



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Generadores eléctricos de corriente continua para las energías renovables

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTORA: Cuenca Chávez, Jimena Alexandra.

DIRECTOR: Castro Mendieta, José Raúl, PhD.

LOJA -ECUADOR



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2019

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Ph. D.

José Raúl Castro Mendieta

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de fin de titulación: “**Generadores eléctricos de corriente continua para las energías renovables**”, realizado por **Cuenca Chávez Jimena Alexandra**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por lo que se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Septiembre de 2019.

f.)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Cuenca Chávez Jimena Alexandra**, declaro ser autor del presente trabajo de titulación: “Generadores eléctricos de corriente continua para las energías renovables”, de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo José Raúl Castro Mendieta director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f.
Autor: Cuenca Chávez Jimena Alexandra
Cédula: 1105910994

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de fin de titulación con mucho amor a mi madre Martha Chávez, por ser mi ejemplo de perseverancia y lucha constante; por cuidarme, apoyarme y ser la razón de mi vida, dedico este esfuerzo a mi abuelito José Chávez quien sin su ayuda no hubiera logrado este objetivo, a mi hermano Daniel Cuenca el cuál es mi ejemplo de lucha y fortaleza, a mis hermanos Wendy Cuenca y Jhon Leandro Cuenca, por confiar en mí, tenerme paciencia y sobre todo por acompañarme siempre.

A mi padre Herman Eduardo Cuenca Céli, por su ejemplo y legado de amor que inspiro en mi vida la determinación y fuerza para este triunfo, aunque ahora no esté aquí entre nosotros, sé que desde el cielo nunca me abandonas y siempre me cuidas. Siempre dedicaré para ti todos mis logros y te recordaré con mucho amor.

Y, a ti Nelson Barraqueta que, gracias a tu amor el cual reapareció después de largos años me ayudo a culminar este trabajo, fue tu cariño y apoyo el cual me alentó a no desmayar en la recta final, estaré agradecida mi vida entera cielo mío. La culminación de este trabajo no hubiera sido posible sin todos ustedes, gracias.

Jimena Cuenca

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por haberme brindado de salud para culminar con éxito esta etapa de mis estudios universitarios, a mi madre, hermanos y a mi abuelito por ser esa inspiración que nunca me abandono.

A mi director de tesis, PhD. José Raúl Castro Mendieta por permitirme desarrollar conjuntamente con su esfuerzo y paciencia este trabajo; su experiencia fue mi motivación para culminar con éxito mi trabajo de fin de titulación.

Agradezco de manera muy especial a los Ingenieros Freddy Ganazhapa y Gastón Chamba, por el apoyo que me brindaron su interés y dedicación desinteresada.

A mis tíos, César Jiménez, Patricio Cuenca, Rosa Soto, Deysi Mijas y Narcisa Cuenca por siempre estar pendientes de mí y brindarme su ayuda.

A mis primas, Vanessa Jiménez, Cecibel Jiménez, Nahely Cuenca por brindarme su apoyo y apoyarme en lo que necesitaba, siempre estaré agradecida.

A mi amiga, Lady sin su apoyo no hubiera sobrellevado todo este trabajo.

A mis compañeros, Ing. José Cumbicos, Ing. Diego Ochoa, Tatiana, María José, Carmen, Andrés Vargas, Andrés Quezada, Miguel; por brindarme su apoyo y ayudarme durante la carrera, por los buenos y malos momentos que hemos pasado juntos.

Jimena Cuenca

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
DEFINICIÓN DE CONCEPTOS.....	3
OBJETIVOS.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO I: ENERGÍAS RENOVABLES	8
1.1 Introducción.....	9
1.2 Energías renovables.....	9
1.2.1 Energía solar.....	10
1.2.2 Energía solar fotovoltaica.....	10
1.2.3 Energía solar térmica	11
1.2.3.1 Sistema solar con torre central receptor con heliostatos	11
1.2.3.2 Colectores cilindro-parabólicos	11
1.2.3.3 Discos parabólicos.....	11
1.2.4 Energía eólica.....	12
1.2.5 Energía hidroeléctrica	13
1.2.6 Biomasa.....	13
1.2.6.1 Biogás.....	14
1.2.7 Energía del mar	14
1.2.8 Energía geotérmica.....	14
1.2.9 Energía eólica seleccionada para producir energía eléctrica de acuerdo al lugar de emplazamiento en la ciudad de Loja.....	15
1.2.9.1 Central eólica Villonaco.....	15
1.2.10 Energía del viento en la ciudad de Loja	15
1.2.11 Potencial eólico a corto plazo en la provincia de Loja.....	16
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE DEL GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA. 17	
2.1 Introducción.....	18
2.2 Generadores	18
2.2.1 Electro – magnetismo	19
2.2.2 Campos electromagnéticos.....	19
2.2.3 Campos magnéticos	20
2.2.4 Inducción electromagnética.....	20
2.2.5 Ecuación de fuerza electromotriz (f.e.m).....	20
2.2.6 Acción del generador de corriente continua	22

