

Regulación de Tensión en CC de un Sistema Eólico Basado en un Generador Síncrono de Imanes Permanentes

David Mateo Rojas Duarte
Sergio Andrés Zambrano Díaz

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2018

Regulación de Tensión en CC de un Sistema Eólico Basado en un Generador Síncrono de Imanes Permanentes

David Mateo Rojas Duarte
Sergio Andrés Zambrano Díaz

Monografía de proyecto de grado para optar al título de:
Ingeniero Electrónico

Director:
Ing. Carlos Andrés Torres Pinzón, PhD.
Codirector:
Ing. Carlos Javier Mojica Casallas, Ms.C.

Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Electrónica
Bogotá, Colombia
2018

Dedicatoria

A nuestros padres, quienes nos brindaron su apoyo y confianza incondicional durante toda nuestra formación personal y profesional.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido realizado bajo la dirección de los ingenieros Carlos Andrés Torres Pinzón, PhD. y Carlos Javier Mojica Casallas, Ms.C y por su apoyo, paciencia y tiempo les expresamos nuestro más profundo agradecimiento por hacer posible la realización de este proyecto.

A nuestros padres por ser el pilar fundamental para que pudiéramos realizar nuestros sueños y cumplir nuestras metas y por ser un ejemplo a seguir. Daisy Duarte, Luz Mery Díaz, Carlos Rojas, Raúl Zambrano.

A nuestras familias por motivarnos a tener un futuro mejor y apoyarnos cada día para salir adelante.

A nuestras parejas, amigos y colegas, por apoyarnos en los momentos difíciles y motivarnos a finalizar nuestros objetivos y alcanzar nuestras metas, por los momentos divertidos y alegres que durante toda nuestra etapa universitaria sobresalieron sobre los malos momentos, por las aventuras vividas durante todo este camino y las nuevas que vendrán. Angelica Gonzalez, Paola Pulido, Cristian Vela, Andrés Téllez, Nicolás Ramírez, David Ortiz, Camilo Martínez, Esteban Restrepo y Andrés Gómez.

A nuestros maestros, quienes desde el primer día de clase en la universidad, nos brindaron sus conocimientos y nos ayudaron a crecer como profesionales y como personas.

GRACIAS

Resumen

El sector energético colombiano basa su producción energética en la extracción de petróleo crudo y la generación de energía por medio de fuentes hídricas, dejando a un lado los demás recursos naturales. Actualmente países como China, Estados Unidos y Alemania cuentan con granjas de viento que suplen un mínimo porcentaje en la red eléctrica de cada país, pero muy importante para el impacto ambiental. En este proyecto se implementó un bus DC de 42 voltios regulado a partir de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG, por sus siglas en inglés); el proyecto parte del estudio del comportamiento de la velocidad del viento presente en la estaciones meteorológicas más cercanas a la sede principal de la universidad Santo Tomás. Sigue con la caracterización del aerogenerador que cuenta con un acople mecánico a un motor trifásico para simular el impacto del viento a las aspas del PMSG que a su vez con la ayuda de un PLC, manipula un variador de frecuencia que altera la velocidad del motor trifásico en función de los perfiles de viento estudiados. Con la ayuda de herramientas de simulación como lo son Matlab y PSim se diseñó e implemento un convertidor DC/DC controlado con un margen de regulación del 1 % a partir de la técnica de control PID.

Palabras clave: Aerogenerador, convertidor trifásico controlado, energía eólica, control PID.

Abstract

The Colombian energy sector bases its production on the extraction of crude oil and the generation of energy through water sources and do not using other available natural resources, currently countries like China, the United States and Germany have wind farms to satisfy a minimum percentage of electricity of each country, but very important for the environmental impact. In this project, it was implemented a DC bus of 42 volts regulated from a permanent magnet synchronous generator (PMSG); the project was based on the study of wind speed behavior in the closest meteorological stations to Santo Tomás University. Follow by the characterization of the wind turbine that has a mechanical coupling to a three-phase motor that simulates the impact of the wind in to the blades of the PMSG that at the same time using a PLC and a variable frequency drive is manipulated (AFD) to change the speed of the three-phase motor in function of the studied wind speed profiles. With help of simulation tools such as Matlab and PSIM, a controlled DC/DC converter was designed and implemented with a regulation margin of 1 %, using a PID control method.

Keywords: Wind turbine, controlled three-phase converter, wind power, PID control.

Lista de Figuras

2-1.	Modelo típico de conversión de energía eólica	3
5-1.	Partes de un aerogenerador	11
5-2.	Alternador trifásico	12
5-3.	Circuito equivalente monofásico	13
5-4.	Circuito equivalente Trifásico	14
5-5.	Topología del rectificador trifásico de onda completa	15
5-6.	Convertidor boost cuadrático	16
5-7.	Sistema resultante para $t=0$	17
5-8.	Sistema resultante para $t=1$	17
5-9.	PWM y voltaje DC respectivo para cada uno	18
6-1.	Acople mecánico del motor trifásico con el PMSG	21
6-2.	Menú de la HMI para simulación de velocidad del viento	21
6-3.	Modo de operación manual en la HMI	21
6-4.	Modo de operación automático para una de las estaciones en la HMI	22
6-5.	Gráfica de comportamiento frecuencia variador Vs velocidad del rotor del PMSG	24
6-6.	Gráfica de determinación de λ según el número de aspas de un aerogenerador	25
6-7.	Parámetros del bloque "PMSM" de simulink	26
6-8.	Circuito equivalente por fase del PMSG	26
6-9.	Simulación del sistema PMSG con carga en configuración estrella	29
6-10.	Implementación del sistema PMSG con carga en configuración estrella	30
6-11.	Resultados de la simulación con conexión en estrella de voltaje del generador, voltaje en la resistencia y corriente en la resistencia con $R = 40 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	31
6-12.	Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje del generador con $R = 40 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	31
6-13.	Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje en la resistencia con $R = 40 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	32
6-14.	Resultados implementación con conexión en estrella de corriente en la resistencia con $R = 40 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	32
6-15.	Resultados de la simulación con conexión en estrella de voltaje del generador, voltaje en la resistencia y corriente en la resistencia con $R = 20 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	33

6-16. Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje del generador con $R = 20 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	33
6-17. Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje en la resistencia con $R = 20 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	34
6-18. Resultados implementación con conexión en estrella de corriente en la resistencia con $R = 20 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	34
6-19. Resultados de la simulación con conexión en estrella de voltaje del generador, voltaje en la resistencia y corriente en la resistencia con $R = 10 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	35
6-20. Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje del generador con $R = 10 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	35
6-21. Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje en la resistencia con $R = 10 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	36
6-22. Resultados implementación con conexión en estrella de corriente en la resistencia con $R = 10 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$	36
6-23. Resultados de la simulación con conexión en estrella de voltaje del generador, voltaje en la resistencia y corriente en la resistencia con $R = 5 \Omega$ y $V = 7,5 \text{ m/s}$	37
6-24. Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje del generador con $R = 5 \Omega$ y $V = 7,5 \text{ m/s}$	37
6-25. Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje en la resistencia con $R = 5 \Omega$ y $V = 7,5 \text{ m/s}$	38
6-26. Resultados implementación con conexión en estrella de corriente en la resistencia con $R = 5 \Omega$ y $V = 7,5 \text{ m/s}$	38
6-27. Rectificador trifásico de onda completa	39
6-28. Topología de un Convertidor Boost Cuadrático	41
6-29. Estado del circuito cuando $u = 0$	42
6-30. Estado del circuito cuando $u = 1$	42
6-31. Diagrama de bloques del Modelo conmutado (ideal no lineal) del convertidor Boost Cuadrático	43
6-32. Valores en estado estacionario de un elemento de almacenamiento de energía en un convertidor DC-DC	44
6-33. Carga y descarga de un elemento de almacenamiento de energía en un convertidor DC-DC	45
6-34. Simulación diagrama de bloques del modelo conmutado del convertidor con los valores de elementos para obtener 100 W con 3 V en la entrada (De arriba para abajo: corriente en L1, corriente en L2, voltaje en C1 y voltaje en C2)	50
6-35. Circuito para simulación del convertidor en Matlab-Simulink	50

6-36. Respuesta para la simulación del convertidor en Matlab-Simulink (De arriba para abajo: corriente en L1, corriente en L2, voltaje en C1 y voltaje en C2) . .	51
6-37. Circuito para simulación del convertidor en Psim	51
6-38. Respuesta para simulación del convertidor en Psim (En rojo corriente en L1, en azul corriente en L2, en verde voltaje en C1 y en magenta voltaje en C2) . .	52
6-39. Representación en función de transferencia del control para la regulación de tensión del sistema	54
6-40. Respuesta del Control	55
6-41. Control aplicado en el diagrama de bloques del sistema con perturbación . . .	55
6-42. Respuesta del control a una perturbación en la entrada	56
7-1. Modelo de simulación con control en Matlab-Simulink del circuito implementado	59
7-2. Respuesta de simulación con control en Matlab-Simulink del circuito implementado	60
7-3. Impreso PCB del convertidor DC-DC Boost Cuadrático	60
7-4. Driver de lado bajo implementado usando un IR2110 para conmutar el MOSFET	61
7-5. Montaje experimental completo del sistema	62
7-6. Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una velocidad del viento de $3,8 \text{ m/s}$	63
7-7. (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una velocidad del viento $3,8 \text{ m/s}$	63
7-8. Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una velocidad del viento de 6 m/s	64
7-9. (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una velocidad del viento 6 m/s	64
7-10. Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una velocidad del viento de 14 m/s	64
7-11. (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una velocidad del viento 14 m/s	64
7-12. Modelo de simulación con control en Matlab-Simulink del circuito ideal . . .	65
7-13. Modelo de simulación con control en Matlab-Simulink del circuito implementado	66

7-14. Respuesta de simulación con 5 V de entada, (De arriba a abajo) Respuesta voltaje circuito ideal, respuesta voltaje circuito implementado y respuesta de corriente de entrada circuito ideal (Azul) y circuito implementado (Rojo) . . .	66
7-15. Respuesta de simulación con 15 V de entada, (De arriba a abajo) Respuesta voltaje circuito ideal, respuesta voltaje circuito implementado y respuesta de corriente de entrada circuito ideal (Azul) y circuito implementado (Rojo) . . .	67
7-16. Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una entrada de 5 V	67
7-17. (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una entrada de 5 V	67
7-18. Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una entrada de 15 V	68
7-19. (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una entrada de 15 V .	68
7-20. Respuesta de simulación con 5 V de entada, (De arriba a abajo) Respuesta voltaje circuito ideal, respuesta voltaje circuito implementado y respuesta de corriente de entrada circuito ideal (Azul) y circuito implementado (Rojo) . . .	69
7-21. Respuesta de simulación con 15 V de entada, (De arriba a abajo) Respuesta voltaje circuito ideal, respuesta voltaje circuito implementado y respuesta de corriente de entrada circuito ideal (Azul) y circuito implementado (Rojo) . . .	70
7-22. Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una entrada de 5 V	70
7-23. (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una entrada de 5 V	70
7-24. Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una entrada de 15 V	71
7-25. (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una entrada de 15 V .	71
10-1. Micro-red inteligente de distribución a partir de un bus DC	77
E-1. Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople DC	90
E-2. Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople AC	90

E-3. Voltaje de entrada al driver de 5V (Amarillo) y Voltaje de entrada al driver de 12V (Azul)	90
E-4. Voltaje en el mosfet (Amarillo), corriente en el mosfet (Azul) y potencia en el mosfet (Rojo)	90
E-5. Voltaje en el Diodo 1 (Amarillo), corriente en el Diodo 1 (Azul) y potencia en el Diodo 1 (Rojo)	91
E-6. Voltaje en el Diodo 2 (Amarillo), corriente en el Diodo 2 (Azul) y potencia en el Diodo 2 (Rojo)	91
E-7. Voltaje en el Diodo 3 (Amarillo), corriente en el Diodo 3 (Azul) y potencia en el Diodo 3 (Rojo)	91
E-8. Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople DC	92
E-9. Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople AC	92
E-10. Voltaje de entrada al driver de 5V (Amarillo) y Voltaje de entrada al driver de 12V (Azul)	92
E-11. Voltaje en el mosfet (Amarillo), corriente en el mosfet (Azul) y potencia en el mosfet (Rojo)	92
E-12. Voltaje en el Diodo 1 (Amarillo), corriente en el Diodo 1 (Azul) y potencia en el Diodo 1 (Rojo)	93
E-13. Voltaje en el Diodo 2 (Amarillo), corriente en el Diodo 2 (Azul) y potencia en el Diodo 2 (Rojo)	93
E-14. Voltaje en el Diodo 3 (Amarillo), corriente en el Diodo 3 (Azul) y potencia en el Diodo 3 (Rojo)	93
E-15. Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople DC	94
E-16. Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople AC	94
E-17. Voltaje de entrada al driver de 5V (Amarillo) y Voltaje de entrada al driver de 12V (Azul)	94
E-18. Voltaje en el mosfet (Amarillo), corriente en el mosfet (Azul) y potencia en el mosfet (Rojo)	94
E-19. Voltaje en el Diodo 1 (Amarillo), corriente en el Diodo 1 (Azul) y potencia en el Diodo 1 (Rojo)	95
E-20. Voltaje en el Diodo 2 (Amarillo), corriente en el Diodo 2 (Azul) y potencia en el Diodo 2 (Rojo)	95
E-21. Voltaje en el Diodo 3 (Amarillo), corriente en el Diodo 3 (Azul) y potencia en el Diodo 3 (Rojo)	95

E-22. Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople DC	96
E-23. Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople AC	96
E-24. Voltaje de entrada al driver de 5V (Amarillo) y Voltaje de entrada al driver de 12V (Azul)	96
E-25. Voltaje en el mosfet (Amarillo), corriente en el mosfet (Azul) y potencia en el mosfet (Rojo)	96
E-26. Voltaje en el Diodo 1 (Amarillo), corriente en el Diodo 1 (Azul) y potencia en el Diodo 1 (Rojo)	97
E-27. Voltaje en el Diodo 2 (Amarillo), corriente en el Diodo 2 (Azul) y potencia en el Diodo 2 (Rojo)	97
E-28. Voltaje en el Diodo 3 (Amarillo), corriente en el Diodo 3 (Azul) y potencia en el Diodo 3 (Rojo)	97

Lista de Tablas

6-1.	Velocidad máxima del viento cada mes del año 2017 en la estación Centro de Alto Rendimiento	20
6-2.	Velocidad máxima del viento cada mes del año 2017 en la estación MinAmbiente	20
6-3.	Frecuencia del variador Vs Velocidad del rotor del PMSG	23
6-4.	Relación de velocidad y frecuencia del generador para determinar el número de polos del PMSG	27
7-1.	Evaluación de eficiencia del prototipo	72
A-1.	Velocidad máxima del viento cada cada día del año 2017 en la estación Centro de Alto Rendimiento	83
B-1.	Velocidad máxima del viento cada cada día del año 2017 en la estación MinAmbiente	84
C-1.	Características del PMSG en circuito abierto	85

Lista de Símbolos y Abreviaciones

<i>A</i>	Unidad de medida de corriente, Amperio
<i>AC</i>	Corriente Alterna
<i>CC</i>	Corriente Continua
<i>D</i>	Porcentaje de ciclo útil de una señal
<i>DC</i>	Corriente Directa
<i>DSP</i>	Procesador Digital de Señales
<i>f</i>	Frecuencia
<i>F</i>	Unidad de medida de capacitancia, Faradio
<i>H</i>	Unidad de medida de inductancia, Henrio
<i>HMI</i>	Interfaz Humano Maquina (por sus siglas en inglés) generalmente es una pantalla
<i>Hz</i>	Unidad de media de frecuencia, Hertz
<i>km</i>	Unidad de medida de distancia, kilómetro
<i>m/s</i>	Unidad de medida de velocidad, metros por segundo
<i>MPPT</i>	Seguidor Punto de Máxima Potencia (Por sus siglas en inglés)
<i>Nm</i>	Unidad de medida de par motor, Newton por metro
<i>PID</i>	Técnica de control Proporcional-Integral-Derivativa
<i>PLC</i>	Controlador Lógico Programable
<i>PMSG</i>	Generador Síncrono de Imanes Permanentes (por sus siglas en inglés)
<i>PWM</i>	Modulación por Ancho de Pulso (por sus siglas en inglés)
<i>RPM</i>	Unidad de medida de velocidad rotacional, Revoluciones por minuto
<i>TSR</i>	Relación de velocidad punta (por sus siglas en inglés)
<i>V</i>	Unidad de medida de diferencial de potencial, Voltio
<i>W</i>	Unidad de medida de potencia, Watt
<i>Wb</i>	Unidad de medida de flujo magnético, Weber

Ω	Unidad de medida de impedancia, Ohm
λ	Constante de Velocidad especifica de un aerogenerador
η	Eficiencia

Contenido

Dedicatoria	III
Agradecimientos	V
Resumen	VII
Lista de Figuras	IX
Lista de tablas	XV
Lista de Símbolos y Abreviaciones	XVII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo General	7
4.2. Objetivos Específicos	7
5. Marco teórico	9
5.1. Relación energía eólica – energía mecánica.	9
5.2. Los Aerogeneradores	10
5.3. Rectificadores Trifásicos	14
5.4. Convertidores DC-DC	16
5.5. Control y regulación de tensión	18
6. Diseño y ejecución del proyecto	19
6.1. Determinación y simulación de los perfiles de viento en la sede principal de la Universidad Santo Tomás	19
6.2. Modelo eléctrico del PMSG	26
6.3. Diseño de un rectificador trifásico	39
6.4. Diseño de un Convertidor DC-DC Boost Cuadrático	40
6.4.1. Modelo Conmutado	41
6.4.2. Diseño estático	43

6.4.3. Modelo lineal o de pequeña señal	52
6.5. Diseño de un control PID para la regulación de voltaje en el convertidor	53
7. Resultados del proyecto	59
7.1. Simulación y funcionamiento del prototipo	59
7.1.1. Resultados del sistema con control sin carga y con una velocidad del viento de $3,8m/s$	63
7.1.2. Resultados del sistema con control sin carga y con una velocidad del viento de $6m/s$	64
7.1.3. Resultados del sistema con control sin carga y con una velocidad del viento de $14m/s$	64
7.2. Análisis de resultados	65
7.2.1. Resultados de las simulaciones con una carga de $800\ \Omega$	66
7.2.2. Resultados del sistema alimentado con una fuente DC programable con control y con carga de $800\ \Omega$	67
7.2.3. Resultados de las simulaciones con una carga de $200\ \Omega$	69
7.2.4. Resultados del sistema alimentado con una fuente DC programable con control y con carga de $200\ \Omega$	70
8. Conclusiones	73
9. Impacto social	75
10. Trabajo Futuro	77
Bibliografía	78
A. Anexo: Velocidades máximas del viento para el año 2017 en la estación Centro de Alto Rendimiento	83
B. Anexo: Velocidades máximas del viento para el año 2017 en la estación MinAmbiente	84
C. Anexo: Tabla de caracterización del PMSG	85
D. Anexo: Código implementado en el DSP para un control PID en discreto	86
E. Anexo: Mediciones adicionales del funcionamiento del circuito	90

1. Introducción

La forma en la que se genera y se distribuye la energía eléctrica actualmente está afrontando nuevos retos, la implementación de energías renovables en el mundo, en especial la energía eólica y la energía fotovoltaica han demostrado un amplio crecimiento en los últimos años. Durante la última década del siglo XX, la capacidad eólica mundial se duplicó aproximadamente cada tres años y para el año 2003 la capacidad instalada en energía eólica mundial alcanzo los 39.000 Giga Watts (GW) [1]. En Colombia la única planta eólica se encuentra ubicada en La Guajira y es un proyecto piloto de la empresa EPM que tiene 19,5 Mega Watts (MW) de potencia nominal [2], pero es un claro ejemplo de que la ley 1715 o ley de energías renovables ha empezado a dar frutos.

En el marco teórico de este documento se encontraran temáticas relacionadas al modelo de conversión de energía eólica en energía eléctrica, funcionamiento de un aerogenerador y topologías de rectificadores con una respectiva técnica de control que aproveche al máximo este recurso renovable

En la sección diseño y ejecución del proyecto se investigo el comportamiento del viento en los lugares mas cercanos a la sede principal de la Universidad Santo Tomás con el fin de diseñar un prototipo de simulación de viento para el aerogenerador, posteriormente se evidencia el desarrollo del modelo eléctrico del aerogenerador junto con el diseño de un rectificador y un convertidor DC-DC cuya tensión es regulada con una técnica clásica de control.

Finalmente en la sección de resultados del proyecto, se realizo un análisis completo del funcionamiento del prototipo implementado, se caracterizo la eficiencia de este y se obtuvieron las respectivas conclusiones sobre el desarrollo del proyecto.

2. Antecedentes

Los aerogeneradores son máquinas comúnmente usadas en la transformación de la energía presente en la velocidad del viento a energía eléctrica, este tipo de conversión tiene una alta demanda de áreas de ingeniería pues, la energía eólica nace al usar motores de grandes aspas que inicialmente contaban con una caja de engranajes que lograba obtener un mayor movimiento en el estator y por medio de un concepto electro-mecánico se genera una corriente alterna (AC). Los principales desafíos con los que actualmente se cuentan, son la inestabilidad en la velocidad del viento y las altas pérdidas presentes en su transformación a corriente continua (CC) al tratarse de varias etapas como se muestra en la Figura 2-1 donde su punto final es lograr inyectar esta energía a la red de distribución eléctrica .

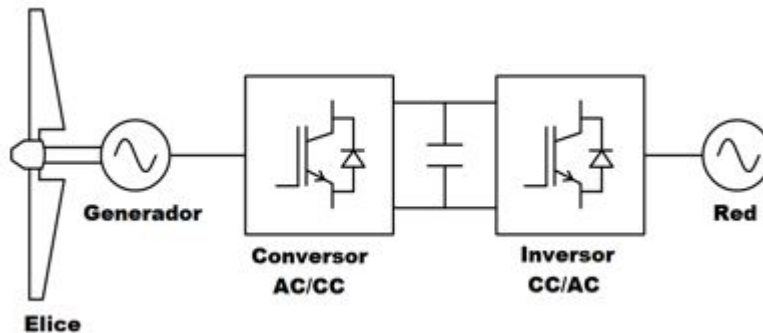


Figura 2-1.: Modelo típico de conversión de energía eólica

Tomado de <http://www.scielo.cl>

En las dos últimas décadas el cambio climático y el compromiso con el medio ambiente ha hecho que la investigación de este tipo de energía limpia tenga un alto grado de desarrollo, logrando implementar técnicas de control como lo es MPPT, que busca aprovechar la máxima potencia en cualquier punto de operación, también aparecen las caracterizaciones de sistemas utilizando el análisis en comportamiento dinámico y por último modelos de cómo lograr inyectar esta energía limpia a la red eléctrica.

En 2004 usando el software Matlab Simulink en el documento “Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors” [3], se comparan distintas estrategias de control aplicadas a los sistemas de energía eólica y se determina la cantidad de energía que cada estrategia de control puede entregar a la red, donde se resalta especialmente el control seguidor de punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés) frente a las otras estrategias. Teniendo en cuenta el éxito y la popularidad del

control MPPT, posteriormente en el año 2006 en el documento “DC Bus Control of Variable Speed Wind Turbine Using a Buck-Boost Converter” [4], usando un convertidor Buck-Boost y un generador síncrono de imanes permanentes, se implementa un control MPPT con el fin de obtener la máxima potencia en CC que el generador puede dar a distintas velocidades, dando una solución parcial al problema de la inestabilidad en la velocidad del viento.

Como se observa, el desarrollo en técnicas de control para sistemas de energía eólica ha tenido grandes avances, se puede considerar como un sector de investigación en constante cambio debido a que en 2010 “Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine Using DC Bus Measurements” [5] y en 2013 “A Robust Control For Permanent Magnet Synchronous Generator Associated With Variable Speed Wind Turbine” [6], mencionan técnicas de control para poder suministrar este tipo de energía a una red eléctrica que parte de la implementación de un control PI. En la última década las investigaciones apuntan al desarrollo de redes inteligentes, este término hace alusión a la interconexión que se logra al implementar un sistema eléctrico con diferentes fuentes de energía que pueden ser tanto renovables como no renovables, proyectos tales como “Design of a Robust Grid Interface System for PMSG-Based Wind Turbine Generators” [7], “Control of aPMSG based wind energy generation system for power maximization and grid fault conditions” [8], “PMSG Wind Energy Conversion System: Modeling and Control” [9], “Proposal of a Three-Phase Bridgeless PFC SEPIC Rectifier with MPPT for Small Wind Energy Systems” [10]. Estos documentos tienen en común, que todos y cada uno de ellos analiza una nueva técnica de control aplicada en convertidores controlados de diferentes tipos como boost, buck-boost, buck.

En el año 2010 aparece el trabajo más influyente en el desarrollo de este proyecto titulado “DC-Bus Voltage Control of Three-Phase PWM Converters connected to Wind Powered Induction Generator” [11], en este proyecto se habla del diseño de un conversor de tensión regulado por pulso PWM que usa el control del voltaje presente en un generador eólico para hacer un bus CC de voltaje constante y también se detalla de manera precisa una técnica de caracterización del generador usando la transformación al marco rotacional “d,q”. Cabe aclarar que el proyecto mencionado trata con un generador eólico asíncrono y el actual proyecto se desarrolló utilizando un generador eólico síncrono de imanes permanentes, no obstante, es un documento que brindo un primer acercamiento al tema y posibles resultados a obtener.

3. Justificación

Dado el crecimiento anteriormente mencionado en la introducción y la llegada de la energía eólica a nuestro país, se crea la necesidad de realizar investigaciones que aporten al desarrollo e implementación de sistemas de energía eólica eficientes y productivos que en un futuro estén en capacidad de suplir la misma o incluso mayor cantidad de energía que las generadoras eléctricas convencionales no renovables. Esto se puede realizar mediante el diseño y aplicación de nuevos y mejorados modelos electrónicos de control que regulen de manera eficiente la tensión otorgada a la red de distribución eléctrica [12].

