la energía obtenida por la diferencia en la concentración de la sal entre el agua de mar y el agua de río aplicando la electrodiálisis inversa con membranas de iones específicos. El residuo en este proceso es agua salubre.

Energía de los gradientes térmicos oceánicos: Este tipo de generación se basa en la diferencia de temperatura que existe entre las aguas oceánicas profundas y las superficiales. Esta diferencia de temperatura se utiliza para mover máquinas térmicas y producir electricidad.

Energía undímotriz: Esta energía es también conocida como energía de las olas. Esta energía tiene como principio generar electricidad por medio del oleaje.

2.1.5. Clasificación de convertidores undimotrices

Los convertidores que utilizan la energía de las olas se clasifican de la siguiente manera [Cruz 2004],

- Dispositivos de la costa: Son aquellos que se instalan en la tierra o sobre la playa.
- Dispositivos cerca de la costa: Son aquellos que están aproximadamente a 20 metros de la costa.
- Dispositivos undímotrices: Son aquellos que están a una distancia mayor de 20m de la costa.

En diferentes partes del mundo se están realizando proyectos de investigación para extraer la energía contenida en los océanos mediante el diseño de sistemas de conversión de energía. En especial, el desarrollo de sistemas de conversión de energía basados en olas ha permitido explorar diferentes estructuras de conversión, entre las cuales se puede citar el oscilador de olas de Arquímedes [Gardner 1998], el convertidor de columna de agua [Chung 2001], el sistema Pelamis [Henderson 2006] y el conocido como Dragón de olas [Kofoed 2006]. En la Figura 2.7 se muestra el funcionamiento básico de estos convertidores undimotrices.

El Oscilador de Arquímedes está totalmente sumergido bajo la superficie del agua y no utiliza la ola superficial para la generación de la energía. Este Oscilador utiliza una cámara de aire instalada sobre el fondo del mar. La sección superior de la cámara de aire se mueve continuamente hacia arriba y hacia abajo, mientras que la parte inferior permanece en una posición fija. La variación periódica de la presión en una ola inicia el movimiento de la porción superior.

El convertidor de columna de agua consiste de una estructura hueca, sumergida y abierta al mar por debajo de la superficie libre del agua. Debido a la oscilación del oleaje, se producen cambios en la presión del aire que esta situado sobre el agua en el interior de la cámara. Por esta razón el aire, que es el fluido de trabajo, se expande y se comprime alternadamente produciendo el movimiento de la turbina. La estructura es un tubo Venturi, de modo que la parte en contacto con el agua posee un diámetro mayor comparado con la parte que aloja a la turbina. De

esta manera, se consigue que las velocidades bajas de oleaje se amplifiquen lo suficiente para que la turbina accione a un generador eléctrico. Se utilizan turbinas de generación de energía por viento llamadas Wells, las cuales operan por medio de un flujo bidireccional pero sin cambiar el sentido de giro.

El sistema Pelamis está formado por tres grandes cilindros articulados de 142 metros de largo por 3.5m de diámetro, parcialmente sumergidos y unidos por juntas bisagra. La ola induce un movimiento relativo entre dichas secciones, activando un sistema hidráulico interior que bombea aceite a alta presión a través de un sistema de motores hidráulicos, equilibrándose con el contenido de unos acumuladores. Los motores hidráulicos están acoplados a un generador eléctrico para producir electricidad. Dicho de otro modo, los fundamentos del sistema se basan en convertir energía cinética en eléctrica. El transporte de la energía se hace conectando el sistema de conversión a una base situada en el lecho oceánico que se conecta con la costa.

La idea básica del Dragón de olas es usar principios bien estudiados en otros sistemas hidroeléctricos pero en el contexto de una plataforma flotante (ver Figura ??(d)). El mecanismo es muy sencillo ya que usa una barrera que captura el agua de las olas que sobrepasan un cierto nivel y se almacenan en un estanque flotante. Al pasar por unas turbinas hidroeléctricas su energía potencial se convierte en energía eléctrica. El dragón de olas no usa ningún mecanismo intermedio, sino que simplemente captura la energía potencial del agua elevada de forma natural. De construcción muy simple, este mecanismo sólo tiene una parte móvil constituida por las turbinas. Esta característica es esencial en cualquier sistema diseñado para funcionar en alta mar, a merced del oleaje y las tempestades.

2.1.6. Generadores lineales

La utilización de máquinas lineales para aplicaciones undimotrices que involucren un movimiento lineal presentan ventajas respecto a los sistemas basados en máquinas rotatorias [Cruz 2008]. La Figura 2.8 presenta la estructura básica del convertidor de energía undimotriz con un generador rotatorio y con un generador lineal. Para el convertidor rotatorio es necesario una caja de engranes ya que el movimiento de la ola es muy lento, mientras que el generador opera a una velocidad mayor. En el caso del convertidor undimotriz con un generador lineal, este opera a una velocidad menor, lo cual permite acoplarlo directamente al flotador. El acoplamiento directo del generador y el flotador es muy adecuado ya que permite que el sistema sea simple, con pocos pasos intermedios de conversión y con

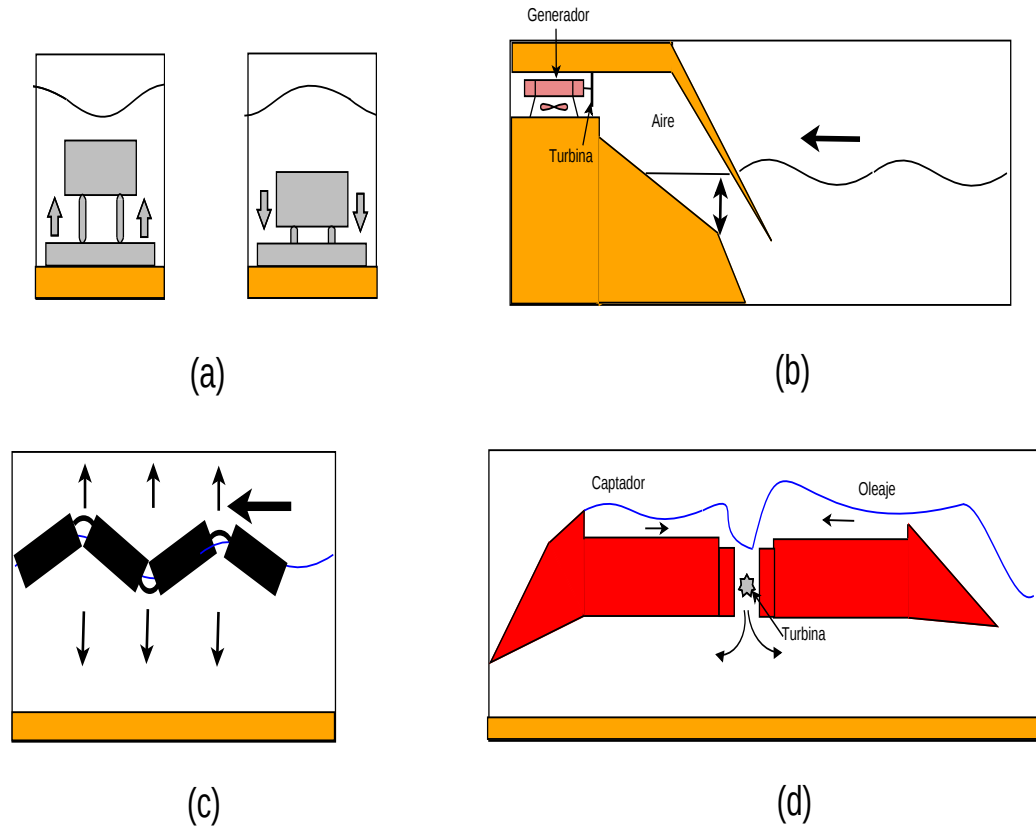


Figura 2.7: Funcionamiento básico de convertidores undimotrices: a).- oscilador de Arquímedes, b).- convertidor de columna de agua, c).- sistema Pelamis y d).- convertidor Drágon.

complejidad mecánica reducida. El acondicionamiento directo es muy parecido al principio de la generación de energía del viento, en donde la parte del movimiento del generador se acopla directamente a la turbina del viento. El generador lineal consiste de un flotador con imanes permanentes y un estátor que contiene las bobinas de la armadura. Al estar en movimiento el flotador con respecto al estátor se induce un voltaje en terminales del generador lineal de acuerdo a la ley de Faraday [Arteaga 2001].

Por otra parte, existen diferentes formas de ubicar el generador lineal en la estructura de generación. En la Figura 2.9 se presentan cuatro topologías para la aplicación del generador lineal. Los tres primeros conceptos se basan en un flotador de superficie. Las Figuras 2.9 (a), (b) y (c) muestran un sistema de punto flotante, un sistema con estructura flotante y un sistema con compuerta de placa sumergida, respectivamente. El último concepto mostrado en la Figura 2.9 (d) es

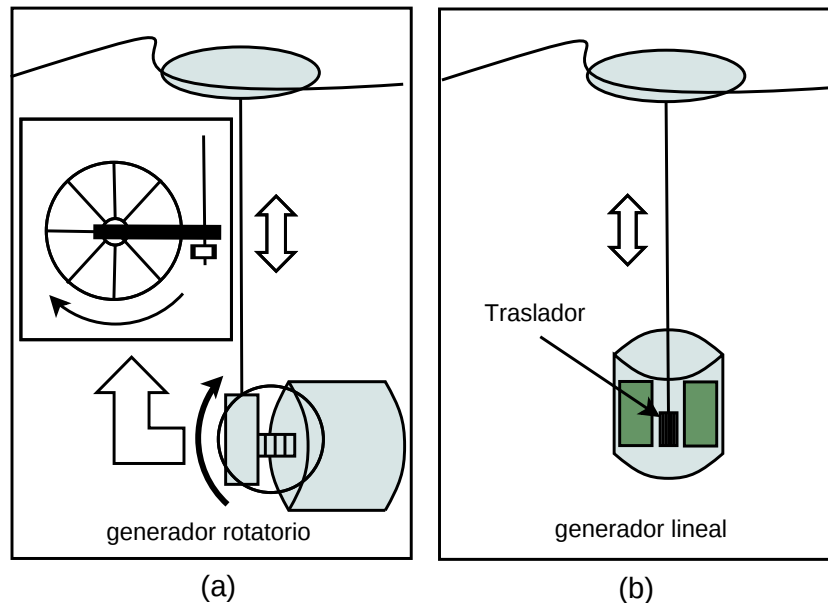


Figura 2.8: Estructura básica del convertidor de ola: (a).- sistema de generación con esquema rotatorio y (b).- sistema de generación con esquema lineal.

una estructura totalmente sumergida en la cual se aloja un flotador y un cilindro. Entre el flotador y el cilindro existe aire el cual sirve para generar el movimiento.

2.2. Topologías de parques de generación conectado a la red eléctrica

Los generadores GUs se pueden operar conjuntamente para crear parques de generación [czech 2009]. Existen distintas topologías las cuales se distinguen entre si por el número y tipo de convertidores de electrónica de potencia que se usan para acoplar el sistema de generación con el sistema eléctrico. En cada una de estas topologías se identifican tres niveles de voltaje. En la parte de baja tensión se conectan los generadores GU en serie o paralelo dependiendo de la configuración. En la parte de media tensión se conectan la salida de los convertidores de electrónica de potencia al punto de conexión en común. En la parte de alta tensión se encuentra el sistema de transmisión que puede ser en CD o CA.

Las topologías de parques de generación se agrupan en tres categorías: velocidad variable individual, velocidad variables individual con terminal común y velocidad variable individual con terminal de CD en alto voltaje. Existen dos topologías de conversión de velocidad variable individual(VI), las cuales se muestran

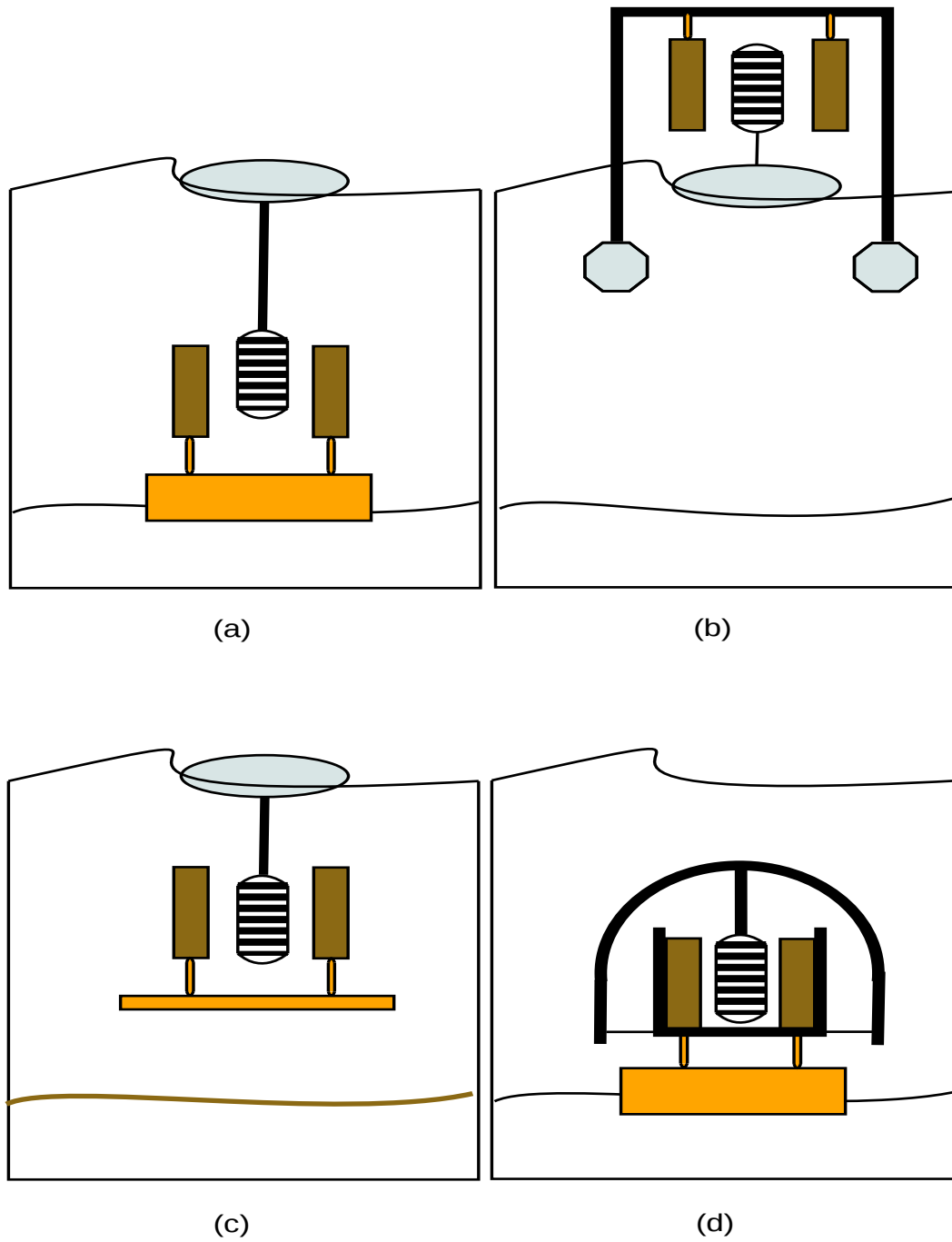


Figura 2.9: Topologías de GUs con generadores lineales: (a).-Sistema de energía de punto flotante, (b).-Sistema de energía de punto flotante con estructura, (c).-Sistema de energía de punto flotante con compuerta de placa sumergida y (d).-Sistema de energía de punto flotante con recipiente sumergido lleno de aire.

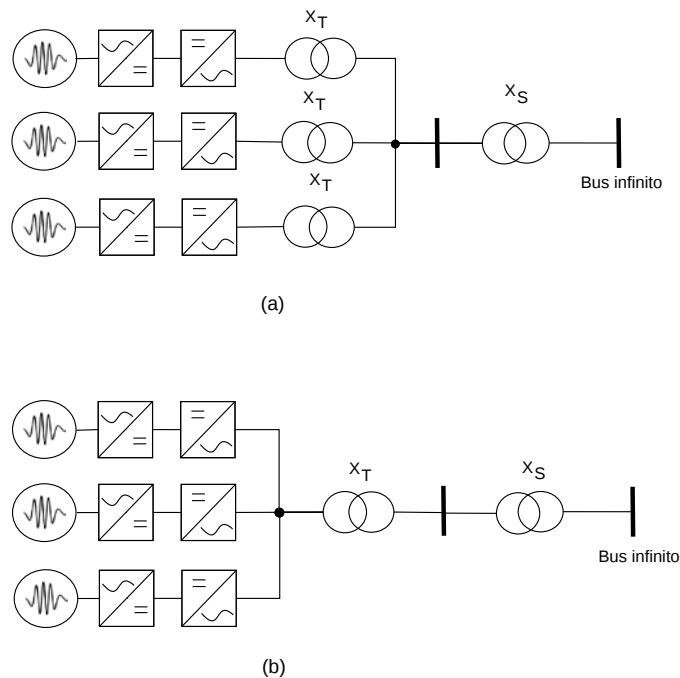


Figura 2.10: Estructura del parque de generación con GUs con topologías de velocidad variable individual: (a).- Topología de parque de GUs con transformador individual y (b).- Topología de parque de GUs con transformador común.

en la Figura 2.10. En estos esquemas es común que se utilicen convertidores de electrónica de potencia con el esquema *Back to Back*. La diferencia principal entre estos esquemas no sólo es el esquema de conexión sino también la cantidad de transformadores utilizados en las conexiones.

En la Figura 2.11 se muestran las topologías de parques con generadores GU con terminal común. En la topología de la Figura 2.11 (a) se utilizan convertidores CA-CD para rectificar el voltaje generado, los cuales se conectan en paralelo a un punto de conexión común. Además, una etapa basada en convertidores CD-CD permite regular el bus de CD que alimenta el inversor CD-CA del parque. La topología de la Figura 2.11 (b) utiliza convertidores CA-CD conectados en un punto en común, los cuales a su vez se conectan a un convertidor CD-CA que inyecta la energía a un bus infinito a través de un transformador. Por su parte, la topología mostrada en la Figura 2.11 (c) requiere un menor número de transformadores, lo cual hace más económico esta topología con respecto a las presentadas en la Figura 2.11 (a) y (b).

La Figura 2.12 presenta las topologías con transmisión de corriente directa en alto voltaje (CDAV). La diferencia entre las topologías de plataforma individual y con la topología con transmisión en CDAV son las estructuras de transmisión.

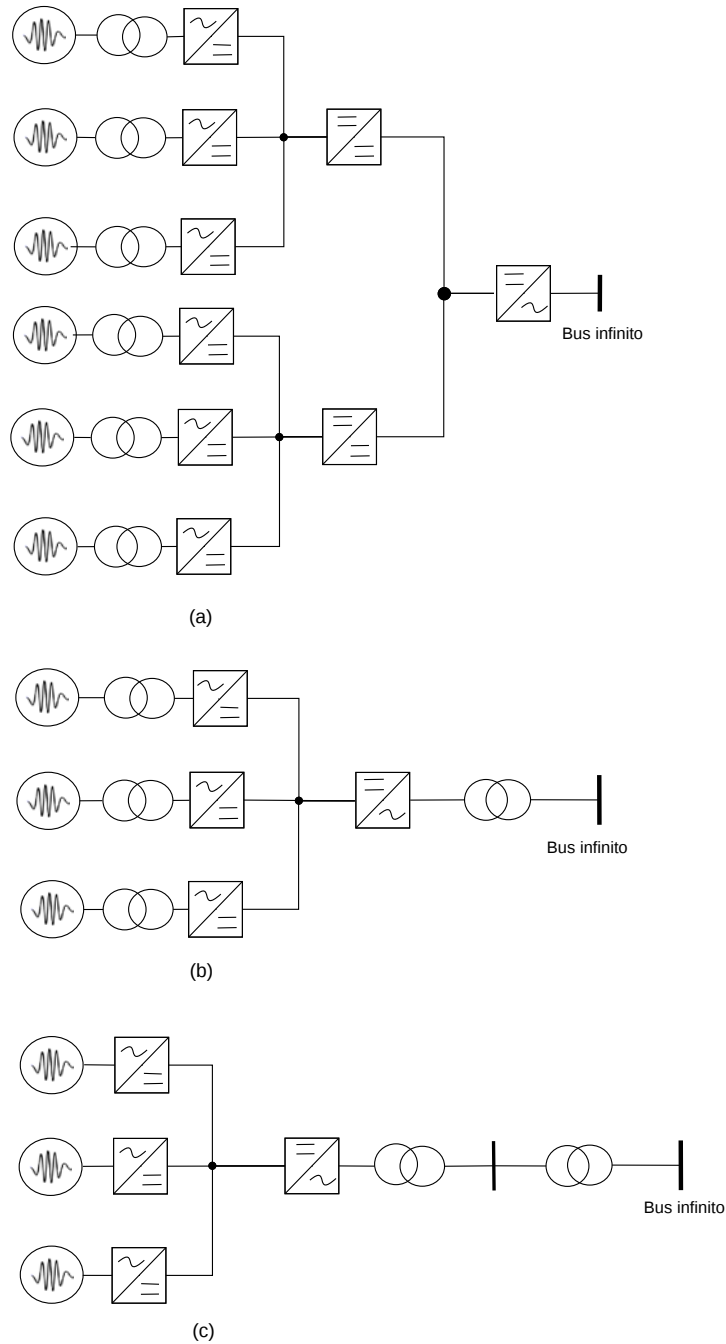


Figura 2.11: Estructura del parque de generación con GUs con topología de velocidad individual variable y una terminal de conexión común: a).- Esquema de conexión con transformador individual y con convertidores CD-CD, b).- Esquema de conexión con transformador individual sin CD-CD y c).- Esquema de conexión en estrella con plataforma terminal

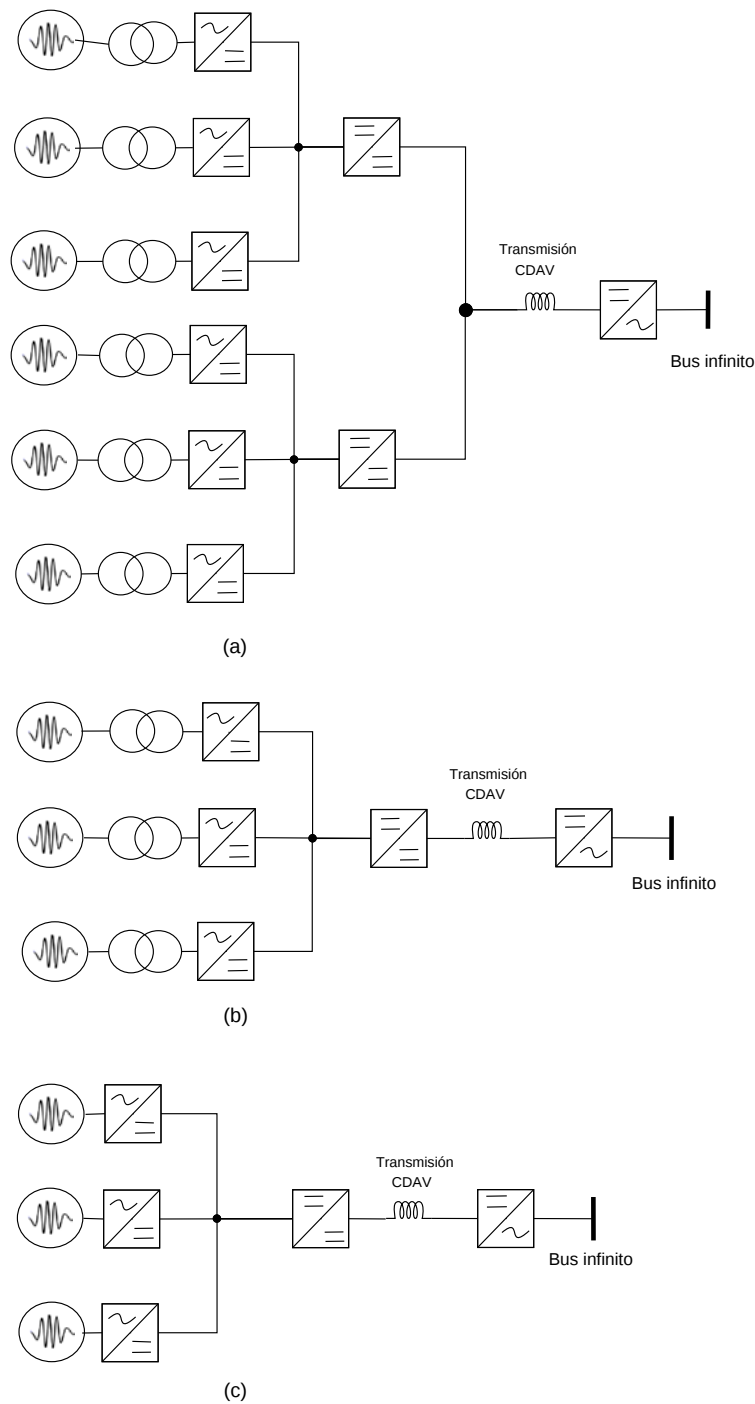


Figura 2.12: Estructura del parque de generación de velocidad individual variable y terminal de transmisión CD en alto voltaje: a).-Esquema de conexión con transmisión en CD, b).- Esquema de conexión en estrella con un convertidor CD-CD con transmisión en CD y c).- Conexión en estrella equipado con convertidores CD-CD con plataforma.

Esta topología utiliza un convertidor CD-CD en el nodo de envío y un convertidor de fuente de voltaje operado como inversor para el nodo de recepción

2.3. Sumario

En este capítulo se presentaron conceptos básicos de la generación undimotriz así como también los diferentes tipos de convertidores de energía. Se mencionan las ventajas de utilizar acoplamiento directo con generadores lineales en lugar de máquinas rotatorias y se presentan 4 alternativas para la generación de energía usando generadores lineales. Además, se describen las diferentes topologías de conexión de convertidores de energía undimotriz con transmisión en corriente alterna y en corriente directa.