2.3	Generador de corriente continua	23
2.3.1	Generadores con excitación independiente o separada.....	25
2.3.2	Generadores autoexcitados	27
2.3.3	Generadores shunt, derivación o en paralelo	27
2.3.4	Generadores en serie	28
2.3.5	Generadores compound, mixto o compuesto	29
2.4	Máquina lineal de corriente continua	29
2.5	Máquina lineal de corriente continua como generador	31
CAPÍTULO III: MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE GENERADORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTINUA		33
3.1	Introducción.....	34
3.2	Modelamiento matemático de los generadores de corriente continua.....	34
3.3	Diseño del modelo de generador DC compound	36
3.3.1	Circuito equivalente del generador DC compound	36
3.3.2	Desarrollo del circuito del generador DC compound mediante teoría de circuitos básicos	37
3.3.3	Desarrollo del circuito del generador DC compound mediante análisis transitorio.....	39
3.3.4	Parámetros para el diseño del generador DC compound.....	40
3.4	Diseño del modelo de generador DC shunt.....	41
3.4.1	Circuito equivalente del generador DC shunt	42
3.4.2	Desarrollo del circuito del generador DC shunt mediante teoría de circuitos básicos	43
3.4.3	Desarrollo del circuito del generador DC shunt mediante análisis transitorio	44
3.4.4	Parámetros para el diseño del generador DC shunt.....	46
3.5	Diseño del modelo del generador DC en serie	46
3.5.1	Circuito equivalente del generador DC en serie	47
3.5.2	Desarrollo del circuito del generador DC en serie mediante análisis transitorio	47
3.5.3	Parámetros del diseño del generador DC en Serie	48
CAPÍTULO IV: RESULTADOS OBTENIDOS		50
4.1	Análisis comparativo entre generadores.....	51
4.2	Análisis del voltaje	51
4.3	Análisis de la potencia	52
4.4	Tablas comparativas respecto a velocidades de vientos de 3.5 m/s y 7 m/s	52
4.5	Tablas comparativas con respecto a una señal de prueba	56
4.6	Análisis comparativo entre generadores.....	60
4.7	Ventajas de los generadores de corriente continua	61
4.8	Desventajas de los generadores de corriente continua	61
CONCLUSIONES.....		62
BIBLIOGRAFÍA.....		63
ANEXOS		66
ANEXO 1: Generador de corriente continua compound en el entorno		

Matlab/Simulink	67
ANEXO 2: Generador de corriente continua shunt en el entorno Matlab/Simulink ..	68
ANEXO 3: Generador de corriente continua serie en el entorno Matlab/Simulink....	69
ANEXO 4: Modelo resultante de generadores conectados a una señal de prueba...	70
Anexo 5: Códigos en el entorno Matlab respecto a las velocidades de vientos constantes (3 m/s y 7 m/s)	71
Anexo 6: Códigos y parámetros en el entorno Matlab de la señal de prueba	76
Anexo 7: Códigos en el entorno Matlab de los tres generadores con una señal de prueba entrante.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura básica de una celda fotovoltaica.....	11
Figura 2 Central solar térmica a altas temperaturas con heliostatos.	12
Figura 3 Central eólica Villonaco.....	12
Figura 4 Instrumentos para el estudio del viento.....	15
Figura 5 Regla de la mano derecha	19
Figura 6 Campo magnético resultante	20
Figura 7 Conductor moviéndose a través de un campo magnético	23
Figura 8 Generador fundamental de corriente continua	24
Figura 9 Generador de excitación independiente.	25
Figura 10 Generador con excitación independiente	26
Figura 11 Generador shunt, derivación o en paralelo.....	27
Figura 12 Generador en serie	28
Figura 13 Generador compound, mixto o compuesto	29
Figura 14 Máquina lineal (campo magnético dirigido hacia el interior de la página)...	30
Figura 15 Generador de corriente continua.....	35
Figura 16 Generador DC compound.....	37
Figura 17 Resolviendo por leyes de Kirchhoff el generador compound parte 1.....	38
Figura 18 Resolviendo por leyes de Kirchhoff el generador compound parte 2.....	38
Figura 19 Resolviendo por leyes de Kirchhoff el generador compound parte 3.....	39
Figura 20 Análisis transitorio del generador dc compound	39
Figura 21 Fenómeno de auto – excitación de un generador shunt.....	41
Figura 22 Generador DC shunt	43
Figura 23 Resolviendo por leyes de Kirchhoff del generador shunt parte 1	43
Figura 24 Resolviendo por leyes de Kirchhoff del generador shunt parte 2	44
Figura 25 Análisis transitorio del generador dc shunt.....	44
Figura 26 Generador DC en serie	47
Figura 27 Resolviendo por leyes de Kirchhoff el generador en serie.....	48
Figura 28 Voltaje de los generadores compound, shunt y serie para un viento constante de 3.5 m/s	51
Figura 29 Potencia de los generadores compound, shunt y serie para un viento constante de 3.5 m/s	52
Figura 30 Tiempo de estabilización de cada generador	54
Figura 31 Análisis de potencias de los tres generadores con un valor constante de 3.5 m/s.	55
Figura 32 Tiempo de estabilización de cada generador (3.5 m/s)	55