Los generadores eólicos o aerogeneradores comúnmente pueden ser de tipo asíncronos o síncronos, este proyecto se desarrolló utilizando un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG por sus siglas en inglés) y mediante la implementación de una técnica de control aplicada a un convertidor DC-DC se reguló la tensión de salida teniendo en cuenta que este sistema trabaja en función de la velocidad del viento. Con el desarrollo y los resultados obtenidos de este proyecto se obtuvo un prototipo base que permitiría crear un bus de distribución de corriente continua para un proyecto más grande y se comprobó que se pueden utilizar diseños de modelos de control convencionales para regular la tensión en sistemas de conversión de energías renovables.

Finalmente, con la realización de este proyecto se busca motivar a futuros profesionales para que continúen aportando en la investigación y hacer de los sistemas de energía renovables sistemas más eficientes e inspirar a futuras generaciones a reemplazar las fuentes de energía eléctrica convencionales no renovables por estos sistemas, reduciendo el impacto ambiental generado por la mala utilización de los recursos naturales limitados.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un bus de distribución de CC regulado alimentado por un sistema eólico basado en una máquina síncrona de imanes permanentes (PMSG).

4.2. Objetivos Específicos

- Analizar y determinar los perfiles de viento en la sede principal de la universidad Santo Tomás con el fin de predecir el potencial energético.
- Analizar y modelar el generador síncrono de imanes permanentes del sistema eólico disponible en el laboratorio.
- Diseñar, modelar e implementar un prototipo de un sistema conmutado de AC-DC de 100W.
- Diseñar, simular e implementar una estrategia de control clásica para la regulación de voltaje del bus de CC de 42 V con un margen de regulación del 2 %.
- Comprobar experimentalmente el funcionamiento del prototipo diseñado con su respectivo control.

5. Marco teórico

5.1. Relación energía eólica – energía mecánica.

Las energías renovables según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), frente a las fuentes convencionales, “las energías renovables son recursos limpios cuyo impacto es prácticamente nulo y siempre reversible” [13]. Para la obtención de estas energías se requiere un módulo específico que aprovecha un recurso natural para generar energía eléctrica, dentro de estos recursos se encuentran la energía solar, geotérmica, mareomotriz y para este proyecto específicamente se describirá la energía eólica, la cual aprovecha el recurso del viento para mover las aspas de un aerogenerador logrando transformar la energía rotatoria de las aspas en energía eléctrica para el consumo humano. [14]

Para poder asociar estas dos fuerzas es necesario definir la energía eólica como una energía cinética la cual responde a una potencia que influye en el funcionamiento del aerogenerador.[15]

$$E_c = \frac{1}{2} m_{aire} v^2 \quad (5-1)$$

Donde:

E_c : Energía Cinética [J]

m_{aire} : Masa Propia Del Aire[kg]

v : Velocidad Propia Del Aire [m/s]

Sabiendo que la energía se puede asociar como la integral de la potencia, se puede llegar a conocer cuanta potencia puede existir en una determinada cantidad de aire por una velocidad.

$$P_v = \frac{1}{2} A \rho v^3 \quad (5-2)$$

Donde:

P_v : Potencia Eólica [W]

A : Área De Barrido Propia Del Rotor [m^2]

ρ : Densidad Del Aire [kg/m^3]

v : Velocidad Propia Del Aire [m/s]

De esta forma se logra explicar que la potencia mecánica de una turbina es proporcional al cubo de la velocidad del viento, con la cual se puede dar a entender la importancia del

comportamiento del viento y la elección de una zona para la instalación del aerogenerador, no obstante, para poder explicar las pérdidas que se presentan al bloqueo del aerogenerador frente al flujo del aire es necesario analizar la eficiencia del aerogenerador con relación a la velocidad tangencial TSR, este término hace referencia al número de revoluciones por minuto del rotor; en la siguiente ecuación se define la velocidad específica [16].

$$\lambda = \frac{r_{aero}\omega}{v_{aire}} \quad (5-3)$$

Donde:

λ : TSR o velocidad específica del aerogenerador

r_{aero} : Radio del aerogenerador [m]

ω : Velocidad angular de la turbina [rad/s]

v_{aire} : Velocidad Propia Del Aire [m/s]

Esta ecuación permite determinar la velocidad angular a la que puede girar el generador basados en la velocidad del viento y de esta forma predecir el potencial energético de un generador, en cuanto mas rápido giren las aspas de un aerogenerador a una velocidad determinada del viento, mas eficiente es su conversión de energía eólica a energía mecánica y posteriormente su conversión a energía eléctrica.

5.2. Los Aerogeneradores

Los aerogeneradores son el principal modulo para la conversión de la energía eólica, pues realizan la transformación a energía eléctrica por medio de una maquina rotatoria que crea un campo magnético, al girar en torno de una bobina fija que responde a una configuración, hoy en día existen varios tipos de aerogeneradores, muchos de ellos dependen de configuraciones mecánicas y controles eléctricos avanzados que son capaces de brindar una mayor eficiencia en la producción de energía eléctrica, en la imagen **5-1** se muestra la configuración clásica que puede existir en un aerogenerador, en él se puede observar elementos de censo, convertidores mecánicos como engranes y el concepto electromagnético mencionado anteriormente.

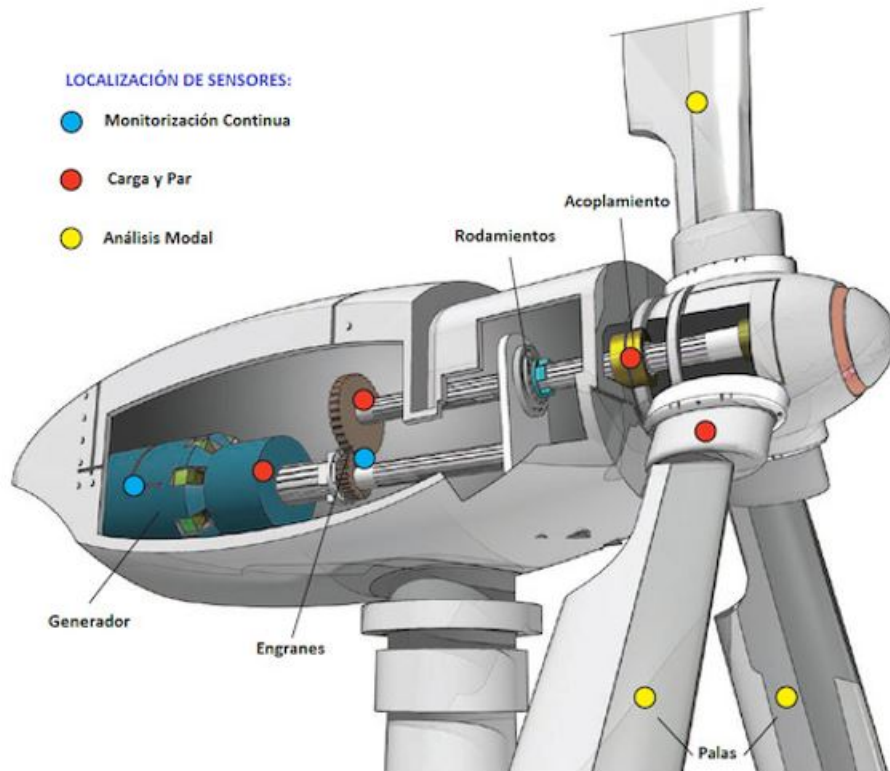


Figura 5-1.: Partes de un aerogenerador

Tomado de: <http://www.grupoalava.com/ingenieros/actualidad/sensores-para-instalacion-permanente-y-ensayo-en-aerogeneradores-y-componentes-de-turbina/>

El generador de inducción es muy común en estos sistemas que cuentan con diferentes topologías como el rotor de jaula o el rotor bobinado, la gran diferencia entre ellas se encuentra en las pérdidas por el sistema mecánico con el que cuentan, pues las fuerzas asociadas al deslizamiento del rotor suelen ser altas a diferencia de las turbinas con generador síncrono.

Los generadores síncronos poseen varias formas de excitación, puede ser por imanes permanentes, por rotor bobinado o por múltiples polos en su estator, la configuración va muy de la mano con la aplicación del generador puesto que los más efectivos para la obtención de energía eólica son los aerogeneradores de imanes permanentes, dado que no poseen caja de engranajes evitando las pérdidas por fricción, su diseño se caracteriza por bobinados en el estator y junto al campo magnético que se encuentra en el rotor le da un acoplamiento permanente entre el rotor y la turbina. [17]

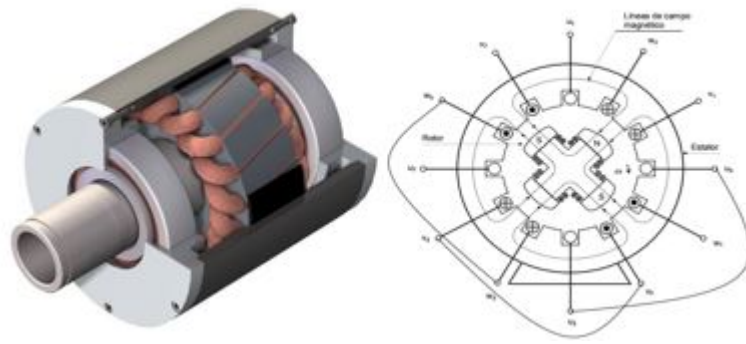


Figura 5-2.: Alternador trifásico

Tomado de: <http://www.directindustry.es/prod/mecc-alte/product-58473-915041.html>

Con el uso de los generadores síncronos en un sistema eólico es necesario determinar la frecuencia rotacional del generador, esta frecuencia se encuentra en relación con la frecuencia sinusoidal de la tensión; estos aerogeneradores presentan una gran ventaja ya que ambas frecuencias son sincronizadas de acuerdo a los polos magnéticos. [15]

La frecuencia del sistema se determina con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{n_p v_s}{120} \quad (5-4)$$

Donde:

n_p : Numero De Polos

v_s : Velocidad De Giro (Rpm)

f : Frecuencia (Hz)

Para poder caracterizar un generador síncrono trifásico es necesario asumir que la máquina esta en equilibrio fasorial, esto permite hacer un modelo monofásico que cuente con los elementos propios del aerogenerador; para eso se diseña un circuito equivalente acorde a las características del generador síncrono.

Los generadores síncronos en su estator tienen un embobinado que se interpreta como un elemento inductivo, mientras que las diferentes pérdidas ya sea por la resistencia de las bobinas del inducido, por espaciado entre hierros o por fabricación son asemejadas a una resistencia general, en la imagen (5-3) se muestra el circuito equivalente monofásico de este tipo de máquinas. El voltaje E_a es la tensión que existe en las terminales del generador, siendo esta la tensión primaria que alimenta al circuito equivalente.

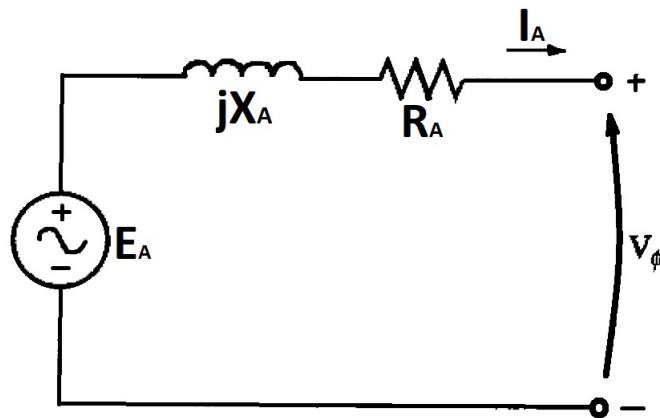


Figura 5-3.: Circuito equivalente monofásico

Tomado del libro: Maquinas eléctricas, Capítulo 5, Pag. 281. [18]

En la imagen (5-3) la ley de corrientes de Kirchhoff describe al sistema de la siguiente manera:

$$V_{\phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (5-5)$$

Donde:

V_{ϕ} : Voltaje total de una fase

E_A : Voltaje interno generado

jX_S : Reactancia del inducido

R_A : Resistencia del estator

I_A : Corriente de fase

Como modelo final se obtiene la imagen 5-4 donde existe un circuito en conexión estrella y cada fase tiene el circuito equivalente hallado en la imagen 5-3. Para el aerogenerador utilizado tiene una conexión en estrella lo que corresponde a la siguiente imagen:

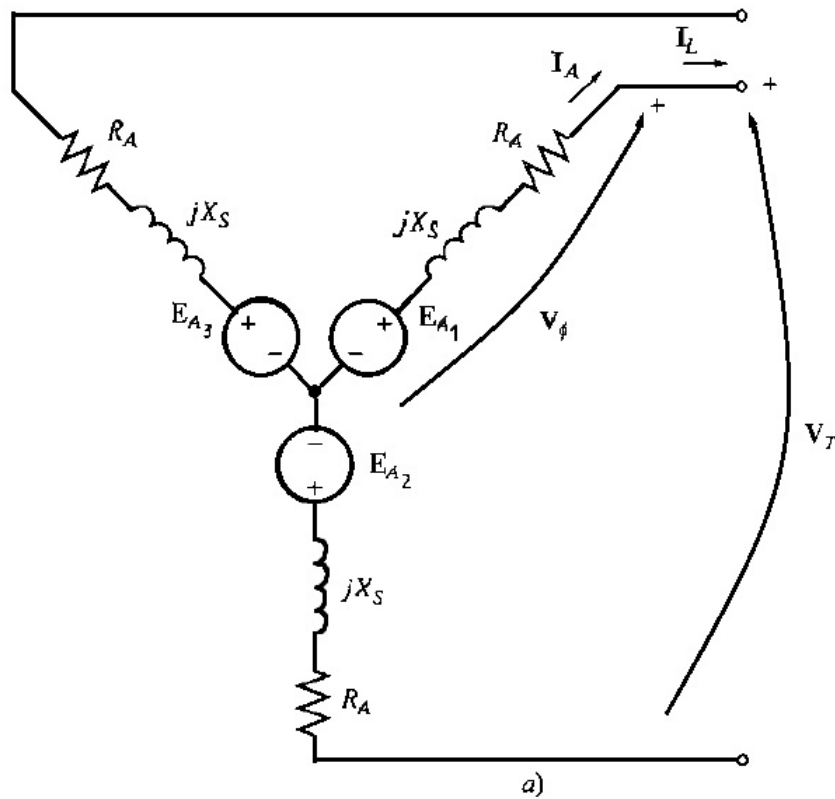


Figura 5-4.: Circuito equivalente Trifásico

Tomado del libro: Maquinas eléctricas, Capítulo 5, Pag. 283. [18]

5.3. Rectificadores Trifásicos

Para este proyecto es inminente el uso de un rectificador, por ende, es necesario conocer la topología básica de un rectificador y así poder convertir la corriente alterna (AC) del aerogenerador en corriente directa (CC); la forma más común de hacer la conversión es usando el rectificador por puente de onda completa, esta topología cuenta con 6 diodos como se muestra en la figura 5-5, donde cada fase usa un par de diodos que trabajan 120° de la señal.

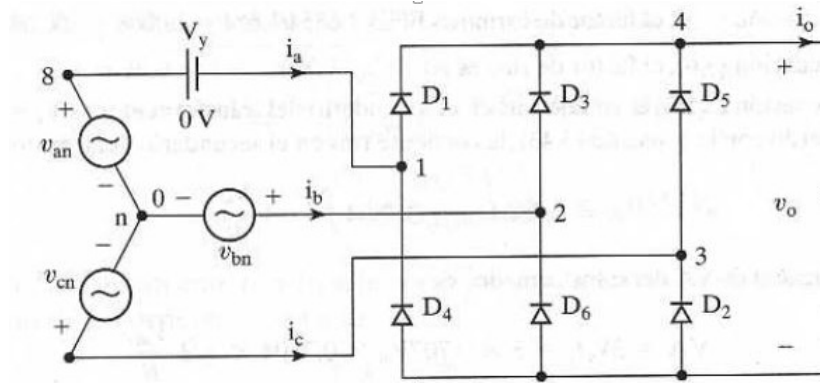


Figura 5-5.: Topología del rectificador trifásico de onda completa

Tomado el libro: Power Electronics Handbook, Capítulo 3, Pág 96 [19]

Para poder conocer la tensión promedio, es necesario definir la tensión pico de fase como V_m y así poder conocer la primera ecuación del sistema correspondiente a tensión promedio del rectificador trifásico de onda completa:

$$V_{PROM} = \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m \cos(\omega t) d(\omega t) \quad (5-6)$$

La tensión RMS del sistema está dada por la siguiente ecuación

$$V_{RMS} = \left(\frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m^2 \cos^2(\omega t) d(\omega t) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5-7)$$

Solucionando la ecuación 5-6 y la ecuación 5-7 , se obtiene:

$$V_{PROM} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad (5-8)$$

La ecuación 5-8 es la representación abreviada de la ecuación 5-6 para conocer la tensión promedio del sistema.

$$V_{RMS} = V_m \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} \quad (5-9)$$

La ecuación 5-9 es la representación abreviada de la ecuación 5-7 para conocer la tensión RMS del sistema.

Los rectificadores trifásicos dependiendo de sus elementos y configuración, tendrán un rendimiento particular, la eficiencia, el factor de forma y el factor de rizo son características asociadas al rendimiento del sistema, estos valores se pueden asociar a las posibles alteraciones y pérdidas al momento de hacer su conversión.

- Eficiencia: Es la relación entre potencia de entrada y potencia de salida, donde se ve afecta por las pérdidas presentes en el sistema.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (5-10)$$

- Factor de Forma: Es una medida de la forma de tensión de la salida.

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{out}} \quad (5-11)$$

- Factor de Rizo: Es una medida del contenido residual alterno.

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} \quad (5-12)$$

5.4. Convertidores DC-DC

El convertidor Boost Cuadrático se utilizó en este proyecto, esto se debe a que el voltaje entregado por el generador es muy bajo para el valor final se deseaba. La topología asociada al convertidor se muestra en la figura 5-6.

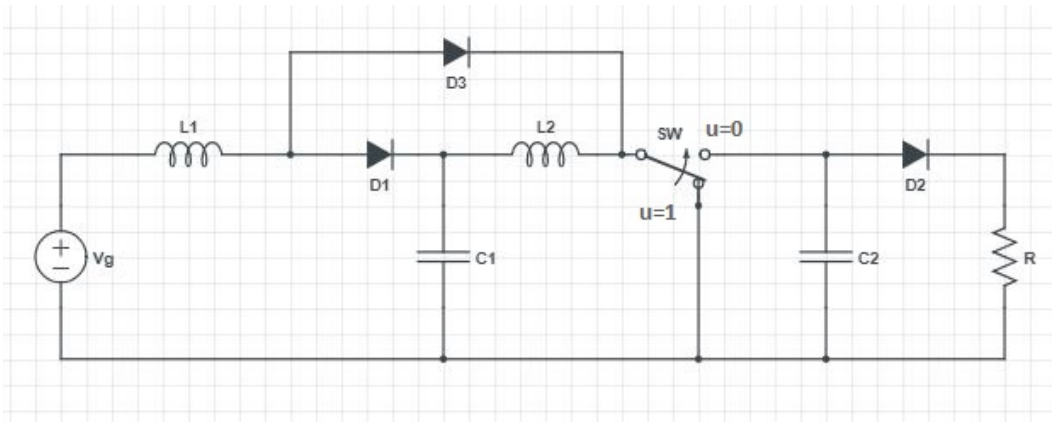


Figura 5-6.: Convertidor boost cuadrático

La salida del sistema esta descrita por:

$$V_o = \frac{V_g}{(1 - U)^2} \quad (5-13)$$

Tanto la primera como la segunda etapa se observa un inductor, un capacitor y un diodo que, con el uso de un interruptor, en este caso un transistor de tipo MOSFET, se logra unir ambas etapas con una conexión en cascada. Es necesario analizar las posibles conexiones que se presentan con el cambio en el interruptor. Cuando el Mosfet se encuentra encendido el circuito cambia de acuerdo a la figura 5-7 donde, el único diodo que da paso a la corriente el Diodo 1 mientras que el diodo 2 y el diodo 3 se encuentran apagados.

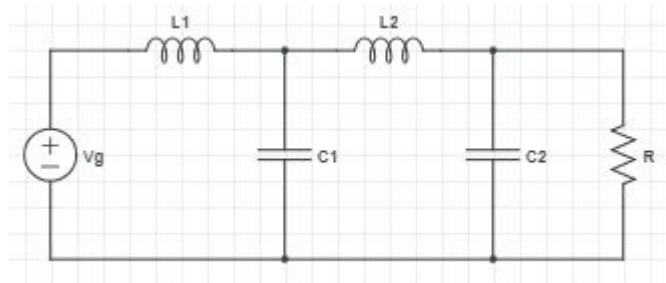


Figura 5-7.: Sistema resultante para $t=0$

Luego de finalizar el ciclo de trabajo del mosfet, los diodos 2 y 3 empiezan a dar paso a la corriente mientras que el diodo 3 es el que se opone al paso, tal cual como se muestra en la figura 5-8.

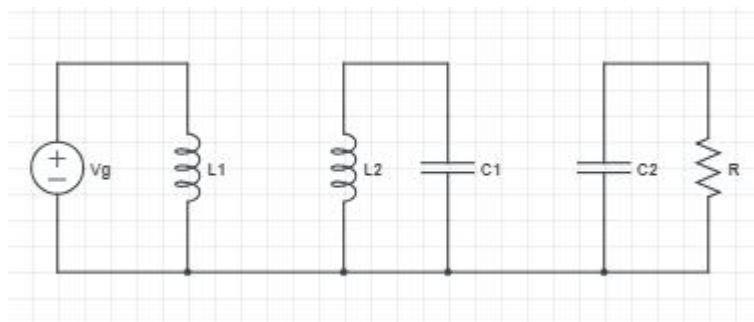


Figura 5-8.: Sistema resultante para $t=1$

Conociendo los dos estados que tiene el convertidor, en el desarrollo del proyecto se explicara su modelamiento tanto en estado estable como en estado conmutado, su modelo promediado y su modelo lineal.

5.5. Control y regulación de tensión

Puesto que un objetivo de este proyecto es brindar una estabilidad en la tensión de salida, es necesario conocer los controles más comunes que se usan para este caso. La modulación por ancho de pulso PWM (siglas en ingles), es una metodología de control asociada al voltaje que basa su funcionamiento al comparar el ciclo útil de una señal externa analógica de alta frecuencia, obteniendo en la salida un porcentaje de tensión que depende al ciclo de trabajo de la señal de control.

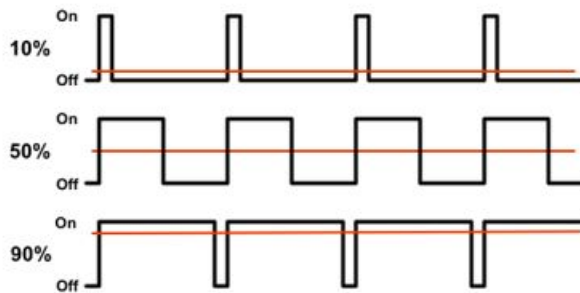


Figura 5-9.: PWM y voltaje DC respectivo para cada uno

Tomado de: <http://www.siriusmicro.com/chrp3/pwm-c.html>

El control por histéresis es comúnmente utilizado, esto se debe a su sencilla estructura de implementación y estabilidad a diferentes cargas, de igual manera posee una respuesta rápida por generación de la señal de control. Este tipo de control cuando es asociado a la variable de tensión busca limitarla por medio de la banda de histéresis que a su vez su respuesta se complementa con el uso de la modulación por ancho de pulso, logrando un estado de conmutación favorable para la regulación. La representación esta dado en las siguientes ecuaciones Ref. importantes – control por histéresis .

$$V_{superior} = V_s + HB \qquad V_{inferior} = V_s - HB \qquad (5-14)$$

Donde:

$V_{superior}$: Máximo valor de control asociado a tensión

$V_{inferior}$: Mínimo valor de control asociado a tensión

V_s : Tensión de referencia

HB : Banda de histéresis

6. Diseño y ejecución del proyecto

En este capítulo se describen las etapas que fueron ejecutadas para realizar el proyecto partiendo del orden en el que fueron planteados los objetivos del mismo.

6.1. Determinación y simulación de los perfiles de viento en la sede principal de la Universidad Santo Tomás

El funcionamiento de este proyecto parte principalmente del comportamiento dinámico de la velocidad del viento que hace girar las aspas de un aerogenerador, por lo cual se hace necesaria la realización de una investigación que permita definir este comportamiento y la implementación de un mecanismo que simule el movimiento rotacional que este genera de acuerdo a las características del aerogenerador y en función de la velocidad del viento presente en la Sede Principal de la Universidad Santo Tomás o un lugar cercano.

La Secretaría Distrital de Ambiente cuenta con una herramienta web (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá) [20] que permite descargar bases de datos del comportamiento del viento en un rango de tiempo y en distintas estaciones de monitoreo ubicadas en la ciudad de Bogotá.

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de este proyecto es predecir el potencial energético en la sede principal de la Universidad Santo Tomás, se obtuvieron los datos de las velocidades máximas diarias que el viento puede alcanzar en las dos estaciones más cercanas a la Universidad Santo Tomás partiendo de que según el Estándar Internacional publicado por la Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission, IEC) 61400-1 IEC Standard for Wind Turbines - Part 1: Design Requirements (2008), donde se enuncian criterios de diseño que aseguran que los aerogeneradores se encuentren adecuadamente protegidos contra daños dentro de su vida útil prevista, las velocidades promedio del viento necesarias para el funcionamiento una turbina eólica se deben encontrar entre 4 m/s y 16 m/s [21].

La primera estación que se tomó en cuenta para el análisis y simulación de los perfiles de viento del sistema se llama “Centro de alto Rendimiento”, esta ubicada a una altura sobre el nivel del mar de 2548 m y se encuentra ubicada en la Calle 63 No. 47-06 lo cual representa una distancia en línea recta respecto a la sede principal de la Universidad Santo Tomás de aproximadamente $1,47\text{ km}$ y la segunda estación se llama “MinAmbiente”, se encuentra

ubicada a una distancia de 15 m de elevación del suelo y se encuentra ubicada en la Calle 37 No. 8-40 lo cual representa una distancia en línea recta respecto a la sede principal de la Universidad Santo Tomás de aproximadamente 3,16 km.