Capítulo 3

Generador de Energía Undimotriz

En este capítulo se presenta el modelado del sistema de conversión de energía undimotriz, el cual se describe en términos de un subsistema mecánico y un subsistema eléctrico. Mientras que la parte hidromecánica esta representada por un oscilador de Arquímedes, la parte eléctrica esta constituida por un generador lineal de imanes permanentes. La dinámica del sistema de conversión se representa por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias.

3.1. Modelado del GU en el marco de referencia ABC

El modelo del sistema de conversión de energía utilizado en este trabajo ha sido reportado previamente [Feng Wu 2008]. Esta representación incluye la parte mecánica y eléctrica asociada al GU.

3.1.1. Ecuaciones del oscilador de Arquímedes

El conjunto de ecuaciones que describen la respuesta dinámica del OOA se reporta en [Feng Wu 2008]. Las ecuaciones diferenciales de la parte mecánica son,

$$\frac{dx}{dt} = v \tag{3.1}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_{tot}}(F_{wave} - \beta_g v - \beta_w v - k_s x) \quad (3.2)$$

en donde,

x desplazamiento vertical del flotador

v velocidad del flotador

β_g coeficiente de amortiguamiento del generador lineal de imanes permanentes

β_w coeficiente de amortiguamiento hidrodinámico del OOA

m_{tot} masa total del flotador y generador lineal

k_s constante de resorte del OOA

F_{wave} suma de fuerzas actuando sobre el flotador

Las variables β_g y β_w son contantes para el análisis de este trabajo.

3.1.2. Caracterización de la componente F_{wave}

La variable F_{wave} que aparece en la ecuación 3.2 representa la fuerza de la ola que incide sobre el GU. Las olas son perturbaciones mecánicas que se producen en la superficie del mar. Estas perturbaciones están provocadas por las fuerzas mecánicas que de alguna manera intervienen en el mar y alteran su equilibrio. Aunque en algunos casos excepcionales las olas pueden estar provocadas por terremotos o por grandes objetos chocando con la superficie del mar, en la inmensa mayoría de los casos el agente que interviene en la formación de las olas es el viento. Las olas generadas por el viento se forman cuando este incide sobre la superficie del mar y se produce un rozamiento que arrastra muy ligeramente el agua, formando micro olas o pequeñas variaciones (ver Figura 3.1(a)). Estas micro olas al elevarse sobre el nivel medio del agua ofrecen mayor superficie para que el viento las continúe empujando como si fueran velas, formándose así olas mas grandes. La potencia de la ola aumentará en tanto el viento se mantenga constante tal como se muestra en la Figura 3.1. En alta mar las olas pueden desplazarse sin consumir prácticamente energía con lo que pueden llegar hasta zonas muy alejadas, totalmente ajenas a las condiciones atmosféricas de donde se formaron [Cruz 2008].

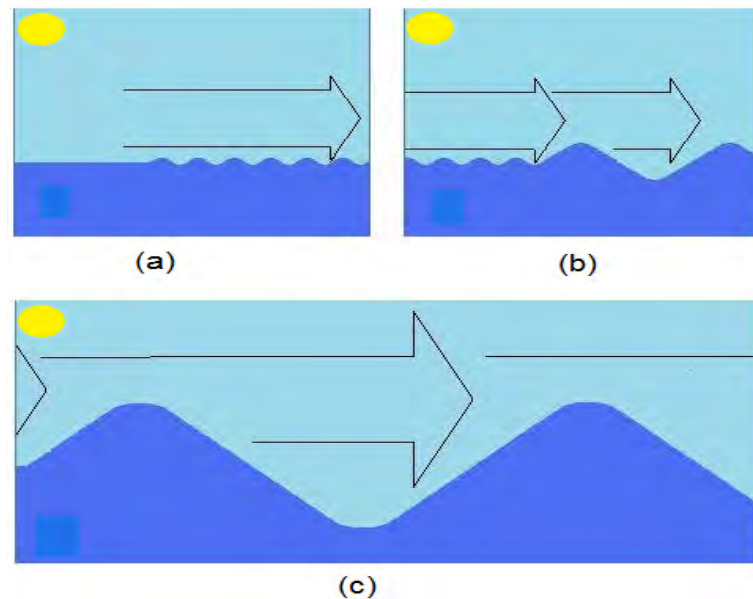


Figura 3.1: Creación de la ola: (a).- El viento fricciona con la superficie del agua y provoca micro-olas, (b).- El viento que continua soplando en la misma dirección aumentando la superficie para que el viento las siga haciendo crecer y (c).- Las olas seguirán creciendo mientras se mantenga el viento en la misma dirección.

El comportamiento de las olas se puede representar por espectros de densidad de potencia. En la Figura 3.2 se muestran 2 espectros de densidad de potencia, cada uno asociado a un sitio considerado favorable para la extracción de energía undimotriz. Ambos espectros pueden ser considerados como sitios típicos que contienen al menos un nivel moderado de energía. El primero es un modelo de espectro que se obtuvo de mediciones en el sitio de South Uist frente a la costa oeste de Escocia, en donde la profundidad del agua es de 42 metros y el recurso promedio se estima de 47.8 kW/m . El segundo espectro que se muestra en la Figura 3.2 es un espectro medido en la isla de Pico en las Azores, que se obtuvo como parte del programa de desarrollo para el dispositivo de columna construido en Pico y fue suministrada por Pontes y Oliveira (1992). El sitio tiene una profundidad del agua de 8m y un recurso promedio estimado de 26.5 kW/m . Estos espectros poseen valores similares de valor pico en el espectro a casi la misma frecuencia, sin embargo, el espectro de South Uist es más amplio en cuanto a la frecuencia y contiene 80 % más potencia que el sitio Pico. Algun dispositivo diseñado para funcionar en cualquier de estos dos sitios debe ser capaz de operar eficazmente dentro de la gama frecuencias y nivel de potencia. Por otra parte, en la Figura 3.2 se muestra una curva adicional para el sitio Pico representada con una línea punteada, la cual representa el espectro de la ola, medido a una profundidad a 104m y con una potencia de 40.3 kW/m . Observando el recurso del sitio Pico localizado en el caso

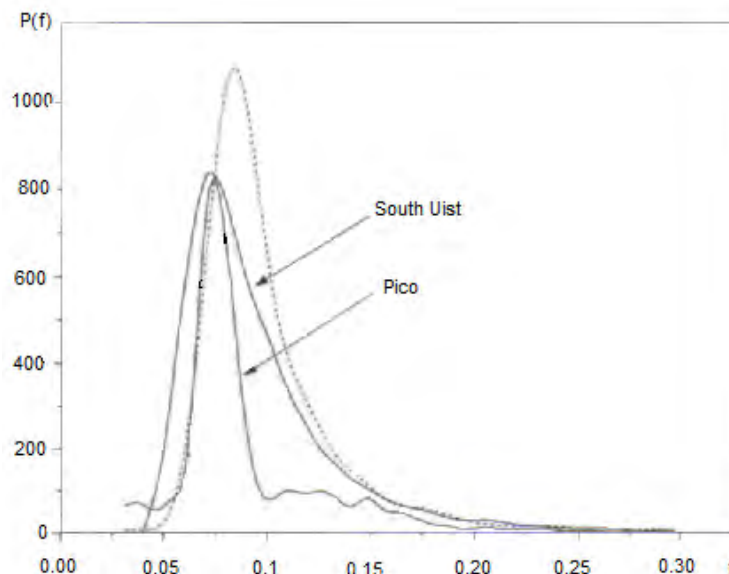


Figura 3.2: Espectros de potencia en función de la frecuencia para los sitios Pico y South Uist.

de estudio en la playa y en aguas profundas se concluye que aproximadamente un tercio de la potencia se ha perdido en el paso de la ola entre los dos sitios de medición, en donde las pérdidas ocurren en la zona de menor profundidad. Otra característica interesante que se puede observar en la Figura 3.2 para el sitio Pico es que el valor máximo de densidad de potencia ocurre a dos frecuencias diferentes [Cruz 2008].

3.1.2.1. Representación espectral de las olas aleatorias

Las olas regulares se caracterizan por su altura y período, sin embargo, este tipo de olas sólo existen en experimentos de laboratorio. Las olas del mar nunca son regulares, por lo que es necesario trabajar con los estándares estadísticos inherentes a la investigación del océano. A primera vista, las olas del mar puede parecer aleatorias, sin embargo, después de algunos análisis, se puede observar que las olas del mar siguen un espectro que se puede determinar. El espectro es la representación de una ola aleatoria en un conjunto de ondas infinitas de frecuencias diferentes y en algunos casos de direcciones distintas con el fin de obtener la energía a cada frecuencia. La función del espectro produce la probabilidad de que existe una cierta frecuencia, sin embargo, la función no es una función de densidad de probabilidad porque su integral no es igual a uno. Es importante mencionar que se pueden obtener modelos de espectros como por ejemplo el de Pierson-Moskowitz

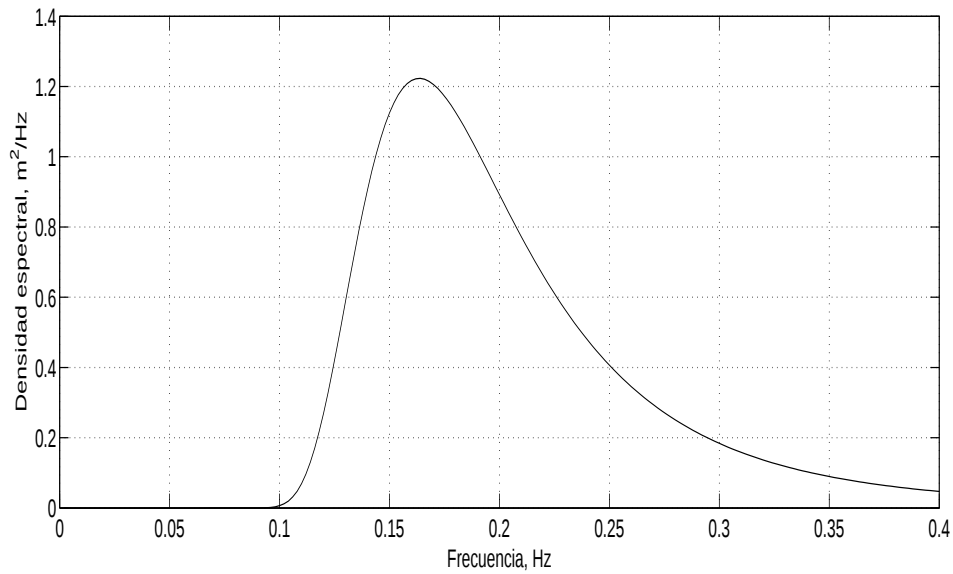


Figura 3.3: Espectros de densidad de Pierson-Moskowitz 1964.

y otro propuesto por Goda [Guilherme 2009].

Pierson-Moskowitz calcula el espectro de la ola para diferentes velocidades del viento. El espectro se puede definir como,

$$S(w) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right] \quad (3.3)$$

en donde $\omega = 2\pi f$, f es la frecuencia de la ola en Hertz, $a = 8.1e^{-3}$, $\beta = 0.74$, $\omega = g/U_{19.5}$, g es la gravedad y $U_{19.5}$ es la velocidad del viento a una altura de 19.5m por encima de la superficie del mar, la cual es la altura de los anemómetros en los barcos meteorológicos utilizados por Pierson y Moskowitz en sus estudios realizados en 1964. Además se puede determinar el espectro para una altura de ola conocida,

$$H_{1/3} = 0.21 \frac{(U_{19.5})^2}{g} \quad (3.4)$$

Al generar los espectros de la ola se obtiene las amplitudes y frecuencias para todos los componentes de las olas en el océano. La Figura 3.3 muestra un ejemplo de espectro de olas del océano generadas con la formulación Pierson-Moskowitz, calculadas en base a la entrada de $H_{1/3}$ de 1.5 metros, lo que representa condiciones de verano.

Una vez que se obtiene el espectro de la ola se puede determinar las amplitudes relativas de la ola a cada frecuencia. Para ello se toma un intervalo de longitud del espectro de frecuencia y se integra. Esto proporciona la variancia durante el intervalo. La variancia $\langle \zeta^2 \rangle$ se relaciona con la altura de la ola mediante,

$$H_{1/3} = 4\sqrt{\langle \zeta^2 \rangle} \quad (3.5)$$

Una vez que se tiene la información de la altura de ola se puede generar un perfil de superficie de la ola mediante la suma de las magnitudes de todas las componentes de frecuencia. Utilizando una fase aleatoria para cada componente de frecuencia se puede representar un estado aleatorio verdadero del mar que se comporta como una ola real [Alphonse 2007].

3.1.3. Ecuaciones del generador lineal

Las ecuaciones de los enlaces de flujo del estator del generador lineal de imanes permanentes en el marco de referencia ABC se definen como [Feng Wu 2008],

$$\boldsymbol{\psi}_s = -\mathbf{L}\mathbf{i}_{abc} + \boldsymbol{\psi}_{PMabc} \quad (3.6)$$

en donde $\boldsymbol{\psi}_s$ es el vector de enlaces de flujo del circuito del estator tal que $\boldsymbol{\psi}_s = [\psi_a, \psi_b, \psi_c]^T$ e $\mathbf{i}_{abc}$ es el vector de corrientes del estator $\mathbf{i}_{abc} = [i_a, i_b, i_c]^T$. Por su parte, la matriz de inductancias $\mathbf{L}$ y el vector de enlaces de flujo del circuito del estator debido al imán permanente $\boldsymbol{\psi}_{PMabc}$ están definidos como,

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{ss} & M & M \\ M & L_{ss} & M \\ M & M & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\boldsymbol{\psi}_{PMabc} = \begin{bmatrix} \psi_{PM} \sin((2\pi x/\lambda)) \\ \psi_{PM} \sin((2\pi x/\lambda) - 2\pi/3) \\ \psi_{PM} \sin((2\pi x/\lambda) + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

en donde L_{ss} es la inductancia propia de una fase, M es la inductancia mutua entre fases, λ es el ancho del polo del generador lineal de imanes permanentes y ψ_{PM} es el enlace de flujo magnético del imán permanente.

La ecuación de voltaje en el estator en el marco de referencia ABC esta definida como,

$$\mathbf{u}_{abc} = -\mathbf{R}\mathbf{i}_{abc} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \quad (3.9)$$

en donde $\mathbf{u}_{abc}$ es el vector de voltajes en terminales del estator $\mathbf{u}_{abc} = [u_a, u_b, u_c]^T$ y $\mathbf{R}$ es la matriz de resistencias definida como,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

en donde R_s es la resistencia de un devanado de fase. Sustituyendo (3.6) en (3.9) se obtiene la ecuación de voltaje en terminales del estator de la máquina,

$$\mathbf{u}_{abc} = -\mathbf{R}\mathbf{i}_{abc} + \frac{d(-\mathbf{L}\mathbf{i}_{abc} + \boldsymbol{\psi}_{PMabc})}{dt} \quad (3.11)$$

Reordenando,

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}_{abc}}{dt} = -\mathbf{R}\mathbf{i}_{abc} - \mathbf{u}_{abc} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{PMabc}}{dt} \quad (3.12)$$

Resolviendo para $\frac{d\mathbf{i}_{abc}}{dt}$,

$$\frac{d\mathbf{i}_{abc}}{dt} = \mathbf{L}^{-1} \left[-\mathbf{R}\mathbf{i}_{abc} - \mathbf{u}_{abc} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{PMabc}}{dt} \right] \quad (3.13)$$

en donde,

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}_{PMabc}}{dt} = \begin{bmatrix} \psi_{PM} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \frac{dx}{dt} \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \\ \psi_{PM} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \frac{dx}{dt} \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \psi_{PM} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \frac{dx}{dt} \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{PM} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) v \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right) \\ \psi_{PM} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) v \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \psi_{PM} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) v \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Las corrientes del estator en coordenadas ABC se pueden trasladar al dominio dq0 mediante la transformación que se reporta en el Apéndice A [Feng Wu 2009]. Además, el voltaje inducido de la máquina se puede determinar con,

$$v_q = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) v \psi_{PM} \quad (3.15)$$

El sistema completo en variables de estado se muestra en el apéndice B.

3.2. Implementación en Simulink

En esta sección se presenta la simulación de un generador undimotriz de 88kW alimentando cargas trifásicas balanceadas. La implementación del convertidor de energía tipo oscilador de Arquímedes se realiza utilizando el programa Simulink. Las ecuaciones diferenciales (3.1), (3.2) y (3.13) definen la dinámica del sistema de conversión. Los resultados de la simulación en Simulink se reportan en términos de formas de onda en el tiempo para la conexión de cargas resistivas, inductivas y capacitivas en terminales del sistema de conversión.

La implementación de dichas ecuaciones en el programa Simulink se presenta en la Figura 3.4. En la Figura 3.4 (a) se muestra la implementación en Simulink del sistema de ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de la parte mecánica del oscilador. La Figura 3.4 inciso (b) presenta la implementación de la Ecuación (3.10) y en la Figura 3.4 inciso (c) se muestra la implementación de la Ecuación (3.11) asociada a $\frac{\psi_{PMabc}}{dt}$. Los datos del generador lineal de imanes permanentes y los parámetros que se utilizaron en la simulación son reportados en el Apéndice C.

3.2.1. Convertidor GU conectado a una carga resistiva

En este caso de estudio se muestra el comportamiento del GU conectado a una carga resistiva trifásica y balanceada. Se considera que sobre el generador incide una ola regular definida por,

$$F_{wave} = \sqrt{2}F \sin(\omega_{wave}t) \quad (3.16)$$

en donde, $\omega_{wave} = 2\pi f_{wave}$, $f_{wave} = \frac{1}{T_{wave}}$, F es la magnitud de la fuerza que incide sobre el flotador y T_{wave} es el período de la ola. Además, los factores de amortiguamiento del generador lineal y hidrodinámicos que son constantes. La simulación de este caso de estudio se realizó en Matlab/Simulink con un método de integración tipo Runge-Kutta de cuarto orden modificado. El tiempo de simulación del caso de estudio es de 30 seg. debido a que el sistema del GU es muy lento por el período de la ola que se eligió.

En la Figura 3.5 se muestran las formas de onda en el tiempo correspondientes

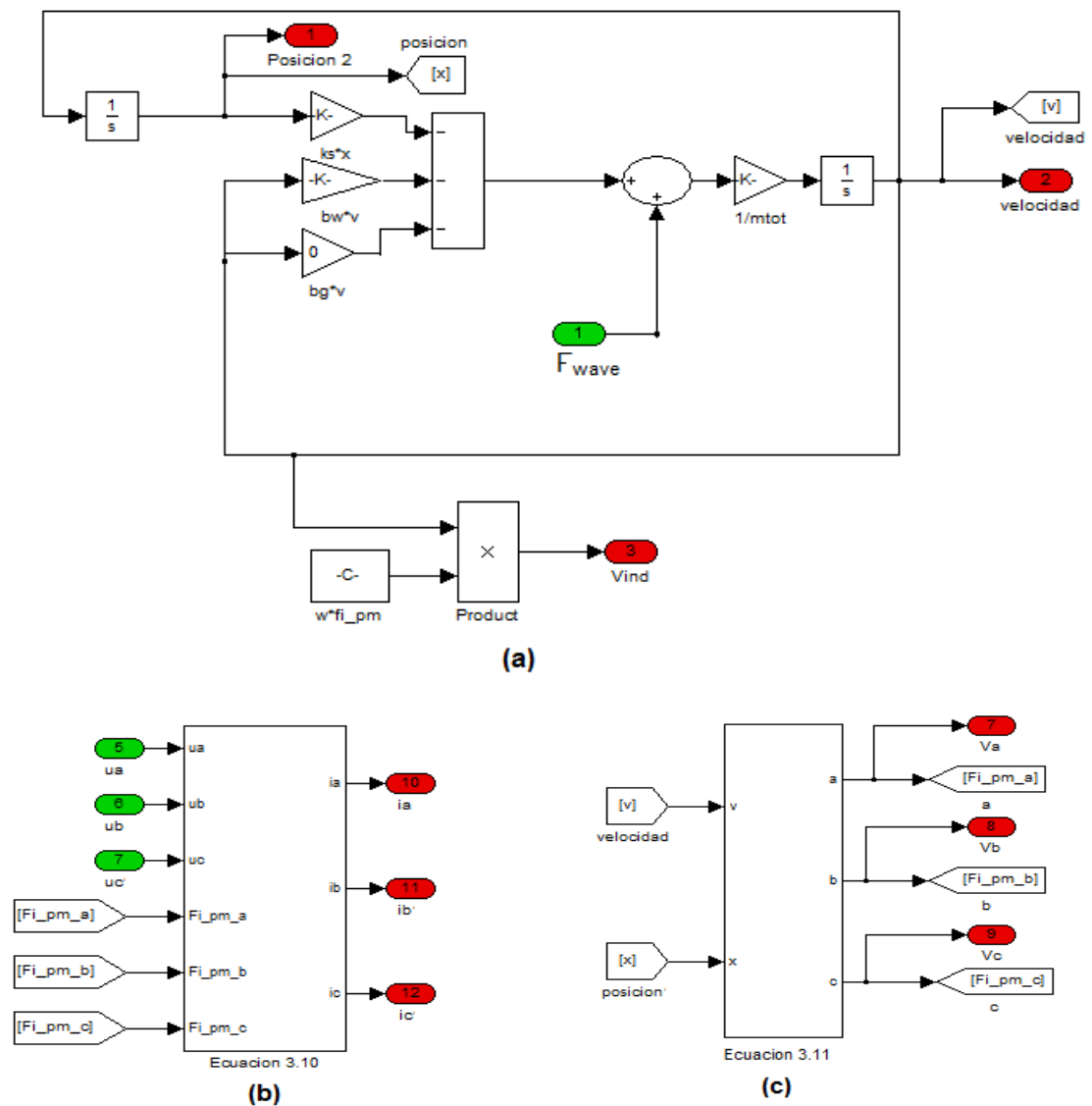


Figura 3.4: Implementación en Simulink del GU:(a).- Ecuaciones diferenciales de la dinámica de la parte mecánica (Ecuación 3.1 y 3.2) (b).- Ecuación (3.11) y (c).- Implementación de la ecuación (3.10).

a la solución del sistema GU con una carga trifásica balanceada y resistiva conectada en estrella. En las Figuras 3.5(a) y (b) se muestran las formas de onda en el tiempo de la posición y la velocidad del flotador, respectivamente. Al comparar estas formas de onda se puede apreciar que la velocidad presenta un defasamiento de $\frac{\pi}{2}$ rad respecto al desplazamiento. Estos resultados asociados a la parte mecánica del sistema GU se observan también bajo diferentes condiciones de operación. Esto significa que debido a la estructura del flotador siempre presenta un cambio de signo en la velocidad y, por lo tanto, se presenta una velocidad igual a cero cuando el desplazamiento alcanza un valor máximo o mínimo. Por su parte, la Figura 3.5 (c) muestra la solución en el tiempo de las corrientes del estator del generador lineal en el marco de referencia dq0. Se puede apreciar que las corrientes en el dominio dq0 muestran un período $T=6.5s$ igual al periodo de la fuerza de la ola F_{wave} . Por su parte, la Figura 3.5 (d) muestra las corrientes en la carga en el marco de referencia ABC, de donde se puede observar que las corrientes presentan variaciones de amplitud y frecuencia conforme cambia las características de la ola, las variaciones en cuanto amplitud y frecuencia es debido a que el voltaje inducido tiene variaciones también en amplitud y frecuencia explicado en la sección anterior. La Figura 3.6 (a) muestra el voltaje inducido del generador de imanes permanentes en el marco de referencia dq0. En el inciso (b) de la Figura 3.6 se presenta el voltaje inducido de la fase A del generador undimotriz. Por otra parte se aprecia en la Figura 3.6 (c) la potencia entregada a la carga resistiva fluctúa con una frecuencia del doble de la frecuencia de la ola. Además, la potencia entregada es positiva, la cual varía entre cero y aproximadamente $130kW$.

3.2.2. Convertidor GU conectado a una carga resistiva-inductiva

En este caso de estudio se observara el comportamiento del GU conectado a una carga trifásica balanceada RL en serie con el estator de la máquina y además conectada en estrella en terminales del generador lineal de imanes permanentes. Los valores de la carga RL se reportan en el Apéndice B. La ola que incide sobre el GU esta definida por la ecuación 3.16. El método de integración utilizado es un Runge Kutta de cuarto orden modificado. El tiempo de simulación para este caso de estudio es de 30seg.