Figura 33 Análisis de las potencias de los tres generadores con un valor constante de 7 m/s	56
Figura 34 Tiempo de estabilización de cada generador (7 m/s)	56
Figura 35 Señal de prueba de entrada	58
Figura 36 Análisis de Potencias con la señal de entrada para los tres generadores. .	59
Figura 37 Tiempo de Estabilización de cada generador con respecto a la señal de prueba de la entrada.....	59
Figura 38 Análisis de la Estabilidad transitoria de los generadores.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Parámetros del generador DC compound	41
Tabla 2	Parámetros del generador DC shunt.....	46
Tabla 3	Parámetros del generador DC en serie	49
Tabla 4	Tabla comparativa de los diferentes tiempos de estabilización de cada generador	53
Tabla 5	Tabla comparativa de voltajes de los generadores para diferentes velocidades	53
Tabla 6	Tabla comparativa de potencia de los generadores para diferentes velocidades	53
Tabla 7	Tabla comparativa de RPM de los generadores para diferentes velocidades	53
Tabla 8	Tabla comparativa de los diferentes tiempos de estabilización de cada generador	58

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realiza el análisis de tres modelos de generadores de corriente continua aprovechando la energía renovable que nos provee el viento, para recomendar el reemplazo de los generadores asíncronos en una turbina eólica. Se aprovecha el recurso eólico como uno de los principales recursos renovables para así disminuir la contaminación ambiental. La energía eólica es la principal fuente de abastecimiento para el desarrollo de este trabajo. Para el funcionamiento y análisis de desempeño de los tres modelos de generadores se emplea el software Matlab/Simulink, dando a conocer cuál de los tres modelos de generadores es el más eficiente con respecto a los porcentajes de velocidad, temperatura y densidad del viento que nos presenta el atlas eólico del Ecuador MEER.

PALABRAS CLAVE: Generador, Corriente continua, Energía eólica, Energías renovables, viento.

ABSTRACT

In this titling work, the analysis of three models of direct current generators was carried out, taking advantage of the renewable energy provided by the wind, to recommend the replacement of asynchronous generators in a wind turbine. The wind resource is use as one of the main renewable resources to reduce environmental pollution. Wind energy is the main source of supply for the development of this work. For the operation and performance analysis of the three generator models, Matlab / Simulink software was used, making known which of the three generator models is the most efficient with respect to the percentages of speed, temperature and wind density that we presents the wind atlas of Ecuador MEER.

KEY WORDS: Generator, Direct current, Wind energy, Renewable energies, wind.

DEFINICIÓN DE CONCEPTOS

Energía Eléctrica: Es una de las formas en la que se manifiesta la energía, tiene como cualidades la docilidad en su control, la fácil y limpia transformación de fuentes de energía externa como son las provenientes de recursos naturales renovables como el viento, agua y sol (Luna, Perez-Negron, Fernandez, & Tequitlalpa, 2014).

Energías renovables: Son las energías que se obtienen con el aprovechamiento de recursos renovables como el viento, agua y sol (Boldea, 2017a).

Generador eléctrico: Es un dispositivo el cuál aprovecha las ventajas electromagnéticas y está diseñado para aprovechar la inducción electromagnética para convertir el movimiento en electricidad (Chemwiki, Alike, & License, 2016).

Generador de corriente continua: Es un dispositivo el cuál transforma la energía mecánica en energía eléctrica continua, esta acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en un campo magnético, resultando una fuerza electromotriz inducida, el generador necesita una energía mecánica de entrada para producir energía eléctrica continua(Álvarez, 2013).

Generador de excitación separada: Es aquel dispositivo que se obtiene de dos fuentes de tensión independiente para la alimentación del rotor y del estator, el flujo del campo se deriva de una fuente de alimentación separada independiente del mismo generador (Chapman, 2012).

Generador en derivación: Es un dispositivo que transforma la energía mecánica que recibe a través de un eje en sus terminales en energía eléctrica continua (Chapman et al.,2012).

Generador en serie: Es un dispositivo que hace que toda la corriente que se suministra a la carga fluya por igual en los devanados del generador, la conexión del circuito de campo en serie con el inducido del generador produce el flujo de campo (Chapman et al.,2012).