Los datos obtenidos de las velocidades máximas diarias de la estación “Centro de alto rendimiento” y la estación “MinAmbiente” se encuentran descritos en los anexos **A-1** y **B-1** respectivamente, no obstante para la implementación del mecanismo de simulación del movimiento del aerogenerador causado por el comportamiento de la velocidad del viento solo se tuvieron en cuenta los valores máximos de velocidad alcanzada cada mes correspondientes a los valores descritos en las Tablas **6-1** y **6-2** respectivamente.

Tabla 6-1.: Velocidad máxima del viento cada mes del año 2017 en la estación Centro de Alto Rendimiento

Velocidad del viento [m/s]											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
4,4	4,5	3,8	4,4	4,6	3,8	4	3,6	3,6	4,1	4,3	4,9

Tabla 6-2.: Velocidad máxima del viento cada mes del año 2017 en la estación MinAmbiente

Velocidad del viento [m/s]										
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
6,9	7,2	5,9	5,5	6	5,7	6,4	5,7	7	6	4,1

La herramienta Web de la Secretaría Distrital de Ambiente no arrojó ningún dato para el mes de diciembre del año 2017 por lo cual este mes no es tenido en cuenta.

El sistema que se implementó para simular el movimiento en el aerogenerador, como se puede observar en la Figura **6-1** consta de un motor trifásico directamente acoplado de forma mecánica al PMSG trifásico suplantando las aspas del aerogenerador original. La velocidad del motor se gradúa utilizando un variador de frecuencia Simens Micromaster 440 y un PLC Siemens S7-1200, el cual mediante una interfaz HMI permite al usuario seleccionar a través un menú (Figura **6-2**) la velocidad del viento simulada y aplicada al PMSG de forma manual (Figura **6-3**) o automática (Figura **6-4**). En el modo automático la velocidad cambia en función de la velocidad máxima de cada mes, cada velocidad de cada mes es simulada por un periodo de cinco segundos y funciona de la misma manera para cada una de las dos estaciones estudiadas en este proyecto y utilizando las tablas anteriormente descritas.

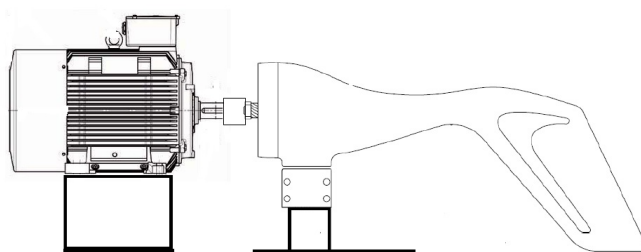


Figura 6-1.: Acople mecánico del motor trifásico con el PMSG
[16]



Figura 6-2.: Menú de la HMI para simulación de velocidad del viento

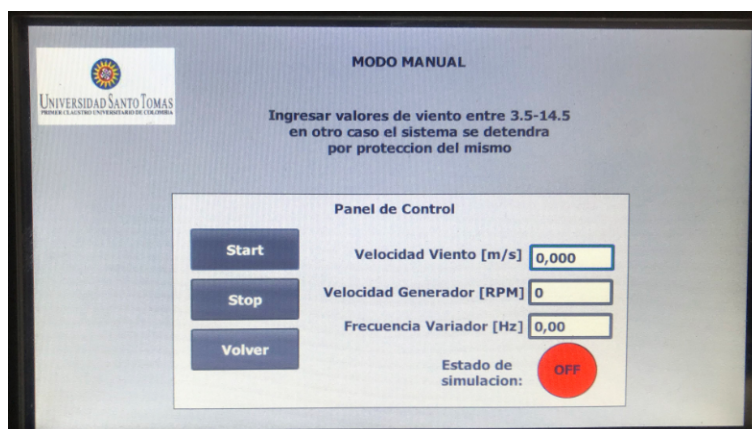


Figura 6-3.: Modo de operación manual en la HMI



Figura 6-4.: Modo de operación automático para una de las estaciones en la HMI

El programa que se desarrolló en el PLC y que varía la frecuencia que el variador de frecuencia aplica al motor trifásico graduando la velocidad que simula el movimiento rotativo de las aspas del aerogenerador en función de una velocidad del viento determinada, utiliza la fórmula de velocidad específica (λ) de un aerogenerador la cual relaciona la velocidad del rotor del PMSG y la velocidad del viento de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{V_r}{V_v} \quad (6-1)$$

Donde:

λ : Velocidad específica

V_r : Velocidad del Viento [m/s]

V_v : Velocidad del Rotor [RPM]

teniendo en cuenta que la velocidad del rotor es una velocidad angular entonces la Ecuación 6-1 también puede ser descrita como:

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_v} \quad (6-2)$$

Donde:

ω : Frecuencia Angular [rad/s]

r : Radio de las aspas del aerogenerador [m]

Ampliando la Ecuación 6-2 se obtiene:

$$\lambda = \frac{2\pi fr}{V_v} = \frac{\pi Df}{V_v} \quad (6-3)$$

Donde:

D : Diámetro de las aspas del aerogenerador [m]

f : Frecuencia Angular del rotor [rad/s]

Despejando a f de la Ecuación 6-3 y dejándola en términos de RPM se obtiene:

$$f = \frac{60\lambda V_v}{\pi D} \quad (6-4)$$

Posteriormente se realizan unas pruebas de velocidad dejando las tres fases del PMSG en circuito abierto y aplicando manualmente distintas frecuencias al variador para generar movimiento en el PMSG, con un tacómetro se mide la velocidad del rotor del PMSG y se realiza la Tabla 6-3 para obtener a partir de la gráfica (Figura 6-5) una ecuación lineal que relacione ambas variables.

Tabla 6-3.: Frecuencia del variador Vs Velocidad del rotor del PMSG

Frecuencia Variador [Hz]	Velocidad Rotor [RPM]
5,00	112,00
10,00	264,00
15,00	414,00
20,00	563,00
25,00	709,00
30,00	845,00
35,00	1000,00
40,00	1155,00
45,00	1307,00
50,00	1454,00
55,00	1590,00
60,00	1700,00

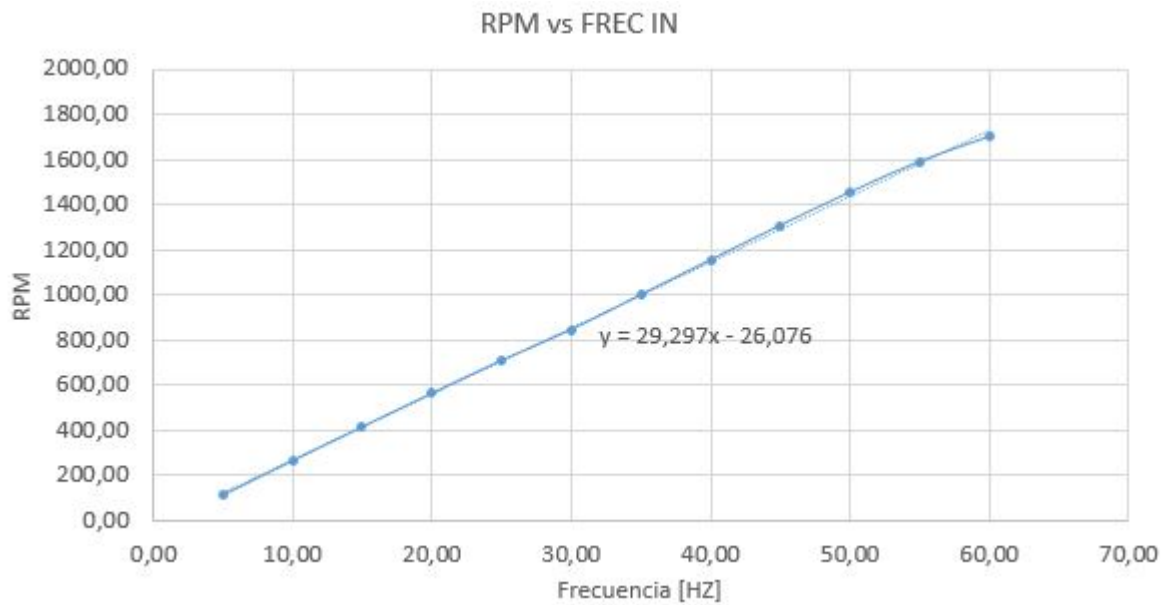


Figura 6-5.: Gráfica de comportamiento frecuencia variador Vs velocidad del rotor del PMSG

A partir de la recta se obtiene que la ecuación lineal que relaciona los valores de frecuencia del variador y velocidad del rotor del PMSG de forma aproximada es:

$$f = 29,297F + 26,076 \quad (6-5)$$

Donde:

f : Velocidad del rotor del PMSG [RPM]

F : Frecuencia del variador [Hz]

Despejando F de la ecuación 6-5 y reemplazando los valores de f respectivamente de la ecuación 6-4, la ecuación que relaciona la frecuencia del variador en términos de la velocidad del viento es:

$$F = \frac{\frac{60\lambda V_v}{\pi D} + 27,076}{29,297} \quad (6-6)$$

Los valores de la ecuación 6-6 son reemplazados teniendo en cuenta que en el manual de usuario del aerogenerador se indica que el valor de D es de $1,17m$ y según la literatura [22] y como se observa en la Figura 6-6 el valor de λ depende de la cantidad de aspas que tiene el aerogenerador y su factor de potencia; para este proyecto se asume que el ángulo de inclinación de las aspas del aerogenerador es cero en todo momento de forma tal que su

coeficiente de potencia (C_p) siempre es máximo, en este caso como el aerogenerador cuenta con 3 aspas el valor de C_p es de 0,47 y λ es de 7

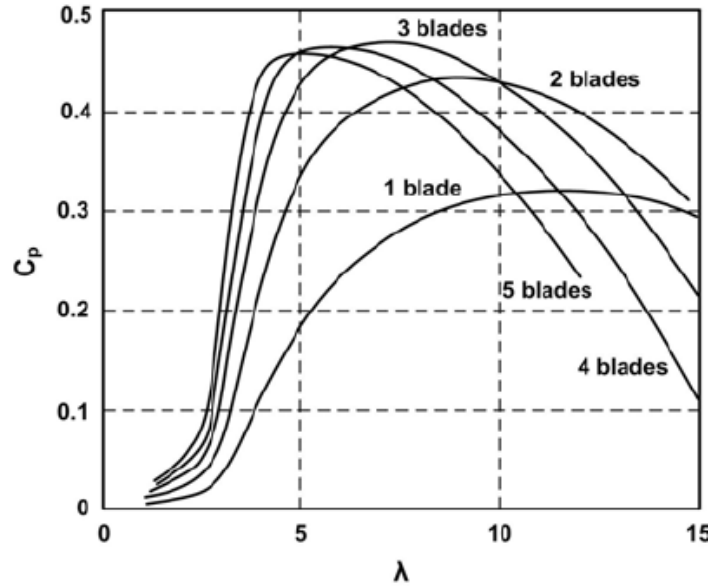


Figura 6-6.: Gráfica de determinación de λ según el número de aspas de un aerogenerador

Finalmente, la ecuación definitiva que es implementada en el PLC para que el usuario ingrese un valor de velocidad del viento en m/s de forma manual o automática y este simule una velocidad rotacional aproximada correspondiente al movimiento generado por las aspas en el rotor del PMSG por medio del acople mecánico del motor trifásico al que se le gradúa la velocidad con el variador, es la siguiente:

$$f = 3,9V_v + 0,89 \quad (6-7)$$

Donde:

f : Frecuencia del variador [Hz]

V_v : Velocidad del viento [m/s]

6.2. Modelo eléctrico del PMSG

Para realizar el modelo eléctrico del generador, se partió de los parámetros (6-7) que el bloque “PMSM” de SIMULINK de la herramienta MATLAB necesita para funcionar y así poder realizar posteriormente una simulación partiendo del uso de este bloque.

Figura 6-7.: Parámetros del bloque “PMSM” de simulink

Este bloque parte del funcionamiento del circuito equivalente de un generador sincrónico (6-8) y cuenta con que el sistema en sus tres fases es balanceado, es decir los valores de los elementos del circuito equivalente para sus tres fases son respectivamente del mismo valor.

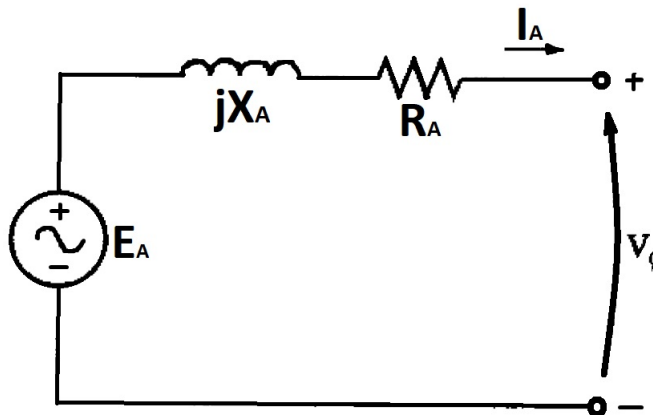


Figura 6-8.: Circuito equivalente por fase del PMSG

Partiendo de las imágenes y el contexto anterior, el primer valor que se calculó fue el valor de los polos, para esto se realizó una tabla que relaciona diferentes velocidades del generador

con la frecuencia de la señal eléctrica de línea que este generaba y la cantidad de polos con que cuenta el generador partiendo de la siguiente ecuación:

$$P = \frac{120 * f}{V_s} \quad (6-8)$$

Donde:

P : Número de polos

f : Frecuencia de la señal eléctrica [Hz]

V_s : Velocidad del generador [RPM]

Tabla 6-4.: Relación de velocidad y frecuencia del generador para determinar el número de polos del PMSG

Velocidad del Motor [RPM]	Frecuencia de la señal [Hz]	Número de polos
264,00	26,30	11,95
563,00	56,20	11,98
845,00	84,70	12,03
1155,00	116,00	12,05
1454,00	146,00	12,05
1700,00	174,00	12,28

De esta forma se determina que el generador cuenta con 12 polos, lo que equivale a que por fase hay 2 pares, es decir, un total de 6 pares de polos, que es el valor que es ingresado en los parámetros del bloque de SIMULINK.

Posteriormente se procede con el valor de la constante de flujo magnético inducido por los imanes de la máquina, este valor puede ser ingresado por el usuario o puede ser calculado por el mismo bloque partiendo de otro parámetro que puede ser el torque mecánico o como se ingreso para este proyecto dado que no hay forma de medir flujo magnético, se ingreso el valor de voltaje pico a pico a una velocidad constante del generador a 1000 RPM, el cual para este generador es de 12 V, de esta forma el bloque calcula que la constante de torque mecánico es de 0,09923 Nm y la constante de flujo electromagnético inducido por los imanes es de 0,01102 Wb

Finalmente, para el modelado del generador se calculan los valores de la resistencia y la inductancia del circuito equivalente. Primero para calcular el valor de la resistencia, se hace la prueba de alimentar el generador en inverso, es decir por sus salidas, midiendo voltaje y corriente, luego por ley de Ohm, la resistencia del circuito equivalente es calculada mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1,06}{5,4} = 0,2026 \Omega \quad (6-9)$$

Después se calculó el valor de la inductancia, para este cálculo, se desarrolló un procedimiento descrito en el libro “Entrenado en Circuitos de Alimentación Eléctrica”[23] que consiste en aplicar pulsos de voltaje usando un generador y medir valores de voltaje y corriente máximos a una frecuencia determinada y usando la siguiente ecuación.

$$L = \frac{V * T}{I} \quad (6-10)$$

Donde:

L : Inductancia [H]

T : Tiempo o periodo de los pulsos [s]

V : Voltaje pico de la señal [V]

I : Corriente pico de la señal [A]

Usando entonces el procedimiento descrito y la ecuación 6-10, para este caso se selecciono $10V_p$ y distintas frecuencias elevadas, ya que teniendo en cuenta la ecuación a menor frecuencia es mayor la corriente en un inductor y se pudo observar que en la prueba para obtener el valor de la resistencia que a frecuencias bajas ($60Hz$) la corriente incrementa rápidamente y alcanza valores muy altos, de esta forma se desarrolló entonces el procedimiento con los siguientes valores, obteniendo los siguientes valores de la inductancia:

$$L = \frac{V * T}{I} = \frac{10 * \frac{1}{200000}}{0,199} = 251,25 \mu H \quad (6-11)$$

$$L = \frac{V * T}{I} = \frac{10 * \frac{1}{500000}}{0,08} = 250,91 \mu H \quad (6-12)$$

$$L = \frac{V * T}{I} = \frac{10 * \frac{1}{700000}}{0,05} = 242,13 \mu H \quad (6-13)$$

De esta forma se determina que el valor de la inductancia es de aproximadamente de $245 \mu H$ para las 3 fases del circuito del generador, teniendo en cuenta este modelo realizado y antes de continuar con todo el proceso de diseño del prototipo, se realiza una conexión en estrella balanceada (todas las resistencias tienen el mismo valor) en las terminales del PMSG y se comparan los resultados de la simulación del modelo con los resultados de la implementación de esta conexión para verificar que el modelo del PMSG es acertado.

Para el desarrollo de la simulación, se implementó en Simulink el siguiente diagrama:

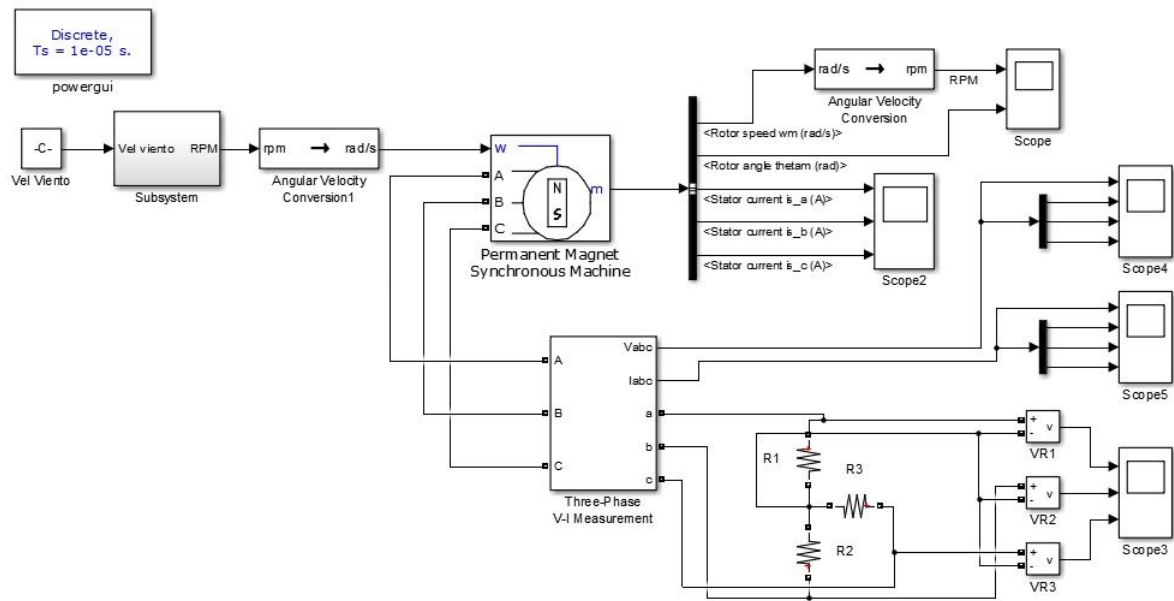


Figura 6-9.: Simulación del sistema PMSG con carga en configuración estrella

Con el fin de poder comparar los resultados de la simulación y la implementación, en el bloque llamado "Subsystem" se implementó la misma ecuación que se usó en el PLC para expresar la velocidad del viento en términos de frecuencia no obstante, el bloque de PMSG la entrada es en RPM por lo cual la ecuación que se implementa es la de velocidad específica (6-4), de esta forma al introducir una velocidad del viento en Matlab y una velocidad del viento expresada en términos de frecuencia en el variador de velocidad se pueden comparar de forma más precisa los resultados de la simulación con la implementación.

El montaje experimental con el que son comparados los resultados de la simulación fue el siguiente:



Figura 6-10.: Implementación del sistema PMSG con carga en configuración estrella

Las pruebas se realizaron a diferentes velocidades y también con diferentes cargas obteniendo los siguientes resultados:

- Resultados con $R = 40 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, m/s$

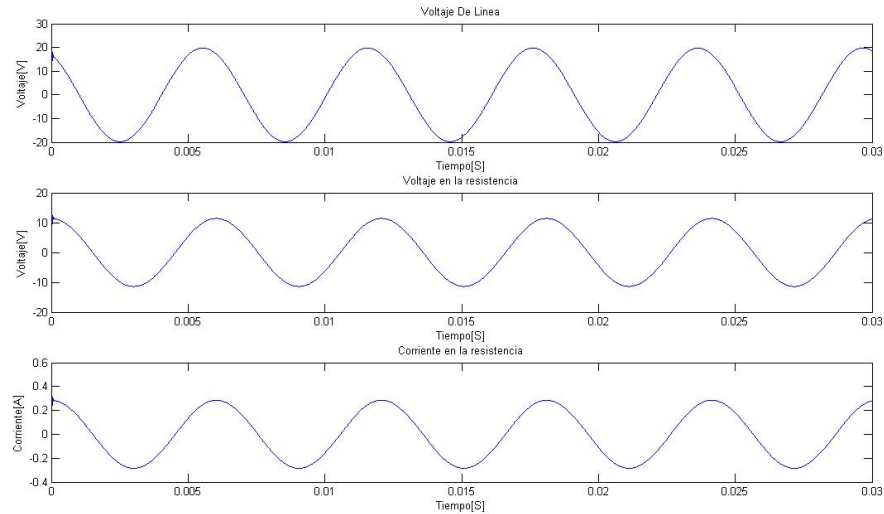


Figura 6-11.: Resultados de la simulación con conexión en estrella de voltaje del generador, voltaje en la resistencia y corriente en la resistencia con $R = 40 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, m/s$

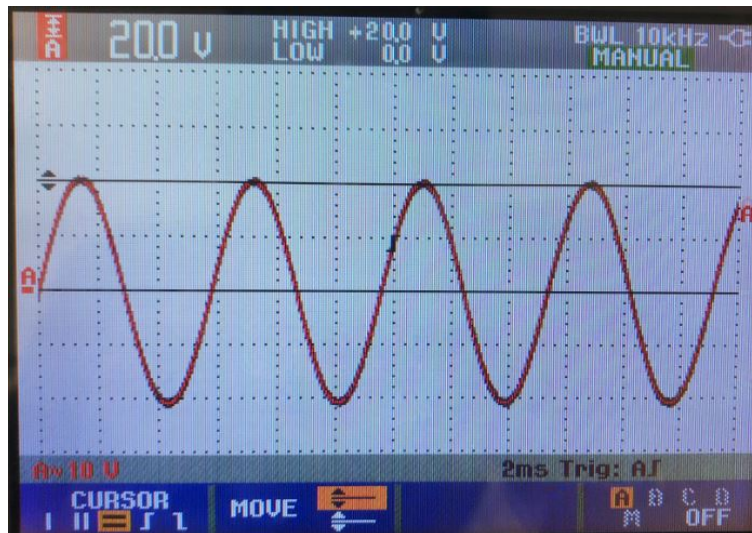


Figura 6-12.: Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje del generador con $R = 40 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, m/s$

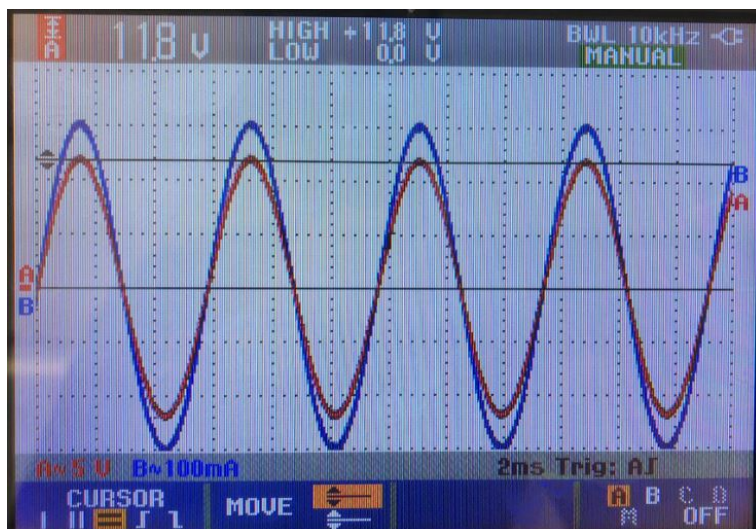


Figura 6-13.: Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje en la resistencia con $R = 40 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$



Figura 6-14.: Resultados implementación con conexión en estrella de corriente en la resistencia con $R = 40 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$

- Resultados con $R = 20 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$

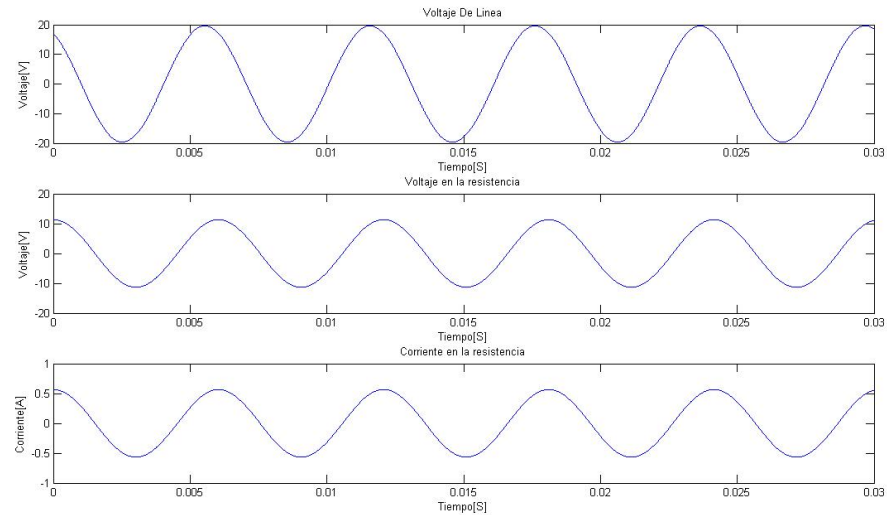


Figura 6-15.: Resultados de la simulación con conexión en estrella de voltaje del generador, voltaje en la resistencia y corriente en la resistencia con $R = 20 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$