En la Figura 3.7 se muestran las forma de onda en el tiempo correspondientes a la solución del sistema GU con carga resistiva-inductiva. Con respecto a las formas de onda reportadas en la Figura 3.5 (a) y (b) del caso anterior, se puede apreciar

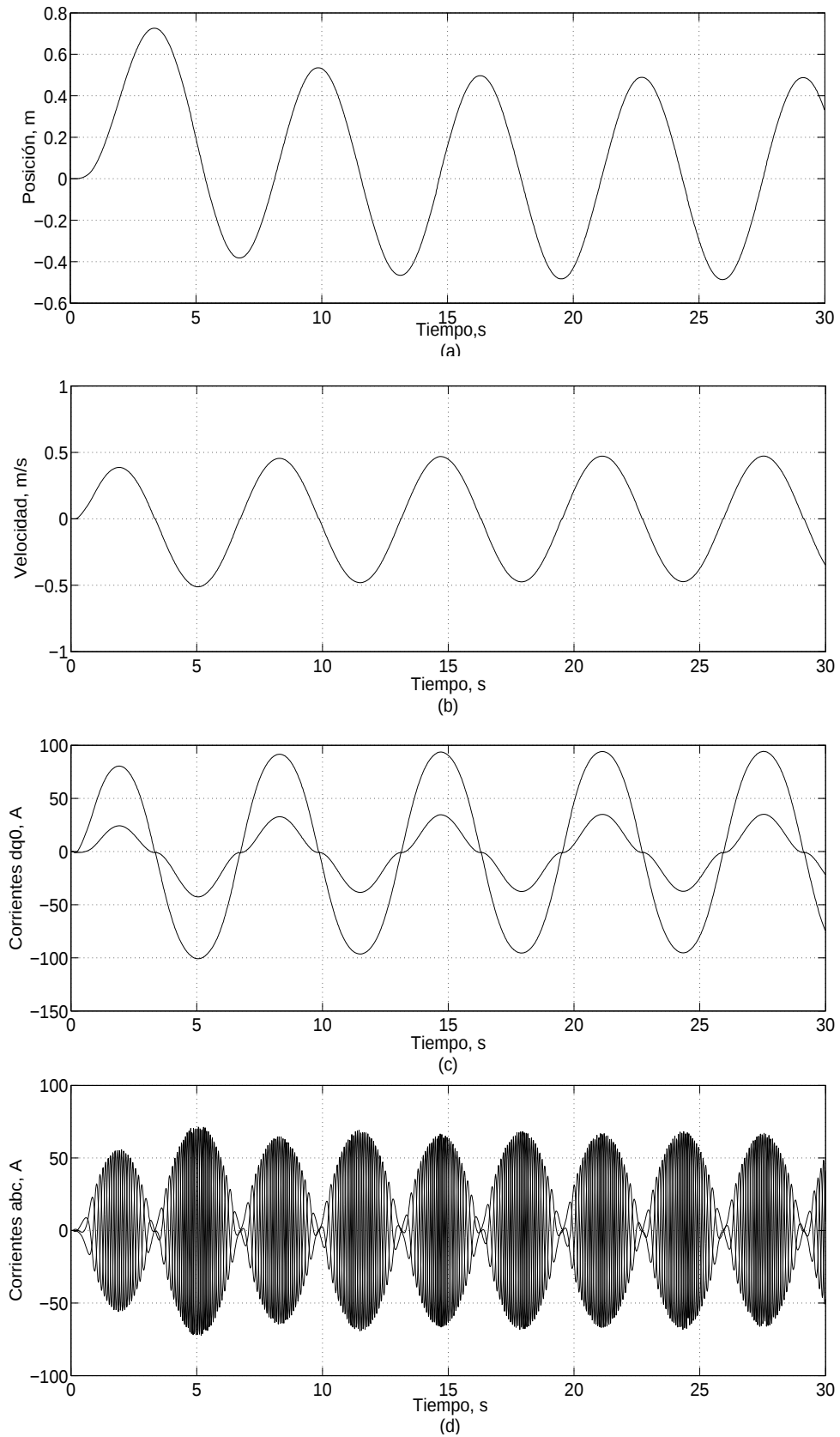


Figura 3.5: Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva: (a).- posición del flotador, (b).- velocidad del flotador, (c).- corrientes en el estator en el marco de referencia dq0 y (d).- corrientes del estator en el marco de referencia ABC

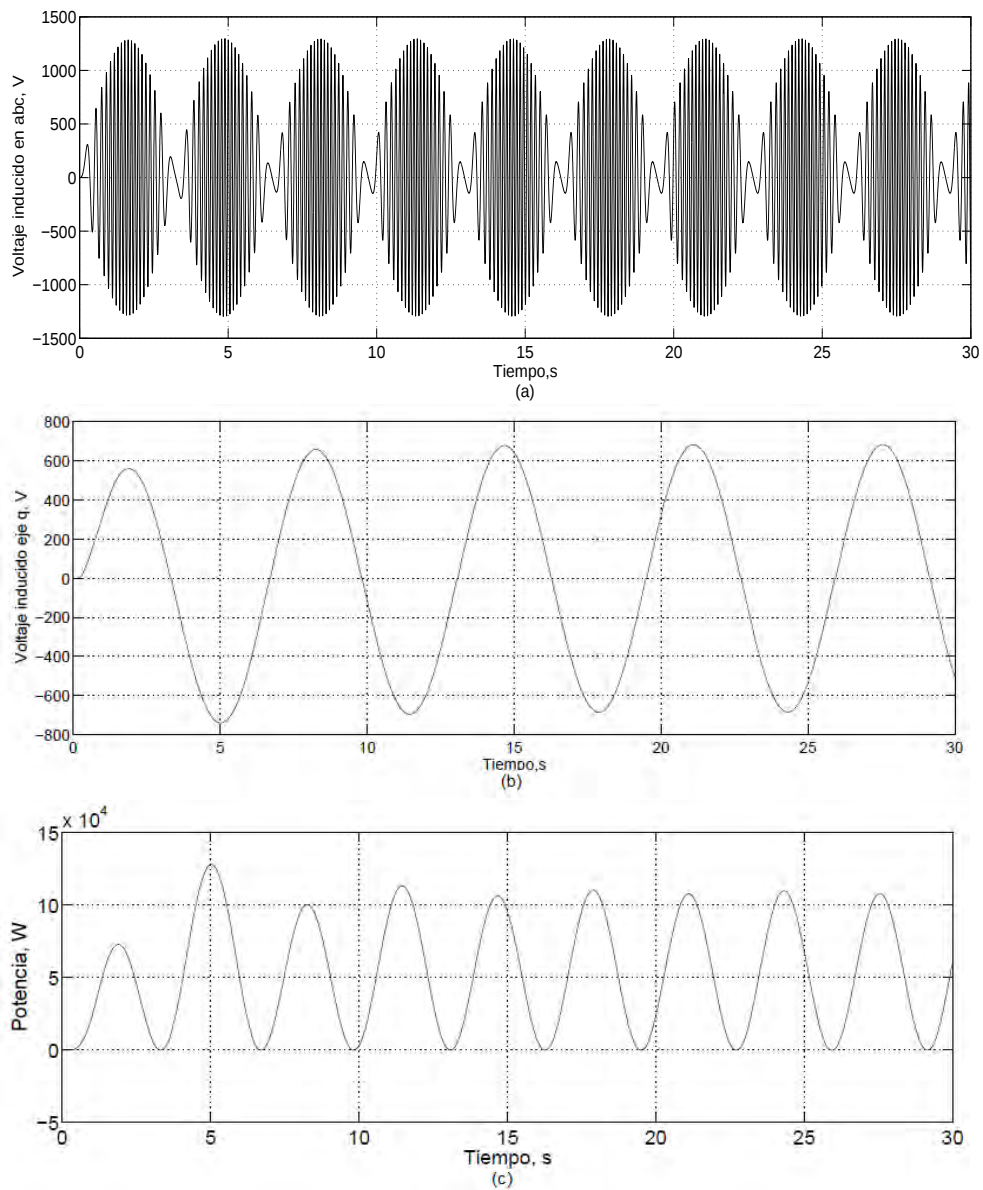


Figura 3.6: Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva: , (a).- voltaje inducido en el marco de referencia abc, (b).- voltaje inducido en el marco de referencia dq0 y (c).- potencia en la carga.

que las formas de onda del desplazamiento y velocidad no cambian con respecto al caso resistivo debido a que no se modifica ningún parámetro de la parte mecánica. La formas de onda de las corrientes en la carga en el marco de referencia dq0 se presentan en el la Figura 3.7(c), en la cual se puede observar que la corriente i_{ds} se encuentra en fase con la componente i_{qs} . Además, se puede apreciar un incremento importante en la componente i_{ds} respecto al caso puramente resistivo. En la Figura 3.7 (d) se presenta las corrientes del estator en el marco de referencia ABC, las cuales presentan un alto grado de variación en frecuencia y amplitud.

Por otra parte en la Figura 3.8 (a) se presenta el voltaje inducido en el marco de referencia abc. Además en el inciso (b) de la Figura 3.8 se muestra el voltaje inducido asociado al eje q del marco de referencia dq0, el cual es similar al caso puramente resistivo. En la Figura 3.8(c) se muestra la potencia suministrada a la carga RL, la cual fluctúa con una frecuencia del doble de la frecuencia de la ola. Además, se puede observar que la potencia entregada a la carga RL disminuye un 37.5 % respecto de la potencia suministrada a la carga resistiva.

3.2.3. Convertidor GU con carga resistiva-capacitiva

En este caso de estudio se observara su comportamiento del GU conectado a una carga RC en paralelo y además conectada en estrella, cabe mencionar que la carga es balanceada. La simulación se realizo en Matlab/Simulink con un método de integración es Runge Kutta de cuarto orden con paso variable. También es importante mencionar que la ola que incide sobre el GU esta dada por la ecuación 3.16.

La Figura 3.9 muestra las forma de onda en el tiempo correspondientes a la solución del sistema de conversión con carga resistiva-capacitiva. En la Figura 3.9 (a) y (b) se muestran las gráficas del desplazamiento y velocidad. Estas dos gráficas no presentan cambios con respecto a los dos casos anteriores. La Figura 3.9 (c) reporta las formas de onda de las corrientes en la carga en el dominio dq0, en donde se puede apreciar que las corrientes i_{ds} e i_{qs} presentan un defasamiento de 180 grados. Finalmente, en el inciso (d) de la Figura 3.9 se muestran las corrientes del estator en el marco de referencia ABC. Estas corrientes presentan variaciones de frecuencia y amplitud como en los casos anteriores. Además, se puede apreciar una disminución de la amplitud de las corrientes respecto al caso con carga RL.

Por otra parte en la Figura 3.10 inciso (a) presenta la forma de onda del voltaje inducido, lo cual es similar al caso resistivo y resistivo-inductivo. En la Figura 3.10 muestra el voltaje inducido en el marco de referencia dq0. Finalmente, la Figura

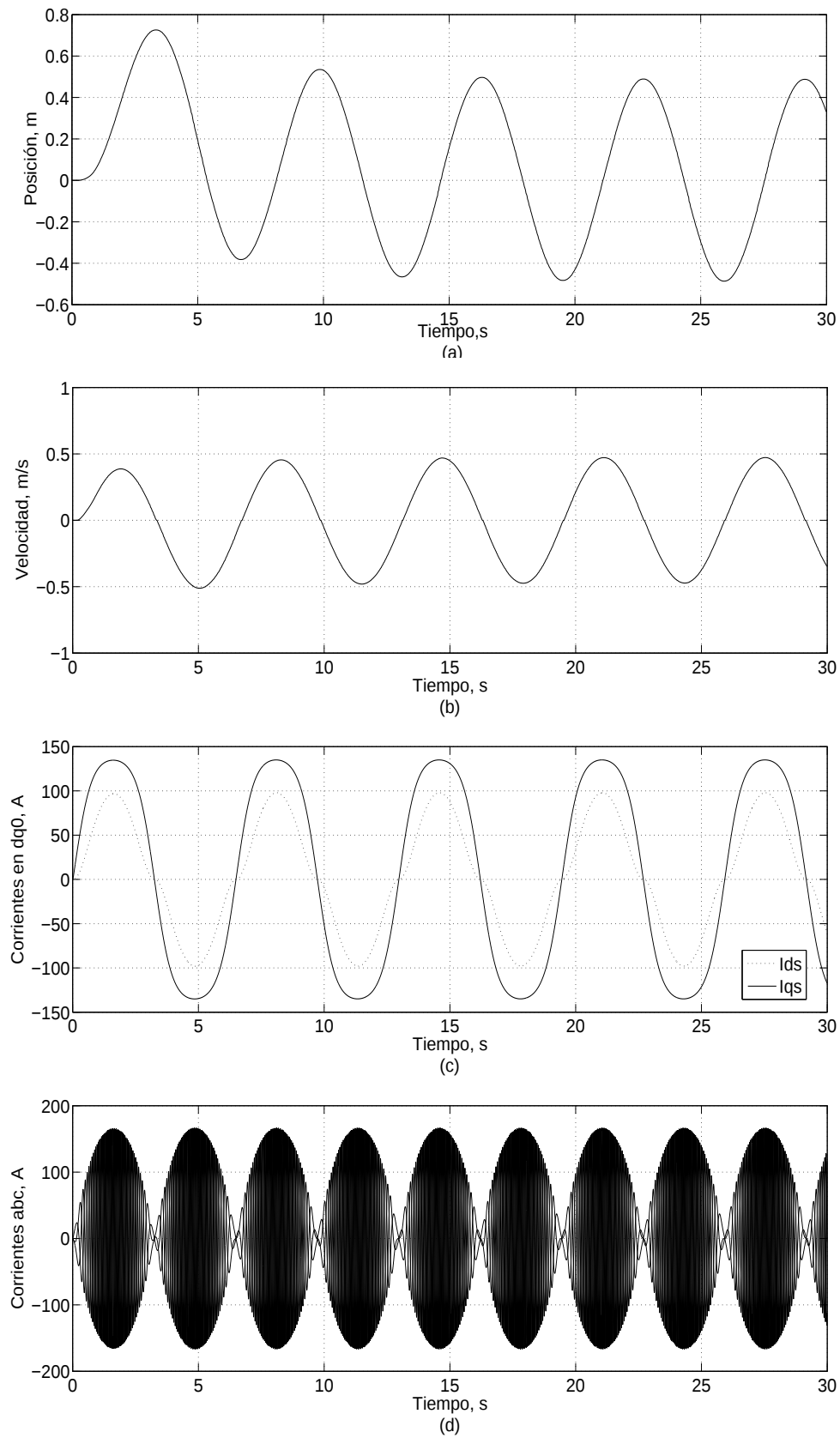


Figura 3.7: Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva inductiva: (a).- posición del flotador, (b).- velocidad del flotador, (c).- corrientes en el estator en el marco de referencia dq0 y (d).- corrientes del estator en el dominio ABC.

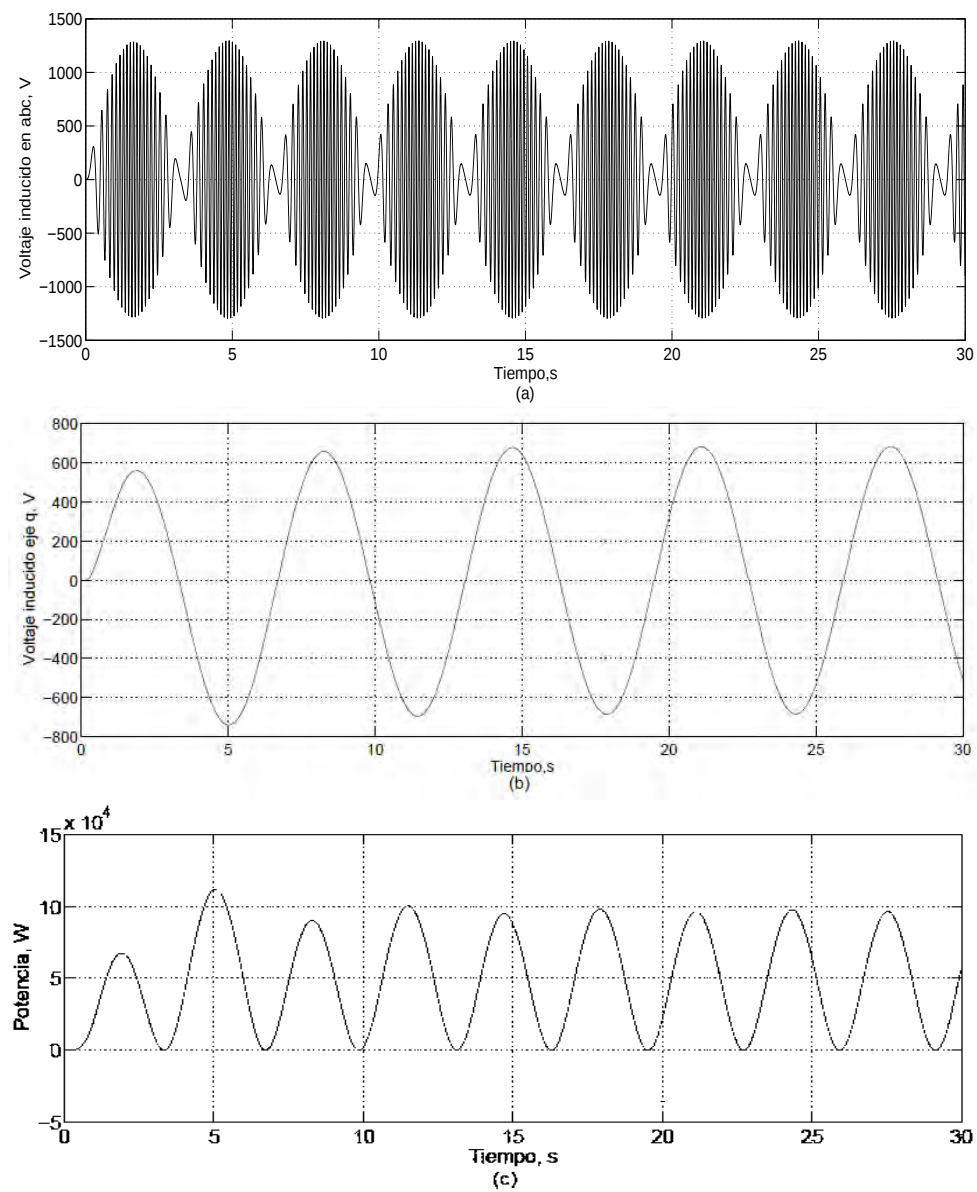


Figura 3.8: Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva inductiva: (a).- voltaje inducido en el dominio ABC, (b).- voltaje inducido en el dominio dq0 y (c).- potencia en la carga.

3.10(c) muestra la potencia entregada a la carga RC, en donde se puede apreciar que la potencia entregada a la carga varía entre los valores de 0 a 111kW con una frecuencia fundamental del doble de la frecuencia de la fuerza de la ola.

3.3. Conclusiones

En este capítulo se presentó el modelado del GU y la implementación en Simulink del convertidor de energía undimotriz. Se analizó la operación del generador por olas alimentando a cargas trifásico del tipo resistivas, inductivas y capacitivas. El generador lineal de imanes permanentes y las cargas están modeladas en el marco de referencia ABC. Por otra parte, la potencia entregada a las cargas presenta una frecuencia de oscilación que corresponde al doble de la frecuencia de la ola. Debido a esta característica fluctuante de la potencia generada por un convertidor de energía por olas, se requiere utilizar convertidores de electrónica de potencia para acoplar el sistema de conversión a un sistema eléctrico de potencia. En los casos de estudio de este capítulo se puede apreciar que la generación de energía por olas tiene grandes variaciones en cuanto a frecuencia y amplitud conforme el flotador sigue el movimiento de la ola.

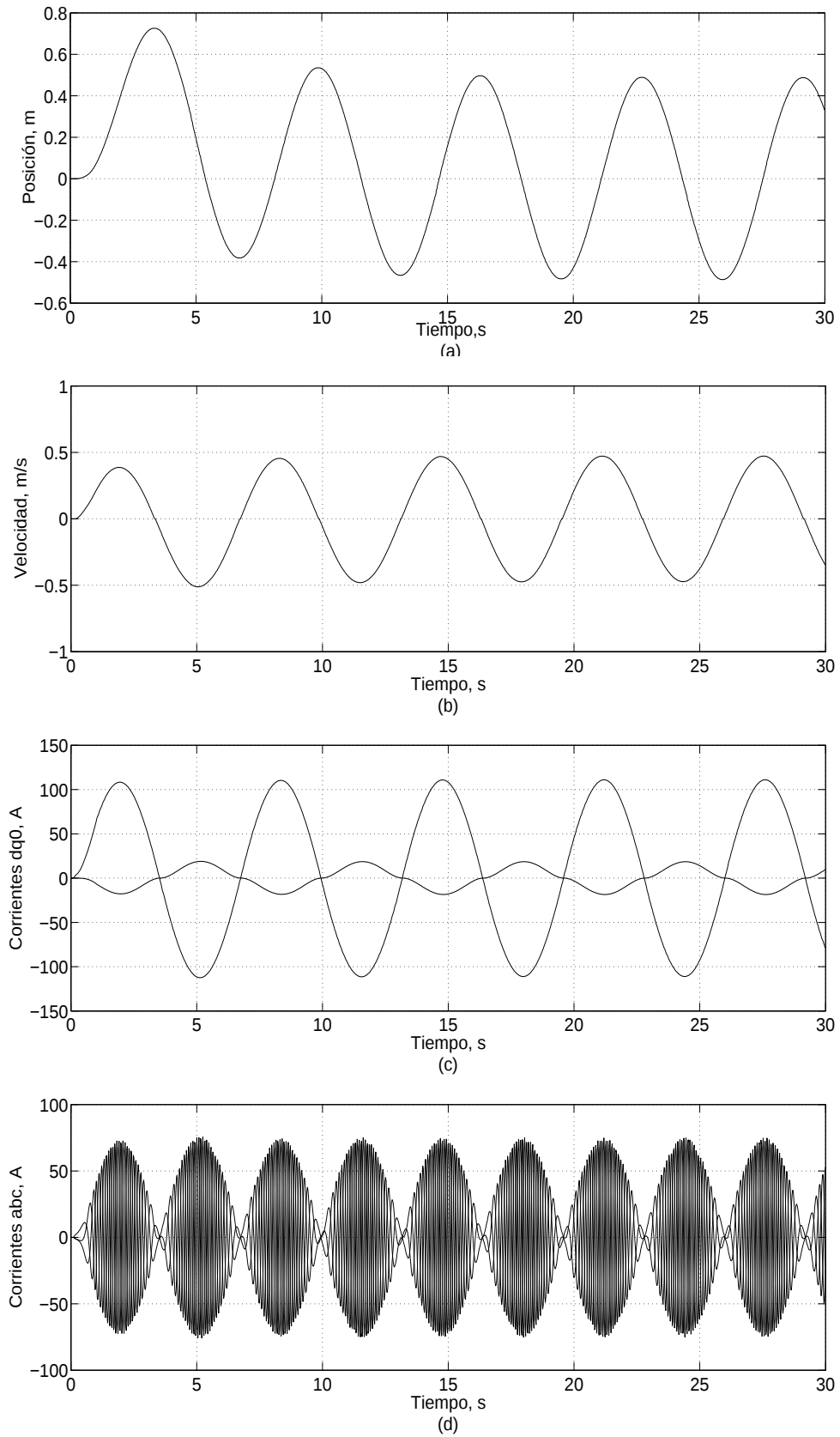


Figura 3.9: Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva-capacitiva: (a).- posición del flotador, (b).- velocidad del flotador, (c).- corrientes en el estator en marco dq0 y (d).- corrientes del estator en el marco ABC.

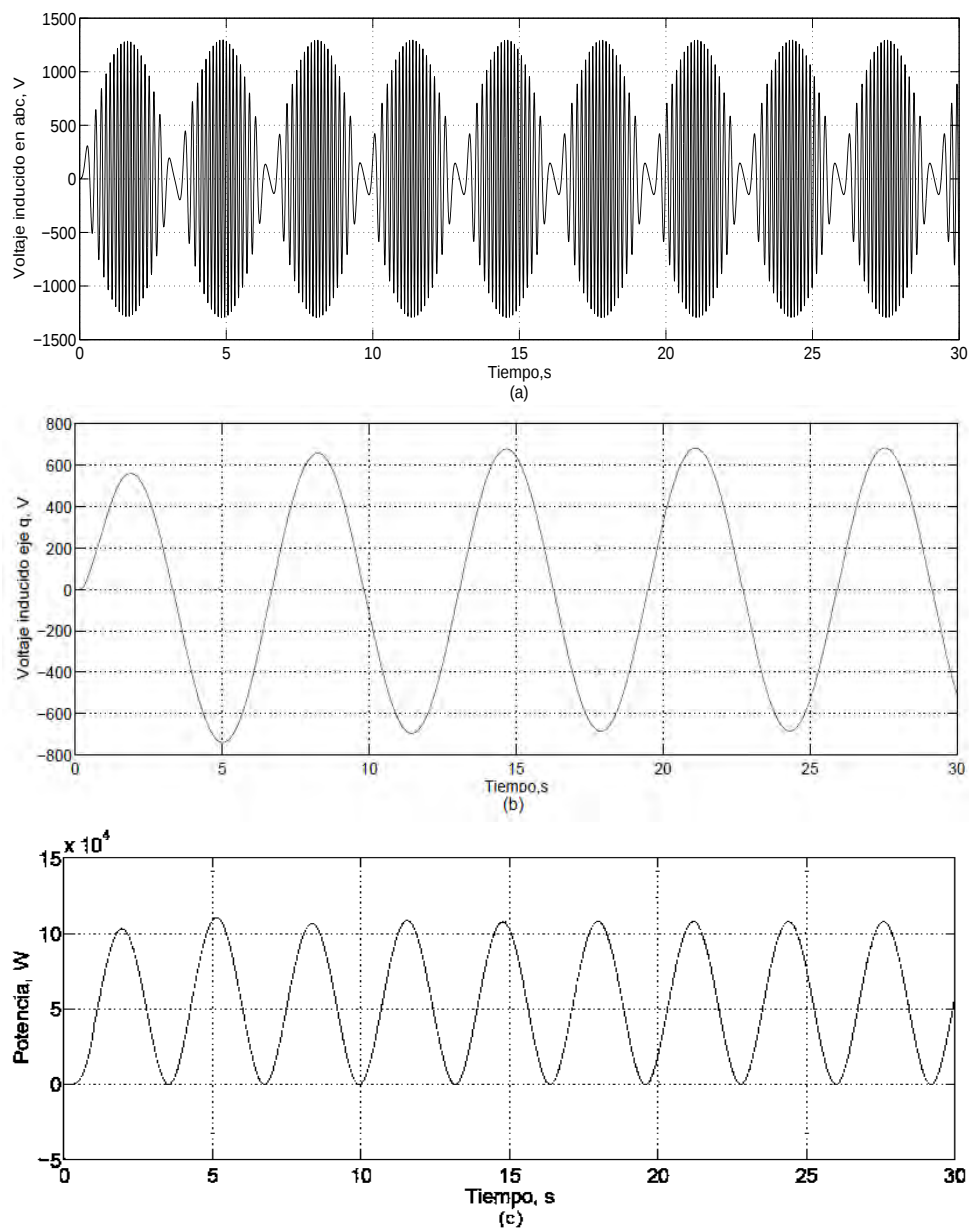


Figura 3.10: Solución en el tiempo de sistema GU con carga resistiva-capacitiva: (a).- voltaje inducido en el marco ABC, (b).- voltaje inducido en el marco dq0 y (c).- potencia en la carga.