Generador compuesto acumulativo: Es un dispositivo considerado con un campo en derivación como un campo en serie, en el cual se restan las fuerzas magneto motrices la una de la otra; los efectos del campo en derivación como el campo en serie son aditivos (Chapman et al.,2012).

Generador compuesto diferencial: Es un dispositivo en el cual la energía para la alimentación del campo se toma de la fuerza electromotriz generada por el generador mediante la conexión en paralelo del devanando del campo en derivación y la conexión en serie del devanado del

campo en serie (Benito, 2014).

Fuerza electromotriz: Es una magnitud que cuantifica una transferencia de energía asociada a un campo no conservatorio, es decir que es capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado (Guisasola, Montero, & Fernández, 2008).

Campo eléctrico: Es un campo de fuerzas conservatorio, el campo eléctrico es producido por una fuerza de tipo central y puede demostrarse que todas las fuerzas centrales son conservativas (Coballes, 2016).

Campos electromagnéticos: Se denominan campos electromagnéticos cuando se está en presencia simultánea del campo eléctrico y magnético, es decir cuando los conductores eléctricos energizados que transportan corriente son fuentes a la vez de campos eléctricos con cargas eléctricas, y de campos magnéticos al estar dichas cargas en movimiento, como ejemplo las antenas (Araujo G., 1992).

Campos magnéticos: Es un campo de fuerzas que se generan por cargas eléctricas, para que se origine un campo magnético se requiere el movimiento de al menos alguna carga eléctrica pues estos se producen por cargas en movimiento (Araujo et al., 1992).

Inducción electromagnética: Es un fenómeno consistente en provocar o inducir una corriente eléctrica mediante un campo magnético variable (Aguilar, 2010).

Potencia (P): Es la tasa a la cual se realiza trabajo o el incremento de trabajo por unidad de tiempo (Chapman et al., 2012).

Voltaje (V): Es la tensión o voltaje que es capaz de proporcionar un generador, esta es la energía transferida a cada culombio de carga para que recorra el circuito, su simbología es por la letra V y se mide en voltios (Raposo, 2009).

OBJETIVOS

Objetivo General

Modelar, analizar y estudiar la generación eléctrica en corriente continua para las energías renovables.

Objetivos Específicos

-)] Determinar el estado del arte de los generadores de corriente continua.
-)] Realizar un análisis comparativo entre generadores de corriente continua.
-)] Analizar las ventajas y desventajas de los generadores de corriente continua.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la energía eléctrica es una de las formas de energía más producidas, la energía eléctrica se ha convertido en una demanda muy alta en el mundo moderno. La generación de energía eléctrica es limitada y su uso es cada vez mayor. La expansión de la generación, transmisión y distribución dependen principalmente de la proyección del consumo de energía eléctrica. Existen algunos casos en que producir corriente continua es necesaria para empresas como las industrias químicas y metalúrgicas, transporte o también conocida como tracción eléctrica (Vargas, 2013)

Acorde a algunos planes de expansión del sector eléctrico, hace prever que la participación de las fuentes de energía renovable no convencionales como la eólica, la solar y la geotérmica, dejará de ser marginal en la matriz energética, convirtiéndose a mediano o largo plazo en un aporte importante en la generación de electricidad(CONELEC, 2009).

Por la falta de conocimientos acerca de los generadores eléctricos de corriente continua en las energías renovables, pueden quizás surgir una serie de preguntas como: ¿Cómo es posible la generación de energía eléctrica reemplazado los generadores síncronos con generadores de corriente continua?, ¿Cuáles son las ventajas en la utilización de los generadores de corriente continua con respecto a otro?, ¿Cómo está estructurado un generador de corriente continua? etc., pero en realidad existen muchas preguntas más, que nos ponen en duda cada día por la falta de información en el tema del desempeño y manejo de los generadores de corriente continua en la generación de energía utilizando energías renovables, puesto que estos generadores eléctricos de corriente continua son de uso restringido por su limitación de generación a pequeñas potencias(Beato & Fuente, 2016).

En los sistemas aislados es importante mencionar, que el generador necesita para su correcto funcionamiento de controles que se mantengan funcionando a valores nominales de operación, y es importante tener en cuenta que las variaciones en la potencia real (o activa) afectan principalmente a la frecuencia de la tensión generada, mientras que la potencia reactiva es menos sensible a estas variaciones en la magnitud de la tensión (Sets, 2009).

Se plantea utilizar la generación eléctrica en corriente continua para aprovechar las energías renovables. Es por ello que se utilizó la energía que nos provee el viento en la ciudad de Loja, considerada con un potencial de velocidad del viento en un rango de 3 m/s y de 7 m/s (Erazo, 2017).

En la actualidad, el campo de aplicación de los generadores de corriente continua es muy reducido, su estudio es importante para comprender mejor ciertos problemas y fenómenos que también se presentan en los generadores comunes de alterna (Narciso B, 2013).