Figura 6-16.: Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje del generador con $R = 20 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$

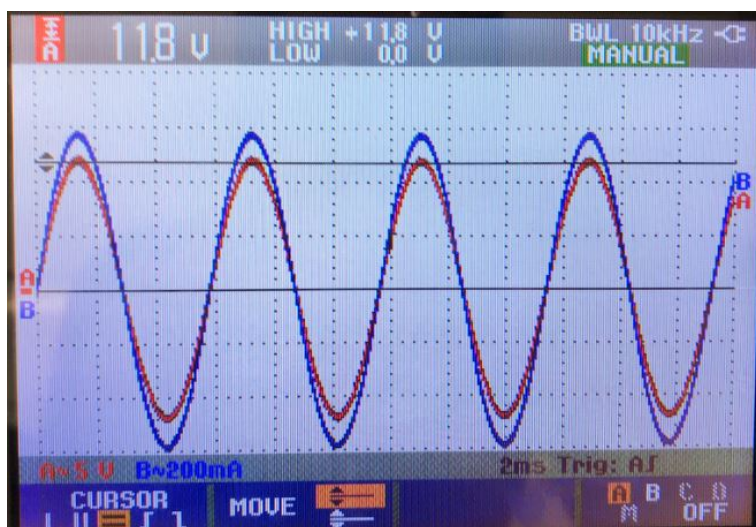


Figura 6-17.: Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje en la resistencia con $R = 20 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$



Figura 6-18.: Resultados implementación con conexión en estrella de corriente en la resistencia con $R = 20 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$

- Resultados con $R = 10 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$

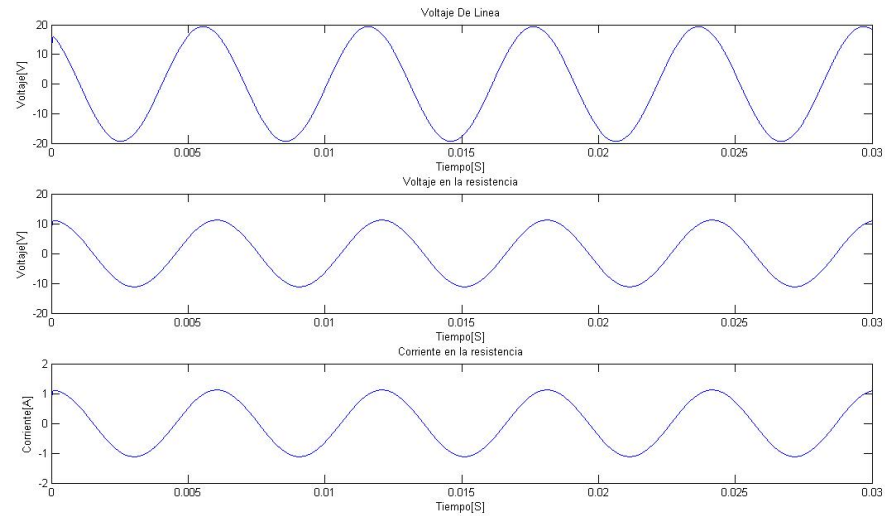


Figura 6-19.: Resultados de la simulación con conexión en estrella de voltaje del generador, voltaje en la resistencia y corriente en la resistencia con $R = 10 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$



Figura 6-20.: Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje del generador con $R = 10 \, \Omega$ y $V = 14,5 \, \text{m/s}$

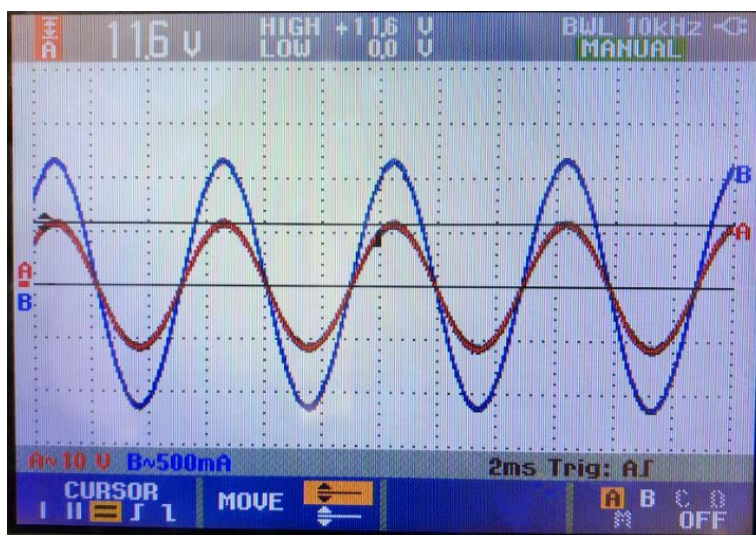


Figura 6-21.: Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje en la resistencia con $R = 10 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$

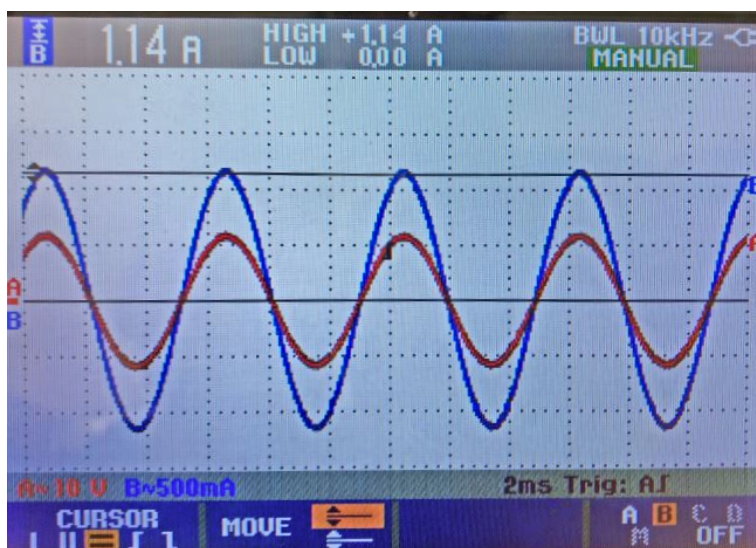


Figura 6-22.: Resultados implementación con conexión en estrella de corriente en la resistencia con $R = 10 \Omega$ y $V = 14,5 \text{ m/s}$

- Resultados con $R = 5 \Omega$ y $V = 7,5 \text{ m/s}$

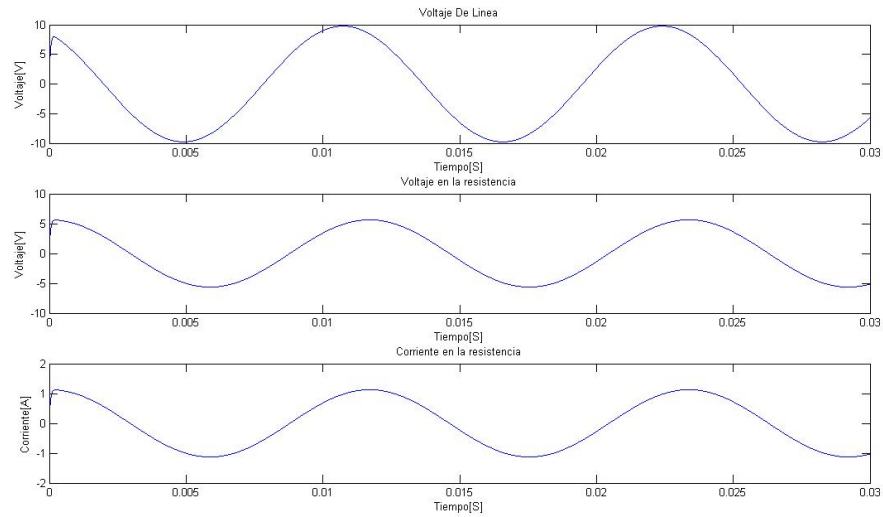


Figura 6-23.: Resultados de la simulación con conexión en estrella de voltaje del generador, voltaje en la resistencia y corriente en la resistencia con $R = 5 \Omega$ y $V = 7,5 \text{ m/s}$



Figura 6-24.: Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje del generador con $R = 5\Omega$ y $V = 7,5\text{m/s}$



Figura 6-25.: Resultados implementación con conexión en estrella de voltaje en la resistencia con $R = 5 \Omega$ y $V = 7,5 \text{ m/s}$



Figura 6-26.: Resultados implementación con conexión en estrella de corriente en la resistencia con $R = 5 \Omega$ y $V = 7,5 \text{ m/s}$

A partir de las imágenes anteriores en los que se compara la simulación del generador y su respectivo funcionamiento implementado, se puede concluir que la caracterización desarrollada del PMSG concuerda con el funcionamiento del mismo y se prosigue con el diseño del prototipo de este proyecto.

6.3. Diseño de un rectificador trifásico

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario realizar la implementación de un rectificador trifásico que convierta la energía producida por el generador en corriente DC, de esta forma posteriormente se añade una etapa de elevación de voltaje mediante la implementación de un convertidor DC-DC. Para este caso en específico se implementó un rectificador trifásico de onda completa, este circuito se compone de 6 diodos y un condensador que determina el rizado de voltaje en DC que se tendrá a la salida, de esta forma en la siguiente imagen se puede apreciar el circuito implementado en la etapa de rectificación del proyecto y que va acoplada directamente a las salidas del PMSG.

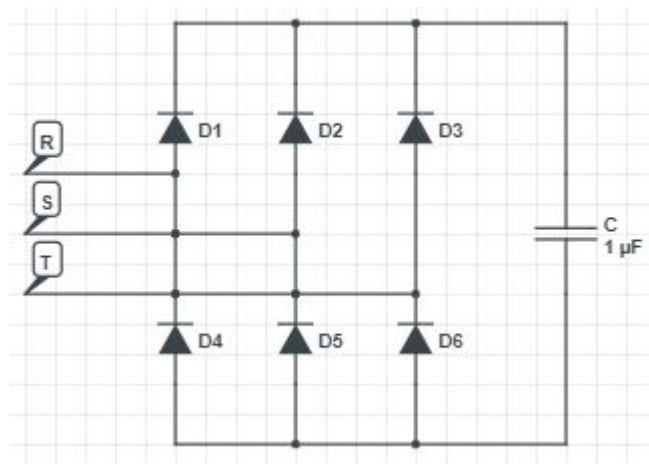


Figura 6-27.: Rectificador trifásico de onda completa

Teniendo en cuenta las características de potencia para el cual estará implementado este proyecto, se escogen diodos que soportan hasta 10 A garantizando que por cada diodo solo circula la mitad de la corriente, ya que la corriente se divide siempre en dos ramas correspondientes al periodo de conducción de cada par de diodos, por otro lado se escoge un condensador de $4700 \mu F$ con el fin de que el rizado de voltaje sea muy pequeño y el tiempo de descarga no sea tan rápido. El rizado del voltaje en la salida del condensador es determinado por la ecuación 6-14 [19]

$$F_R = \frac{1}{\sqrt{2}(QFRC - 1)} \quad (6-14)$$

De la ecuación anterior se tiene que F_R es el factor de rizo, Q es la cantidad de pulsos formados por la rectificación del voltaje, que en este caso al ser un rectificador trifásico de puente completo compuesto de 6 diodos, toma el valor de 6. F es la frecuencia de la onda que el generador produce a una determinada velocidad, en este caso el valor de la frecuencia es de

174 Hz y el voltaje que genera es de 21,2 V_p para la velocidad más alta (estos valores fueron tomados de la tabla que se encuentra en el anexo C-1 que complementa la tabla 6-4 y que relaciona las características del generador), con el valor del voltaje se calcula la resistencia equivalente a la carga que el rectificador tiene en paralelo al condensador, teniendo en cuenta que la potencia que se desea obtener en la salida del sistema es de 100 W, esta resistencia es calculada dentro de la misma ecuación y cabe aclarar que este es el valor máximo de factor de rizado que tendrá el sistema, ya que cuando el valor del voltaje disminuya debido a la reducción de velocidad del generador, el valor de rizado disminuye también.

$$F_R = \frac{1}{\sqrt{2}(6 * 174 * \frac{21,2^2}{100} * 0,0047 - 1)} = 0,016 = 1,6\% \quad (6-15)$$

Una vez implementado y verificado el funcionamiento del rectificador con una carga de prueba y el condensador seleccionado se determina que el rizado no sobrepasa el 2 % y que el rango de voltaje en DC que produce el generador es de 3 V cuando el generador gira dada una velocidad del viento de 3,5 m/s y de 18 V, dada una velocidad del viento de 14,5 m/s . Estos resultados se evidencian más adelante en el capítulo de resultados de este documento.

6.4. Diseño de un Convertidor DC-DC Boost Cuadrático

En el capítulo anterior se pudo observar que la tensión que se puede obtener del PMSG a partir de la velocidad mínima del viento (3,5 m/s) a la cual este comienza a generar es de 3 V, se decide entonces a partir de este parámetro, diseñar e implementar para este proyecto un convertidor de tipo Boost Cuadrático, teniendo en cuenta que un convertidor de tipo Boost tendría que operar en su máxima capacidad de ciclo de trabajo para poder obtener los 42 V planteados para el desarrollo de este proyecto.

Teniendo en cuenta la ecuación 6-16 que relaciona el ciclo de trabajo, el voltaje de entrada y el voltaje de salida de un convertidor Boost, se puede afirmar el planteamiento anteriormente mencionado, ya que lo ideal en los convertidores DC-DC es que su ciclo de trabajo se encuentre en el rango entre 0,3 – 0,9 [24]

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \Rightarrow D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad (6-16)$$

Donde:

V_i : Voltaje de entrada [V]

V_o : Voltaje de salida [V]

D: Ciclo de trabajo

Remplazando los valores de voltaje de entrada (3 V) y voltaje de salida (42 V) se tiene entonces que el ciclo de trabajo D es de 0,928, validando que un convertidor Boost no es apropiado para esta aplicación y se procede con el diseño y simulación de un convertidor Boost Cuadrático.

Una vez aclarado esto, se procede con el desarrollo del diseño del convertidor el cual se puede definir mediante el diseño del modelo conmutado, el desarrollo del diseño estático y la elaboración del modelo lineal o de pequeña señal del convertidor.

6.4.1. Modelo Conmutado

En primera instancia se debe entender que el circuito tiene un elemento de conmutación, por lo cual el circuito puede ser representado de la siguiente manera:

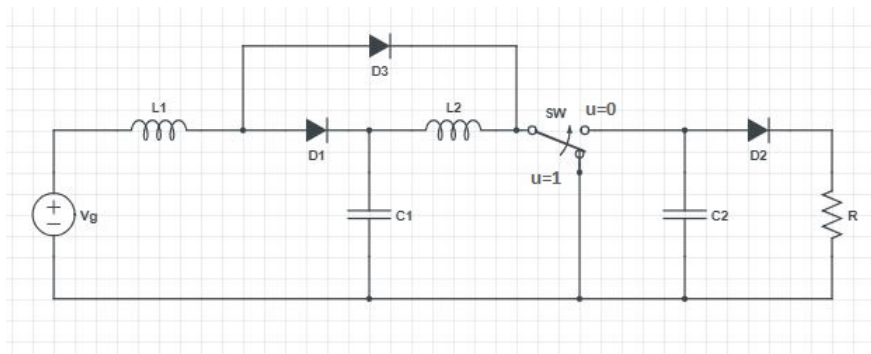


Figura 6-28.: Topología de un Convertidor Boost Cuadrático

Como se observa en la Figura 6-28, el diseño del convertidor parte de construir en una primera estancia el modelo conmutado (ideal no lineal) partiendo de los dos estados ($u = 0$ y $u = 1$) que tiene el circuito y que se dan debido al cambio de estado en el interruptor (SW). Estos estados pueden ser representados mediante las siguientes imágenes:

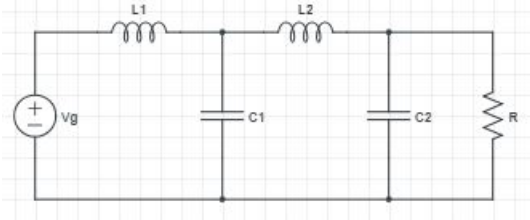


Figura 6-29.: Estado del circuito cuando $u = 0$

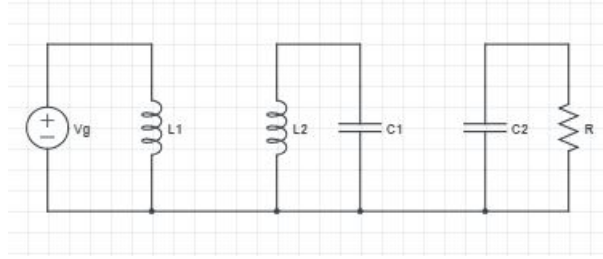


Figura 6-30.: Estado del circuito cuando $u = 1$

Teniendo en cuenta la Figura 6-29 que representa el primer estado del circuito del convertidor, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$V_{L1} = V_g - V_{C1} \Rightarrow \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{V_g - V_{C1}}{L_1} \quad (6-17)$$

$$V_{L2} = V_{C1} - V_{C2} \Rightarrow \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{V_{C1} - V_{C2}}{L_2} \quad (6-18)$$

$$I_{C1} = I_{L1} - I_{L2} \Rightarrow \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{I_{L1} - I_{L2}}{C_1} \quad (6-19)$$

$$I_{C2} = I_{L2} - I_R \Rightarrow \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{I_{L2}}{C_2} - \frac{V_{C2}}{RC_2} \quad (6-20)$$

Posteriormente teniendo en cuenta la Figura 6-30 que representa el segundo estado del circuito del convertidor, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$V_{L1} = V_g \Rightarrow \frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{V_g}{L_1} \quad (6-21)$$

$$V_{L2} = V_{C1} \Rightarrow \frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{V_{C1}}{L_2} \quad (6-22)$$

$$I_{C1} = -I_{L2} \Rightarrow \frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{-I_{L2}}{C_1} \quad (6-23)$$

$$I_{C2} = -I_R \Rightarrow \frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{-V_{C2}}{RC_2} \quad (6-24)$$

Partiendo de las ecuaciones 6-17 a la 6-24 y teniendo en cuenta la conmutación, se obtienen las siguientes ecuaciones que representan el modelo conmutado (ideal no lineal) del convertidor Boost Cuadrático:

$$\frac{dI_{L1}}{dt} = \frac{V_g}{L_1} - \frac{V_{C1}}{L_1}(1 - u) \quad (6-25)$$

$$\frac{dI_{L2}}{dt} = \frac{V_{C1}}{L_2} - \frac{V_{C2}}{L_2}(1-u) \quad (6-26)$$

$$\frac{dV_{C1}}{dt} = \frac{-I_{L2}}{C_1} + \frac{I_{L1}}{C_1}(1-u) \quad (6-27)$$

$$\frac{dV_{C2}}{dt} = \frac{-V_{C2}}{RC_2} + \frac{I_{L2}}{C_2}(1-u) \quad (6-28)$$

Este modelo puede ser expresado en forma de diagrama de bloques como se ve en la Figura 6-31

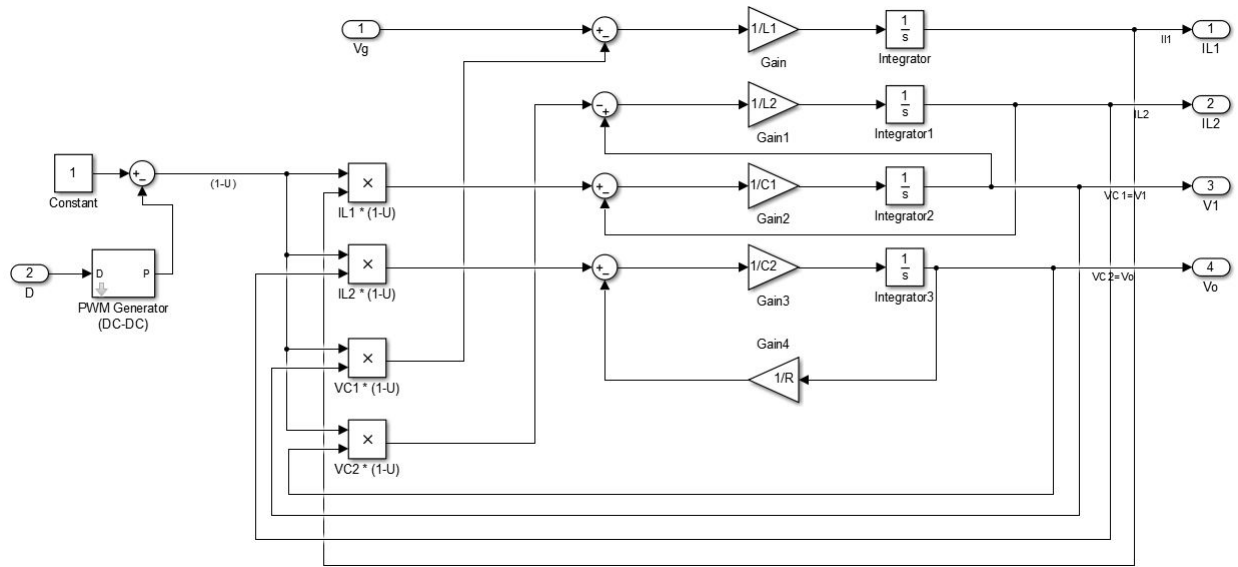


Figura 6-31.: Diagrama de bloques del Modelo conmutado (ideal no lineal) del convertidor Boost Cuadrático

6.4.2. Diseño estático

El diseño estático se realiza con el fin de determinar el valor estático de corriente, voltaje y los rizados de estos en los respectivos elementos de almacenamiento de energía y es a partir de estas ecuaciones que se calcula el valor de estos elementos y se determinan sus características físicas.

Este diseño parte de las ecuaciones planteadas para cada estado del circuito en la sección anterior pero sin su representación diferencial, es decir:

Cuando $u = 0$

$$V_{L1} = V_g - V_{C1} \quad (6-29)$$

$$V_{L2} = V_{C1} - V_{C2} \quad (6-30)$$

$$I_{C1} = I_{L1} - I_{L2} \quad (6-31)$$

$$I_{C2} = I_{L2} - \frac{V_{C2}}{R} \quad (6-32)$$

Cuando $u = 1$

$$V_{L1} = V_g \quad (6-33)$$

$$V_{L2} = V_{C1} \quad (6-34)$$

$$I_{C1} = -I_{L2} \quad (6-35)$$

$$I_{C2} = -\frac{V_{C2}}{R} \quad (6-36)$$

Posteriormente se realiza el balance en los elementos de almacenamiento de energía, esto mediante el desarrollo de las integrales que determinan el comportamiento del área bajo la curva de los valores en estado estacionario de los elementos de almacenamiento de energía en los cambios de estado del circuito como se observa en la Figura 6-32.

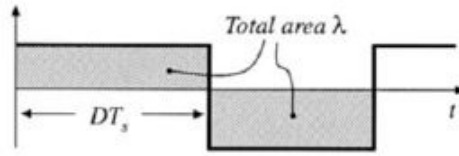


Figura 6-32.: Valores en estado estacionario de un elemento de almacenamiento de energía en un convertidor DC-DC

[24]

Estas integrales se igualan a cero teniendo en cuenta la Ley de Faraday cuyo enunciado corresponde a: -“Toda corriente o voltaje en las terminales de un inductor o condensador respectivamente durante un periodo complejo de tiempo es igual a cero (0)”- [24]. De esta forma se obtiene entonces un valor estático tanto de corriente en los inductores como de voltaje en los condensadores, descrito mediante las siguientes ecuaciones:

- Balance en el inductor L_1

$$\int_0^{T_s} V_{L1}(t)dt = V_g DT_s + (V_g - V_{C1})(1 - D)T_s = 0 \Rightarrow V_{C1} = \frac{V_g}{1 - D} \quad (6-37)$$

- Balance en el inductor L_2

$$\int_0^{T_s} V_{L2}(t)dt = V_{C1} DT_s + (V_{C1} - V_{C2})(1 - D)T_s = 0 \Rightarrow V_{C2} = \frac{V_g}{(1 - D)^2} \quad (6-38)$$

- Balance en el condensador C_1

$$\int_0^{T_s} I_{C_1}(t)dt = -I_{L_2}DT_s + (I_{L_1} - I_{L_2})(1-D)T_s = 0 \Rightarrow I_{L_1} = \frac{V_g}{R(1-D)^4} \quad (6-39)$$

- Balance en el condensador C_2

$$\int_0^{T_s} I_{C_1}(t)dt = -\frac{V_{C_2}}{R}DT_s + (I_{L_2} - \frac{V_{C_2}}{R})(1-D)T_s = 0 \Rightarrow I_{L_2} = \frac{V_g}{R(1-D)^3} \quad (6-40)$$

Donde:

T_s : Tiempo de conmutación [s]

D : Ciclo útil de Trabajo

Teniendo ya los valores en estado estático de corriente y voltaje, se realiza entonces la determinación del rizado de corriente y voltaje en los elementos de almacenamiento de energía teniendo en cuenta el comportamiento de la carga y la descarga de estos elementos en cada uno de los dos estados del circuito, el tiempo de conmutación (T_s) y el ciclo útil de trabajo (D), como se puede observar en la siguiente imagen:

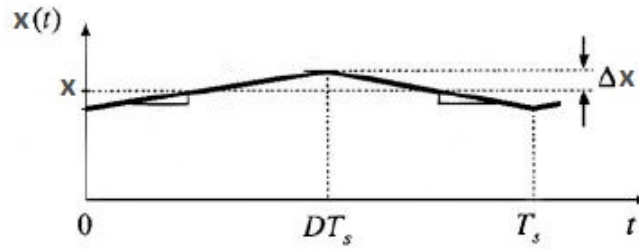


Figura 6-33.: Carga y descarga de un elemento de almacenamiento de energía en un convertidor DC-DC

[24]

De esta forma los rizados están determinados mediante las siguientes ecuaciones:

- Rizado en el inductor L_1

$$\Delta I_{L_1} = \frac{V_g D}{2L_1 F_s} \quad (6-41)$$

- Rizado en el inductor L_2

$$\Delta I_{L_2} = \frac{V_g D}{2L_2 F_s (1-D)} \quad (6-42)$$

- Rizado en el condensador C_1

$$\Delta V_{C_1} = \frac{V_g D}{2C_1 F_s R (1-D)^3} \quad (6-43)$$

- Rizado en el condensador C_2

$$\Delta V_{C_2} = \frac{V_g D}{2C_2 F_s R (1-D)^2} \quad (6-44)$$

Teniendo ya todas las ecuaciones del modelo estático, se puede calcular el valor de los elementos de almacenamiento de energía partiendo de los siguientes parámetros de diseño.