Capítulo 4

Convertidores de Electrónica de potencia

La generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía juega un papel importante en los sistemas de potencia modernos. Esto se debe al hecho de que los costos de producción de electricidad con fuentes renovables ha disminuido considerablemente en las últimas décadas. Como consecuencia, la producción de electricidad con fuentes de generación como el viento se ha vuelto competitiva en comparación a las fuentes convencionales de energía. Este tipo de tecnologías de generación basados en fuentes renovables de energía tienen la particularidad que no pueden conectarse directamente al sistema de potencia. En estos casos se requiere algún tipo de interface de electrónica de potencia. Por ejemplo, los sistemas de generación undimotriz requieren de un sistema de conversión CA-CD-CA para acoplar el generador por olas con el sistema eléctrico de potencia. En estos esquemas se utiliza un convertidor de fuente de voltaje como elemento principal para realizar la conversión de CA-CD y CD-CA. Un aspecto importante es el sistema de control del inversor, el cual se encarga de transferir la energía generada hacia el sistema de potencia. En este capítulo se presenta el diseño de un controlador de voltaje para un inversor PWM, el cual tiene como objetivo transferir la potencia producida por el generador undimotriz hacia una carga aislada.

4.1. Sistema de generación undimotriz con interface de electrónica de potencia

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama esquemático de un sistema de generación undimotriz alimentando una carga trifásica a través de una etapa basado en electrónica de potencia. La fuente de energía esta representada por un generador undimotriz basado en un oscilador de Arquímedes y un generador lineal de imanes permanentes. Este generador produce un voltaje trifásico de magnitud y frecuencia variable. Por lo tanto, este sistema de generación no puede conectarse directamente a una red eléctrica. Es por ello que se requiere una etapa de electrónica de potencia para transformar el voltaje de salida variable del generador undimotriz en un voltaje de magnitud y frecuencia constantes para acoplarse a la red. La salida del generador undimotriz se convierte a CD por medio de un rectificador trifásico no controlado y posteriormente a CA mediante un inversor. En esta tesis se implementa la etapa de rectificación utilizando un puente trifásico de diodos, mientras que la etapa de inversion se realiza con un convertidor fuente de voltaje usando un esquema de conmutación de modulación de ancho de pulso. Existen otras topologías de acoplamiento del GU a la red, una de esas topologías intercambian el rectificador trifásico de diodos por un convertidor fuente de voltaje. El convertidor fuente de voltaje tiene la función de controlar el oscilador de Arquímedes, de tal forma que se encuentre en resonancia el GU con la ola que incide sobre el. Los beneficios que tiene la topología mencionada es poder extraer la máxima energía de la ola.

El sistema de control de lazo cerrado implementado en este trabajo se muestra en la Figura 4.2, en donde el voltaje de salida v_0 es medido y comparado con el voltaje de referencia V_{ref} . El controlador tiene como entrada el error de voltaje y produce el voltaje de control V_c . Este voltaje de control actúa como entrada al modulador de ancho de pulso para producir la señal de conmutación $d(t)$ para el inversor PWM. Con el propósito de aplicar teoría de control lineal, los bloques del sistema de control mostrada en la Figura 4.2 se linealizan alrededor de un punto de operación mediante perturbaciones de pequeña señal.

4.2. Control de voltaje

La Figura 4.3 muestra un inversor trifásico alimentando una carga aislada y el sistema de control. El voltaje de CD de entrada al inversor lo provee el generador

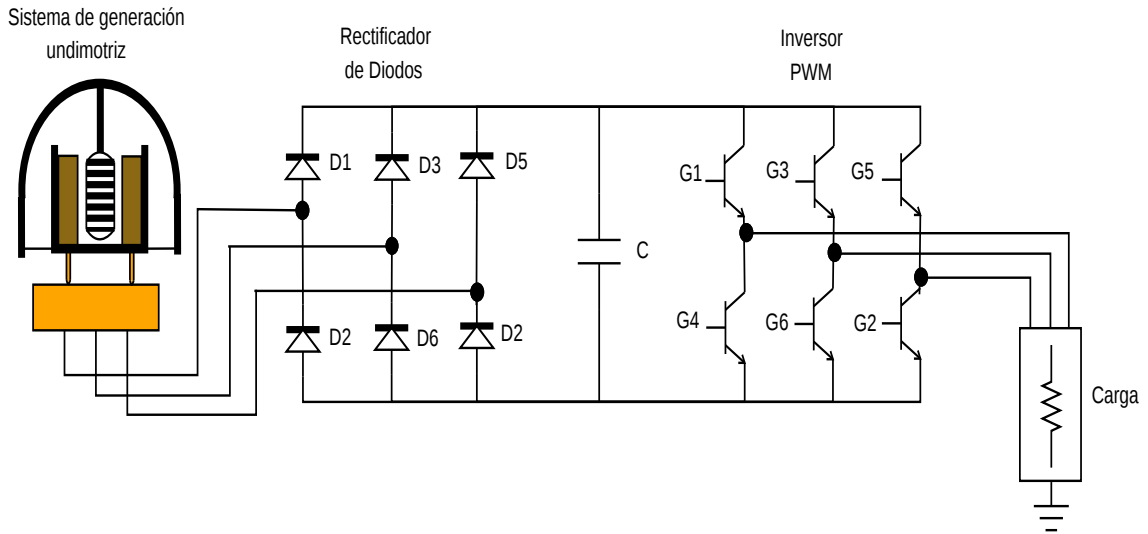


Figura 4.1: Sistema de generación undimotriz acoplado a un sistema eléctrico.

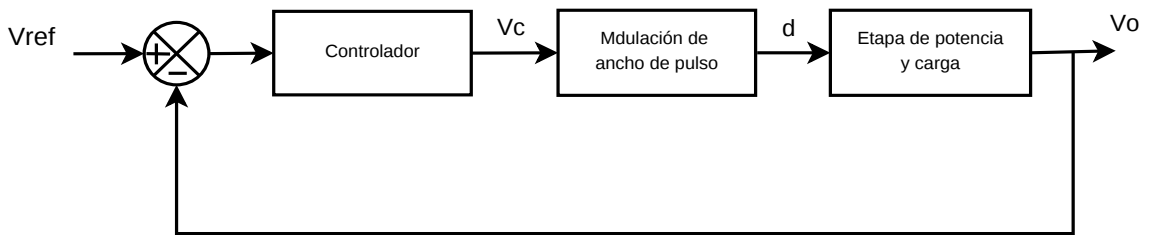


Figura 4.2: Sistema de control de lazo cerrado.

undimotriz, el cual se representa en esta figura como una fuente de voltaje de CD. El controlador contiene un lazo de control del voltaje en la carga, mientras que el bus de voltaje de CD no es regulado en esta tesis. El controlador de voltaje minimiza el error entre la referencia de voltaje y el voltaje medido. La salida del controlador de voltaje se transforma del marco de referencia dq al marco ABC. La salida del controlador de voltaje en coordenadas ABC alimenta un generador de modulación por ancho de pulso, el cual determina el ciclo de trabajo de cada uno de los elementos de conmutación que integran al inversor. Las componentes de frecuencia asociadas al esquema PWM son atenuados por medio de un filtro L-C ubicado entre el inversor y la carga. El diseño del sistema de control hace uso de la representación del convertidor fuente de voltaje por medio de valores promedio de voltajes y corrientes sin considerar el rizado asociado a la conmutación de alta frecuencia.

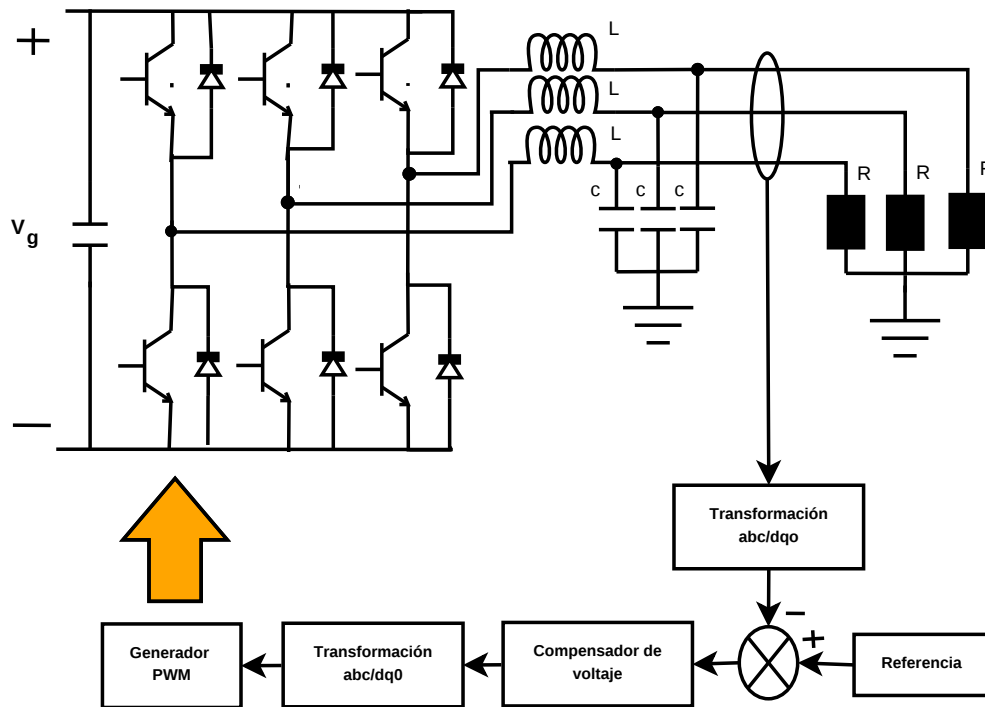


Figura 4.3: Esquema de control del inversor alimentando una carga aislada.

4.2.1. Modelo promediado de un inversor en coordenadas ABC

El circuito del inversor trifásico se puede representar por medio de tres interruptores bidireccionales como se muestra en la Figura 4.4. Las señales de modulación de ancho de pulso para controlar los interruptores y generar voltajes trifásicos balanceados se obtienen comparando tres señales de control con una forma de onda triangular V_{tri} . Las señales de control que determinan la amplitud y la frecuencia de los voltajes de salida se definen como,

$$\begin{aligned} v_{c,A}(t) &= \hat{V}_c \sin(\omega t) \\ v_{c,B}(t) &= \hat{V}_c \sin(\omega t - 120^\circ) \\ v_{c,C}(t) &= \hat{V}_c \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (4.1)$$

El modelo promediado del inversor trifásico en coordenadas ABC se obtiene aplicando el operador promedio a cada rama de conmutación del modelo mostrado en la Figura 4.4 [Mohan 2003]. El modelo promediado resultante se muestra en la Figura 6.1, en donde el voltaje de salida del inversor se puede expresar como,

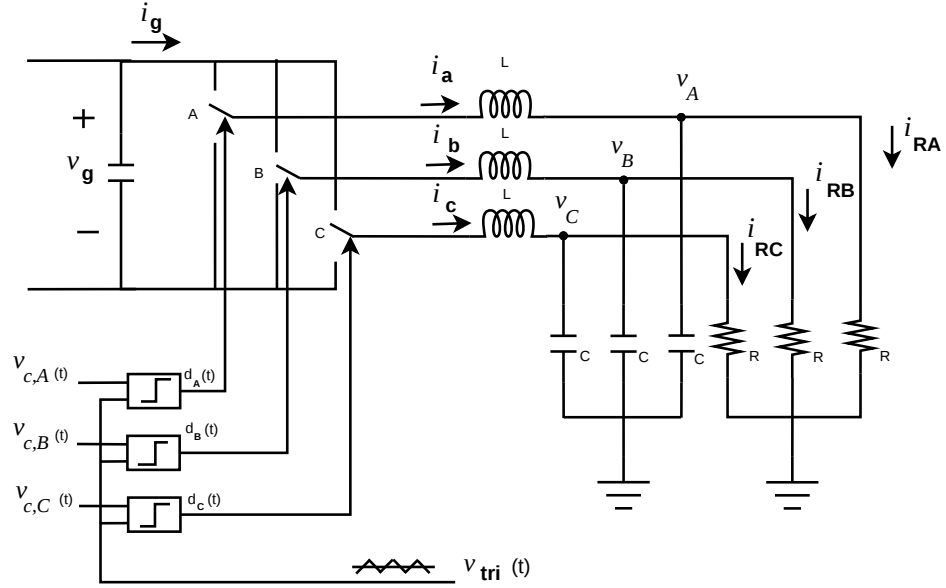


Figura 4.4: Representación del inversor trifásico con interruptores bidireccionales.

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} V_g \quad (4.2)$$

y la corriente en el lado de CD es,

$$i_g = \begin{bmatrix} d_a & d_b & d_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix}^T \quad (4.3)$$

en donde d_a , d_b y d_c son los ciclos de trabajo de línea a neutro. En la Figura 4.6 muestra como se representa el ciclo de trabajo y esta definido por,

$$d_a = \frac{T_{up}}{T_s} \quad (4.4)$$

en donde T_s es el tiempo del período y se define como $T_s = \frac{1}{f_s}$. Además, las ecuaciones que describen las corrientes en los inductores y los voltajes en los capacitores se definen como,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \left[V_g \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{v}_A \\ \bar{v}_B \\ \bar{v}_C \end{bmatrix} \right] \quad (4.5)$$

$$(4.6)$$

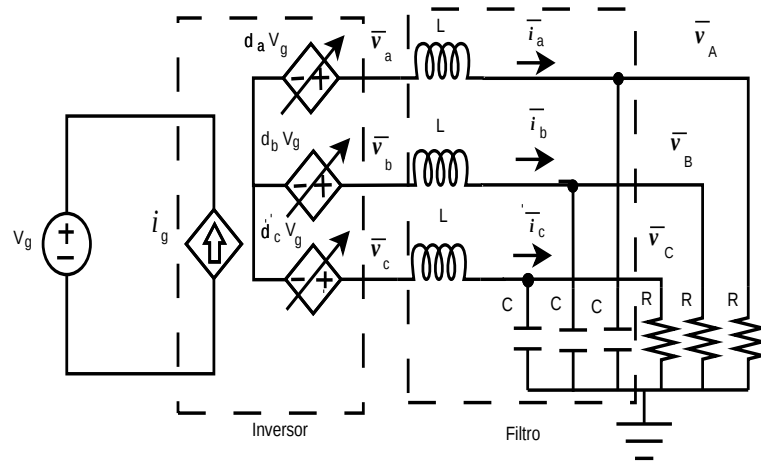


Figura 4.5: Modelo promediado del inversor trifásico, filtro y carga en el dominio de las fases.

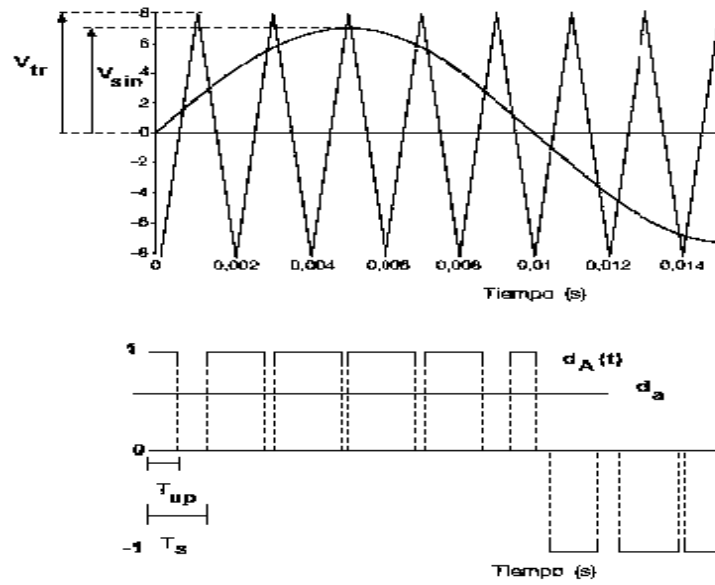


Figura 4.6: Esquemático del ciclo de trabajo.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{v}_A \\ \bar{v}_B \\ \bar{v}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \left[\begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ra} \\ \bar{i}_{Rb} \\ \bar{i}_{Rc} \end{bmatrix} \right] \quad (4.7)$$

$$(4.8)$$

El diseño de un controlador de voltaje en coordenadas ABC presenta algunas dificultades. Debido a que todas las variables trifásicas son senoidales en estado

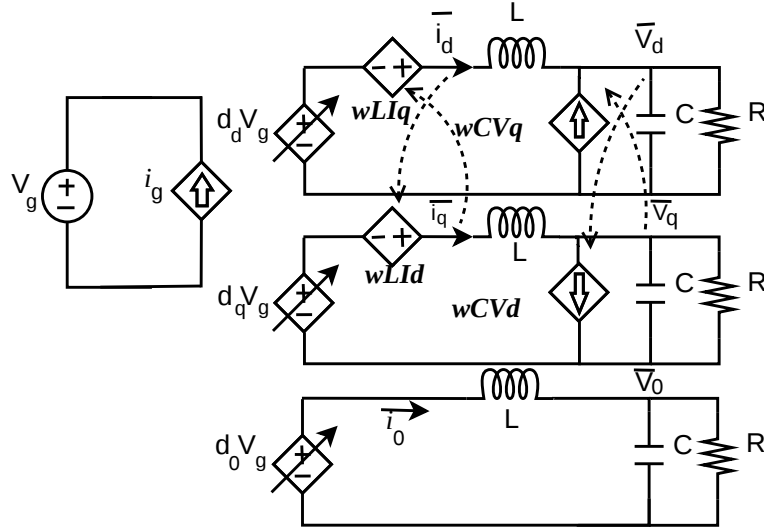


Figura 4.7: Modelo promediado del inversor trifásico con filtro de segundo orden y carga resistiva en el marco de referencia dq0.

estable, no es posible obtener un modelo de pequeña señal. Sin embargo, las variables trifásicas senoidales en coordenadas ABC se pueden transformar en valores de CD en coordenadas dq0. El modelo promediado en coordenadas dq0 se obtiene aplicando las transformaciones reportados en el Apéndice A. El modelo resultante en el marco dq0 se reporta en la Figura 4.7. Se puede apreciar que el inversor en coordenadas dq0 se puede dividir en dos subsistemas. El subsistema del eje cero es un sistema de segundo orden que es equivalente a un convertidor reductor CD-CD, mientras que los ejes d y q se encuentran acoplados y forman un sistema de cuarto orden. Si el subsistema del eje dq se desacopla entonces el inversor se transforma en tres convertidores reductores CD-CD [Zhang 2000].

4.2.2. Linealización del convertidor reductor CD-CD

La representación promedio de un convertidor reductor CD-CD se muestra en la Figura 4.8 (a). Las cantidades promedio descritas en la Figura 4.8 se pueden describir como la suma de la componente de CD de estado estable y la perturbación de pequeña señal,

$$\begin{aligned} d(t) &= D + \tilde{d}(t) \\ \bar{v}_g(t) &= V_g + \tilde{v}_g \\ \bar{i}_L(t) &= I_L + \tilde{i}_L \end{aligned} \tag{4.9}$$

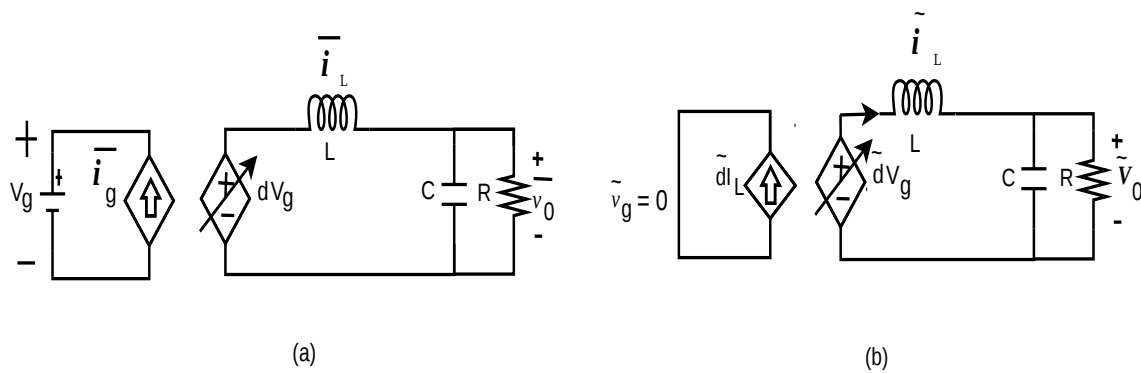


Figura 4.8: Linealización de un convertidor reductor CD-CD en el modo de conducción continuo: a).-modelo promediado y b).- modelo de pequeña señal.

Las cantidades de CD de estado estable se representa con letras mayúsculas y la perturbación de pequeña señal con el símbolo tilde.

La representación linealizada de pequeña señal se muestra en la Figura 4.8(b). La función de transferencia del convertidor reductor en el modo de conducción continua es [Mohan 2003],

$$\frac{\tilde{v}_0}{\tilde{d}} = \frac{V_g}{LC} \frac{1}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (4.10)$$

en donde la señal de entrada es la acción de control asociado al ciclo de trabajo y la salida es el voltaje en terminales del filtro. V_g es el voltaje de CD en la entrada del inversor, L es la inductancia del filtro, C es el capacitor del filtro y R es la resistencia de la carga. Este modelo se utiliza para el diseño del controlador de voltaje.

4.2.3. Diseño del lazo de control

La Figura 4.9 muestra el diagrama de bloques del sistema con el lazo de control de retroalimentación. En este trabajo de tesis se considera una carga trifásica balanceada, por lo cual se elimina el circuito del eje 0 de la Figura 4.7. Además, se desprecian los acoplamientos entre los circuitos de los ejes d y q que se observan en la Figura 4.7 con el objetivo de simplificar el diseño del sistema de control. La representación de pequeña señal del inversor trifásico se simplifica a un convertidor CD-CD reductor para el eje d y un convertidor CD-CD reductor para el eje q. Por

lo tanto, la representación aproximada del inversor trifásico, filtro y carga para los ejes d y q es,

$$G_p(s) \approx \frac{V_g}{s^2 LC + s \frac{L}{R} + 1} \quad (4.11)$$

En el lazo de control se encuentran los compensadores de voltaje de eje d y q. El lazo de control de voltaje del eje d esta dado por,

$$L_d = G_p G_c = \left(\frac{\tilde{v}_d}{\tilde{d}_d} \right) G_c \quad (4.12)$$

en donde G_c representa el controlador PI definido como,

$$G_c = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (4.13)$$

La función de transferencia $\left(\frac{\tilde{v}_d}{\tilde{d}_d} \right)$ se define en (4.11). Las constantes k_p y k_i son la ganancia proporcional e integral. Por otra parte, el lazo de control de eje q se define de forma similar como,

$$L_q = G_p G_c = \left(\frac{\tilde{v}_q}{\tilde{d}_q} \right) G_c \quad (4.14)$$

4.2.4. Estrategia de diseño: compensador sintonizado con el método Bode analítico

La acción de control se basa en la regulación del ciclo de trabajo asociada al esquema de conmutación PWM. Los controladores PI se encargan de generar voltajes de control que se comparan con una señal portadora de alta frecuencia triangular para determinar el ciclo de trabajo. Los parámetros de diseño en el dominio del tiempo establecidos en este trabajo son los siguientes:

*Tiempo de establecimiento $t_s = 1ms$

*Error de estado estable $e_{ss} = 2\mu$

*Máximo sobreimpulso $M_p = 0.03$

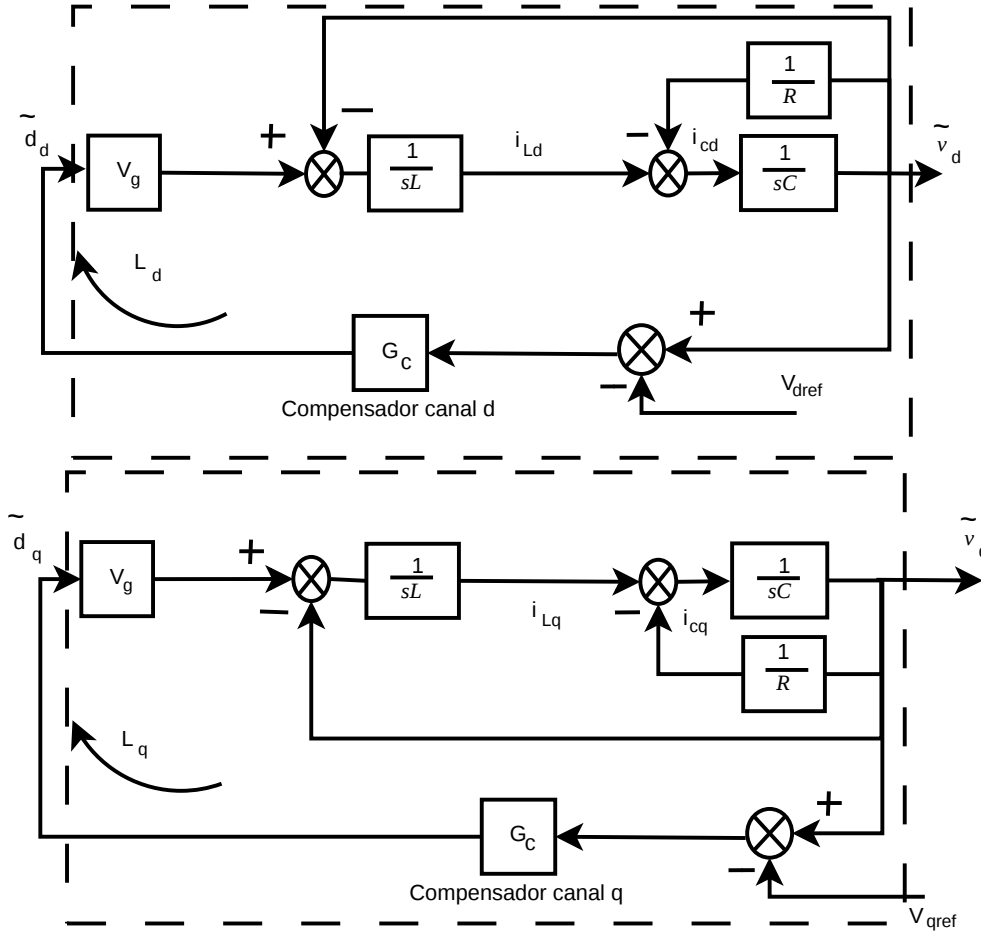


Figura 4.9: Diagrama de bloques del sistema de pequeña señal con lazo de retroalimentación.