El desarrollo del presente trabajo se divide de la siguiente manera: el primer capítulo aborda la importancia de las energías renovables y selecciona cual será el recurso renovable para aprovecharlo en la generación de energía eléctrica en corriente continua. Seleccionando la energía renovable según las condiciones del ambiente para el cual será dirigido el desarrollo de este trabajo investigativo. El segundo capítulo aborda al estado del arte de un generador de corriente continua sus partes, clasificación y funcionalidad. El tercer capítulo presenta tres análisis de modelos matemáticos de los generadores de corriente continua (generador compound, generador shunt y generador en serie) los mismos que se han desarrollado usando ecuaciones diferenciales y a su vez también se desarrolló el análisis respectivo en términos de las variables físicas de entrada (el viento) mediante simulaciones con ayuda del software que nos ofrece Matlab/Simulink. El cuarto capítulo se trata de los resultados obtenidos en las simulaciones, en las mismas que se obtuvo su rendimiento y estabilidad, ventajas y desventajas de los generadores DC; y conclusiones para recomendar la utilización de estos generadores de corriente continua. Para el análisis y la obtención de resultados se necesitó la ayuda del software Matlab/Simulink en la cual se comparó el inicio de funcionamiento de cada generador teniendo como variable de entrada el viento estables y variantes (fuerza del viento constante y fuerza del viento en forma de ráfaga), comparando la estabilidad de cada uno de los generadores (su inicio y retardo de funcionamiento).

CAPÍTULO I: ENERGÍAS RENOVABLES

1.1 Introducción

La generación, suministro, distribución y utilización de energía eléctrica aprovechando las energías renovables constituyen uno de los campos más desafiantes de la energía eléctrica. Las operaciones de una empresa eléctrica al igual que otras empresas se divide por áreas, en este caso tres áreas: generación eléctrica, transmisión eléctrica y distribución eléctrica (Beato et al.,2016).

Las energías renovables son fuentes de energía limpias, las cuales no producen gases de efecto invernadero causantes de la destrucción del medio ambiente. Es importante mencionar que al igual que el agua, los alimentos y el aire, la energía eléctrica se ha convertido en una parte integral de la vida diaria de las personas. En este trabajo de titulación se aprovechará el recurso renovable que nos provee el viento y convertir este en energía eléctrica. Este capítulo expone las ventajas que nos provee generar energía eléctrica en corriente continua con energías renovables.

1.2 Energías renovables

Las energías renovables son fuentes de energía limpia e inagotable, son energías limpias que contribuyen a cuidar del medio ambiente, son aquellas que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua como consecuencia de la radiación solar, son fundamentalmente la energía hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y las marinas. (Instituto Tecnológico de Canarias, 2008).

Existen diferentes tipos de energías renovables, pues en la naturaleza podemos encontrar variedad de fuentes de energía primaria de las que podemos aprovechar y extraer energía. (Renewable & Agency, 2013).

Las limitantes para acceder a las fuentes de energías renovables son las siguientes:

- J No son accesibles a un costo razonable, los suministros son limitados y la falta de medios rentables para capturar y concentrar la energía renovable.
- J La mayoría de los flujos de energías renovables son por naturaleza difusos, por lo que la captura de cantidades significativas de energía implica grandes áreas de terreno es el caso de la energía solar fotovoltaica y la energía eólica.

Las ventajas para aprovechar las fuentes de energías renovables son las siguientes:

-) Estas fuentes de energía no se agotan, estos recursos son renovados a través del proceso natural.
-) Son disponibles durante todo el año, mediante una inversión única podemos obtener energía para muchas décadas sin afectar el medio ambiente.

Si existe una implementación exitosa de fuentes de energía renovables se incrementará la economía y se disminuirá la contaminación ambiental (Alrikabi & Benefits, 2014).

1.2.1 Energía solar

Las tecnologías solares aprovechan directamente el poder del sol y utilizan la energía para producir calor, luz y energía (lit, 2015).

Las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar pueden clasificarse en: energía solar fotovoltaica y energía solar térmica (Buitrago, 2005).

1.2.2 Energía solar fotovoltaica

Esta energía se produce por el efecto fotovoltaico el cual consiste en que la luz puede generar una corriente eléctrica al radiar ciertos materiales (Buitrago et al.,2005).

El efecto fotovoltaico se basa en el uso de materiales semiconductores, estos se caracterizan porque conducen la electricidad mejor que un aislante y mejoran su capacidad para conducir la electricidad al ser radiados. Pero para producir el efecto fotovoltaico es necesario que aparezca un voltaje que mueva a estos electrones en una dirección preferencial, generando una corriente eléctrica (Buitrago et al.,2005).

Una forma de lograr este efecto es unir dos materiales semiconductores de características electrónicas diferentes: uno de ellos debe ser capaz de ceder parte de sus electrones con facilidad (material tipo N) y mientras que el otro debe aceptar fácilmente electrones adicionales (material tipo P), este efecto se produce precisamente al iluminar la superficie de unión entre los dos diferentes materiales como lo muestra la Figura 1 (Buitrago et al.,2005).