Parámetros de diseño:

- Voltaje min de entrada: $V_g = 3 \text{ V}$
- Voltaje max de entrada: $V_g = 16 \text{ V}$
- Voltaje de salida: $V_{C_2} = 42 \text{ V}$
- Resistencia Máxima: $V_g = 3,42 \text{ k}\Omega$
- Resistencia Mínima: $V_g = 17,64 \text{ }\Omega$
- Frecuencia de Trabajo: $F_s = 50 \text{ kHz}$

Los valores de voltaje de entrada se obtienen de la implementación del rectificador trifásico al PMSG. Los valores de las resistencias se obtienen teniendo en cuenta que existe una resistencia de censado que es un divisor de tensión cuyas características de voltaje y potencia se expresan de la ecuación 6-45 a la 6-51 y una resistencia de carga que se calcula con la ecuación 6-52 teniendo en cuenta que se quiere tener 100 *Watts* en la carga del convertidor. La frecuencia de trabajo al igual que el voltaje de salida, se escogen por elección de diseño.

- La resistencia de censado se diseño con fin de que en esta no se disipara más de 1 *Watt*, de esta manera no representa pérdidas significativas al sistema. Partiendo entonces de que la tensión nominal es de 42 V, el cálculo del divisor de tensión para que este máxi-

mo tenga 1,5 V es el siguiente:

$$R_1 = 3,3 \text{ k}\Omega \quad (6-45)$$

$$R_2 = 120 \text{ }\Omega \quad (6-46)$$

$$V_{R_{s1}} = \frac{42 * 120}{3420} = 1,47 \text{ V} \quad (6-47)$$

$$V_{R_{s2}} = \frac{42 * 3300}{3420} = 40,53 \text{ V} \quad (6-48)$$

$$P_{R_{s1}} = \frac{1,47^2}{120} = 0,0181 \text{ Watts} \quad (6-49)$$

$$P_{R_{s2}} = \frac{40,53^2}{3300} = 0,49 \text{ Watts} \quad (6-50)$$

$$P_{total} = P_{R_1} + P_{R_2} = 0,51 \text{ Watts} \quad (6-51)$$

- La resistencia de carga se calcula teniendo en cuenta la potencia de salida y el voltaje de salida de esta forma

$$R = \frac{42^2}{100} = 17,64 \text{ }\Omega \quad (6-52)$$

Con los parámetros de diseño mencionados se procede a determinar el valor del ciclo útil D utilizando la ecuación 6-37 y teniendo en cuenta el peor de los casos de voltaje de entrada que es de 3 V y que el voltaje de salida es $V_{C_2} = 42 \text{ V}$, de esta forma:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{V_g}{V_{C_2}}} = 1 - \sqrt{\frac{3}{42}} = 0,7327 \quad (6-53)$$

Para determinar el rango de ciclo útil D que se utilizara posteriormente en el diseño del controlador, también se determina el valor de este cuando el voltaje de entrada es el más alto, es decir 16 V teniendo en cuenta la caracterización del PMSG, de esta forma el valor de D para este caso es de:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{V_g}{V_{C_2}}} = 1 - \sqrt{\frac{16}{42}} = 0,3828 \quad (6-54)$$

Luego teniendo el valor de D se determinan los voltajes en estado estacionario de los dos condensadores utilizando las ecuaciones 6-37 y 6-38 de la siguiente manera:

- Voltaje en el condensador C_1

$$V_{C_1} = \frac{V_g}{1 - D} = \frac{3}{1 - 0,7327} = 11,22 \text{ V} \quad (6-55)$$

- Voltaje en el condensador C_2

$$V_{C_2} = \frac{V_g}{(1-D)^2} = \frac{3}{(1-0,7327)^2} = 42 \text{ V} \quad (6-56)$$

Como fue planteado en los objetivos el margen de regulación en el voltaje de salida es del 1 %, lo cual teniendo en cuenta que el voltaje es de 42V da un valor para el rizado de voltaje del condensador V_{C_2} de 0,42. Por parámetro de diseño se escoge que el rizado de voltaje en el condensador V_{C_1} sea del 5 % lo que para el valor de 11,22V corresponde a un rizado de 0,34V. A partir de esto se calcula el valor de cada condensador utilizando las ecuaciones 6-43 y 6-44 respectivamente de la siguiente forma:

- Valor del condensador C_1

$$C_1 = \frac{V_g D}{2\Delta V_{C_1} F_s R (1-D)^3} = \frac{3V * 0,7327}{2 * 0,34 * 50kHz * 17,64\Omega (1-0,7327)^3} \Rightarrow \geq 193 \mu F \quad (6-57)$$

- Valor del condensador C_2

$$C_2 = \frac{V_g D}{2\Delta V_{C_2} F_s R (1-D)^2} = \frac{3V * 0,7327}{2 * 0,42 * 50kHz * 17,64\Omega (1-0,7327)^2} \Rightarrow \geq 42 \mu F \quad (6-58)$$

Para el cálculo de las bobinas se tuvo en cuenta el comportamiento del circuito de una manera distinta, pues a diferencia del comportamiento estático del voltaje en los condensadores, cuando el voltaje de entrada en el sistema cambia y el ciclo útil de trabajo D se modifica para mantener el voltaje de salida en el valor deseado, en ambos condensadores el valor del voltaje se mantiene; sin embargo para los inductores la corriente es inversamente proporcional al voltaje de entrada y al valor de la resistencia de carga, de esta manera se tomó el comportamiento del circuito cuando la corriente es más baja, es decir, sin carga pero con resistencia de censado (3,342 k Ω) y 16 V en la tensión de entrada, esto con el fin de determinar un rizado en la corriente en ambos inductores que no provocara que la corriente caiga a cero causando que el sistema actué de manera irregular.

Partiendo de los valores anteriormente mencionados, se calcula el valor de ciclo util D y el valor estático de la corriente en ambos inductores a partir de las ecuaciones 6-60 y 6-61 de la siguiente manera:

- Valor del ciclo útil para los valores establecidos:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{V_g}{V_{C_2}}} = 1 - \sqrt{\frac{16}{42}} = 0,3827 \quad (6-59)$$

- Corriente en el inductor L_1

$$I_{L_1} = \frac{V_g}{R(1-D)^4} = \frac{16V}{3,342k\Omega(1-0,3827)^4} = 32,2 \text{ mA} \quad (6-60)$$

- Corriente en el inductor L_2

$$I_{L_2} = \frac{V_g}{R(1-D)^3} = \frac{16V}{3,342k\Omega(1-0,3827)^3} = 19,8 \text{ mA} \quad (6-61)$$

Con estos valores, se establecen unos valores de rizado en los inductores de forma tal que la corriente nunca caiga a cero, de esta forma par el inductor L_1 se determina un rizado de 15 mA y para el inductor L_2 se determina un rizado de 10 mA . Usando las ecuaciones de rizado 6-41 y 6-42 se determinan entonces los valores de los inductores de la siguiente manera:

- Valor del inductor L_1

$$L_1 = \frac{V_g D}{2\Delta I_{L_1} F_s} = \frac{16V * 0,3827}{2 * 15\text{mA} * 50\text{kHz}} \Rightarrow \geq 4,1 \text{ mH} \quad (6-62)$$

- Valor del inductor L_2

$$L_2 = \frac{V_g D}{2\Delta I_{L_2} F_s (1-D)} = \frac{16V * 0,3827}{2 * 10\text{mA} * 50\text{kHz} (1-0,3827)} \Rightarrow \geq 9,9 \text{ mH} \quad (6-63)$$

Ya teniendo los valores de los elementos se procede a simular el funcionamiento del mismo, en primera instancia se desarrolla la simulación del diagrama de bloques de la figura **6-31** obteniendo el siguiente resultado:

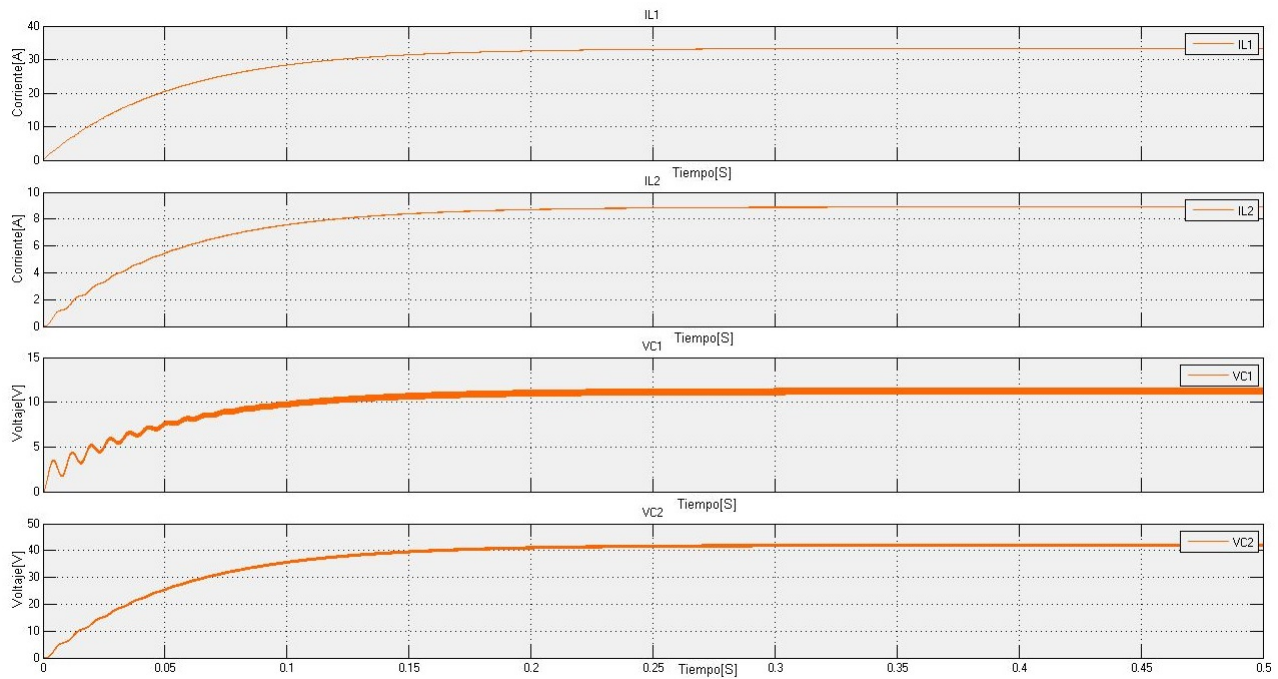


Figura 6-34.: Simulación diagrama de bloques del modelo conmutado del convertidor con los valores de elementos para obtener 100 W con 3 V en la entrada (De arriba para abajo: corriente en L1, corriente en L2, voltaje en C1 y voltaje en C2)

Una vez que se verifica el funcionamiento del diagrama de bloques se realiza la simulación del circuito utilizando el siguiente diagrama, para verificar que la respuesta sea acorde a la respuesta generada por el diagrama de bloques.

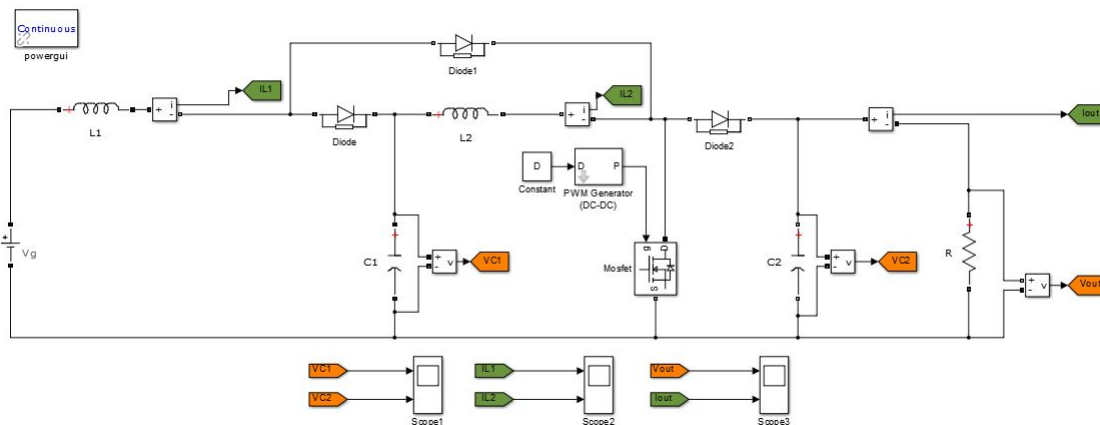


Figura 6-35.: Circuito para simulación del convertidor en Matlab-Simulink

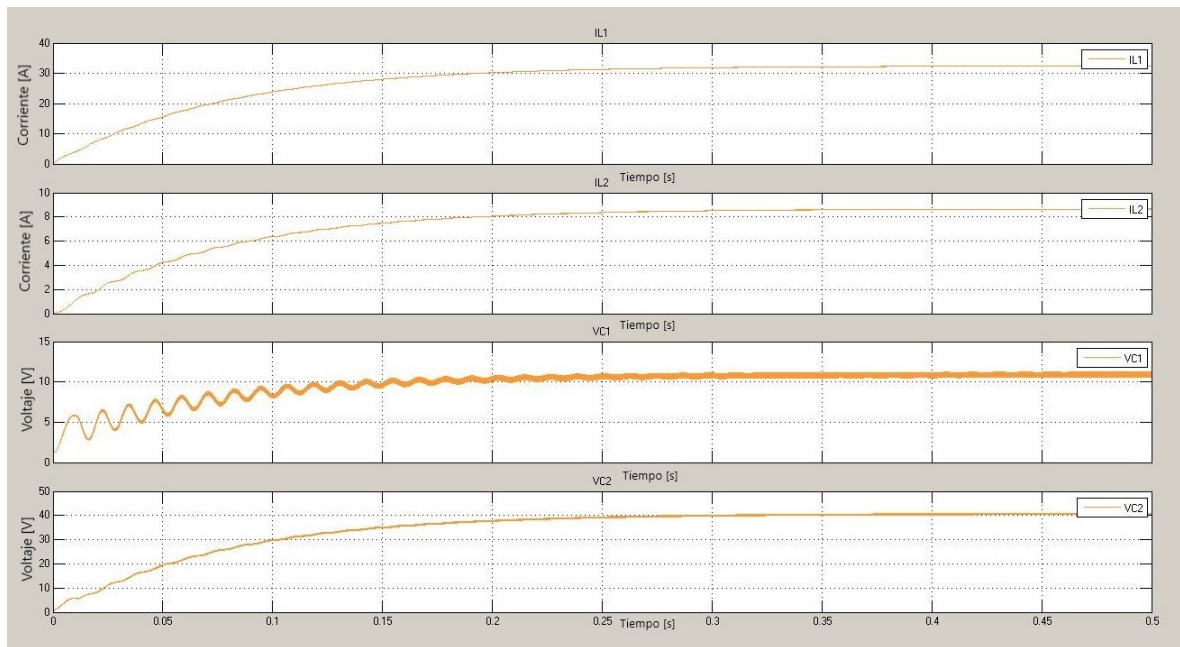


Figura 6-36.: Respuesta para la simulación del convertidor en Matlab-Simulink (De arriba para abajo: corriente en L1, corriente en L2, voltaje en C1 y voltaje en C2)

Dado que el comportamiento es el mismo tanto para la respuesta del diagrama de bloques como para el modelo del circuito se realiza una simulación más utilizando la herramienta Psim para corroborar el funcionamiento del circuito.

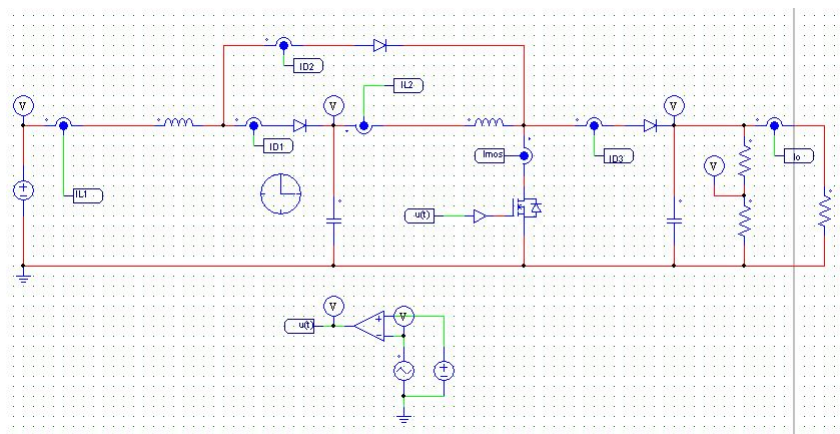


Figura 6-37.: Circuito para simulación del convertidor en Psim

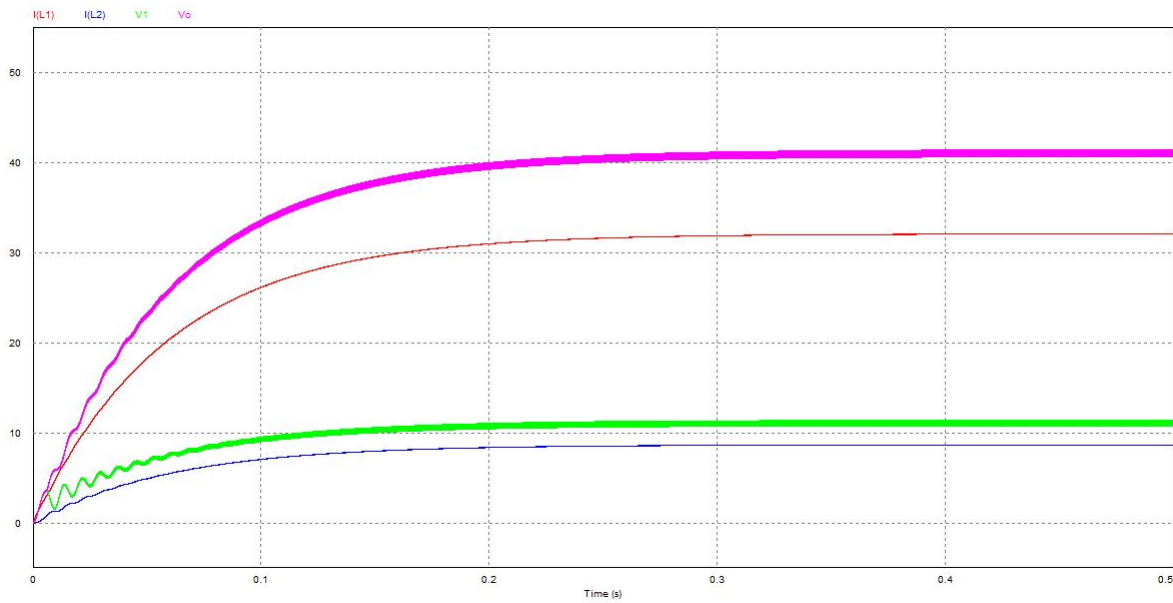


Figura 6-38.: Respuesta para simulación del convertidor en Psim (En rojo corriente en L1, en azul corriente en L2, en verde voltaje en C1 y en magenta voltaje en C2)

Una vez se determina que el circuito está en capacidades de elevar el voltaje hasta los 42 V, se prosigue a desarrollar el modelo lineal del sistema el cual es requerido para el diseño de una técnica de control que regule la tensión.

6.4.3. Modelo lineal o de pequeña señal

A partir del modelo conmutado no lineal y expresando las ecuaciones en términos del ciclo útil de trabajo, se realiza entonces un proceso de linealización utilizando el método por matriz Jacobiana, de esta forma el modelo lineal del convertidor se puede expresar mediante matrices de la siguiente manera donde el símbolo “~” sobre las ecuaciones expresa que el modelo es de pequeña señal:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\tilde{I}_{L1}}{dt} \\ \frac{d\tilde{I}_{L2}}{dt} \\ \frac{d\tilde{V}_{C1}}{dt} \\ \frac{d\tilde{V}_{C2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-(1-D)}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & \frac{-(1-D)}{L_2} \\ \frac{1-D}{C_1} & \frac{-1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1-D}{C_2} & 0 & \frac{-1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{L1} \\ \tilde{I}_{L2} \\ \tilde{V}_{C1} \\ \tilde{V}_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_g}{L_1(1-D)} \\ \frac{V_g}{L_2(1-D)^2} \\ \frac{-V_g}{RC_1(1-D)^4} \\ \frac{-V_g}{RC_2(1-D)^3} \end{bmatrix} \tilde{d} \quad (6-64)$$

$$\tilde{y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{L1} \\ \tilde{I}_{L2} \\ \tilde{V}_{C1} \\ \tilde{V}_{C2} \end{bmatrix} + 0 \quad (6-65)$$

6.5. Diseño de un control PID para la regulación de voltaje en el convertidor

A partir del modelo lineal del convertidor, se puede determinar la función de transferencia que relaciona el ciclo útil de trabajo D con el voltaje de salida teniendo en cuenta la representación en variables de estado descritas en la ecuación 6-66 y expresándola como una función de transferencia:

$$\dot{x}_t = A_{x_t} + B_{u_t} \quad (6-66)$$

$$\dot{y}_t = C_{x_t} + D_{u_t} \quad (6-67)$$

Teniendo en cuenta la representación de variables de estado descritas en el modelo lineal, se realiza su transformación a función de transferencia tomando como referencia el voltaje de salida V_{C2} de forma tal que queda descrita de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{V_{C2}}{D} = \frac{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0}{b_3s^4 + b_2s^3 + b_1s^2 + b_0} \quad (6-68)$$

Donde:

$$a_0: -V_g(2RD^4 - 8RD^3 + 12RD^2 - 8RD + 2R)$$

$$a_1: V_g(L_2D^2 - 2L_2D + 2L_1 + L_2)$$

$$a_2: -V_g(C_1L_1RD^2 - 2C_1L_1RD + C_1L_1R)$$

$$a_3: C_1L_1L_2V_g$$

$$b_0: (D-1)^3(RD^4 - 4RD^3 + 6RD^2 - 4RD + R)$$

$$b_1: ((D-1)^3(L_2D^2 - 2L_2D + L_1 + L_2))$$

$$b_2: (D-1)^3(C_1L_1R + C_2L_1R + C_2L_2R - 2C_1DL_1R - 2C_2DL_2R + C_1D^2L_1R + C_2D^2L_2R)$$

$$b_3: C_1L_1L_2(D-1)^3$$

$$b_4: C_1C_2L_1L_2R(D-1)^3$$

Para continuar con el diseño del control, se tomaron en cuenta los valores de los elementos que fueron implementados en el convertidor boost cuadrático, de esta forma los valores con los que se diseñó el control y se realizaron las pruebas para la obtención de resultados de simulación e implementación son los siguientes:

$$L_1 = 5 \text{ mH}$$

$$L_2 = 27 \text{ mH}$$

$$C_1 = 195 \text{ } \mu\text{F}$$

$$C_2 = 69 \text{ } \mu\text{F}$$

$$R = 3,42 \text{ k}\Omega$$

De esta forma la función de transferencia que determina el comportamiento del sistema y con el que se hace el diseño del control es la siguiente:

$$G(s) = \frac{V_{C_2}}{D} = \frac{-665,9s^3 + 6,025 * 10^6 s^2 - 3,033 * 10^8 s + 8,874 * 10^{11}}{s^4 + 4,238s^3 + 3,029 * 10^5 s^2 + 1,121 * 10^6 s + 2,823 * 10^9} \quad (6-69)$$

Con esta ecuación, se realiza la simulación en la herramienta Matlab del sistema descrito en la figura 6-39, de esta forma se sintoniza un control PID utilizando la herramienta de sintonización de Simulink del bloque PID Controller para obtener los valores de las constantes correspondientes a esta técnica de control clásica para la regulación de tensión del sistema.

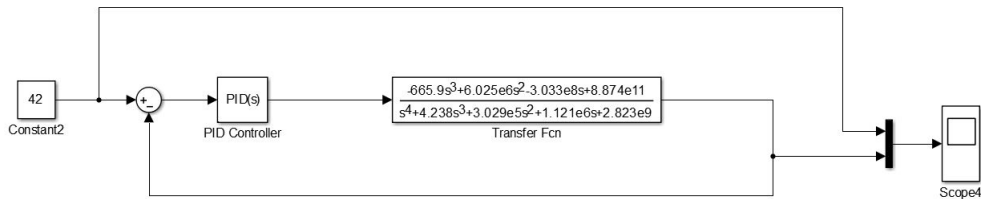


Figura 6-39.: Representación en función de transferencia del control para la regulación de tensión del sistema

La respuesta del sistema a un valor constante de ciclo útil D debido a los valores de los elementos, es demorada, llegando a tardar mas de 10 S para estabilizarse en el valor deseado de 42 V, al aumentar la constante proporcional para hacer mas rápido el control, este se torna inestable y genera sobre impulsos que aumentan el error de la respuesta del control antes de llegar a estabilizarse, por lo cual el control funciona principalmente en función de la constante integral que reduce el error en estado estacionario.