El tiempo de establecimiento se elige a partir de la respuesta en lazo abierto del sistema (ver Figura 4.10). El error de estado estable y el máximo sobreimpulso son datos seleccionados arbitrariamente. El factor de amortiguamiento del sistema de segundo orden definido en (4.11) para el máximo sobreimpulso especificado es [Phillips 2000],

$$\zeta = -\frac{\ln(M_p)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(M_p)^2}} = 0.7448 \quad (4.15)$$

El margen de fase de la planta y del compensador se calcula como,

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{2\zeta}{\sqrt{\sqrt{1 + 4\zeta^4} - 2\zeta^2}} \right) = 1.1808 \text{ rad} \quad (4.16)$$

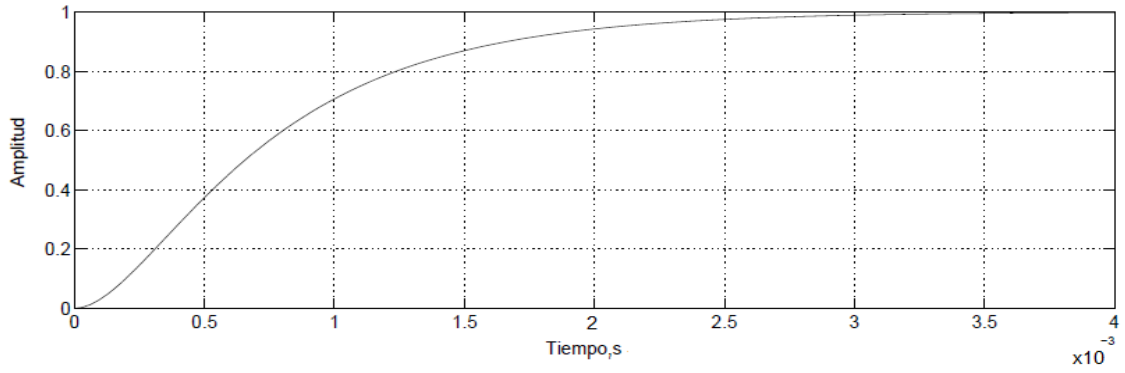


Figura 4.10: Respuesta en lazo abierto.

La frecuencia de corte que cumple con el tiempo de establecimiento especificado es,

$$\omega_c = \frac{6}{t_s \tan(\gamma)} = 2466.4 \text{ rad} \quad (4.17)$$

Considerando la función de transferencia del controlador G_c definida como,

$$G_c = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (4.18)$$

las constantes k_p y k_i se pueden determinar mediante,

$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G_p(s) G_c(s) \quad (4.19)$$

Sustituyendo los valores reportados en el Apéndice D, entonces k_v tiene la forma,

$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{2000}{1.30e^{-7}s^2 + 8.23e^{-4}s + 1} \right) \left(\frac{k_p s + k_i}{s} \right) \quad (4.20)$$

Simplificando (4.20),

$$k_v = 2000k_i \quad (4.21)$$

o bien,

$$k_i = \frac{k_v}{2000} \quad (4.22)$$

Se multiplica un factor de 0.9 en el denominador para garantizar un error de estado estable menor al requerido [Soria 2010]. Además, considerando que el error de estado estable se define como,

$$e_{ss} = \frac{1}{k_v} \quad (4.23)$$

entonces,

$$k_i = \frac{\frac{1}{e_{ss}}}{2000(0.9)} = 277.77 \quad (4.24)$$

Por su parte, el cálculo de la constante k_p involucra la identificación del ángulo θ del compensador PI a la frecuencia ω_c . De [Phillips 1985] se define,

$$\theta = 180^\circ + \gamma - \angle G_p(j\omega_c) \quad (4.25)$$

El ángulo θ puede tomar valores positivos o negativos pero se debe cumplir la restricción que indica que a la frecuencia de corte ω_c el ángulo del controlador debe ser $|\theta| < 90^\circ$. En este caso se elige $\theta < 0^\circ$ ya que se trata de un controlador PI [Phillips 1985]. Por lo tanto se tiene,

$$\theta = 180^\circ + \gamma - \angle G_p(j\omega_c) < 0 \quad (4.26)$$

Sustituyendo valores en (4.26) se obtiene,

$$\angle G_p(j\omega_c) > 180^\circ + 67.65^\circ = 247.65^\circ$$

En la Figura 4.11 se muestra la respuesta de la planta en lazo abierto. Tomando en cuenta que se debe cumplir $\angle G_p(j\omega_c) > 247.65^\circ$ se elige una $\omega_c < 2466.4 \text{ rad/seg}$. Por lo tanto, se elige $\omega = 2240 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$. De la Figura 4.11 con $\omega = 2240 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ se tiene,

$$\begin{aligned} |G_p(\omega_c)| &= 5.46 \text{ dB} \\ \angle G_p(\omega_c) &= -79.30^\circ = -1.3848 \text{ rad} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el ángulo θ se calcula como,

$$\theta = \pi + \gamma - \angle G_p(\omega_c) = 5.7071 \text{ rad} = 326.9932^\circ$$

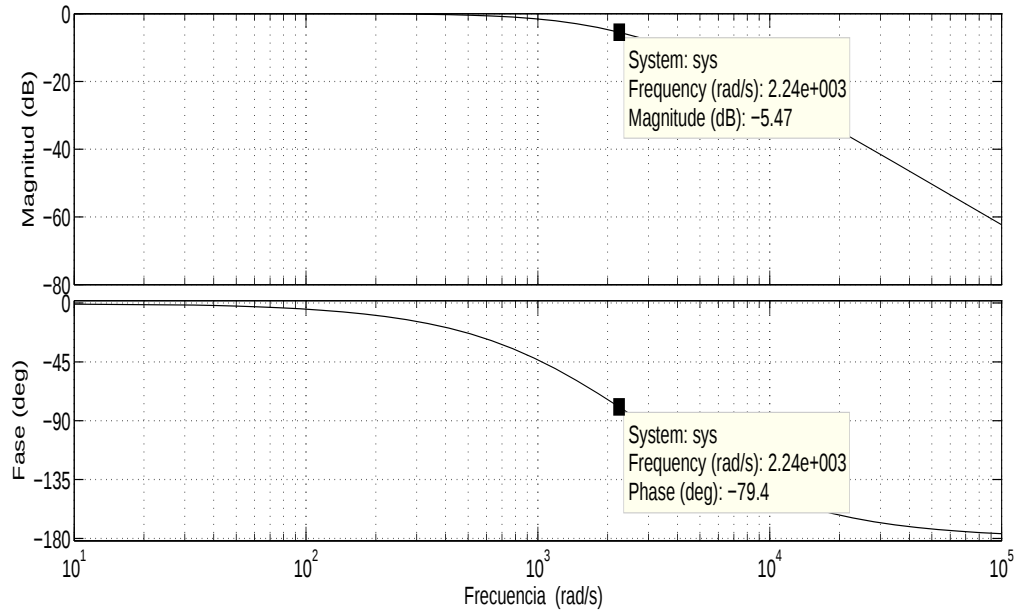


Figura 4.11: Respuesta de lazo abierto del sistema.

Por lo tanto se cumple que $|\theta| = |-33.04477| < 90^\circ$. La constante k_p del controlador PI se calcula mediante [Phillips 2000],

$$k_p = \frac{\cos(\theta)}{|G_p(\omega_c)|} = 0.1535 \quad (4.27)$$

Por lo tanto, 4.27 y 4.24 definen al controlador PI. La respuesta a la frecuencia del controlador PI se muestra en la Figura 4.12. Se puede apreciar que la respuesta del controlador se aproxima al valor de diseño ya que presento un ángulo de fase de -39° a la frecuencia de 2240 rad/seg. La respuesta en la frecuencia de lazo abierto del sistema con el controlador PI y el diagrama de la ubicación de los polos y ceros se muestra en la Figura 4.13. La ubicación de polos y ceros que se muestra en la Figura 4.13 (a) indica que el sistema es estable. Además, se puede observar en la Figura 4.13(b) que el margen de ganancia es de 30.9 dB y un margen de fase de 78.1 grados.

Por otra parte, la Figura 4.14 presenta la respuesta en la frecuencia del sistema en lazo cerrado, en donde se aprecia que el margen de fase es de aproximadamente 67° , lo cual cumple con los parámetros de diseño establecidos anteriormente.

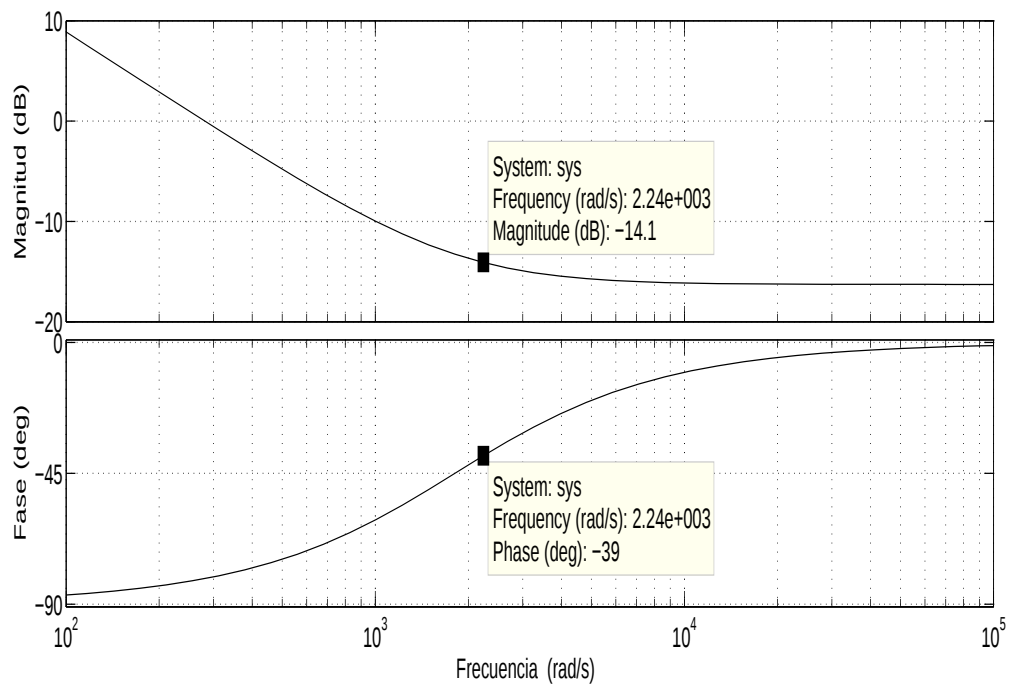


Figura 4.12: Respuesta del controlador PI.

4.3. Implementación del sistema de control en Simulink

En la Figura 4.15 se muestra la implementación en Simulink del sistema que incluye el inversor tipo convertidor fuente de voltaje (inversor-CFV), filtro, carga y sistema de control. El sistema de control consta de 2 bloques principales los cuales son: un generador PWM y el controlador de voltaje. Las señales que proveen los controladores PI se utilizan para calcular el índice de modulación y así generar las señales senoidales de control. Estas señales se utilizan para compararlas con la señal triangular y generar la señal PWM que controla el (inversor-CFV). La comparación de las señales se hace en el bloque generador de señal PWM.

La implementación del sistema de control se muestra en la Figura 4.16. Los voltajes de entrada V_{abc} se encuentran en por unidad y se miden en terminales de salida del filtro de segundo orden. Las conversiones del marco de referencia ABC a dq0 se realizan en los bloques de transformación indicados a la entrada y salida del sistema de control. Los voltajes de eje d y q se sustraen de los voltajes de referencia y los errores de voltaje alimentan las entradas de los controladores PI.

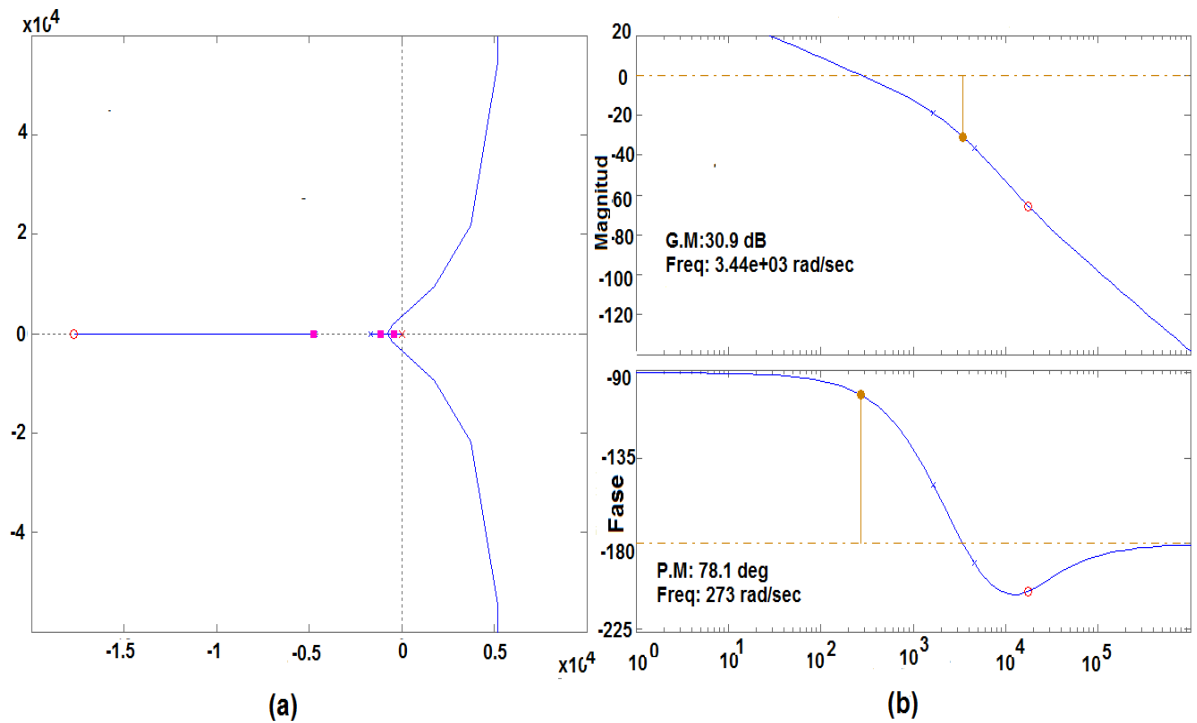


Figura 4.13: Respuesta de lazo abierto de la planta y el controlador: (a).- Ubicación de polos-ceros. y (b).- respuesta de lazo abierto en la frecuencia.

Finalmente, las señales que proveen los controladores PI se transforman del marco de referencia dq0 al marco de referencia ABC.

4.4. Respuesta del sistema ante un cambio de referencia de voltaje

En este caso de estudio se presenta el desempeño del sistema de control ante un cambio de referencia de 0.3 a 1 en p.u. En la Figura 4.17 (a) se muestra el cambio de referencia al cual es sometida el sistema de control en $t=9$ seg. En la Figura 4.17 (b) se muestra el voltaje en la carga de fase a fase ante un cambio de referencia de 0.3 a 1 p.u. En la Figura 4.17 (c) se presenta un acercamiento del voltaje en la carga de fase a fase en el instante en el cambio de referencia, mientras que la Figura 4.17 (d) reporta el voltaje rms en la carga. Finalmente, la Figura 4.17 (e) muestra el índice de modulación, en donde se puede apreciar que

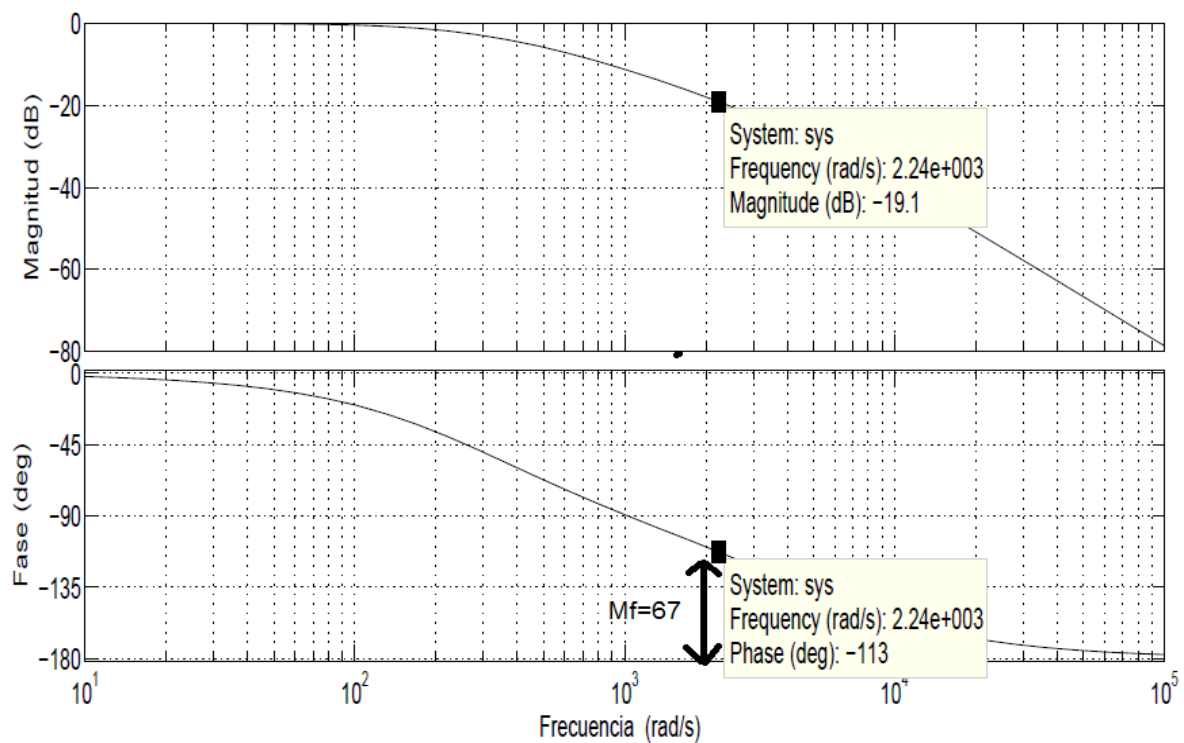


Figura 4.14: Respuesta en la frecuencia en lazo cerrado del sistema.

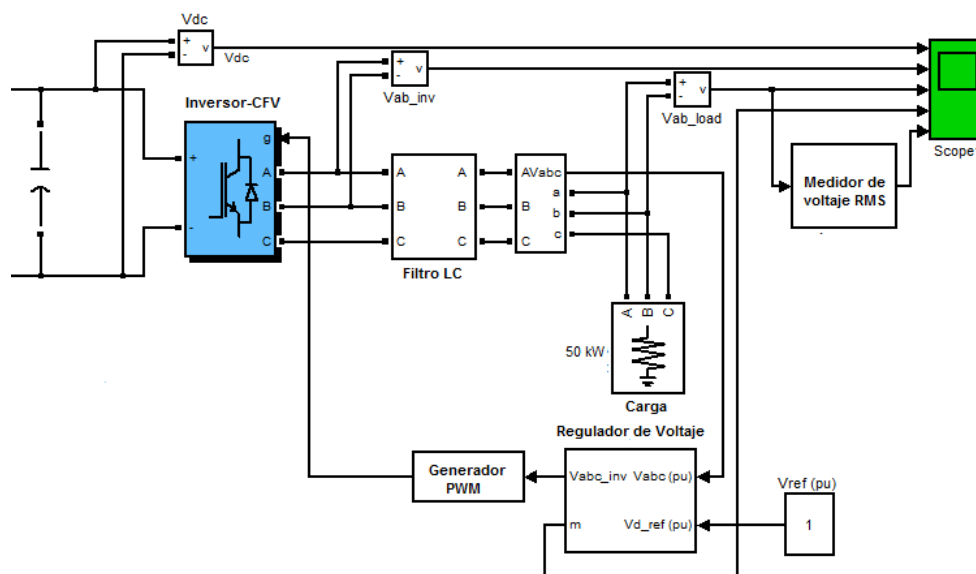


Figura 4.15: Inversor trifásico PWM con control de voltaje.

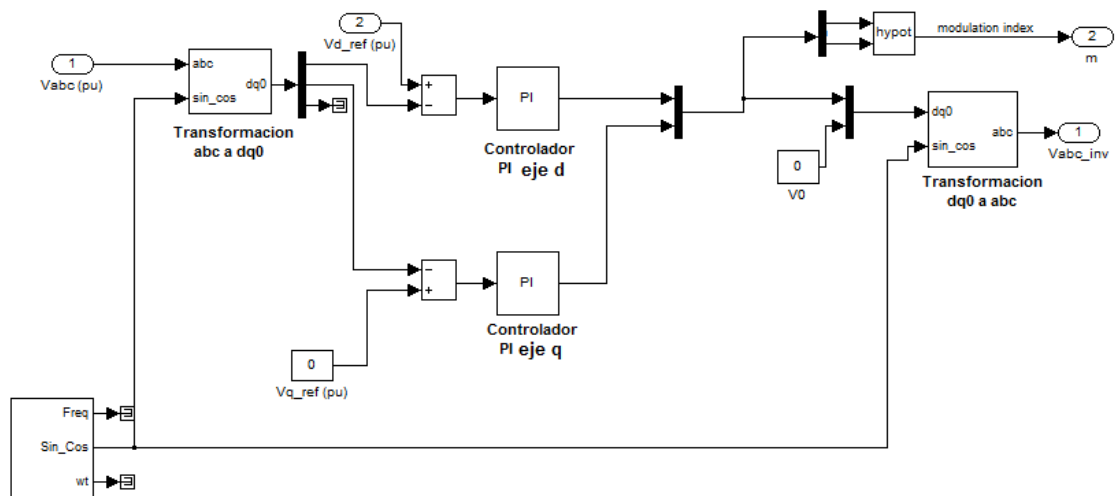


Figura 4.16: Sistema de control del inversor trifásico .

el sistema de control ajusta dicho índice de 0.25 a 0.8. Estos resultados demuestran que el sistema de control regula el voltaje de salida de forma adecuada ante un cambio de referencia.

4.5. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los dispositivos de electrónica de potencia necesarios para acoplar el sistema de generación undimotriz a un sistema eléctrico aislado. La etapa de electrónica de potencia consta de un rectificador trifásico no controlado de diodos, un capacitor de acoplamiento, un inversor trifásico PWM y un filtro de segundo orden. Se presentó el modelado del convertidor fuente de voltaje, el filtro de segundo orden y la carga trifásica. El diseño del controlador de voltaje se realizó por medio del método Bode analítico y la representación de pequeña señal del inversor trifásico. Además, se presentó la implementación del sistema de control en el programa Simulink. La respuesta de lazo cerrado del sistema de control ante cambios de referencia es satisfactorio ya que es capaz de regular el voltaje de salida.

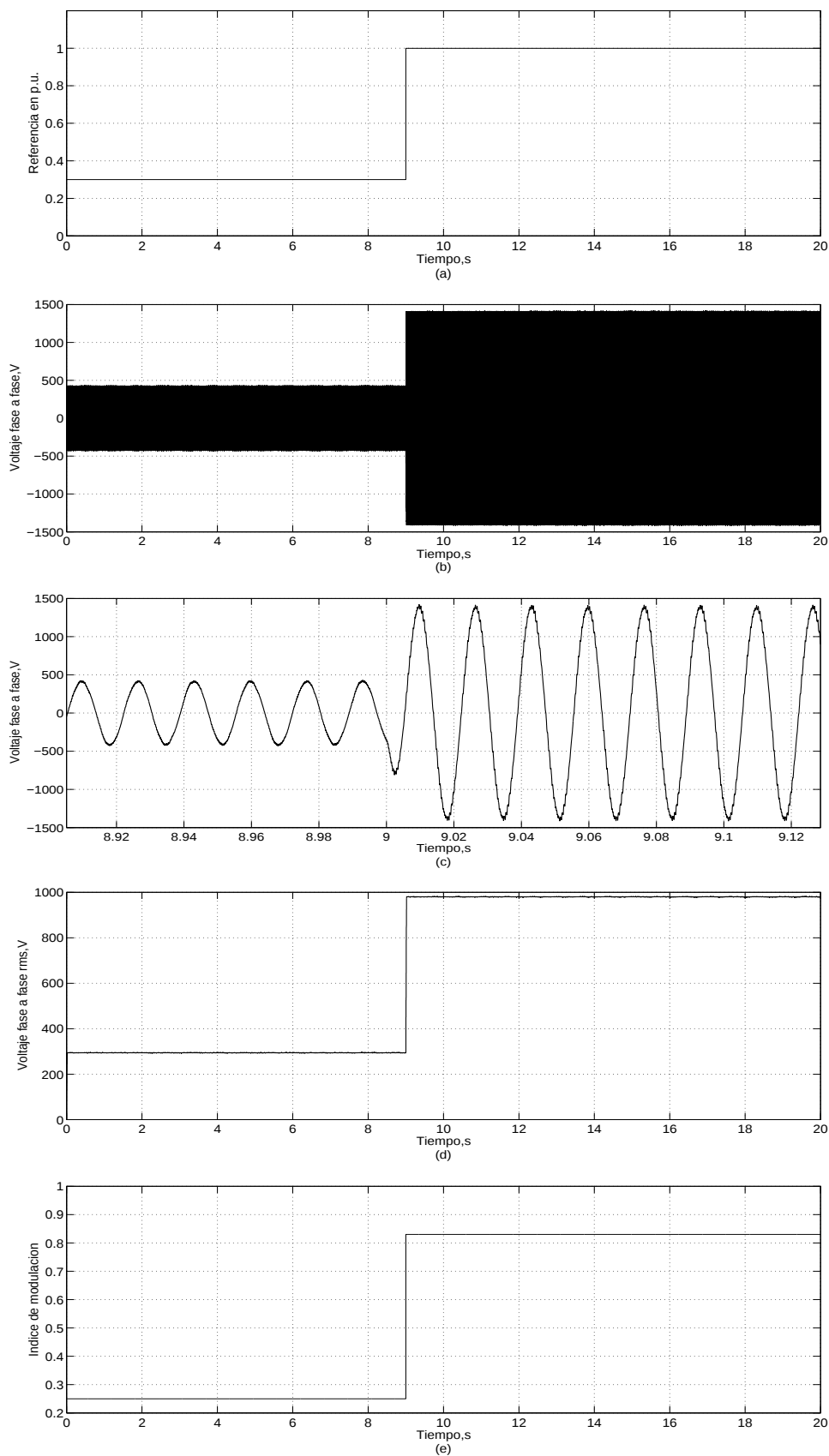


Figura 4.17: Respuesta del sistema ante cambio de referencia. (a).-Señal de referencia del control, (b).- Voltaje fase a fase de la carga, (c).- Voltaje de fase a fase en la carga en el instante del cambio de referencia, (d).- Voltaje rms de fase a fase, y (e).- índice de modulación.