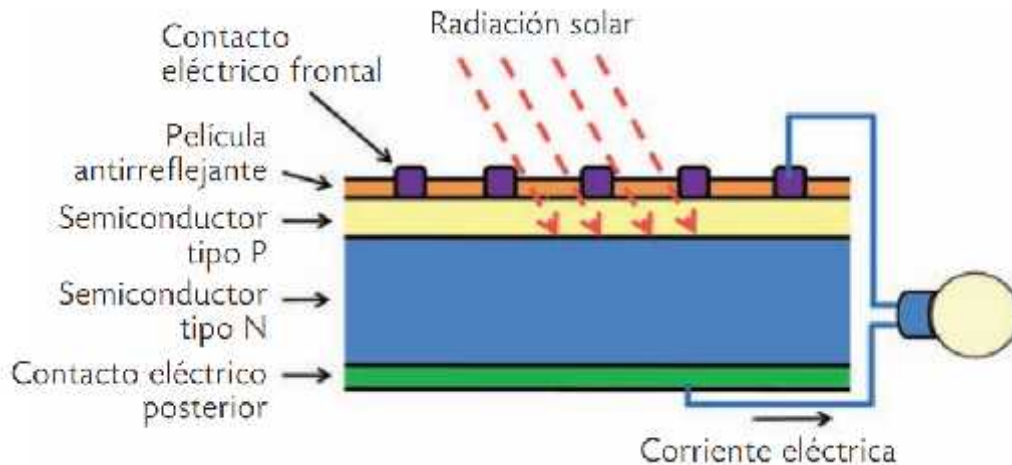


Figura 1 Estructura básica de una celda fotovoltaica.

Fuente: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaSol.pdf

Elaboración: El Autor.

1.2.3 Energía solar térmica

Es también conocida como energía termo solar, consiste en el aprovechamiento de la energía del sol para producir calor y después convertirla a energía eléctrica. Los sistemas que se utilizan para aprovechar las temperaturas altas del sol se dividen en tres tecnologías que se utilizan para la generación de electricidad las cuales se describen a continuación (Instituto Tecnológico de Canarias, 2008).

1.2.3.1 *Sistema solar con torre central receptor con heliostatos*

Estos sistemas suelen estar constituidos por una serie de espejos que reflejan los rayos solares hacia una torre central, concentrando la radiación solar en un solo punto como lo muestra la Figura 2 (Instituto Tecnológico de Canarias, 2008).

1.2.3.2 *Colectores cilindro-parabólicos*

Este sistema consiste en un espejo cilindro-parabólico que refleja la radiación solar sobre un tubo de vidrio, el fluido calo portador pasa por una tubería situada en el foco de los colectores, pudiendo alcanzar temperaturas aproximadas de 400°C (Instituto Tecnológico de Canarias, 2008).

1.2.3.3 *Discos parabólicos*

Estos sistemas están constituidos por espejos parabólicos en cuyo foco se sitúa el receptor solar, es una tecnología adecuada para una producción descentralizada, cercana al lugar de consumo (Instituto Tecnológico de Canarias, 2008).

Esta tecnología es utilizada principalmente en centrales eléctricas a gran escala para impulsar ciudades y comunidades (Of & Of, 2001).



Figura 2 Central solar térmica a altas temperaturas con heliostatos.
Fuente: <https://solar-energia.net/energia-solar-termica/alta-temperatura>
Elaboración: El Autor.

1.2.4 Energía eólica

La generación de energía se lleva a cabo con la fuerza del viento, es la energía cinética del aire en movimiento la cual nos proporciona energía mecánica en un eje de la turbina eólica y esta energía mecánica es transformada en energía eléctrica con la ayuda de un generador (Erazo et al., 2017).



Figura 3 Central eólica Villonaco.
Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=DwRKUHhy0Og>
Elaboración: El Autor.

En Ecuador la central Eólica Villonaco que se muestra en la Figura 3, aprovecha las altas velocidades del viento. La producción energética es entregada al Sistema Nacional

Interconectado, para cubrir el 51,19% de la demanda de la ciudad de Loja. (Erazo et al.,2017).

1.2.5 Energía hidroeléctrica

Esta energía también llamada hidráulica es una de las energías más conocidas y utilizadas en el mundo, utiliza la fuerza del agua en su curso para así generar la energía eléctrica y se produce generalmente en embalses. Actualmente, esta energía es la mayor fuente de energía renovable para la generación de energía eléctrica en todo el mundo, la generación de energía hidroeléctrica ha tenido un fuerte aumento en los últimos 50 años (Abolhosseini, Heshmati, & Altmann, 2014).