Con los siguientes valores de constantes hallados usando la herramienta de sintonización del bloque PID Controller para el control PID: $K_P = 0,00004$, $K_I = 0,00922$ y $K_D = 0,0001$, el sistema responde a la entrada mínima de 3V ajustando el valor de ciclo útil, de la manera más rápida posible, es decir estabilizando el sistema en 2 segundos y sin generar sobre impulsos o comportamiento inestable significativo antes de alcanzar el estado estacionario como se observa en la figura 6-40

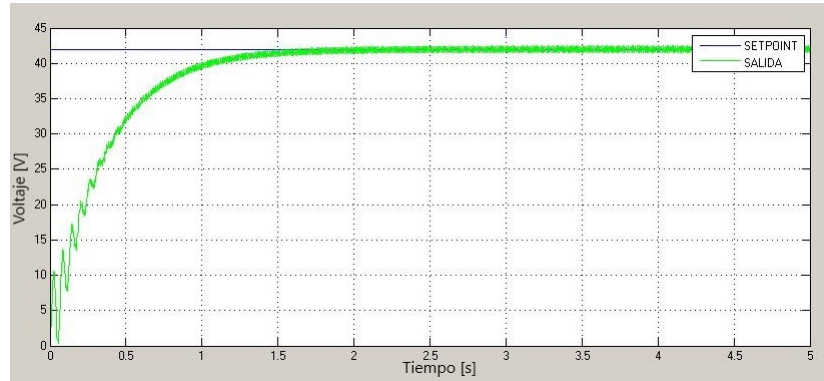


Figura 6-40.: Respuesta del Control

Para ver el comportamiento del control a una perturbación, se aplica el control diseñado al diagrama de bloques del modelo conmutado del convertidor el cual se representa como un subsistema y se genera en la entrada del sistema un escalón para ver el comportamiento como se muestra en las figuras 6-41 y 6-42.

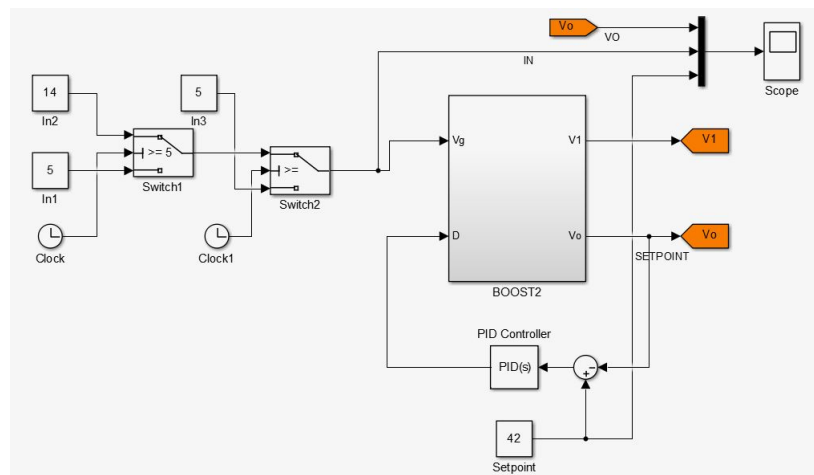


Figura 6-41.: Control aplicado en el diagrama de bloques del sistema con perturbación

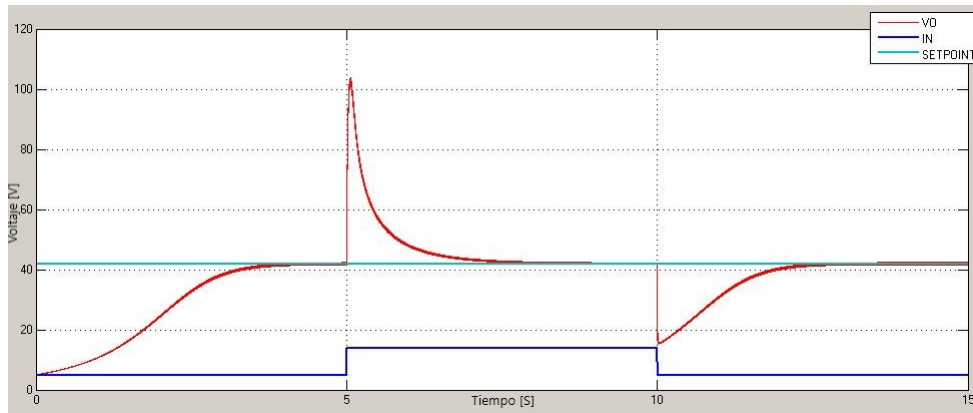


Figura 6-42.: Respuesta del control a una perturbación en la entrada

Posteriormente con estas simulaciones se realiza la implementación de un sistema de control digital utilizando un DSP F28335 desarrollado por la empresa Texas Instruments en el cual se programa este control en su forma discreta (Ver anexo **D**) mediante el uso de las siguientes ecuaciones en diferencias que representan el funcionamiento del control PID en digital:

- Las primeras ecuaciones que se deben tener en cuenta corresponden al cálculo de las constantes de control en discreto que dependen de las constantes de control el tiempo continuo:

$$K_1 = \frac{K_P + K_D}{T_s} \quad K_2 = K_I T_s - K_P - \left(2 \frac{K_D}{T_s}\right) \quad K_3 = \frac{K_D}{T_s} \quad (6-70)$$

Donde:

K_1 : Es la constante 1 de control en discreto

K_2 : Es la constante 2 de control en discreto

K_3 : Es la constante 3 de control en discreto

T_s : Periodo de muestreo, en este caso es $\frac{1}{50kHz}$

- La segunda ecuación que se debe tener en cuenta corresponde al cálculo del error el cual se calcula de la siguiente manera:

$$E_K = Set\ point - Out \quad (6-71)$$

Donde:

E_K : Error

Set point: Es el valor determinado que el control debe mantener, en este caso 42V

Out: Salida actual del sistema

- La tercera ecuación correspondería al funcionamiento del control la cual es su función de transferencia representada en ecuaciones en diferencia:

$$D = (K_1 E_K) + (K_2 E_{K-1}) + (K_3 E_{K-2}) + D_{K-1} \quad (6-72)$$

Donde:

D : Es la salida del control, en este caso es el valor de ciclo útil que se requiere para activar el MOSFET y mantener el voltaje en 42V

E_K : Es el error medido actual

E_{K-1} : Es el error medio en la muestra anterior

E_{K-2} : Es el error medio dos muestras antes

D_{K-1} : Es la salida del control calculada en la muestra anterior

7. Resultados del proyecto

En este capítulo se evidencian los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto y se realiza su respectivo análisis, además en el anexo E se evidencia la toma de mediciones adicionales en los elementos del circuito que corroboran su funcionamiento.

7.1. Simulación y funcionamiento del prototipo

Para iniciar con la implementación del prototipo se realiza la simulación del circuito con los elementos que se usaron para el convertidor, y aplicando en cada uno de los elementos las características dadas por el fabricante; tomando como entrada una fuente de voltaje, se realiza el siguiente modelo:

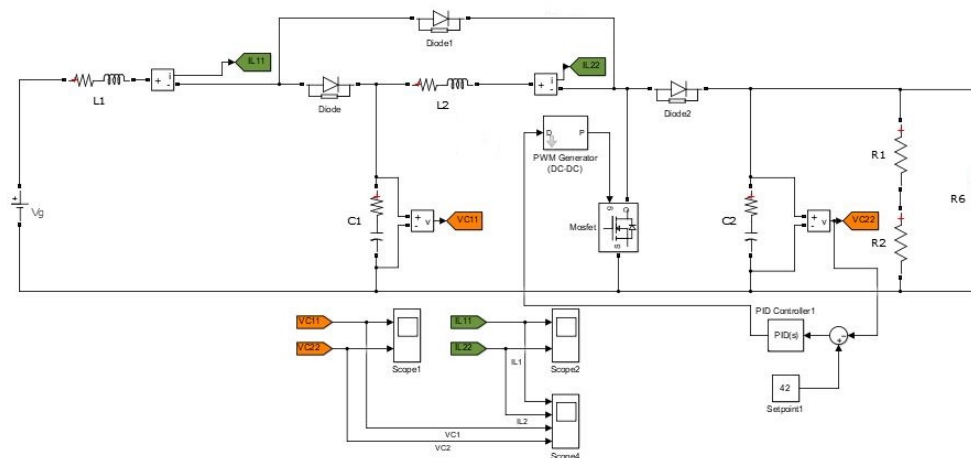


Figura 7-1.: Modelo de simulación con control en Matlab-Simulink del circuito implementado

Una vez se tiene el modelo, se realiza la programación para que el voltaje de entrada suba en un determinado espacio de tiempo y vuelva a caer un tiempo después con el fin de ver la respuesta el bloque de control diseñado y se obtiene la siguiente respuesta:

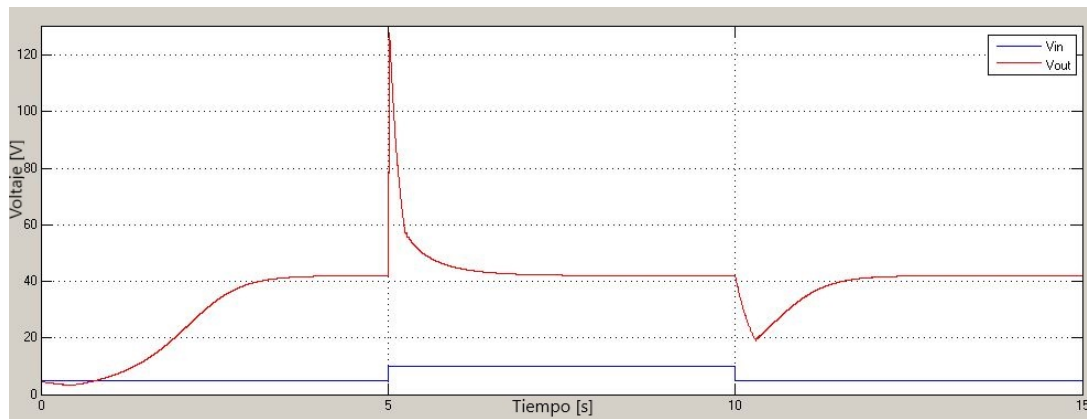


Figura 7-2.: Respuesta de simulación con control en Matlab-Simulink del circuito implementado

En la figura 7-2 se ve la respuesta del control frente a la perturbación aplicada en los tiempos de 5 s y 10 s donde se crea un pico de voltaje debido al ciclo útil (D) con el que viene trabajando el sistema y este nuevamente lo regula, cabe destacar que al momento de implementar, se tuvo en cuenta este comportamiento para realizar una limitación del ciclo útil que no permitiera que este pico se presente.

Por medio del programa de diseño “OrCAD PCB” se realizó el prototipo del convertidor DC-DC boost cuadrático que se utilizó en este proyecto, en la siguiente imagen (Figura 7-3) se muestra el bosquejo del mismo, en este se evidencian las pistas, los elementos de disipación y los puertos de entrada y salida del convertidor.

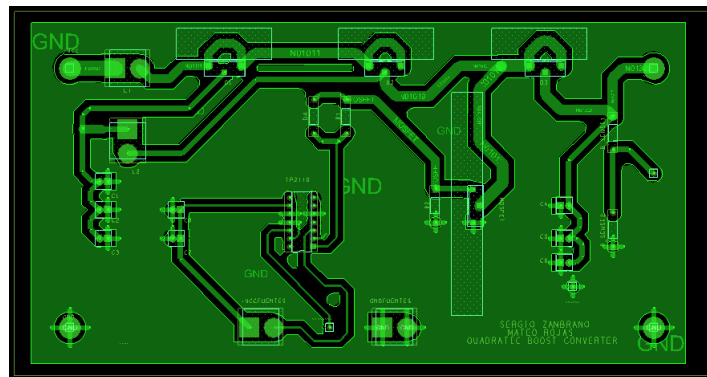


Figura 7-3.: Impreso PCB del convertidor DC-DC Boost Cuadrático

Una vez elaborado el PCB, se implementa todo el sistema tal y como se muestra en la figura 7-5 este cuenta con un PLC, un variador y un motor acoplado al PMSG que se encargan

de simular los perfiles de viento tal y como se describe en el capítulo anterior. Además una fuente dual que se encarga de suplir el IR2110 que junto con el DSP se comporta como el driver (7-4) que permite la conmutación del MOSFET implementado en el PCB y así mismo el control de regulación del sistema.

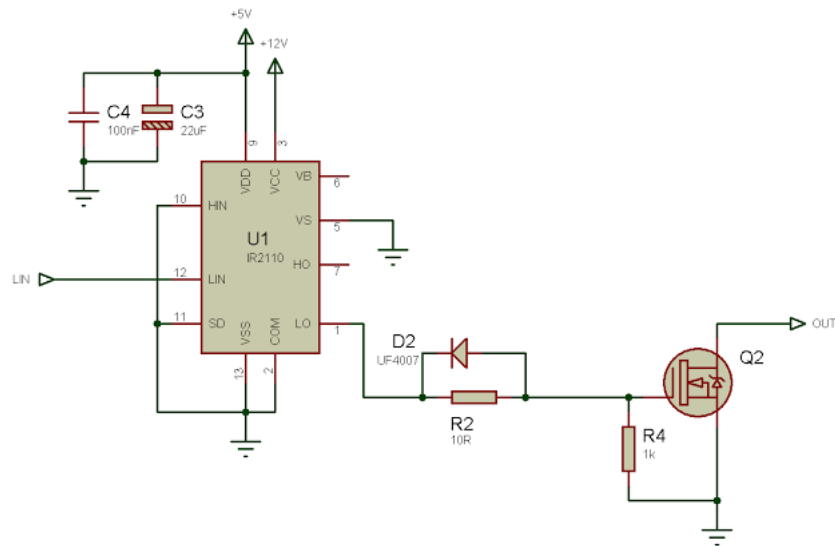


Figura 7-4.: Driver de lado bajo implementado usando un IR2110 para conmutar el MOSFET

Tomado de <http://archive.is/xzSIY>

Además se observa en la figura 7-5 todos los instrumentos de medición que fueron utilizados para la obtención y análisis de resultados. Cabe destacar que a la entrada del PCB hay un rectificador con 6 diodos MIC10A10 y un condensador de $4700\mu F$ y que los elementos implementados en el PCB son los siguientes:

$$L_1 = 5\text{ mH}$$

$$L_2 = 27\text{ mH}$$

$$C_1 = 195\text{ }\mu F$$

$$C_2 = 69\text{ }\mu F$$

$$R = 3,42\text{ k}\Omega$$

MOSFET IRFZ44N

Diodos MUR1660

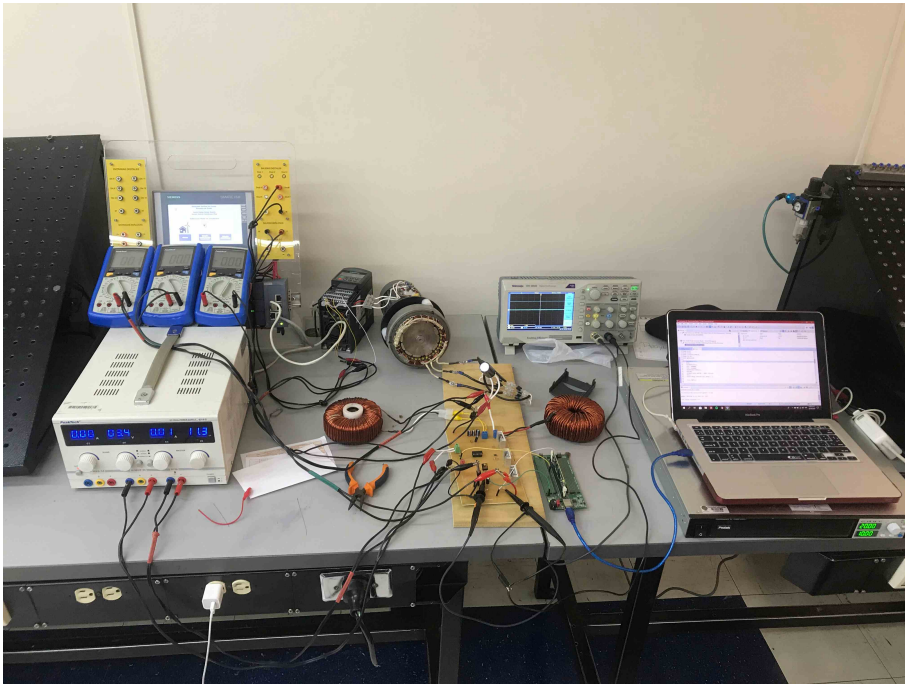


Figura 7-5.: Montaje experimental completo del sistema

Una vez construido el sistema, se procede con la obtención de los resultados y su respectivo análisis, en las siguientes dos secciones se evidencian las pruebas y simulaciones que se realizaron para entender el funcionamiento del sistema.

La primera prueba realizada al sistema, no cuenta con carga en el convertidor y se utilizó el PMSG como entrada de alimentación a distintas velocidades con el fin de verificar el funcionamiento de la regulación de voltaje del sistema simulando diferentes velocidades del viento. A continuación los resultados obtenidos.

7.1.1. Resultados del sistema con control sin carga y con una velocidad del viento de $3,8\text{ m/s}$



Figura 7-6.: Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una velocidad del viento de $3,8\text{ m/s}$



Figura 7-7.: (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una velocidad del viento $3,8\text{ m/s}$

7.1.2. Resultados del sistema con control sin carga y con una velocidad del viento de 6 m/s

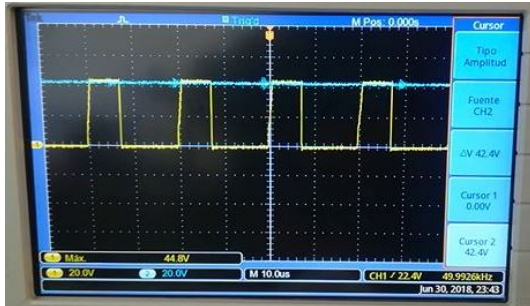


Figura 7-8.: Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una velocidad del viento de 6 m/s



Figura 7-9.: (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una velocidad del viento 6 m/s

7.1.3. Resultados del sistema con control sin carga y con una velocidad del viento de 14 m/s



Figura 7-10.: Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una velocidad del viento de 14 m/s



Figura 7-11.: (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una velocidad del viento 14 m/s

Como se puede observar en las imágenes anteriores, en todas las velocidades el sistema de regulación funciona, variando el ciclo útil de forma rápida para que en cada cambio de velocidad, se mantengan mínimo los 42 V de tensión regulados dentro de un margen de regulación del 1 %, no obstante la potencia de salida del sistema sin carga representa un valor de 0,5 W por lo cual se procede a realizar un análisis del sistema y evaluar la capacidad de potencia que este puede generar

7.2. Análisis de resultados

Conociendo el comportamiento del sistema sin carga y verificando el funcionamiento del control para la regulación de tensión, es necesario conocer la capacidad máxima de potencia que es capaz de generar el sistema, por eso, se analiza su respuesta con dos diferentes cargas ($800\ \Omega$ y $200\ \Omega$) y aplicando dos voltajes diferentes en la entrada (5 V y 15 V) con cada carga, además se realiza la comparación del funcionamiento del sistema con la simulación del circuito y con la simulación del circuito ideal, el cual no presenta pérdidas ni de voltaje ni de corriente en ninguno de sus elementos. Teniendo en cuenta esto se utilizan los siguientes modelos de simulación (7-12 y 7-13) para comparar sus respuestas con los resultados obtenidos

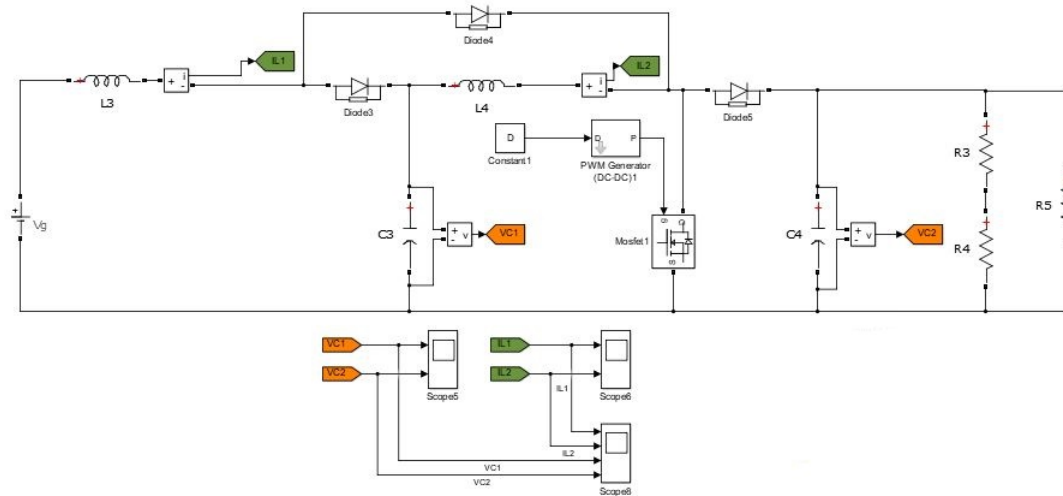


Figura 7-12.: Modelo de simulación con control en Matlab-Simulink del circuito ideal

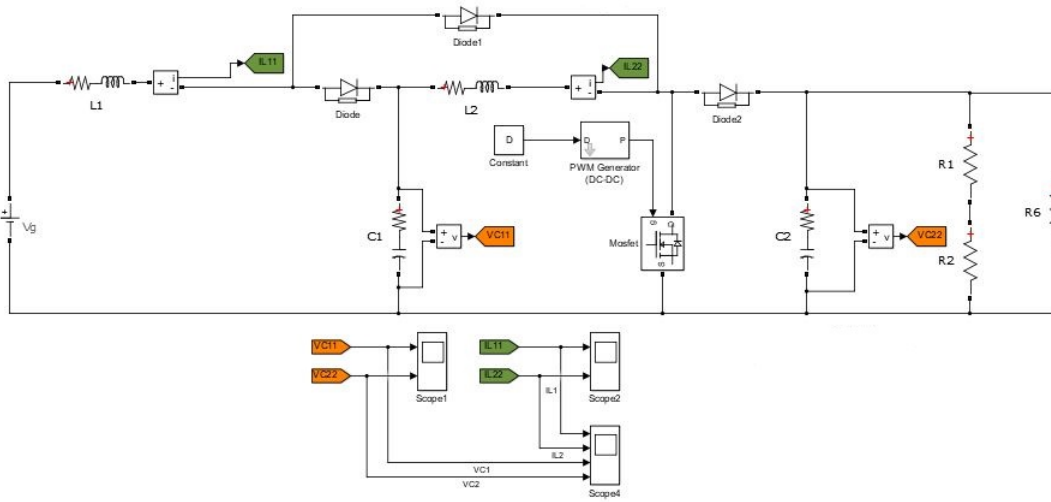


Figura 7-13.: Modelo de simulación con control en Matlab-Simulink del circuito implementado

7.2.1. Resultados de las simulaciones con una carga de $800\ \Omega$

La primera prueba con carga que se realiza es con $800\ \Omega$, obteniendo un resultado satisfactorio tanto para $5\ V$ y $15\ V$ en la entrada del convertidor en la simulación tanto ideal como en la del sistema implementado. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes dos imágenes:

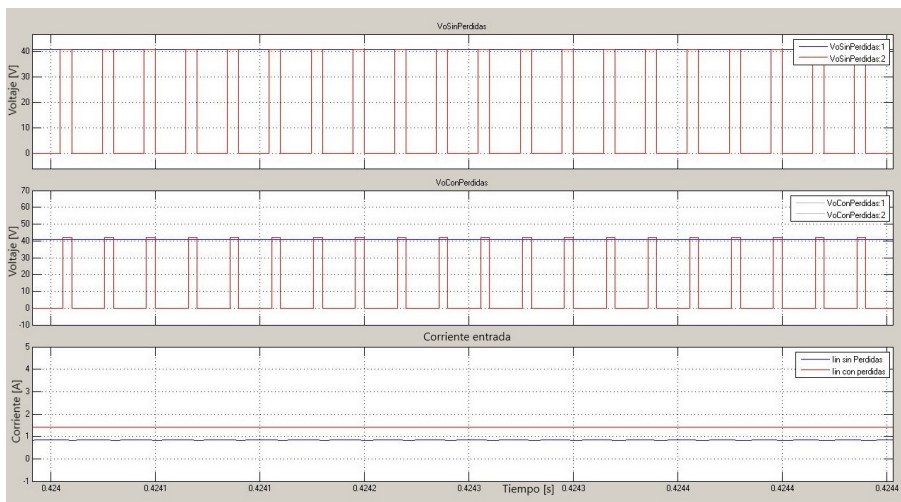


Figura 7-14.: Respuesta de simulación con $5\ V$ de entada, (De arriba a abajo) Respuesta voltaje circuito ideal, respuesta voltaje circuito implementado y respuesta de corriente de entrada circuito ideal (Azul) y circuito implementado (Rojo)

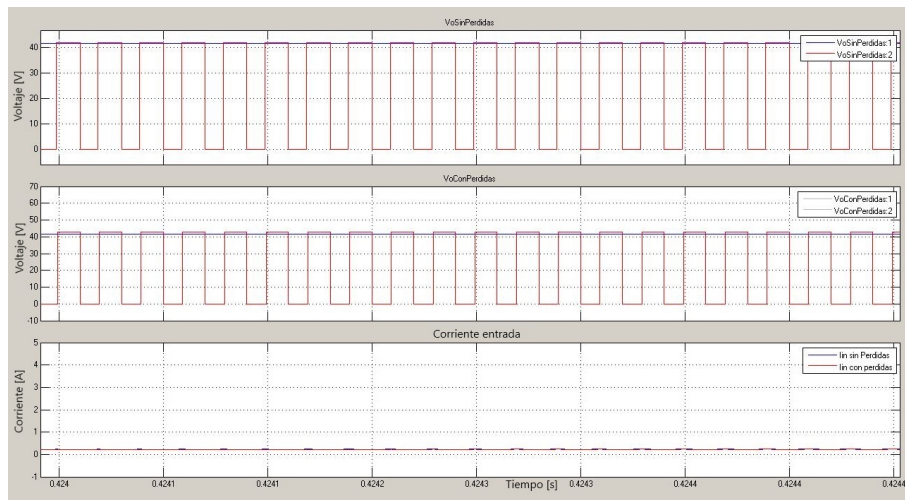


Figura 7-15.: Respuesta de simulación con 15 V de entrada, (De arriba a abajo) Respuesta voltaje circuito ideal, respuesta voltaje circuito implementado y respuesta de corriente de entrada circuito ideal (Azul) y circuito implementado (Rojo)

7.2.2. Resultados del sistema alimentado con una fuente DC programable con control y con carga de $800\ \Omega$

Con esta primera prueba los resultados para la implementación también fueron satisfactorios, cabe aclarar que para estas pruebas se cambió el sistema de alimentación por una fuente DC programable con el fin de determinar la eficiencia propia del convertidor. Los resultados se muestran a continuación:

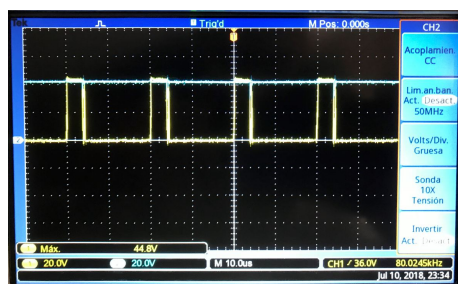


Figura 7-16.: Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una entrada de 5 V



Figura 7-17.: (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una entrada de 5 V

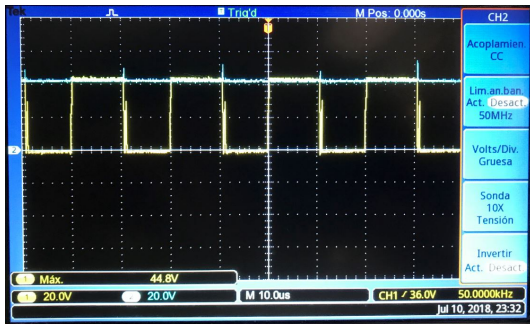


Figura 7-18.: Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una entrada de 15 V

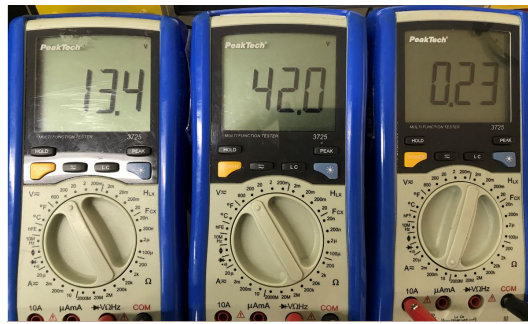


Figura 7-19.: (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una entrada de 15 V

Como se puede observar en las imágenes anteriores tanto de simulación como de implementación, se puede identificar que con ambos voltajes el sistema de regulación funciona manteniendo el voltaje en 42 V con un margen de regulación del 1 %, además teniendo en cuenta la comparativa de las dos simulaciones, se evidencia que el ciclo útil del circuito implementado es mayor respecto al ciclo útil del circuito ideal, esto se deba a las pérdidas que se dan en los elementos. En las bobinas existe una resistencia interna de aproximadamente $2\text{ m}\Omega$ lo cual causa una pérdida de corriente, cada diodo del convertidor tiene un consumo de voltaje de 1,5 V representando pérdidas significativas de voltaje y finalmente en la implementación se conecta la fuente DC de prueba al puente rectificador el cual evidencia en ambos casos una pérdida significativa de voltaje de hasta 2 V .