Capítulo 5

Casos de estudio

En este capítulo se presentan diversos casos de estudio relacionados con la operación de convertidores de energía undimotriz para alimentar una carga aislada. Se analizan topologías de conexión con dos y tres convertidores de energía undimotriz. El control de voltaje realiza con controladores PI presentados en el capítulo anterior. Se analiza el comportamiento del sistema de conversión y el regulador de voltaje para escenarios de operación con variación de la característica de la ola y la variación de la carga. El sistema de conversión alimenta una carga trifásica balanceada con factor de potencia unitario.

5.1. Caso de estudio 1. Dos generadores conectados en paralelo

En este caso de estudio se presenta la operación de dos convertidores de energía undimotriz conectados en paralelo como se muestra en la Figura 5.1. Se considera que la ola que impulsa a los GU es puramente senoidal. Además, se considera que los generadores undimotrices están desplazados entre si una distancia que se refleja en un desplazamiento de 180° de las olas que inciden en dichos GUs. El desplazamiento de los generadores de 180° , es debido a mientras el GU1 es cero la energía que produce el GU2 se encuentra produciendo su punto máximo de energía. Esto implica que se mantiene un nivel de voltaje de generación sin descender a cero en el nodo V_{uni} . A la salida de cada GU se conecta un rectificador trifásico de diodos, el cual tiene la función de convertir el voltaje generado por los generadores undimotrices a voltajes de corriente directa en los nodos V_{rec1} y V_{rec2} . La etapa de

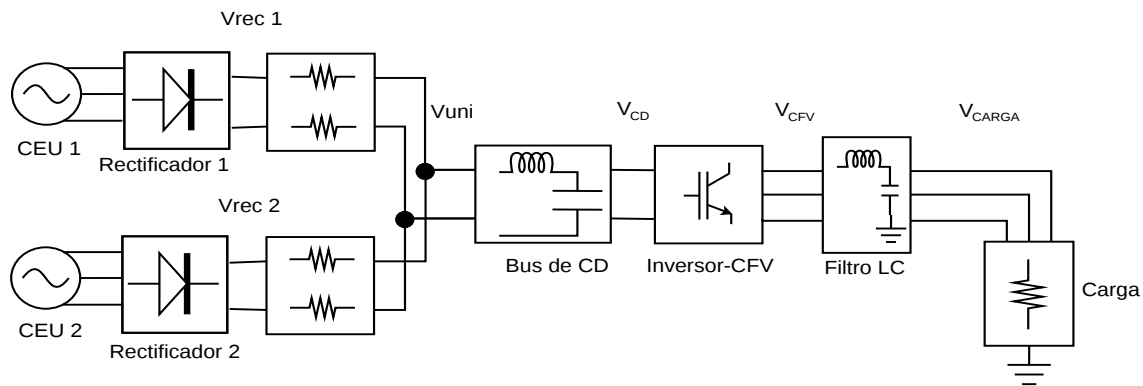


Figura 5.1: Diagrama esquemático del sistema de generación para el caso de estudio 1.

acoplamiento consta de un conjunto de resistencias, un inductor y un capacitor. La etapa de acoplamiento termina en el nodo V_{CD} , el cual es un voltaje de CD con un rizo. La etapa de rectificación y el sistema de acoplamiento lleva acabo la función de desacoplar la frecuencia del sistema de generación y del sistema aislado. Un convertidor de fuente de voltaje operado como inversor y un filtro de segundo orden se encargan de mantener el voltaje constante en terminales de la carga. La salida del inversor es el nodo V_{CFV} , el cual es una señal PWM modulada por la señal de entrada del CFV. Finalmente en el nodo V_{carga} se encuentra una señal senoidal, dado que la señal PWM de la salida del CFV es ingresada al filtro de segundo orden. El filtro de segundo orden se diseñó con una frecuencia de corte de 440Hz.

La Figura 5.2 muestra las formas de onda obtenidas con dos generadores alimentando una carga trifásica balanceada de 50kW y una característica de la ola tipo senoidal. Los datos de simulación de este caso de estudio se presentan en el Apéndice D. La Figura 5.2 (a) muestra la fuerza de ola que incide sobre el generador en donde, la fuerza tiene un valor de 1.72MN de pico a pico y una frecuencia de 0.1538Hz. La Figura 5.2 (b) muestra el voltaje fase a fase en terminales del generador 1, el cual presenta un alto grado de variación en amplitud y frecuencia. La Figura 5.2 (c) se muestra la forma de onda de la salida de voltaje del GU 2. Por su parte, la Figura 5.2 (d) presenta el voltaje en la salida vrec1 del esquemático de la Figura 5.1. En esta Figura se observa que presenta un voltaje de corriente directa con picos de voltaje de 3000v. En la Figura 5.2 (e) muestra el voltaje en las terminales vrec2 del esquemático de la Figura 5.1. Esta forma de onda del 1 voltaje rectificado tiene una magnitud de pico de 3000v. Finalmente en la Figura

5.2 (f) se muestra el nodo vuni del esquemático 5.2. La forma de onda de este nodo es similar a los nodos vrec1 y vrec2, además de presentar una magnitud de 3000V de pico. La Figura 5.3 (a) presenta el voltaje en el bus de corriente directa. Es importante mencionar que el bus de corriente directa presenta un rizado de voltaje de 623 volts pico-pico, el cual es debido a la variabilidad de la generación de energía de los GUs. En este trabajo no se controla el voltaje de CD, pero existen trabajos realizados que controlan el voltaje de CD por medio de convertidores CD-CD y con banco de baterías [Wu 2009]. Por su parte el convertidor de fuente de voltaje entrega un voltaje de conmutación PWM (ver Figura 5.2(b)). Se puede observar que esta forma de onda presenta modulación en la amplitud del voltaje, la cual está asociada a la variación de amplitud observada en el voltaje de CD en la entrada del inversor. La Figura 5.2 (c) muestra el voltaje de salida de la etapa de filtrado, en donde las componentes de frecuencia asociadas a la conmutación PWM se han eliminado. En el inciso (d) de la Figura 5.2 se muestra el índice de modulación determinado por el sistema de control. Se puede observar que durante el primer segundo de la simulación el índice de modulación m_a toma valores mayores de 1.0 asociados a la operación en la región de sobre modulación. A partir del tiempo $t > 1\text{seg.}$ el índice de modulación se ajusta entre 0.75 y 0.55. Este comportamiento del índice de modulación es debido a la actuación del sistema de control para regular la variación de la forma de onda del voltaje de CD.

5.1.1. Análisis de armónicos en el caso de estudio 1

El contenido armónico de las principales variables del sistema de conversión con 2 GUs se muestra en la Figura 5.4. Este análisis se realizó en el instante $t = 20\text{seg.}$ En la Figura 5.4 (a) se puede observar que las componentes de frecuencia más importantes en el bus de CD son la componente de cuarta y octava armónica con 6.5 % y 1.2 % respecto de la componente de CD, respectivamente. Por su parte, se observa de la Figura 5.4 (b) que las componentes armónicas más relevantes en el voltaje de salida del inversor PWM son los armónicos ubicados en bandas laterales alrededor de $m_f = 33$. El voltaje en la carga trifásica presenta un bajo contenido armónico ya que el filtro se encarga de eliminar las armónicas asociadas a la frecuencia de conmutación del inversor (ver Figura 5.4 (c)). La Tabla 5.1 resume el porcentaje de distorsión armónica total para las principales variables del sistema de generación. Se puede apreciar que el voltaje en el bus de CD es de 6.83 % de THD, mientras el voltaje de salida del CFV tiene 118.12 % THD. Por su parte, el porcentaje de THD en la carga es de 2.10 %. Este nivel de THD se

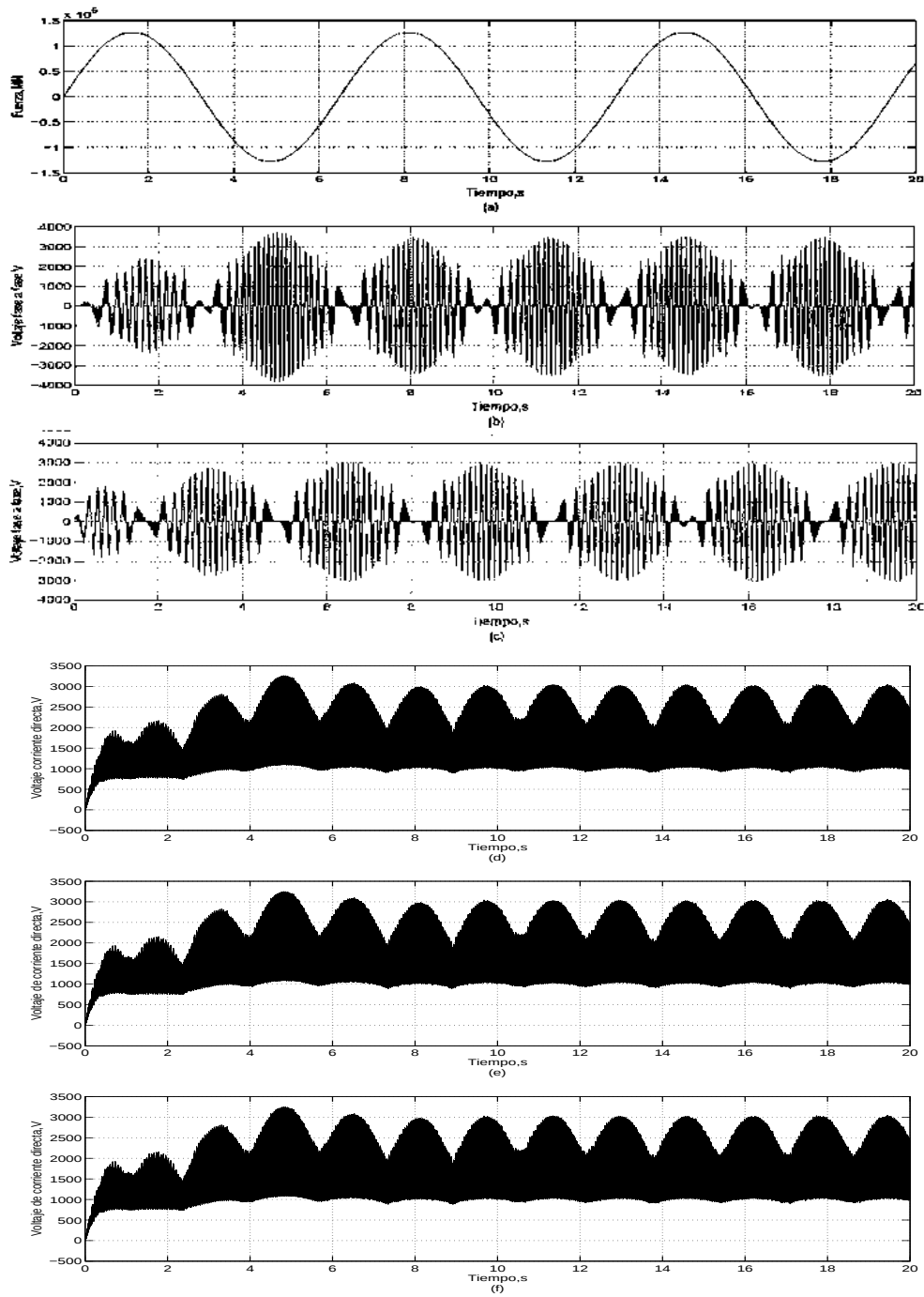


Figura 5.2: Sistema de generación con dos GUs:(a).- Fuerza de la ola (b).- voltaje de fase a fase en el GU 1 (c).- voltaje de fase a fase en el GU 2 (d).- voltaje en el nodo vrec1 (e).- voltaje en el nodo vrec2 y (f).- voltaje en el nodo vuni.

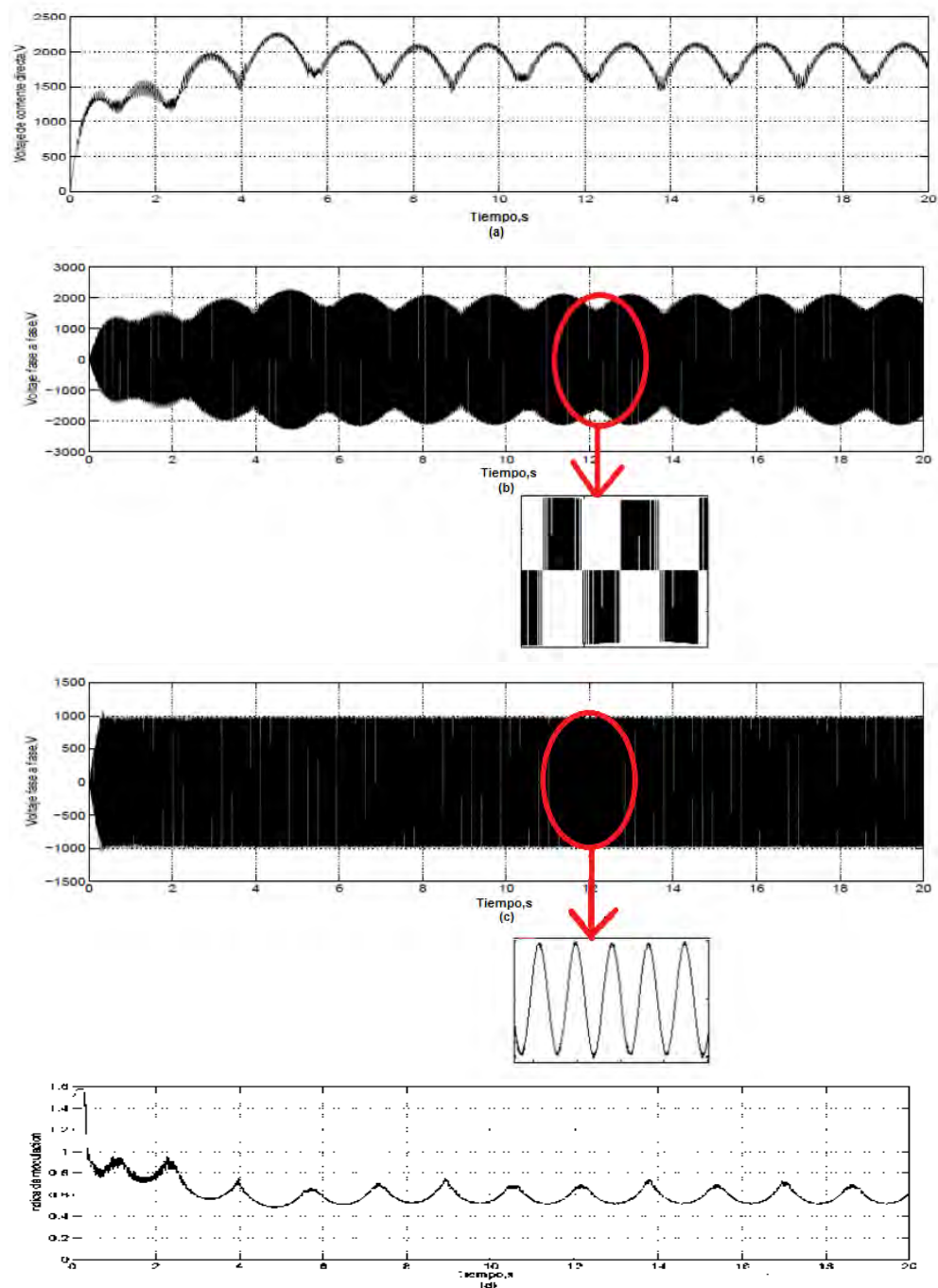


Figura 5.3: Sistema de generación con dos GUs: (a).- Voltaje en el nodo vcd (b).- 1 (c).- voltaje en el nodo Vcfv y (d).- voltaje en el nodo vcarga.

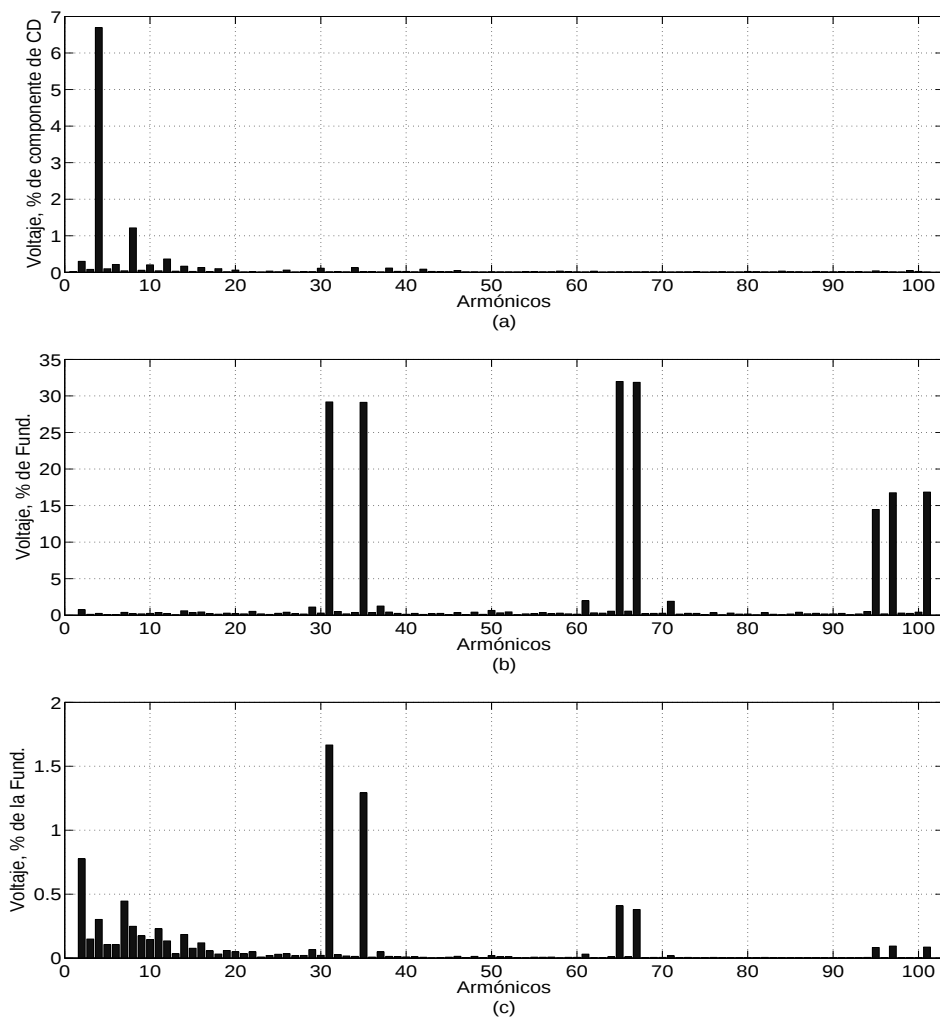


Figura 5.4: Contenido armónico del caso de estudio 1 (a).- voltaje en el bus de CD, (b).- voltaje de fase a fase en terminales del inversor y (c).- voltaje de fase a fase en la carga.

encuentra por debajo del límite de 5 % recomendado por el estándar IEEE-519 y es similar a los niveles de distorsión reportados previamente en la literatura para sistemas de generación undimotrices [das 2006].

5.1.2. Respuesta del sistema GU con una reducción de 10 % de la fuerza de la entrada

Considerando una disminución de 10 % de la fuerza de la ola que mueve al generador en $t=25\text{seg.}$, se analiza el desempeño del sistema de control de voltaje en la carga. La Figura 5.5 (a) muestra la forma de onda de la fuerza de la ola, en donde se observa que en el instante de $t=25\text{seg.}$ se aplica la disminución del

Tabla 5.1: Distorsión armónica total del sistema de conversión con 2 generadores.

Variable	% THD
V_{CD}	6.83 %
V_{CFV}	118.2 %
V_{CARGA}	2.10 %

10 % de la fuerza de la ola. En el inciso (b) de la Figura 5.5 se muestra el voltaje de fase a fase de salida del convertidor de energía undimotriz y la Figura 5.5 (c) presenta el voltaje en el bus de CD. El voltaje en el capacitor tiene una variación de 450V pico a pico montada en una componente de corriente directa de 1600v. Por su parte, la Figura 5.5 (d) muestra el voltaje fase a fase en la salida del inversor, en donde se observa que la amplitud del voltaje se encuentra modulada por la variación del voltaje de corriente directa. En la Figura 5.5 (e) se muestra la forma de onda del voltaje de fase a fase en la carga, en la cual se observa que este voltaje no presenta variaciones importantes en el instante en que disminuye el voltaje en el lado de corriente directa. La Figura 5.5 (f) muestra el índice de modulación de amplitud, en donde se aprecia que el sistema de control opera el inversor en la región lineal con $m_a < 1.0$. Antes de realizar la reducción de la ola que incide sobre el GU el índice de modulación varia en el rango de 0.53 a 0.7, mientras que después del instante $t=25\text{seg}$ el índice de modulación varia de 0.57 a 0.8.

5.1.3. Respuesta del sistema GU con una reducción de 10 % en la carga

En este caso de estudio se analiza la operación de dos generadores conectados en paralelo ante una disminución de 10 % en la carga trifásica. La disminución de la carga se realiza en el tiempo $t = 25\text{s}$. Al presentarse esta disminución en la carga el sistema de control debe mantener constante el voltaje en la carga. En la Figura 5.6 (a) se presenta la magnitud de la carga, en donde se observa que inicialmente la carga presenta un valor de 19.2Ω y se disminuye un 10 % en el instante de 25 segundos. En la Figura 5.6 (b) se muestra la forma de onda del voltaje de fase a fase de salida en el generador 1, en la cual se observa que la disminución en la carga no afecta la forma de onda de la parte de generación. En la Figura 5.6 (c) se muestra el voltaje en el bus de CD, en el cual se observa que el voltaje tiene un rizado de 450v pico a pico montada en la componente de corriente directa de 1600v.

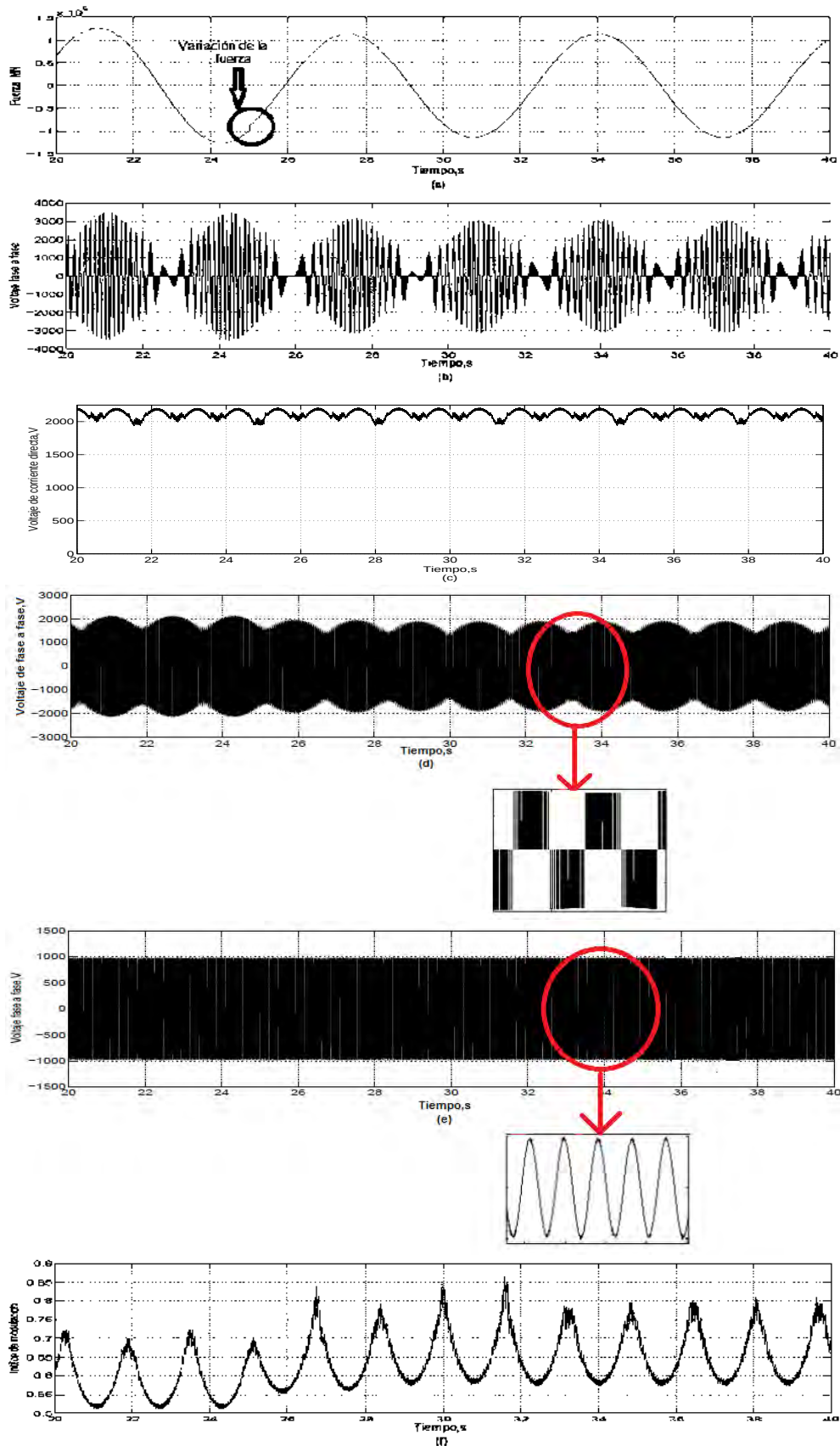


Figura 5.5: Sistema de generación con 2 GUs y variación de la fuerza de entrada: (a).- Fuerza de la ola (b).- voltaje de fase a fase en el CEU1 (c).- voltaje en el bus de CD (d).- voltaje fase a fase del inversor (e).- voltaje en la carga y (f).- índice de modulación.