En la actualidad la mayor central hidroeléctrica con 22500 MW en potencia instalada del mundo está situada en el curso del río Yangtsé en China, la represa de las tres gargantas es la mayor represa del mundo (López P, 2008) .

En Ecuador la energía hidroeléctrica es la que mayor energía ofrece al mercado, cuya demanda de energía satisface alrededor del 71,6% equivalente al 20,08 GW/h en el año 2017. La electricidad generada a través de las centrales eléctricas en el Ecuador es utilizada en mayor parte para consumo interno y también para comercializarla a países como, Bolivia, Perú o Colombia (Clave, 2017).

1.2.6 Biomasa

Esta forma de energía es una de las formas más económicas y ecológicas conocidas para generar energía eléctrica en una central térmica. Esta energía consiste en la combustión de residuos orgánicos de origen animal y vegetal (Aung, 2014).

La biomasa se puede convertir en energía térmica, líquidos, combustibles sólidos o gases y otros productos químicos a través de una variedad de procesos de conversión. La conversión directa es el proceso o método más simple para extraer energía de la biomasa (Khan, Memon, & Sattar, 2018).

La energía de biomasa es abundante, no agrega dióxido de carbono a la atmósfera ya que absorbe la misma cantidad de carbono en crecimiento que se libera cuando consumido como combustible. La energía de biomasa no está asociada con el medio ambiente impactos tales como lluvia ácida, botín de mina, pozos abiertos, derrames de petróleo, eliminación de desechos radiactivos o represas de ríos (Sriram & Shahidehpour, 2017).

1.2.6.1 **Biogás**

Esta energía es una energía alternativa producida biodegradando materia orgánica, mediante microorganismos generados por la biodegradación de biomasa en dispositivos específicos sin oxígeno, así se genera un gas combustible que se utiliza para producir energía eléctrica. Esta energía es una mezcla de combustibles de gases, se compone principalmente de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) y se forma a partir de la descomposición bacteriana anaeróbica de compuestos orgánicos, es decir sin oxígeno (Jørgensen, 2015).

El biogás se produce naturalmente en pantanos, pantanos arrozaes, etc. y en el sedimento en el fondo de lagos y océanos donde las condiciones anaeróbicas prevalecen a cierta profundidad (Jørgensen et al.,2015).

1.2.7 **Energía del mar**

Los océanos, cubren más del 70% de la superficie de la tierra, esta energía esta almacenada en los océanos en gran parte como energía térmica, en otra parte como energía cinética y también en productos químicos y biológicos (Leijon, 2014).

Se han sugerido numerosas técnicas para extraer energía del mar, la mayoría de las cuales se pueden aprovechar de las siguientes maneras:

-) Energía de corriente marina y de marea
-) Energía de olas
-) Energía termal del océano
-) Energía de gradientes de salinidad (osmosis)
-) Cultivación de biomasa marina

Esta energía puede ser mareomotriz si esta aprovecha la fuerza de las mareas o undimotriz si esta aprovecha la fuerza de las olas, y así es la producción de energía eléctrica gracias a la fuerza del mar (Leijon et al.,2014).

1.2.8 **Energía geotérmica**

Esta energía aprovecha las altas temperaturas de yacimientos bajo la superficie terrestre (volcánicos) para la generación de energía a través del calor (100° a 150°) (Saibi, Finsterle, Berkeley, Bertani, & Nishijima, 2013).

Le energía geotérmica, definida como el calor de la tierra, es limpia y sostenible. Es posible

utilizar métodos geofísicos y numéricos y el uso de una planta de energía geotérmica como tecnología para producir electricidad a partir de las aguas calientes subterráneas (Saibi et al., 2013).

1.2.9 Energía eólica seleccionada para producir energía eléctrica de acuerdo al lugar de emplazamiento en la ciudad de Loja.

1.2.9.1 Central eólica Villonaco

Se tomó como referencia la Central Eólica Villonaco, se ubicada en el cerro Villonaco a 2720 msnm, a 14km aproximadamente del centro de la ciudad de Loja, esta central eólica, forma parte de las 31 centrales en operación de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, empresa pública estratégica adscrita al Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. Según el emplazamiento y las condiciones del mismo estas son ideales para la producción de energía, aprovechando el recurso eólico(CELEC.EP, 2015).

Las estadísticas de la empresa GOLDWIND, comparándolas con las 614 centrales eólicas instaladas a nivel mundial de esta marca, con un total de 22000 unidades de generación tienen un registro de 2000 horas de producción anual. La producción de la central eólica Villonaco es de 5600 horas de producción por año (CELEC.EP, 2015).

1.2.10 Energía del viento en la ciudad de Loja

Según el Atlas Eólico del Ecuador presentado por el MEER en el año 2013, Loja representa el 52% del potencial Eólico aprovechado del país. Es importante las variaciones diurnas y nocturnas estacionales del viento para el aprovechamiento de la energía eólica. Se necesita que el viento alcance una velocidad mínima que dependiendo del aerogenerador a utilizar oscilará entre 3 m/s a 7m/s (Renovable, 2013).