Con estas pruebas se valida que el sistema puede mantener una potencia de 2,2 W constante independientemente de la velocidad del viento, siempre y cuando esta sea mayor 3,5 V que equivale a una entrada al convertidor de 3 V

7.2.3. Resultados de las simulaciones con una carga de $200\ \Omega$

Con los resultados anteriores, se busca elevar aún más la potencia de salida con el fin de determinar la capacidad de potencia que se puede obtener del prototipo, de esta manera se aumenta la carga y se obtienen los siguientes resultados de simulación:

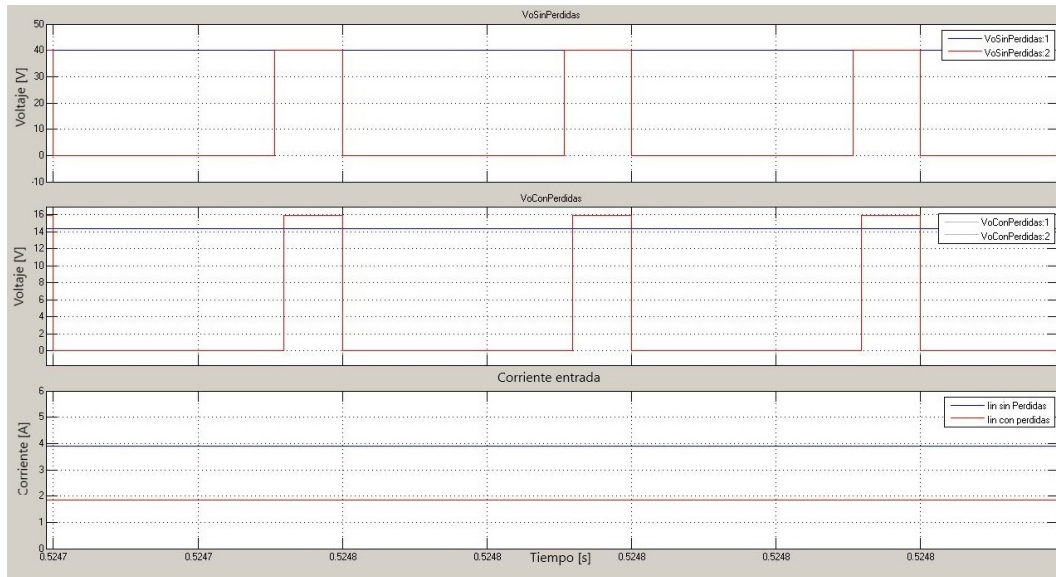


Figura 7-20.: Respuesta de simulación con 5 V de entada, (De arriba a abajo) Respuesta voltaje circuito ideal, respuesta voltaje circuito implementado y respuesta de corriente de entrada circuito ideal (Azul) y circuito implementado (Rojo)

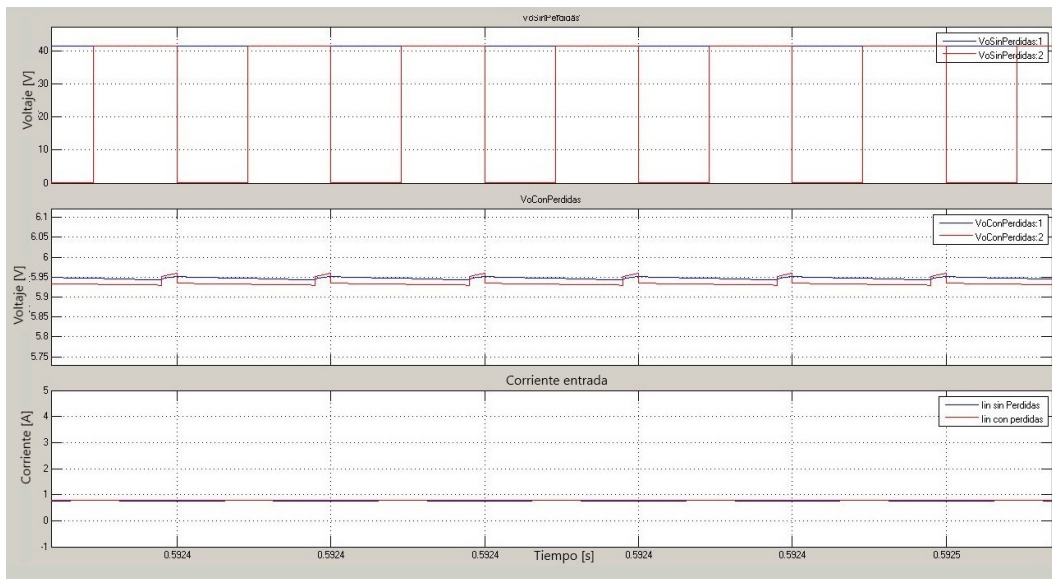


Figura 7-21.: Respuesta de simulación con 15 V de entrada, (De arriba a abajo) Respuesta voltaje circuito ideal, respuesta voltaje circuito implementado y respuesta de corriente de entrada circuito ideal (Azul) y circuito implementado (Rojo)

7.2.4. Resultados del sistema alimentado con una fuente DC programable con control y con carga de 200 Ω

Posteriormente los resultados obtenidos del sistema son los siguientes:



Figura 7-22.: Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una entrada de 5 V



Figura 7-23.: (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una con una entrada de 5 V

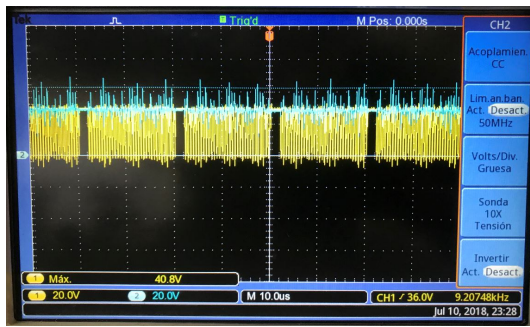


Figura 7-24.: Respuesta de conmutación del MOSFET (Amarillo) y voltaje de salida (Azul) del sistema con una entrada de 15 V



Figura 7-25.: (De izquierda a derecha) Voltaje de entrada al convertidor, voltaje de salida del convertidor, corriente de entrada al convertidor con una entrada de 15 V

A partir de los resultados obtenidos con esta prueba se puede determinar que aunque el sistema aplique el mayor ciclo útil para elevar el voltaje que es del 90 % el prototipo no está en capacidad de entregar los 42 V y la máxima potencia obtenida sea de 3 W, esto debido a las pérdidas que representan los elementos.

Por otra parte en las figuras 7-23 y 7-25 se puede determinar que con valores de superiores a los 800 Ω el sistema se vuelve inestable y no está en capacidad de regular el voltaje en función de la velocidad del viento dado que intenta exigir más corriente al sistema pero por las mismas características del MOSFET y su comportamiento que cambia en términos de resistencia interna, evita que la corriente necesaria para elevar el voltaje se pueda obtener, causando que como se ve en la simulación, el sistema no conmute de forma adecuada cruzando por 0 V y en la implementación creando una inestabilidad debido a que el control entra en conflicto con el comportamiento del MOSFET.

Finalmente, teniendo en cuenta todos los resultados obtenidos se evalúa el comportamiento del prototipo en términos de eficiencia (η) mediante la siguiente tabla **7-1** donde se observa que el sistema es eficiente en baja potencia y que a mayor potencia exigida en la carga el sistema se torna menos eficiente.

	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
800 Ω	3,10	1,67	41,80	0,05	5,18	2,18	42,19
	13,40	0,23	42,00	0,05	3,08	2,21	71,54
200 Ω	2,30	5,93	12,70	0,06	13,64	0,81	5,91
	12,30	0,66	24,50	0,12	8,12	3,00	36,97

Tabla 7-1.: Evaluación de eficiencia del prototipo

8. Conclusiones

En este proyecto se diseñó e implementó un prototipo de un bus de distribución de CC regulado alimentado por un sistema eólico basado en una maquina síncrona de imanes permanentes (PMSG), que en conjunto cuenta con un sistema que simula los perfiles de viento producidos cerca a la sede principal de la Universidad Santo Tomás en un aerogenerador, el diseño de un elevador DC-DC Boost cuadrático que eleva el voltaje de entrada de dicho sistema y un regulador de voltaje basado en una técnica de control clásica PID que permite mantener independientemente de la velocidad del viento una tensión constante de 42 V.

Como se estableció en la sección de diseño y ejecución del proyecto, el aerogenerador utilizado en este proyecto genera energía eléctrica a partir de una velocidad del viento de $3,5 \text{ m/s}$ y las velocidades promedio del viento necesarias para el funcionamiento de un aerogenerador, se deben encontrar entre el rango comprendido por los 4 y 16 m/s . Tomando como referencia los datos obtenidos de la estación meteorológica “MinAmbiente” que es la más cercana a la sede principal de universidad Santo Tomás, se determina que estas velocidades son alcanzadas por lo menos 136 días de los 365 días del año lo que equivaldría a un 37,26 % de efectividad anual asumiendo que más allá de alcanzar la velocidad mínima requerida, la velocidad media en estos días se mantiene en el rango mencionado, de esta manera se determina que no es factible el aprovechamiento de energía eólica en la sede principal de la Universidad Santo Tomás. No obstante, se podría adicionar al sistema de elevación de voltaje, un sistema mecánico que permita la aceleración de las aspas con velocidades del viento desde 1 m/s .

En este proyecto se realizó el modelo de un PMSG disponible en los laboratorios y mediante los resultados obtenidos de las pruebas que se llevaron a cabo para caracterizarlo, se pudieron ejecutar simulaciones que corroboran los cálculos obtenidos y el funcionamiento del generador.

En la sección de diseño y ejecución del proyecto se realizaron los cálculos para diseñar, modelar e implementar un prototipo de un sistema conmutado de AC-DC de 100 W, de esta manera se elaboró un rectificador trifásico AC-DC de puente completo con un factor de rizo inferior al 2 % y posteriormente se realizó el diseño de un convertidor DC-DC boost cuadrático que cuenta con un Mosfet que se encarga de la conmutación del sistema para que este eleve el voltaje de entrada y lo lleve a 42 V.

A partir de las simulaciones obtenidas en la sección de diseño y ejecución del proyecto se logró identificar que la corriente necesaria para obtener 42 V y 100 W a la salida con una

entrada de 3 V era de más de 35 A y los elementos con los que está elaborado el PMSG no cuentan con las características para entregar esta corriente, según las pruebas realizadas, la corriente máxima que el PMSG puede entregar en óptimas condiciones de funcionamiento es de 2 A, si la corriente supera este valor, el PMSG se calienta y genera ruido reduciendo así su velocidad, causando que el voltaje entregado se reduzca significativamente.

El funcionamiento del prototipo a 100 W, dada las condiciones anteriores no fue alcanzado, debido a que estos sistemas de conversión son altamente sensibles a las resistencias internas y consumos de tensión presentes en las etapas de elevación, por lo cual para la implementación de un prototipo funcional a partir del PMSG disponible en los laboratorios, se requiere de materiales de mejores características a los utilizados en este proyecto, generando mayores costos en la elaboración del mismo. Por otra parte, debido a las altas pérdidas presentes en los elementos del convertidor y del rectificador, el sistema no es capaz de suministrar la potencia que se tuvo en cuenta al momento de realizar el diseño.

Es de destacar en el desarrollo de este proyecto el control PID implementado para la regulación de tensión, ya que este permitió obtener una señal regulada de 42 V con un margen de regulación del 2 %. Independientemente de la velocidad a la cual el aerogenerador esté funcionando o el cambio que se realice de velocidad, la respuesta del control es rápida, no presenta sobre impulsos significativos en la implementación y permite al sistema mantenerse dentro del margen de regulación establecido.

Teniendo en cuenta el diseño del prototipo y los resultados obtenidos, se comprobó el funcionamiento de este con su respectivo control y su desempeño fue evaluado en la sección de resultados por su eficiencia evidenciando que el prototipo es más eficiente con cargas de menor capacidad, no obstante entre menor sea la carga menor es la potencia generada, pero debido a la calidad de los materiales, el funcionamiento del generador y las pérdidas presentadas en el rectificador y en el convertidor, entre menor sea el valor de la carga más inestable se vuelve el sistema, generando que la tensión no alcance el valor establecido de 42 V y en consecuencia tampoco la potencia deseada, no obstante se podrían realizar mejoras en el prototipo teniendo en cuenta las pérdidas en los cálculos de diseño y mejorando la calidad de los materiales.

9. Impacto social

A nivel institucional el proyecto busca motivar a posibles estudiantes de la facultad a investigar y aprender los conceptos tratados que se relacionan con el campo de las energías renovables, a utilizar y explotar al máximo los recursos con los que cuenta la universidad para sus proyectos de grado, pues el aerogenerador fue proporcionado por el semillero GED.

La energía eólica es una fuente de energía renovable muy poco explorada y aplicada en Colombia, pues su fuerte son los proyectos hidroeléctricos que actualmente ha dejado impactos negativos en la sociedad; por eso este proyecto busca generar una conciencia de cambio y mostrar a los estudiantes tomasinos que si existe un método alternativo y limpio para abastecernos de energía. De igual manera lograr que la sociedad se dé cuenta que la Universidad Santo Tomás está investigando en posibles alternativas para los sectores rurales que no cuentan con energía estable en sus comunidades y porque no, en un futuro hacer realidad el proyecto piloto de la empresa EPM que busca instalar un parque de energía eólica en el departamento de La Guajira.

A nivel de avances tecnológicos el proyecto cuenta con una regulación de 42v, este nivel de tensión es un estándar que está tomando mucha fuerza en los sectores de industria de aviación y automotriz. Con esto se busca minimizar las pérdidas de potencia a partir del incremento de la tensión y disminución de corriente, logrando utilizar elementos de bajo costo y de menor sección de conducción que actualmente no son utilizados en la mayoría de sistemas basados en 12 o 24 voltios.

10.Trabajo Futuro

Como continuación de este proyecto de grado al realizarse en un campo de investigación como lo son el campo de las energías renovables, quedan abiertos varios aspectos donde se puede profundizar y en las que es posible continuar trabajando.

A continuación se muestra algunos de los posibles trabajos futuros como complemento para este proyecto de grado, que bien, no se desarrollaron por el alcance o con la suficiente profundidad. Entre los posibles trabajos se destacan:

- Añadir al diseño del convertidor las pérdidas que los elementos del circuito pueden generar y de esta forma asegurar una potencia significativa constante en la salida del sistema.
- Mejorar la calidad de los elementos que fueron implementados en el circuito, debido a que los utilizados en el desarrollo de este proyecto son sensibles al ruido, a la temperatura y presentan pérdidas significativas de potencia lo que conlleva a un gran impacto en la eficiencia del convertidor.
- Implementar una técnica de control mas robusta basada en el control PID usado en este proyecto con el fin de regular regular tension y corriente, garantizando la extracción de la máxima potencia de un aerogenerador.
- A partir del desarrollo de mas convertidores que basan su funcionamiento a partir de una fuente renovable de energía, crear un bus de distribución DC bajo el concepto de una micro red inteligente que aporte energía a la red eléctrica, como se muestra en la siguiente imagen.

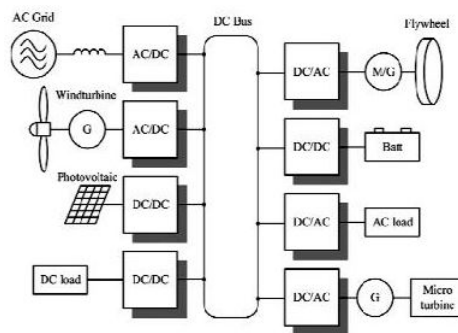


Figura 10-1.: Micro-red inteligente de distribución a partir de un bus DC

Tomado de: <https://jmirez.wordpress.com/2016/03/30/j985e-conceptual-diagram-of-a-dc-bus-microgrid-system/>

Bibliografía

- [1] A. Rolan, Á. Luna, G. Vázquez, D. Aguilar, and G. Azevedo. Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. *IEEE*, 2009.
- [2] Portafolio. El viento ganaría terreno como fuente de energía en el país. url <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/viento-ganaria-terreno-fuente-energia-pais-39746>, 2015.
- [3] T. Kelvin and I. Syed. Optimum control strategies in energy conversion of pmsg wind turbine system without mechanical sensors. *IEEE*, 2004.
- [4] T. Tafticht, K. Agbossou, and A. Chériti. Dc bus control of variable speed wind turbine using a buck-boost converter. *IEEE Canada*, 2006.
- [5] C. Koch-Ciobotaru R. Boraci, C. Vasar I. Filip, and G. Prostean. Control strategy for a variable-speed wind turbine using dc bus measurements. *IEEE Timisoara*, 2010.
- [6] A. TAHRI, S. HASSAINE, and S. MOREAU. A robust control for permanent magnet synchronous generator associated with variable speed wind turbine. *IEEE Poitiers*, 2013.
- [7] S. Zhang and K.-J. Tseng, D. M. Vilathgamuwa, T. D. Nguyen, and X.-Y. Wang. Design of a robust grid interface system for pmsg-based wind turbine generators. *IEEE*, 2011.
- [8] Y. Erramia, M. Ouassaid, and M. Maaroufi. Control of a pmsg based wind energy generation system for power maximization and grid fault conditions. *sciencedirect Morocco*, 2013.
- [9] M. B. Hamed y L. Sbita O. Elbeji. Pmsg wind energy conversion system: Modeling and control. *Scientific Research Publishing Inc., Tunisia*, 2014.
- [10] W. de Jesus Kremes and C. H. Illa Font. Proposal of a three-phase bridgeless pfc sepic rectifier with mppt for small wind energy systems. *IEEE Parana*, 2016.
- [11] M. M. Amin and O. A. Mohammed. Dc-bus voltage control of three-phase pwm converters connected to wind powered induction generator. *IEEE Miami*, 2010.
- [12] W. d. J. Kremes and C. E. Illa. Proposal of a three-phase bridgeless pfc sepic rectifier with mppt for small wind energy systems. *IEEE*, 2016.

- [13] twenergy. Que son las energias renovables. url <https://twenergy.com/a/que-son-las-energias-renovables-516>, 2017.
- [14] EOLICAT. Energia eolica. url <http://eoliccat.net/?lang=es>, 2017.
- [15] P. B. Rosenmann. Diseño de aerogeneradores con imanes permanentes para aplicaciones en electrificación rural. *Santiago de Chile*, 2007.
- [16] Antonio Ávila Segura. Diseño de un convertidor estático dc-dc de tipo buck-boost empleado como regulador del generador eólico air-x 400w. *Universidad Javeriana, Facultad De Ingenieria, Bogota DC*, 2013.
- [17] Juan Mamuel Gimenez and Juan Carlos Gómez. Gerenciación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia. *San Juan Argentina*, 2011.
- [18] Stephen j. Chapman. *Maquinas Electricas, Tercera Edicion*. MCGrawHill, 2000.
- [19] M. H. Rashid. *Power Electronics Handbook*. Butterworth-Heinemann, 2010.
- [20] Secretaria Distrital de Ambiente. Red de monitoreo de calidad del aire de bogotá - rmcab. url <http://ambientebogota.gov.co/red-de-calidad-del-aire>, 2018.
- [21] H. Ramirez-Murillo, A. G. Huertas, Z. L. Moraand, I. A. Arias, and C. A. Torres. Caracterización del potencial energetico renovable eolico y solar: Caso de estudio manizales. *Universidad Santo Tomas.*, 2016.
- [22] Carlos Silva, Demercil Oliveira, Luiz Henrique Barreto, and R.P.T. Bascope. *A novel three-phase rectifier with high power factor for wind energy conversion systems*. 11 2009.
- [23] DEGEM SYSTEMS . *Entrenado en Circuitos de Alimentacion Electrica*. I.T.E. Innovative Technologies In Education., 2004.
- [24] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic. *Fundamental of Power Electronics*. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2004.
- [25] W. Rusong and D. Shashi B y S. Gordon R. Analysis of an ac-to-dc voltage source converter using pwm with phase and amplitude control. *IEEE*, 1991.
- [26] I. Schiemenz and M. Stiebler. Control of a permanent magnet synchronous generator used in a variable speed wind energy system. *IEEE*, 2002.

- [27] A. Kenji, T. Yukichi, O. Takahisa, and S. Masaaki. A maximum power control of wmd generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuitl. *IEEE*, 2002.