En el inciso (d) de la Figura 5.6 se muestra el voltaje en la salida del inversor, el cual esta modulada en amplitud debido a las variaciones de voltaje en el lado de CD. Además, en el inciso (e) se muestra que el voltaje en la carga se mantiene constante ante las variaciones de voltaje del lado de CD y ante la disminución de la carga trifásica. Además en el inciso (f) de la Figura 5.5 se muestra el índice de modulación de amplitud determinado por el sistema de control, el cual opera en todo momento con $m_a < 1.0$

5.2. Caso de estudio 2. Tres generadores conectados en paralelo

En esta sección se presenta un caso de estudio con conexión de tres convertidores de energía undimotriz en paralelo como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 5.7. La operación de un mayor número de generadores en paralelo mejora la forma de onda y reduce el rizado del voltaje en el bus de CD. De esta manera es posible transferir una potencia constante al sistema eléctrico a carga aislada [das 2006]. Se considera en este caso de estudio que la ola que incide al sistema de conversión es puramente senoidal y existe un defasamiento de $\pi/3$ rad entre los convertidores. La etapa de electrónica de potencia para acoplar los convertidores de energía undimotriz con la carga consta de un rectificador trifásico de diodos en terminales de cada convertidor de energía, un bus de CD y un inversor PWM. La salida rectificada de cada GU se conectan en paralelo y el voltaje resultante se alimenta a un filtro de segundo orden. El inversor CFV es el encargado de suministrar el voltaje constante a la carga trifásica. Los parámetros utilizados en este caso de estudio se reportan en el Apéndice E.

Las formas de onda del sistema con 3 generadores conectados en paralelo con una fuerza de la ola constante y una carga de 50kW se muestra en la Figura 5.8. El sistema de control regula el voltaje de salida en la carga a 690V. La Figura 5.8 (a) muestra la fuerza de ola que incide sobre el generador, en donde la fuerza tiene un valor de 1.72MN de pico a pico y una frecuencia de 0.1538Hz. La Figura 5.8 (b) muestra el voltaje fase a fase del generador 1, en el cual se puede observar que presenta variaciones en amplitud y frecuencia asociados al movimiento del oscilador Arquímedes conforme se desplaza la ola. La Figura 5.8 (c) muestra la forma de onda que se obtiene del voltaje de fase a fase en las terminales del generador 2, en cual se observa que presenta variación de amplitud y fase como en el generador 1. Además tiene la forma de onda un defasamiento con respecto al

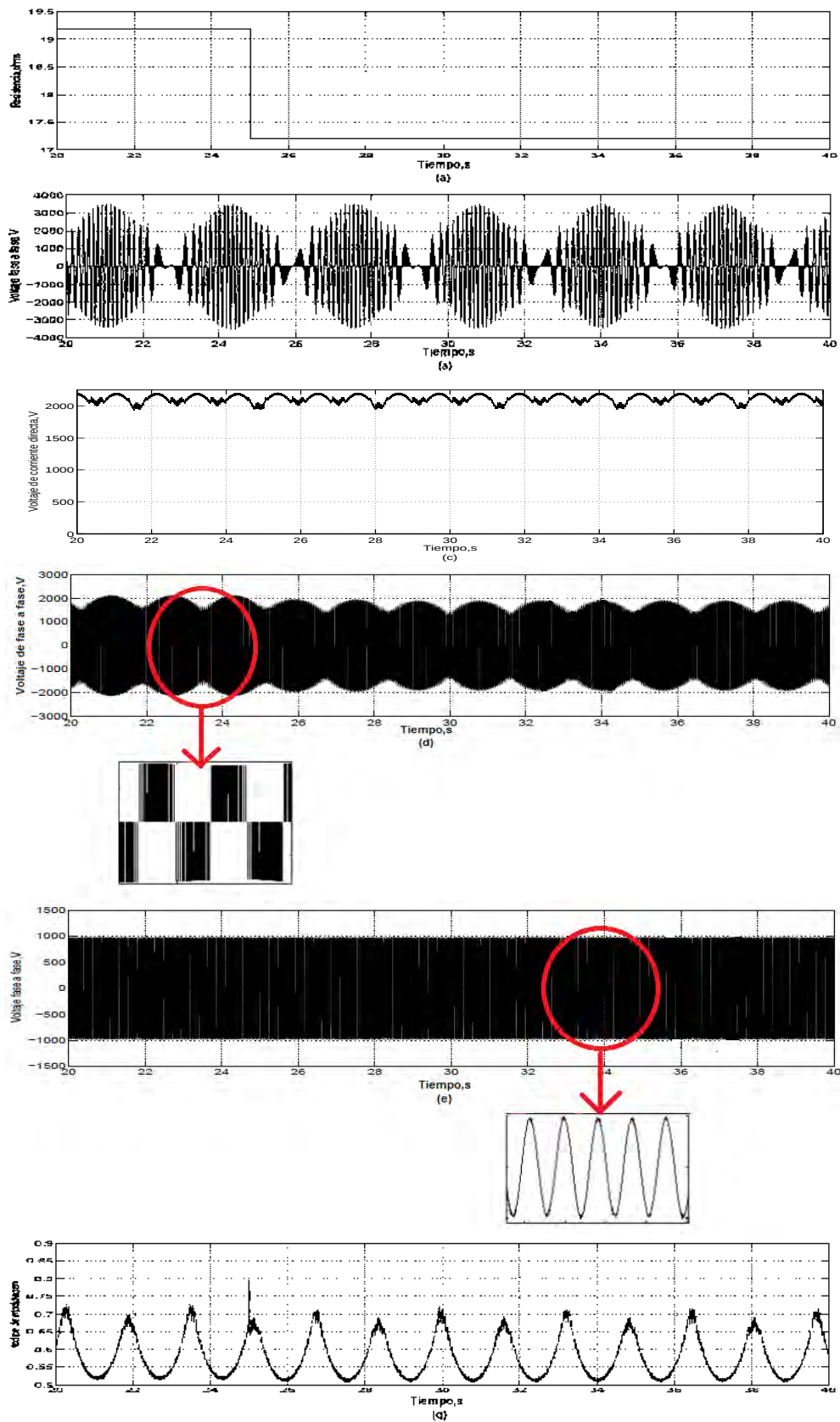


Figura 5.6: Sistema de generación con 2 GUs y variación de la carga (a).- magnitud de la resistencia de carga (b).- voltaje de fase a fase en el GU 1 (c).- voltaje en el bus de CD (d).- voltaje fase a fase del inversor (e).- voltaje en la carga y (f) índice de modulación.

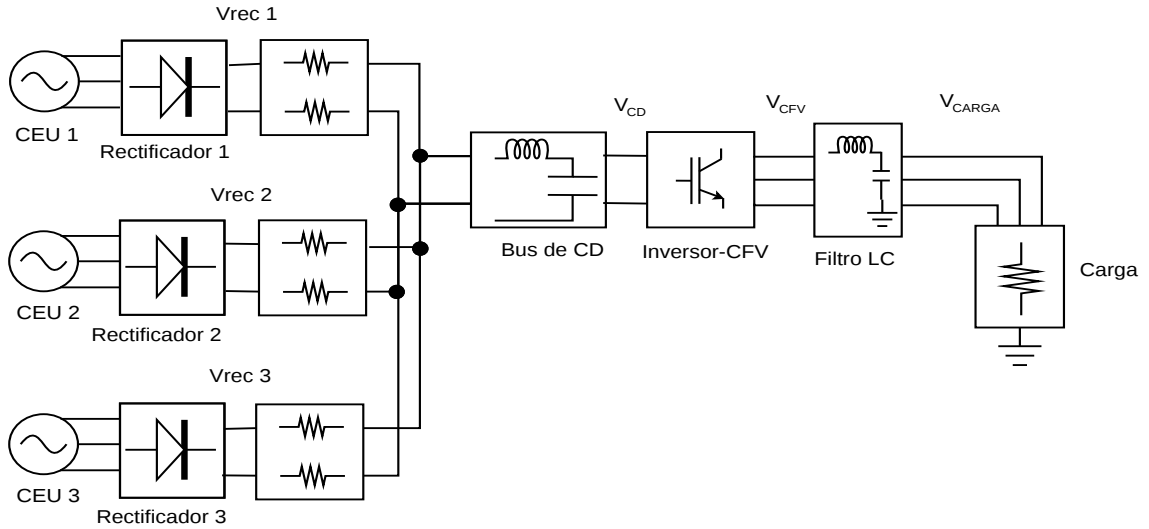


Figura 5.7: Diagrama esquemático del sistema de generación para el caso de estudio 2.

generador 1. Por otra parte, el inciso (d) de la Figura 5.8 muestra el voltaje en el bus de CD. Después del transitorio inicial, el voltaje de CD presenta una forma de onda con un rizado de voltaje de 110 volts pico-pico. El convertidor de fuente de voltaje entrega un voltaje de conmutación PWM (ver Figura 5.8(e)), en donde la variación de la amplitud del voltaje está asociado a las variaciones observadas en el voltaje de CD. La Figura 5.8 (f) muestra la solución en el tiempo del voltaje de salida filtrado. El sistema de control y el filtro se encargan de regular el voltaje y eliminar las componentes armónicas del esquema PWM, respectivamente. En el inciso (g) de la Figura 5.8 se muestra la forma de onda del índice de modulación, en donde se observa que para el intervalo $0 < t < 1$ el sistema de control opera el inversor en la región de sobre modulación. Para el intervalo $1 < t < 2.5$ el índice de modulación de amplitud varía entre los valores de 0.8 y 0.87. Para el intervalo $2.5 < t < 20$ el índice de modulación varía en el rango de 0.58 a 0.67. El ajuste del índice de modulación se debe a la constante variación de la forma de onda del voltaje en el bus de CD.

5.2.1. Análisis de armónicos en el caso de estudio 2.

El análisis armónico para el sistema de conversión undimotriz con 3 GUs se muestra en la Figura 5.9. Este análisis se realizó en el instante $t = 20$ seg. El análisis armónico se realizó en diferentes periodos, el periodo de la forma de onda

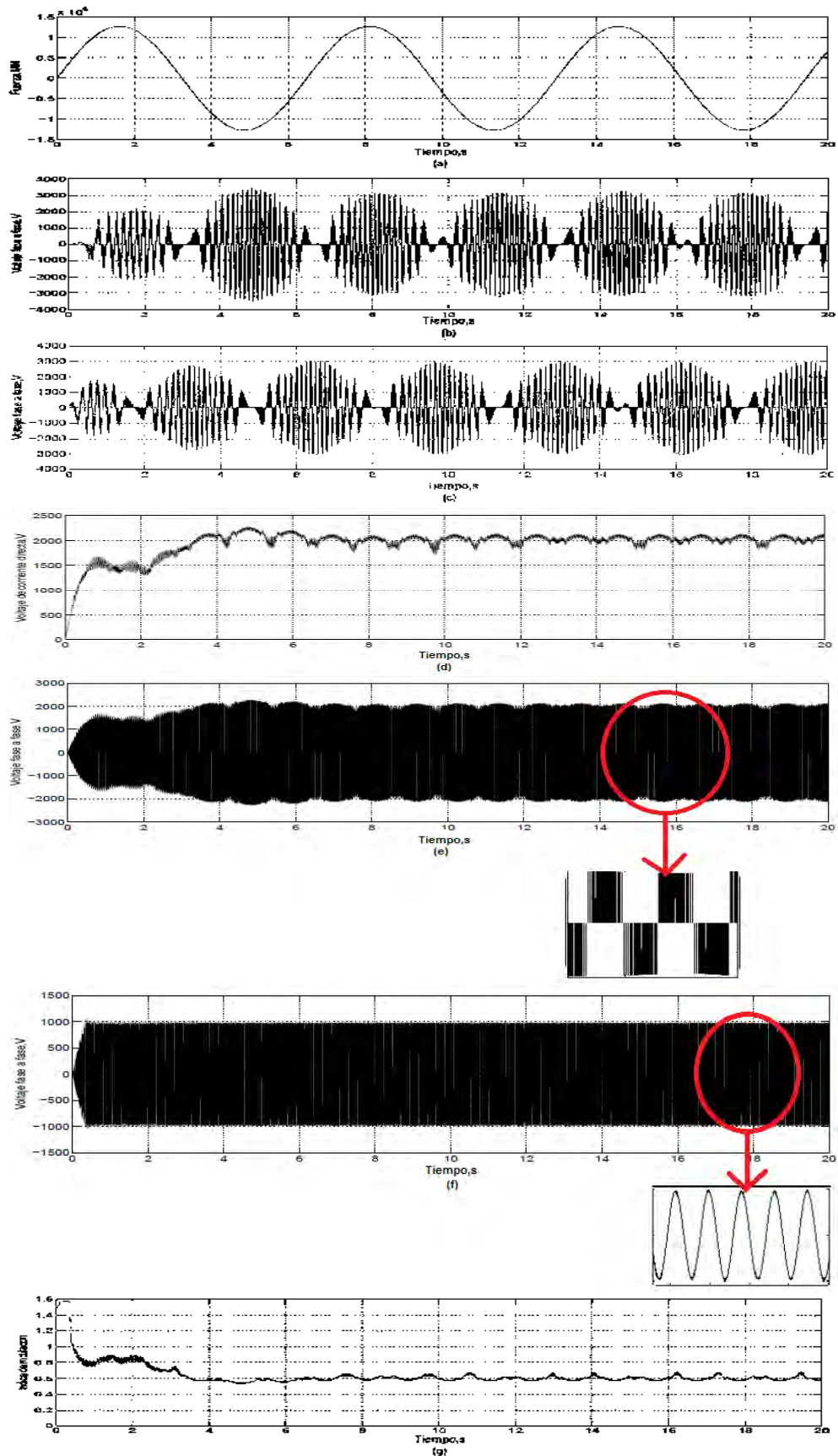


Figura 5.8: Sistema de generación con tres GUs:(a).- Fuerza de la ola (b).- voltaje de fase a fase en el GU 1 (c).- voltaje de fase a fase en el GU 2 (d).- voltaje en el capacitor de acoplamiento (e).- voltaje fase a fase del CFV (f).- voltaje en la carga y (g).- índice de modulación.

Tabla 5.2: Distorsión armónica total del sistema de conversión con 3 generadores.

Variable	% THD
V_{CD}	1.90 %
V_{CFV}	122 %
V_{CARGA}	1.97 %

de la ola y las formas de ondas antes del inversor en los diferentes nodos es de 6.5s . El periodo con que se analiza después del inversor en los diferentes nodos es de 16.33ms. En la Figura 5.9 (a) se puede observar que la componente de frecuencia más importante en el voltaje del bus de CD es precisamente la sexta armónica con un valor de 1.7%. Por otra parte, se muestra en la Figura 5.9 (c) que las componentes armónicas más relevantes en el voltaje en terminales del inversor PWM son los armónicos ubicados en las bandas laterales de $m_f = 33$. En la Figura 5.9 (d) se observa que el voltaje en la carga trifásica presenta un bajo contenido armónico ya que el filtro se encarga de eliminar las armónicas asociadas a la frecuencia de conmutación del inversor. La Tabla 5.2 presenta la distorsión armónica total para las principales variables del sistema de generación. De esta tabla se puede apreciar que el voltaje en el bus de CD, el voltaje de salida del CFV y el voltaje en la carga presentan 1.90 %, 122 % y 1.97 % de THD, respectivamente. Este nivel de distorsión en el voltaje en la carga se encuentra por debajo del límite recomendado por el estándar IEEE-519 y es ligeramente menor que el % THD del esquema de generación con dos unidades GUs presentado previamente.

5.2.2. Respuesta del sistema GU con una reducción de 10 % en la fuerza de la ola

En esta parte del caso de estudio con 3 GUs se analiza el comportamiento del sistema con 3 generadores undimotrices y una disminución de 10 % de la fuerza en la ola que incide al sistema de generación. Las principales formas de onda de este sistema se muestran en la Figura 5.10. La Figura 5.10 (a) muestra la reducción de la fuerza de la ola en un 10 % en el instante $t = 25s$. En la Figura 5.10 (b) se muestra la forma de onda del voltaje de fase a fase de salida del generador undimotriz 1, en donde el voltaje presenta variaciones de magnitud y frecuencia. En la Figura 5.10 (c) se muestra el voltaje en el bus de CD, el cual presenta un rizado de 450V montada en el voltaje de CD de 2050V en los primeros 25 segundos y disminuye a 1800V con un rizado de 450v para $t > 25s$. En la Figura 5.10 (d)

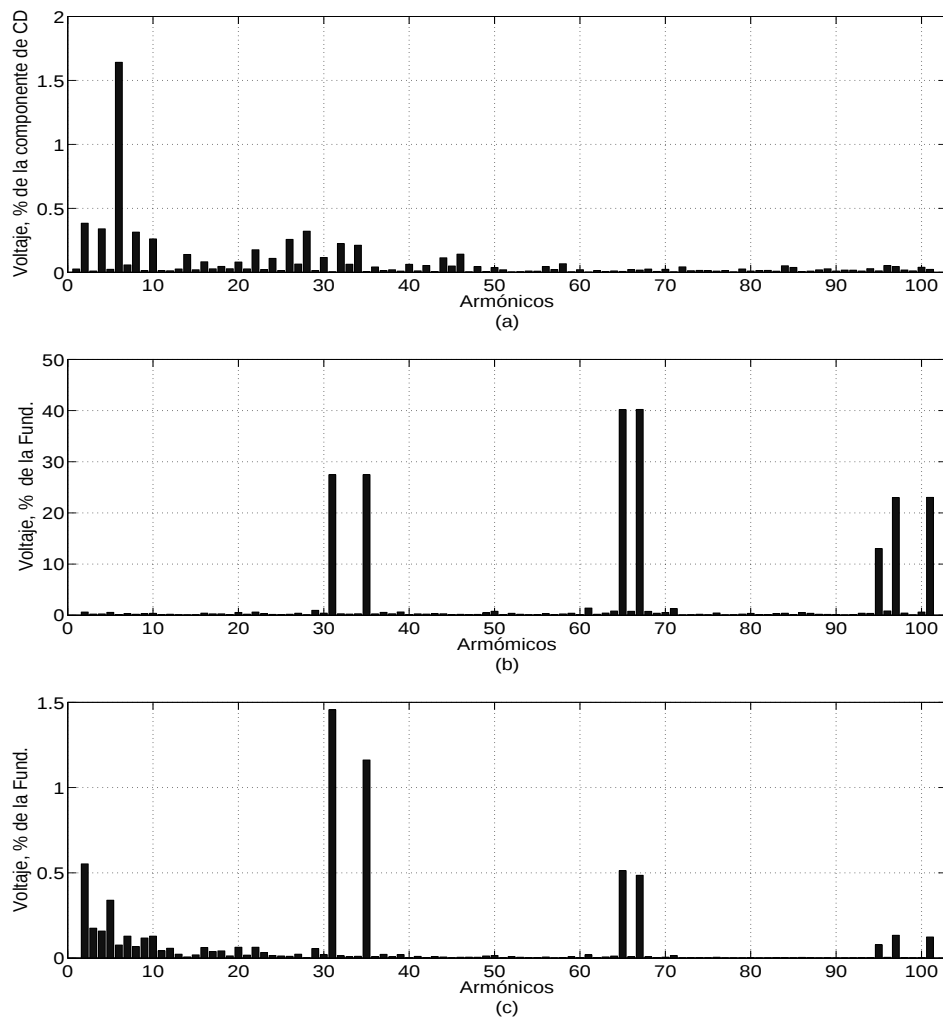


Figura 5.9: Contenido armónico para el caso de estudio 2: (a).- voltaje en el bus de CD (b).- voltaje de fase a fase en terminales del inversor (c).- voltaje de fase a fase en la carga.

se muestra el voltaje de fase a fase de salida inversor, el cual es un voltaje PWM con la amplitud modulada por la forma de onda del voltaje en el bus de CD. La Figura 5.10 inciso (e) muestra el voltaje en la carga, el cual se mantiene constante ante el disturbio ocasionado por la disminución de la fuerza de la ola. El inciso (f) de la Figura 5.10 muestra el índice de modulación determinado por el sistema de control. Se observa que en el tiempo de 20 a 25 segundos el índice de modulación se encuentra en un rango de 0.53 a 0.57, mientras que para $t > 25s$ el índice de modulación se ajusta constantemente en el rango de 0.58 a 0.68.

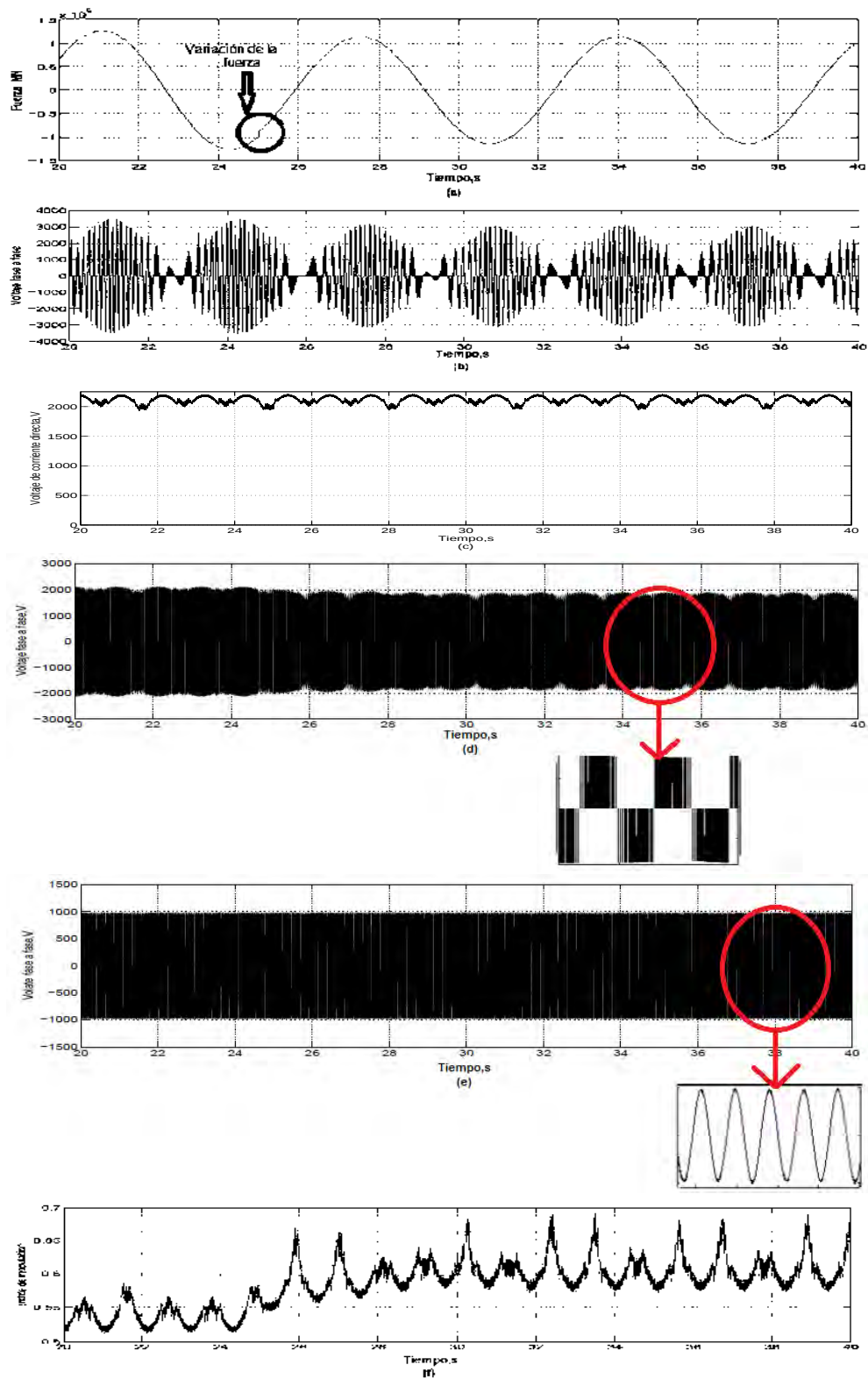


Figura 5.10: Sistema de generación con 3 GUs y variación de la fuerza de entrada (a).- Fuerza de la ola (b).- voltaje de fase a fase en el generador 1 (c).- voltaje de corriente directa en el capacitor (d).- voltaje de fase a fase en el inversor (e).- voltaje en la carga fase a fase y (f).- índice de modulación .

5.2.3. Respuesta del sistema con 3 GUs y reducción de la carga en 10 %

La Figura 5.11 muestra el desempeño del sistema conversión ante un cambio de 10 % en la carga. En la Figura 5.11 (a) muestra el cambio en la carga, la cual varía de 19.19Ω a 17.271Ω en un tiempo de 25 segundos. La Figura 5.11 (b) muestra el voltaje de fase a fase en las terminales del generador undimotriz 1, el cual presenta variación en frecuencia y amplitud. En la Figura 5.11 (c) se muestra el voltaje de corriente directa en la entrada del inversor. Este voltaje presenta una componente de CD de 2050V y una variación de 350V. En la Figura 5.11 (d) se muestra el voltaje en la salida del convertidor fuente de voltaje, el cual presenta una modulación de la amplitud igual a la que presenta la entrada del CFV en el lado de CD. La Figura 5.11 inciso (e) muestra el voltaje en la carga, donde se observa que el voltaje en la carga no presenta variaciones importantes ante la reducción de la carga. La Figura 5.11 (f) muestra el índice de modulación del esquema de conmutación PWM. El índice de modulación de amplitud se ajusta constantemente en el rango de 0.52 a 0.57, es decir, opera en región lineal.

5.3. Conclusiones

En esta capítulo se presentaron casos de estudio con 2 y 3 convertidores de energía undimotriz conectados en paralelo. Los casos de estudio consideran la presencia de una ola senoidal con periodo y amplitud constante. De acuerdo al análisis armónico realizado, la distorsión armónica total del voltaje en la carga en el caso de estudio con 2 generadores en paralelo es de 2.10 % THD, mientras que el caso de estudio con 3 generadores en paralelo presento 1.95 % de THD. Además, se observó que el sistema de control ajusta el índice de modulación para el caso de estudio con 2 generadores entre 0.75 y 0.55, mientras que para el caso de estudio con tres generadores la variación del índice de modulación es entre 0.58 y 0.67. Los resultados de simulación demuestra que los voltajes de salida en la carga se regulan adecuadamente ante disturbios en la característica de la ola o en la carga.

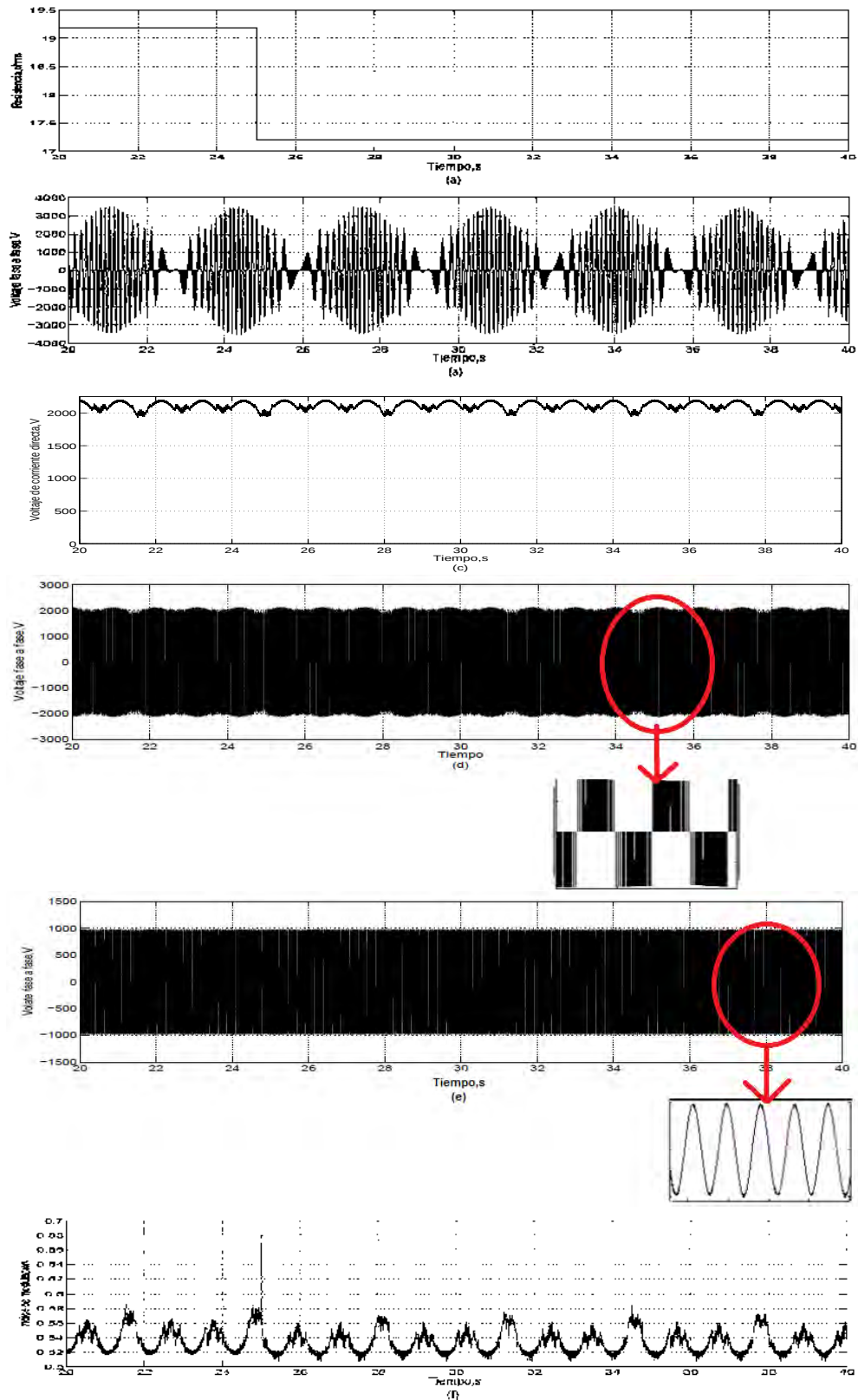


Figura 5.11: Sistema de generación con 3 GUs y variación de la carga (a).- magnitud de la resistencia de carga (b).- voltaje de fase a fase en el GU 1 (c).- voltaje en el capacitor de acoplamiento (d).- voltaje fase a fase del CFV (e).- voltaje en la carga y (f).- Índice de modulación.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

En esta tesis se presentó el análisis mediante simulación de la operación de un sistema de generación undimotriz. El sistema de generación esta constituido por un oscilador de Arquímedes, un generador lineal de imanes permanentes y una etapa de electrónica de potencia. Se diseñó un controlador para regular el voltaje en terminales de una carga trifásica balanceada. El diseño del controlador basado en compensadores PI hace uso de modelos de pequeña señal para los convertidores de electrónica de potencia y el método Bode analítico.

Se presentó la implementación en Simulink de un convertidor de energía undimotriz tipo oscilador de Arquímedes. Se analizó la operación de este convertidor alimentando a cargas del tipo resistivas, inductivas y capacitivas. La potencia entregada a las cargas presenta una frecuencia de oscilación que corresponde al doble de la frecuencia fundamental de la ola. Por otra parte, el voltaje de salida presenta grandes variaciones importantes en términos de frecuencia y amplitud. Debido a esta característica fluctuante de la potencia generada por el convertidor de energía undimotriz se requiere incorporar una etapa de electrónica de potencia para acoplarlo a un sistema eléctrico de potencia.

La etapa de electrónica de potencia necesaria para acoplar el sistema de generación undimotriz a un sistema eléctrico aislado. Se implementó con un rectificador trifásico de diodos, un capacitor de acoplamiento, un inversor basado en un convertidor fuente de voltaje trifásico y un filtro de segundo orden. La representación del inversor trifásico se realiza utilizando el modelo de pequeña señal de un convertidor reductor CD-CD con el objeto de facilitar el diseño del sistema de control.

El diseño del controlador de voltaje se realizó por medio del método Bode analítico, el cual se basa en parámetros que establece el diseñador. La implementación del sistema de control en el programa Simulink demostró que el desempeño del sistema de control es adecuado respecto a los parámetros de diseño.

Se presentaron casos de estudio con 2 y 3 convertidores de energía undimotriz conectados en paralelo. Los casos de estudio se simularon considerando un ola senoidal con periodo y amplitud constante. La distorsión armónica total para el caso de estudio con dos unidades de conversión en paralelo presenta 2.10 % de THD, mientras que el caso de estudio con tres unidades en paralelo presento 1.97 % de THD. El índice de modulación que determina el sistema de control para el caso de dos unidades se ajusta en el rango de 0.75 a 0.55, mientras que el caso para tres unidades la variación del índice de modulación es de 0.58 a 0.67. Se pudo observar que el sistema de control opera el inversor en la región de sobremodulación con el objeto de lograr la regulación de voltaje en la carga durante el arranque ya que el nivel de voltaje en el bus de CD es relativamente bajo. Sin embargo, una vez que pasa el transitorio de arranque el control opera el inversor en la región lineal. Para el caso con tres unidades de conversión el sistema de control opera el inversor en la región lineal ya que existe un nivel de voltaje mayor en el bus de CD respecto al caso con dos unidades de conversión. La operación del inversor en la región de operación lineal asegura la presencia de un contenido armónico con presencia de armónicos como bandas laterales alrededor de la modulación de frecuencia m_f .

6.2. Trabajos Futuros

Los trabajos futuros de esta tesis son:

- Incorporar un convertidor CD-CD para regular el voltaje en el bus de CD y mejorar la transferencia de energía.
- Diseñar el sistema de control del convertidor de fuente de voltaje con técnicas avanzadas de control óptimo ó modos deslizantes.
- Comprobar el desempeño del sistema de control con una entrada de fuerza de la ola con un espectro de frecuencia modelado con la teoría Pierson-Moskowitz.
- Implementar la etapa de electrónica de potencia con dos convertidores de fuente de voltaje en la configuración *back to back*.

- Diseñar un sistema de control para el CFV del lado del generador para regular las variables hidrodinámicas del oscilador de Arquímedes.
- Simular parques de generación undimotrices conectados a la red eléctrica.

Apéndice A

Transformación ABC-dq0 para un generador lineal

$$f_{dq0} = Df_{abc}$$

en donde

$$D = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\alpha - \frac{4}{3}\pi) \\ -\sin(\alpha) & -\sin(\alpha - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\alpha - \frac{4}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

con $\alpha = (2\pi/\lambda)x - \frac{\pi}{2}$ y x es el desplazamiento del flotador.

Transformación ABC-dq0

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Transformación qd0-ABC

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 1 \\ \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & 1 \\ \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix}$$

Apéndice B

El modelado de las ecuaciones diferenciales que representan la parte mecánica y la parte eléctrica del dispositivo de conversión de energía en variables de estado expresado en la forma,

$$\dot{x} = A\mathbf{x} + N(\mathbf{x}) + Bu$$

en donde las matrices son,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-k_s}{m_{tot}} & \frac{-\beta_\omega - \beta_g}{m_{tot}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L'_{11}R_s & L'_{12}R_s & L'_{13}R_s \\ 0 & 0 & L'_{21}R_s & L'_{22}R_s & L'_{23}R_s \\ 0 & 0 & L'_{31}R_s & L'_{32}R_s & L'_{33}R_s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ v \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$N(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L'_{11}T + L'_{12}P + L'_{13}R \\ L'_{21}T + L'_{22}P + L'_{23}R \\ L'_{31}T + L'_{32}P + L'_{33}R \end{bmatrix}$$

en donde, $T = \psi_{PM} \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) v \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) x \right)$, $P = \psi_{PM} \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) v \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) x - \frac{2\pi}{3} \right)$ y $R = \psi_{PM} \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) v \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) x + \frac{2\pi}{3} \right)$.

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F_{wave}}{m_{tot}} \\ -u_a L'_{11} - u_b L'_{12} - u_c L'_{13} \\ -u_a L'_{21} - u_b L'_{22} - u_b L'_{23} \\ -u_a L'_{31} - u_b L'_{32} - u_c L'_{33} \end{bmatrix}$$

La matriz inversa de L es,

$$L^{-1} = L_{inv} = \begin{bmatrix} L'_{11} & L'_{12} & L'_{13} \\ L'_{21} & L'_{22} & L'_{23} \\ L'_{31} & L'_{32} & L'_{33} \end{bmatrix}$$

Apéndice C

Datos para los casos de estudio del capítulo 3

$$\begin{aligned}R_s &= 0.29\Omega, L_s = 0.031, F_{wave} = \sqrt{2}(0.9e6) \sin(0.97t) \\ \lambda &= 0.1m, m_{tot} = 0.6e6, \beta_\omega = 1.42e6, k_s = 0.56e6, \beta_g = 0 \\ \psi_{PM} &= 23 \\ T_{wave} &= 6.5seg.\end{aligned}$$

Caso resistivo

$$R_{carga} = 6\Omega$$

Caso resistivo-inductivo

$$\begin{aligned}R_{carga} &= 6\Omega \\ L_{carga} &= 50mH\end{aligned}$$

Caso resistivo-capacitivo

$$\begin{aligned}R_{carga} &= 6\Omega \\ C_{carga} &= 2mF\end{aligned}$$

Apéndice D

Datos para la implementación de los casos de estudio capítulo 4

$$T_{wave} = 6.5seg. \ R = 19.19\Omega$$

$$L = 0.006H$$

$$C = 0.00002180F$$

$$V_g = 2000v$$

$$T_s = 5\mu s$$

$$m_s = 33$$

Apéndice E

Datos del caso de estudio

Carga: $R = 19.2\Omega$, $P = 50kW$, $V = 980vrms$

Generador undimotriz: $R_s = 0.29ohms$, $L_s = 0.031$, $F_{wave} = \sqrt{2}(0.9e6)$

$\lambda = 0.1m$, $m_{tot} = 0.6e6$, $\beta_\omega = 1.42e6$, $k_s = 0.56e6$, $\beta_g = 0$, $\psi_{PM} = 23Wb$

Sistema de acoplamiento: $c_{aco} = 0.001$, $L_{aco} = 0.01H$, $R_{aco} = 0.5\Omega$

Filtro: $C = 21.80\mu F$, $L = 6mH$

Controlador PI: $kp = 0.0271$, $ki = 277.77$

Inversor: $m_f = 33$

Apéndice F

Transformación del modelo promediado de ABC a dq0

La Figura 6.1 presenta el modelo promediado del inversor PWM en el marco de referencia ABC. Los voltajes de salida del inversor son,

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_a \\ \bar{v}_b \\ \bar{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} V_g$$

La corriente del bus de CD se define como,

$$i_g = \begin{bmatrix} d_a & d_b & d_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_a & \bar{i}_b & \bar{i}_c \end{bmatrix}^T$$

en donde d_a , d_b y d_c son los ciclos de trabajo de linea a neutro. Las ecuaciones que describen las corrientes en los inductores y los voltajes en los capacitores se definen como,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \left[V_g \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{v}_A \\ \bar{v}_B \\ \bar{v}_C \end{bmatrix} \right]$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{v}_A \\ \bar{v}_B \\ \bar{v}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \left[\begin{bmatrix} \bar{i}_a \\ \bar{i}_b \\ \bar{i}_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{i}_{Ra} \\ \bar{i}_{Rb} \\ \bar{i}_{Rc} \end{bmatrix} \right]$$

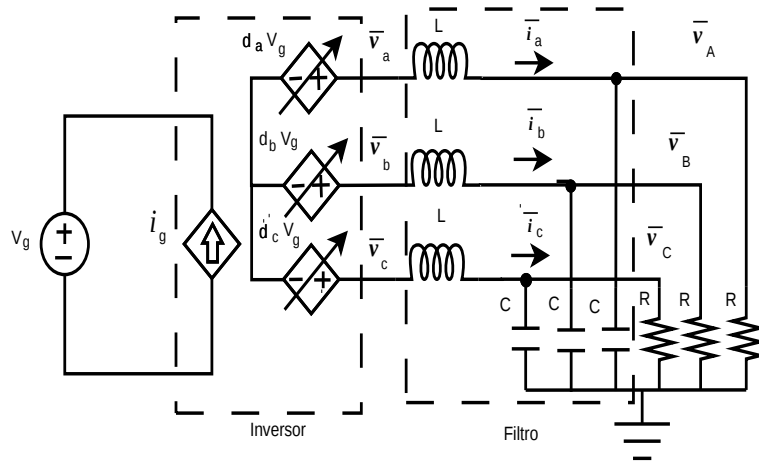


Figura 6.1: Modelo promediado del inversor trifásico, filtro y carga en el dominio de las fases.

La transformación del marco de referencia de ABC al marco de referencia dq0 se realiza mediante la aplicación de las matrices de transformación de park. Estas matrices de transformación se definen como,

$$D = \begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

La transformación se realiza de la siguiente manera,

$$f_{dq0} = D f_{abc}$$

Las ecuaciones en el marco de referencia dq0 utilizando las transformaciones de ABC a dq0 mencionadas anteriormente está definidas como,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_g \\ d_q \\ d_d \\ d_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{V}_d \\ \bar{V}_q \\ \bar{V}_0 \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ -\bar{i}_q \\ \bar{i}_0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{v}_d \\ \bar{v}_q \\ \bar{v}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{C} \left[\omega C \begin{bmatrix} \bar{v}_q \\ -\bar{v}_d \\ \bar{v}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \\ \bar{i}_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{Rd} \\ -i_{Rq} \\ i_{R0} \end{bmatrix} \right]$$

Además, la corriente en el bus de CD se define como [\[Zhang 2000\]](#),

$$i_g = - \begin{bmatrix} \frac{3}{2}d_d & \frac{3}{2}d_{qb} & \frac{3}{2}d_0 \end{bmatrix}$$

Bibliografía

- [Feng Wu 2008] FENG WU, XIAO-PING, ZHANG y STERLING, M., “*Modeling and Control of AWS-Based Wave Energy Conversion System Integrated Into Power Grid*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 23, no.3, Agosto, 2004, págs. 1196–1204.
- [Feng Wu 2009] FENG WU, XIAO PING ZHANG, PING JU y STERLING M., “*Optimal Control for AWS-Based Wave Energy Conversion System*”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.24, no.4 Noviembre, 2009, págs. 1747–1755.
- [Secretaria 2006] TORRES F. y MORALES E., “*Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en Mexico*”, Informe de Secretaria de Energía de Mexico, Junio, 2007.
- [SENER1 2011] SECRETARIA DE ENERGÍA NACIONAL, “*Estrategia nacional para la transición energetica y el aprovechamiento sustentable de la energía*”, Secretaria de Energía de Mexico, Enero, 2011.
- [SENER2 2007] SECRETARIA DE ENERGÍA NACIONAL, “*Programa Sectorial de Energía 20072012*”, Informe de Secretaria de Energía de Mexico, Noviembre, 2007, págs.
- [SENER3 2007] COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA EN MÉXICO, “*Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables*”, Informe de Secretaria de Energía de Mexico, Noviembre, 2007.
- [SENER4 2010] SECRETARIA DE ENERGÍA, “*Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética*”, Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Diciembre, 2010, págs. 1–52.
- [da Costa 2007] DA COSTA J.S., BEIRAO P. y VALÉRIO, D., “*Internal Model Control applied to the Archimedes Wave Swing*”, International Conference on Control Systems and Computer Science, Portugal, 2009, págs. 1–8.

- [czech 2009] CZECH B., BAUER P., POLINDER H. y KORONDI P., “*Modeling and simulating an Archimedes Wave Swing park in steady state conditions*”, IEEE 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Tokyo, Septiembre, 2009, págs. 1–10.
- [Wu 2009] WU F., ZHANG X. P y JU, P., “*Application of the battery energy storage in wave energy conversion system*”, IEEE International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, China, Abril, 2009, págs. 1–4.
- [das 2006] DAS, B. y PAL B.C., “*Voltage Control Performance of AWS Connected for Grid Operation*”, IEEE Transactions on Energy Conversion , Junio, vol.21, no. 2, 2006, págs. 353–361.
- [Zhang 2000] ZHANG, R., “*New high power, high performance power converter systems*”, IEEE Transactions on Energy Conversion , Mayo, vol.15, no. 3, 2000, págs. 456–463.
- [Jose 2006] JOSÉ, GOLDEMBERG, “*The promise of clean energy*”, Energy Policy , Octubre, 2006, págs. 2185–2190.
- [García 2010] GARCIA S., DAN M.A y JEAN, “*Control of Hydrodynamic Parameters of Wave Energy Point Absorbers using Linear Generators and VSC-based Power Converters Connected to the Grid*”, International conference on renewable energies and power quality, ICREPQ’10, España, Marzo, 2010, págs. 1–6.
- [Douglas 2011] BARNES DOUGLAS y MARTINOT ERIC MCCRONE, “*Renewables 2011 Global Status Report*”, Sunna Research and Worldwatch Institute, Paris Francia, Volumen 3, 2011, págs. 1–117.
- [Cruz 2008] CRUZ, JOÃO, “*Ocean wave energy: current status and future prepectives*”, Bristol:Springer, Febrero, 2008.
- [Loeb 1976] W. GONCALVES, “*Energia de ondas: aspectos tecnologicos e economicos e perspectivas de aproveitamento no Brasil*”, Reporte tecnico, Programa institucional de becas, Octubre, 2004, págs. 1–11.
- [Chozas 2008] FERNÁNDEZ CHOZAS JULIA, “*Una aproximación a la energía de las olas para la generación de electricidad*”, Tesis de Licenciatura, Madrid España, Septiembre, 2008.

- [Guilherme 2009] GUILHERME FERNANDO DA SILVA NUNES, *Modelling and Control of a Wave Energy Converter*, Tesis de Maestria, Lisboa Portugal, Octubre, 2009.
- [Alphonse 2007] ALPHONSE A. SCHACHER, *A Novel Control Design for a Wave Energy Converter*, Tesis de Maestria, Oregon State University, 15 de Junio, 2007.
- [Soria 2010] ROSALIA SORIA LUZ, *Diseño de Controladores Digitales Basados en Procesadores Digitales de Señales*, Tesis de Maestria, Michoacan Mexico, Marzo, 2010.
- [Cruz 2004] JOO M.B.P.CRUZ y ANTONIO J.N.A. SARMENTO, “*Energia das Ondas: Introduo aos Aspectos Tecnolgicos, Econmicos e Ambientais*”, Conferencia, Instituto Superior Tcnico Wave Energy Centre, Brasil, Octubre, 2004, págs. 1–65.
- [Gardner 1998] GARDNER F., “*Physical model testing for characterizing the AWS*”, Wave Energy Conference, Patras Grecia, Septiembre, 1998, págs. 192–199.
- [Chung 2001] CHUNG JIN S., “*On the fluid dynamics models for sloshing Source*”, International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Noruega, Junio 17-22, 2001.
- [Henderson 2006] R. HENDERSON, “*Design simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter*”, Renewable Energy, Volumen 31, Scotland UK, 2006, págs. 271–283.
- [IEA 2003] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, “*Ocean energy systems*”, Implementing Agreement on Ocean Energy Systems, Reporte tecnico, Anexo 2, Volumen 1, Octubre 2003, págs. 1–65.
- [Arteaga 2001] ARTEAGA, ROBERTO MURPHY, “*Teoria electromagnetica/Electromagnetic Theory*”, Limusa, Julio, 2001.
- [Polinder 2005] POLINDER H., MECROW B.C, JACK A.G, DICKINSON P.G, y MUELLER M.A, “*Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.20, no.2, Junio, 2001, págs. 260–267.

- [Zhang 2000] ZHANG R., LEE F.C., BOROYEVICH D. y MAO, HENGCHUN, “*New high power, high performance power converter systems*”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.20, no.2, Mayo, 2000, págs. 456–463.
- [Mohan 2003] MOHAN NED, UNDELAND TORE M. y ROBBINS WILLIAM P., “*Power Electronics: Converters, Applications, and Design*”, Wiley, Volumen 3, Octubre, 2003.
- [Kofoed 2006] P. KOFOED, “*Prototype testing of the wave energy converter wave dragon*”, Renewable Energy, Volumen 31, 2006, págs.181-189.
- [Hiti 1994] HITI S. y BOROYEVICH, D., “*Control of front-end three-phase boost rectifier*”, IEEE Conference Proceedings, APEC’ 94, Virginia, Febrero, Volumen 2, 1994, págs 927–933.
- [Polinder 2005] POLINDER H., MECROW B.C., JACK A.G., DICKINSON P.G. y AND MUELLER M.A, “*Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Holanda, Vol.20, no. 2, Junio, 2005, págs 260–267.
- [Phillips 2000] PHILLIPS CHARLES L. y HARBOR ROYCE D., *Feedback Control Systems*, Prentice Hall, Agosto, 2000.
- [Matlab 2012] TYAGI AGAM KUMAR, *MATLAB and SIMULINK for Engineers formulae*, Oxford University Press, USA, Febrero, 2012.
- [Phillips 1985] PHILLIPS CHARLES L., “*Analytical Bode Design of Controllers*”, IEEE Transactions on Education, vol.28, no.1, Febrero, 1985, págs 43–44.
- [Dormand 1986] DORMAND J.R. y PRINCE P.J., “*A reconsideration of some embedded RungeKutta formulae*”, Journal of Computational and Applied Mathematics, Volumen 15, no. 2, Junio, 1986, págs 203–211.
- [Ogata 2009] OGATA KATSUHIKO, *Modern Control Engineering*, India: Prentice-Hall, Septiembre, 2009.
- [Kundur 1994] KUNDUR PRABHA, *USA: Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Professional, Enero, 1994.
- [Astrom 1997] KARL J. ASTROM y BJORN WITTENMARK, *Computer-Controlled System*, Teory and Desing, Prentice Hall, 1997.
- [Rashid 1995] RASHID, MUHAMMAD H., *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*, Prentice-Hall, Diciembre, 1995.

-
- [Rodriguez 2005] RODRIGUEZ J.R., DIXON J.W., ESPINOZA J.R., PONTT J. y LEZANA P., “*PWM regenerative rectifiers: state of the art*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, n0.2, Febrero, 2005, págs 5–22.
- [Zhang 1997] ZHANG R., BOROYEVICH D., PRASAD V.H., LEE F.C. y DUBOVSKY S., “*A three-phase inverter with a neutral leg with space vector modulation*”, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol.2, Febrero, 1997, Volumen 2, págs 857–863.