A. Anexo: Velocidades máximas del viento para el año 2017 en la estación Centro de Alto Rendimiento

Tabla A-1.: Velocidad máxima del viento cada cada día del año 2017 en la estación Centro de Alto Rendimiento

	Velocidad maxima cada día del mes para el año 2017 en metros por segundo [m/s]											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Dia1	3,6	2,7	1,9	3,2	3,1	2,5	2,2	1,7	3,2	2,6	3,7	3,4
Dia2	3,3	3,5	2,1	3,6	3,5	3,8	3,1	3,1	2,6	3,6	3,5	1,9
Dia3	3,7	2,2	3,8	3,1	2,7	2,8	2,5	2,4	3,4	3,9	3	3,7
Dia4	3	3,2	2,7	3,1	3	2,8	2,9	2,7	2,6	3,2	1	2,7
Dia5	3,2	3,6	2,7	2,9	3,1	2,2	2,6	2,8	2,3	3	3,8	3,1
Dia6	2,5	3,4	3	2,1	2,9	2,5	3,3	2,5	2,2	2,9	4,3	4,9
Dia7	2,5	2,7	2,7	2,9	2,4	1,8	2,6	3,4	2,8	2,1	2,1	3,5
Dia8	2,8	3,5	2,2	2,5	2,8	2,8	2,4	3,4	3,4	2,8	3	2,5
Dia9	2,1	4,2	1,7	3,3	2,2	2,7	3,2	2,8	2,3	2,8	3,4	3,4
Dia10	3,8	4		4,4	2,9	2,6	2,8	2,7	2,4	4,1	2,6	4,4
Dia11	3,4	4,1		2,7	2,6	2,9	2,8	2,4	2,8	2,8	3,1	3,9
Dia12	3,5	3,8		4	2,5	1,5	2,4	3	3,4	2,3	3,4	3,7
Dia13	4,1	3,9		2,5	2,9	2,9	2,6	3	3,1	2,8	2,6	4,4
Dia14	2,7	3,5		1,6	4,6	2	2,1	3,2	2,4	2,8	2,4	3,3
Dia15	3,8	4		3	3,4	2	3,7	2,9	2,7	3,6	1,6	3
Dia16	3,5	3,6		2,4	2,6	2,4	2,2	2,5	2,2	2,4	3,1	3,4
Dia17	4,4	2,8		2,3	2,6	2,9	2,8	2,3	3,2	2,6	3,2	3,7
Dia18	1,8			2,2	2,8	2,9	3	3,4	3	2,3	2,9	3,2
Dia19	2,9			3	3,6	2,1	2,6	3,2	3,6	2,9	2,1	4,2
Dia20	4	3,1		1,6	2,4	1,8	2,6	3,3	3,1	2,5	2,6	3,7
Dia21	4,2	4,3		2,8	2,7	2,3	2,9	3,6	3,2	2,9	4,1	3,4
Dia22	3,5	4,5		2,3	2,6	2,3	2,3	2,9	2,4	3,5	3,8	3,9
Dia23	3,8	3,1		2,4	2,6	3,1	3	2,6	2	2,6	2,7	2,8
Dia24	4	2,5		2,8	2,5	3,8	2,1	3,1	2,7	2,4	3	3,1
Dia25	3,1	2		2,6	3,4	2,8	4	3	2,2	2,6	2,5	4,3
Dia26	2,3	3,1		3,1	3,8	2	2,7	2,6	2,1	2,3	3,1	3
Dia27	3,3	2,9		2,9	2,8	2,2	2,8	3	2,7	1,9	3,4	3
Dia28	2,6	2,8	2,9	2,9	2,3	3,4	2,5	2,1	3,5	3,4	3,2	2,9
Dia29	2,7		3,1	2,9	2,7	2,4	2,7	2,1	3,1	2,6	3,7	3,5
Dia30	2,1		2,4	2,2	3	2,7	2,4	2,5	2,9	3	3,2	3,4
Dia31	2,7		2,6		3,4		2,6	2,7		2,4		2,9

Las casillas vacías indican que la herramienta Web de la Secretaría Distrital de Ambiente, no arrojo datos de velocidad del viento para un determinado día y por consecuencia no se tienen en cuenta

B. Anexo: Velocidades máximas del viento para el año 2017 en la estación MinAmbiente

Tabla B-1.: Velocidad máxima del viento cada cada día del año 2017 en la estación MinAmbiente

	Velocidad maxima cada día del mes para el año 2017 en metros por segundo [m/s]										
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Dia1	4,3	1,8	1,8	4,2	3,6	2,7	3,6	3,7	5,2	2,6	2,4
Dia2	4	2,5	4,4	4,3	1,6	3,7	5	4,8	5,3	3,4	2,9
Dia3	4,7	5,3	5,3	5,5	2,3	3,4	2,9	2,9	6,9	2,8	2,4
Dia4	3,3	6,4	4,6	4,7	4,1	3,2	2,5	4,4	4	4,7	1,4
Dia5	3,3	4,6	3,5	4,7	3,1	4	3,1	5,7	3,2	6	3
Dia6	5,3	5,3	3,7	4,1	2,1	3,6	5,5	4,3	4,6	4,2	4,1
Dia7	3,7	7,2	3,3	2,8	2,3	2,4	5,4	3	3,6	3	3,4
Dia8	2,7	3,7	1,8	3,2	2,8	1,6	3,4	4	3,5	4,6	3,7
Dia9	1,9	6,	64,7	3,1	2,9	2,2	4,9	4,7	3,2	3,2	2,6
Dia10	4,2	5,7	4,7	3,4	2,6	3	4,1	3,5	4,6	3,5	3,3
Dia11	2,7	6,5	2,4	2,8	2	2,4	5	3,3	5,2	2,4	3
Dia12	2,7	6,3	1,4	3,2	2,1	2	5,8	4,7	4,1	4,5	3,7
Dia13	4,3	5,8	1,9	3,2	3,6	2,9	3,9	3,4	5,1	3,5	3,3
Dia14	3,6	5,1	2,9	1,8	3,2	3,8	2,7	1,6	3,3	4,4	2,2
Dia15	4,5	4,5	5,9	2,3	1,3	3,6	5,1	4,6	3,3	4	1,4
Dia16	5,2	2,7	4,3	4,5	4,1	4,3	2,5	2,6	3,7	3,6	3,8
Dia17	4,1	4,3	4,1	3,2	2,3	2,3	3,6	3,9	7	5	2
Dia18	2,5	4,6	4,9	2	2,8	2	5,5	2,2	2,8	4,8	3,1
Dia19	2,2	3,	6,1	4,3	5,4	3	4,5	5	2,1	2,7	3,1
Dia20	6,6	4,3	2,7	1,6	5	3,4	5,6	5,3	2,5	5	1,6
Dia21	2,7	5	4,8	2,9	6	5,7	2,9	3,3	4,1	4,9	2
Dia22	4,1	4,5	2,8	4,8	2,8	3,6	4	3,4	2,9	3,1	1,3
Dia23	4,3	6	5	4,7	4	3,9	3,8	4,2	3,7	3,2	
Dia24	6,5	3	2,5	3,2	3,6	3,2	3,8	2,6	2,9	3	
Dia25	3,8	1,3	1,5	2,5	4,4	3	5,4	4,7	4,8	3,3	
Dia26	5,4	4,5	1,9	5	4,4	4,2	3,2	4,1	1,5	2,8	
Dia27	6,9	3,3	3,9	4	4,5	3,5	6,4	3,4	2,7	4,1	
Dia28	4,7	4,2	3,3	4,7	4,3	3,3	3,9	2,3	3,3	4,7	
Dia29	2,9		4,2	4,5	3,6	3,4	2,9	2,3	4	3,4	
Dia30	2,3		1,7	3,5	3,7	4,8	3,6	4,6	3,8	2,5	
Dia31	3,6		3,2		4,1		4,1		4,9	4,2	

Las casillas vacías indican que la herramienta Web de la Secretaría Distrital de Ambiente, no arrojo datos de velocidad del viento para un determinado día y por consecuencia no se tienen en cuenta

C. Anexo: Tabla de caracterización del PMSG

Tabla C-1.: Características del PMSG en circuito abierto

FREC IN MOTOR (Hz)	Vel. Generador (RPM)	Vel. Generador (RPS)	Frecuencia Salida (Hz)	Voltaje pico (V)	Voltaje pp (V)	Polos	Pares de polos Generador	Velocidad del viento (m/s) Cte
5,00	112,00	1,87	11,62	1,44	2,88	12,45	6,23	0,98
10,00	264,00	4,40	26,30	3,20	6,40	11,95	5,98	2,31
15,00	414,00	6,90	41,60	5,12	10,24	12,06	6,03	3,62
20,00	563,00	9,38	56,20	6,80	13,60	11,98	5,99	4,93
25,00	709,00	11,82	71,40	8,40	16,80	12,08	6,04	6,20
30,00	845,00	14,08	84,70	10,40	20,80	12,03	6,01	7,40
35,00	1000,00	16,67	100,00	12,00	24,00	12,00	6,00	8,75
40,00	1155,00	19,25	116,00	14,00	28,00	12,05	6,03	10,11
45,00	1307,00	21,78	130,00	16,00	32,00	11,94	5,97	11,44
50,00	1454,00	24,23	146,00	17,60	35,20	12,05	6,02	12,72
55,00	1590,00	26,50	160,00	19,60	39,20	12,08	6,04	13,92
60,00	1700,00	28,33	174,00	21,20	42,40	12,28	6,14	14,88
65,00	1820,00	30,33	186,00	23,00	46,00	12,26	6,13	15,93

D. Anexo: Código implementado en el DSP para un control PID en discreto

```
#include "DSP28x_Project.h"
// #include "IQmathLib.h"

#define V_TBPRD 1500
// #define D 0.5

// -----Control

interrupt void ADC_Intrrpt (void);
void Init_PWM1(void);
void ADC_Config (void);

Uint16 V_ADC, p;
float EK=0;
float EK_2=0;
float EK_1=0;
float D=0;
float D_1=0;

float KP=0.00004;
float KI=0.00922;
float KD=0.00001;

float TS=0.00002;
float K1=0;
float K2=0;
float K3=0;
float setpoint=2050.0;
float D1 =0;
void main(void)
{
    InitSysCtrl();
```

```
DINT;
InitPieCtrl();
IER = 0x0000;
IFR = 0x0000;
InitPieVectTable();
EALLOW;
PieVectTable.ADCINT = &ADC_Intrrpt;
EDIS;
PieCtrlRegs.PIEIER1.bit.INTx6 = 1;

Init_PWM1();

InitAdc();
ADC_Config();

IER |= M_INT1;

EINT;
ERTM;
K1=(KP+KD)/TS;
K2=(KI*TS)-KP-(2*(KD/TS));
K3=KD/TS;
while(1)
{
}

void ADC_Config (void)
{
  AdcRegs.ADCTRL1.bit.SEQ_CASC = 0x1;
  AdcRegs.ADCTRL1.bit.CONT_RUN = 0x0;
  AdcRegs.ADCTRL1.bit.ACQ_PS = 0x7;
  AdcRegs.ADCTRL1.bit.CPS = 0x0;
  AdcRegs.ADCTRL2.bit.EPWM_SOCA_SEQ1 = 0x1;
  AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_ENA_SEQ1 = 0x1;
  AdcRegs.ADCTRL2.bit.INT_MOD_SEQ1 = 0x0;
  AdcRegs.ADCTRL3.bit.ADCCLKPS = 0x6;
  AdcRegs.ADCTRL3.bit.SMODE_SEL = 0x0;
  AdcRegs.ADCMAXCONV.all = 0x1;
```

```
AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV00 = 0x0;
//AdcRegs.ADCCHSELSEQ1.bit.CONV01 = 0x0;
}

interrupt void ADC_Intrrpt(void)
{
V_ADC = AdcMirror.ADCRESULT0;

//D=((0.0008*V_ADC+0.187)*0.9)/3;
EK= setpoint - (float)V_ADC;
D = (K1*EK) + (K2*EK_1) + (K3*EK_2) + D_1;
if(D > 0.9)
{
D1 = 0.9;
}
else if(D < 0.2)
{
D1 = 0.2;
}
else
D1 = D;
EK_2=EK_1;
EK_1=EK;
D_1=D1;

EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = (Uint16)V_TBPRD*D1; //ajustar el comparador de PWM
AdcRegs.ADCTRL2.bit.RST_SEQ1 = 1;           // Reset SEQ1
AdcRegs.ADCST.bit.INT_SEQ1_CLR = 1;         // Clear INT SEQ1 bit
PieCtrlRegs.PIEACK.all=PIEACK_GROUP1;
}

void Init_PWM1(void)
{
EALLOW;
SysCtrlRegs.PCLKCR1.bit.EPWM1ENCLK = 1;    // ePWM1
EDIS;

InitEPwm1Gpio();
```

```
EPwm1Regs.TBPRD = V_TBPRD; //1500
EPwm1Regs.TBCTL.bit.CTRMODE = TB_COUNT_UPDOWN;
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PHSEN = 0; //jesus
EPwm1Regs.TBCTL.bit.PRDLN = TB_SHADOW;
EPwm1Regs.TBCTL.bit.HSPCLKDIV = TB_DIV1; //yisus
EPwm1Regs.TBCTL.bit.CLKDIV = TB_DIV1;
EPwm1Regs.TBCTL.bit.SYNCSEL = 1;

EPwm1Regs.ETSEL.bit.INTEN = 0;
EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCEN = 1;
EPwm1Regs.ETSEL.bit.SOCSEL = ET_CTR_ZERO;
EPwm1Regs.ETPS.bit.SOCAPRD = ET_1ST;

EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = V_TBPRD*D;
EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = AQ_CLEAR;
EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAD = AQ_SET;

//EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA = V_TBPRD*D; //Cambio del Ciclo util
}
```

E. Anexo: Mediciones adicionales del funcionamiento del circuito

A continuación se presentan los resultados de medidas de voltaje y corriente tomados en los elementos del convertidor DC-DC Boost cuadrático cuando este se encuentra funcionando sin carga y con una alimentación en el puente rectificador que lo alimenta de $5V_{dc}$

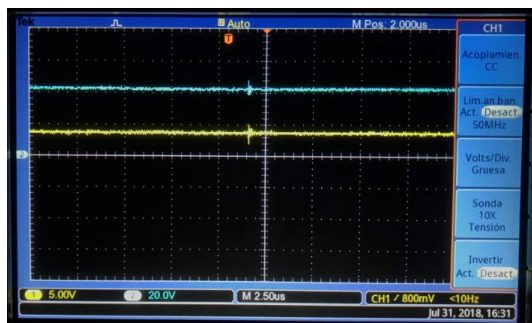


Figura E-1.: Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople DC

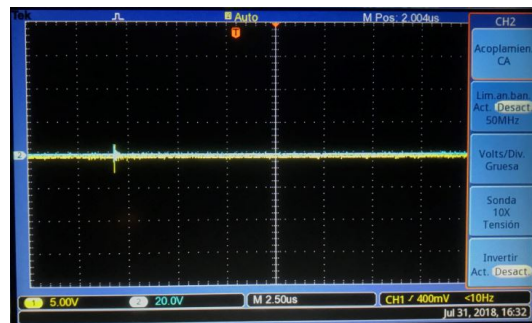


Figura E-2.: Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople AC



Figura E-3.: Voltaje de entrada al driver de 5V (Amarillo) y Voltaje de entrada al driver de 12V (Azul)

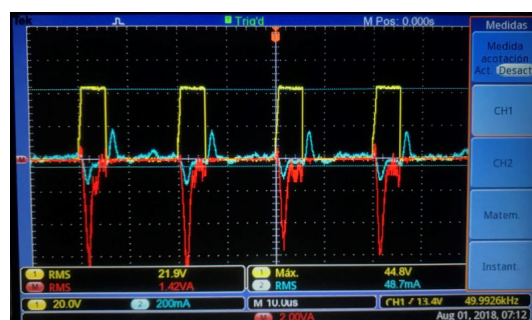


Figura E-4.: Voltaje en el mosfet (Amarillo), corriente en el mosfet (Azul) y potencia en el mosfet (Rojo)

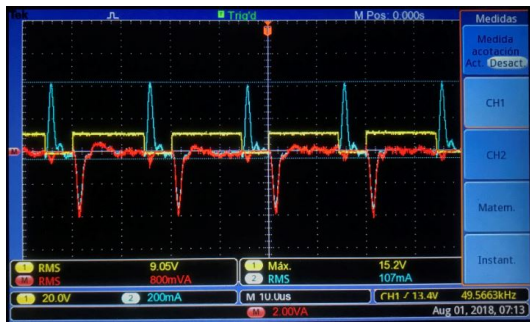


Figura E-5.: Voltaje en el Diodo 1 (Amarillo), corriente en el Diodo 1 (Azul) y potencia en el Diodo 1 (Rojo)



Figura E-6.: Voltaje en el Diodo 2 (Amarillo), corriente en el Diodo 2 (Azul) y potencia en el Diodo 2 (Rojo)



Figura E-7.: Voltaje en el Diodo 3 (Amarillo), corriente en el Diodo 3 (Azul) y potencia en el Diodo 3 (Rojo)

A continuación se presentan los resultados de medidas de voltaje y corriente tomados en los elementos del convertidor DC-DC Boost cuadrático cuando este se encuentra funcionando con una carga de 800Ω y con una alimentación en el puente rectificador que lo alimenta de $5V_{dc}$

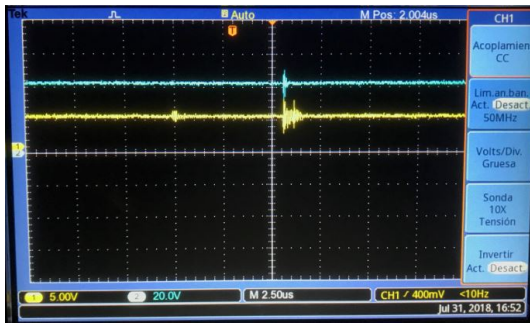


Figura E-8.: Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople DC

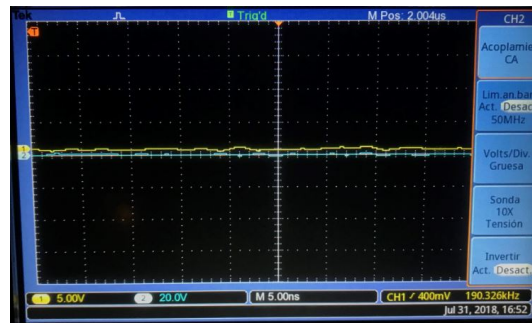


Figura E-9.: Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople AC

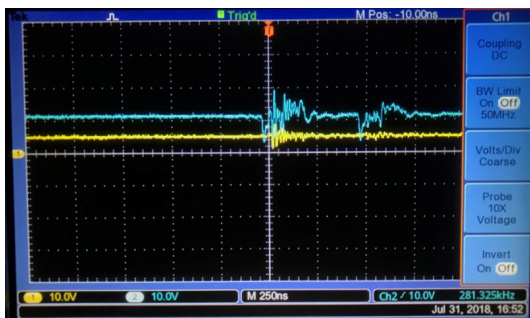


Figura E-10.: Voltaje de entrada al driver de 5V (Amarillo) y Voltaje de entrada al driver de 12V (Azul)

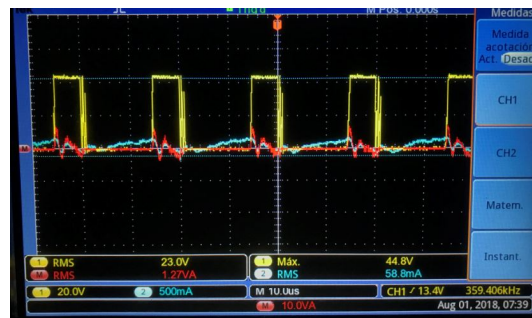


Figura E-11.: Voltaje en el mosfet (Amarillo), corriente en el mosfet (Azul) y potencia en el mosfet (Rojo)

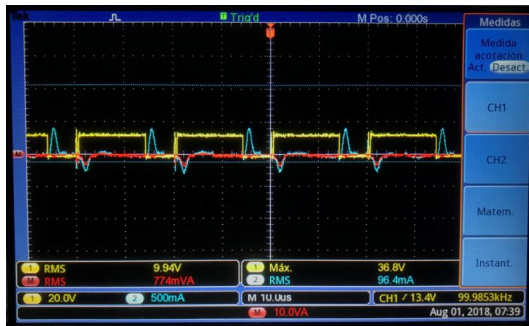


Figura E-12.: Voltaje en el Diodo 1 (Amarillo), corriente en el Diodo 1 (Azul) y potencia en el Diodo 1 (Rojo)

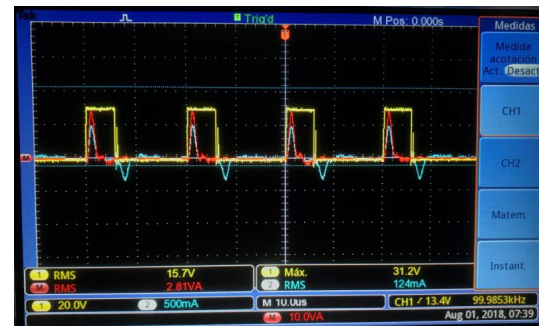


Figura E-13.: Voltaje en el Diodo 2 (Amarillo), corriente en el Diodo 2 (Azul) y potencia en el Diodo 2 (Rojo)



Figura E-14.: Voltaje en el Diodo 3 (Amarillo), corriente en el Diodo 3 (Azul) y potencia en el Diodo 3 (Rojo)

A continuación se presentan los resultados de medidas de voltaje y corriente tomados en los elementos del convertidor DC-DC Boost cuadrático cuando este se encuentra funcionando sin carga y con una alimentación en el puente rectificador que lo alimenta de 15V $_{dc}$

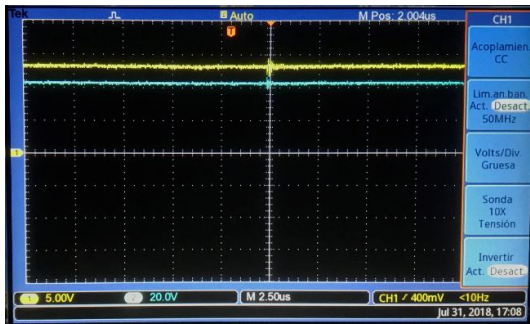


Figura E-15.: Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople DC

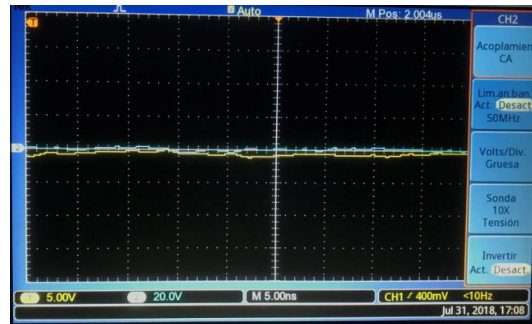


Figura E-16.: Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople AC

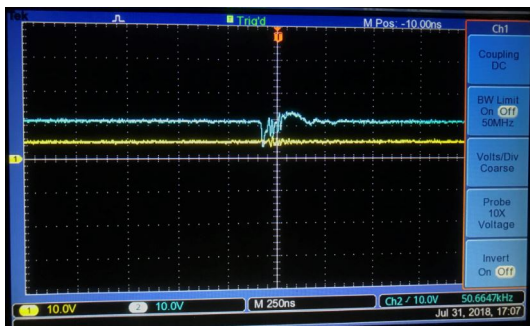


Figura E-17.: Voltaje de entrada al driver de 5V (Amarillo) y Voltaje de entrada al driver de 12V (Azul)



Figura E-18.: Voltaje en el mosfet (Amarillo), corriente en el mosfet (Azul) y potencia en el mosfet (Rojo)

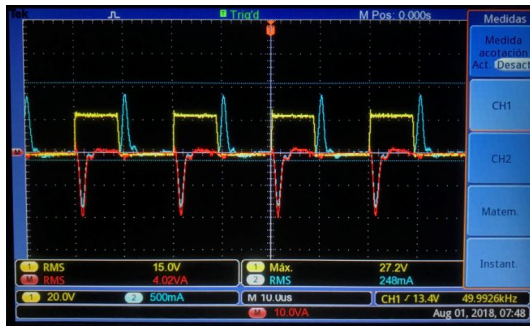


Figura E-19.: Voltaje en el Diodo 1 (Amarillo), corriente en el Diodo 1 (Azul) y potencia en el Diodo 1 (Rojo)

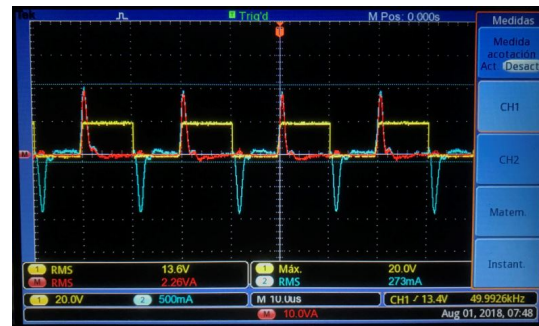


Figura E-20.: Voltaje en el Diodo 2 (Amarillo), corriente en el Diodo 2 (Azul) y potencia en el Diodo 2 (Rojo)



Figura E-21.: Voltaje en el Diodo 3 (Amarillo), corriente en el Diodo 3 (Azul) y potencia en el Diodo 3 (Rojo)

A continuación se presentan los resultados de medidas de voltaje y corriente tomados en los elementos del convertidor DC-DC Boost cuadrático cuando este se encuentra funcionando con una carga de 800Ω y con una alimentación en el puente rectificador que lo alimenta de $15V_{dc}$

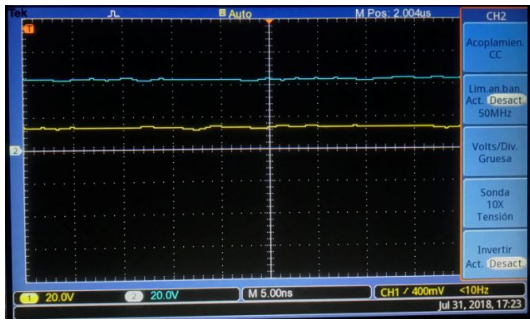


Figura E-22.: Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople DC

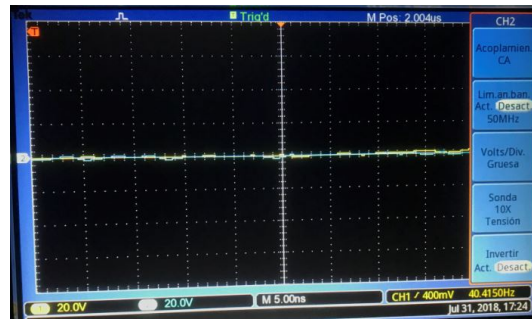


Figura E-23.: Voltaje de entrada (Amarillo) y voltaje de salida del convertidor (Azul) en acople AC



Figura E-24.: Voltaje de entrada al driver de 5V (Amarillo) y Voltaje de entrada al driver de 12V (Azul)

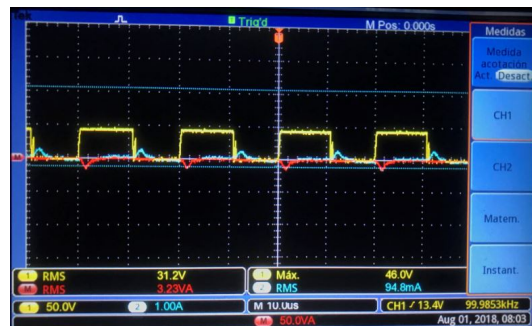


Figura E-25.: Voltaje en el mosfet (Amarillo), corriente en el mosfet (Azul) y potencia en el mosfet (Rojo)



Figura E-26.: Voltaje en el Diodo 1 (Amarillo), corriente en el Diodo 1 (Azul) y potencia en el Diodo 1 (Rojo)

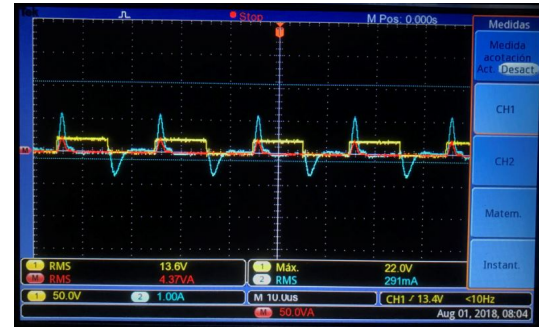


Figura E-27.: Voltaje en el Diodo 2 (Amarillo), corriente en el Diodo 2 (Azul) y potencia en el Diodo 2 (Rojo)



Figura E-28.: Voltaje en el Diodo 3 (Amarillo), corriente en el Diodo 3 (Azul) y potencia en el Diodo 3 (Rojo)