La energía del viento se caracteriza por la velocidad y dirección. Para determinar la velocidad se utiliza la escala de beaufort y la dirección la proporciona la veleta de los aerogeneradores. Para realizar el estudio preciso del viento para un parque eólico se lo obtiene con ayuda de los siguientes instrumentos como nos muestra la Figura 4. Los vientos dominantes son los vientos alisios (vientos provenientes del este) (Erazo et al.,2017).



Figura 4 Instrumentos para el estudio del viento

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

1.2.11 Potencial eólico a corto plazo en la provincia de Loja

El Atlas Eólico del Ecuador, nos muestra las condiciones del viento anuales, obteniendo mapas digitales mediante geo-procesamientos, cálculo de desempeño, producción de energía eléctrica a partir de curvas de potencia de turbinas existentes en el mercado, estimando así un potencial de generación eólica y a partir de parques instalados en las zonas donde el recurso de viento es el más favorable (Renovable, 2013).

El potencial eólico a corto plazo en la provincia de Loja se encuentra en Saraguro, El Tablón, Manú, Membrillo, Las Chinchas, Barrio Guayrapamba. La velocidad promedio es de 3 m/s a 7m/s, es importante mencionar que el lugar de emplazamiento es fundamental para el diseño de un parque eólico, para determinar el comportamiento del viento, analizar datos y obtener resultados (Erazo et al.,2017).

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE DEL GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA

2.1 Introducción

El presente capítulo hace referencia a los generadores de corriente continua, partes fundamentales y clasificación. Citando fuentes de investigaciones que darán un mayor enfoque al tema del trabajo de investigación y recomendar la utilización del generador de corriente continua para que la generación de energía eléctrica en DC aprovechando las energías renovables.

2.2 Generadores

Es importante mencionar que un generador es lo opuesto a un motor, siendo este el que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Un generador eléctrico es una máquina que produce energía eléctrica mediante transformación de la energía mecánica (Sebastian & Alvarado, 2012).

Generalmente este tipo de máquinas producen energía eléctrica a partir de energías renovables como ejemplo tenemos la energía hidráulica, eólica y solar. El generador eléctrico transforma la energía mecánica en eléctrica, esta acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en un campo magnético, resultando una f.e.m inducida que al aplicarla a un circuito externo produce una corriente que interacciona con el campo y desarrolla una fuerza mecánica que se opone al movimiento(Chapman et al.,2012).

El generador eléctrico está compuesto por tres partes fundamentales que son:

1. Rotor: Es la parte en movimiento que es accionada por el motor.
2. Estator: Es la carcasa dentro de la cual gira el rotor.
3. Motor de accionamiento: Este motor funciona según el tipo de energía que se utilice para generar movimiento (eólica, hidráulica, solar, etc.), y debido a esto el diseño del mismo es diferente; si se emplea agua el motor de accionamiento es la turbina, y si se emplea vapor el motor de accionamiento es un motor de combustión (Boldea, 2017a).

Las dos partes importantes de un generador eléctrico son el campo magnético y el conductor o conductores. Los generadores son accionados por una fuente de energía mecánica o también conocido como el motor principal del generador (turbina de vapor, motor de diésel o incluso un motor eléctrico) (Boldea, 2017b).

Los generadores de electricidad dependen del magnetismo para su funcionamiento, la clave se encuentra en la ley de Faraday que establece que para que se genere una corriente eléctrica debe existir un movimiento entre el conductor y el campo magnético. Antes de

presentar el diseño y funcionamiento de los generadores, se dará una exposición del fenómeno del magnetismo y su asociación con la electricidad (Boldea, 2017a).

2.2.1 Electro – magnetismo

Esta forma de magnetismo es la misma que se encuentra en los imanes naturales o permanentes. La diferencia del electromagnetismo es que crea artificialmente y deja de existir cuando se elimina la fuerza creadora. El electromagnetismo es la rama de la física o ingeniería eléctrica que estudia los fenómenos eléctricos y magnéticos(Matthew N, O, 2003).

Los campos electromagnéticos se emplean en calentadores por inducción para operaciones de fundición, forja, temple, endurecimiento de superficie y soldadura. La energía electromagnética ofrece múltiples posibilidades novedosas e interesantes en diversas áreas. Entre los dispositivos electromagnéticos se cuentan transformadores, relevadores eléctricos, radios y televisores, teléfonos, motores eléctricos, líneas de transmisión, guías de ondas, antenas, fibra óptica, radares y rayos láser (Matthew et al.,2003).

2.2.2 Campos electromagnéticos

La corriente que fluye a través de un conductor no sólo produce calor, sino también un campo magnético sobre el alambre. Esto se demuestra colocando una aguja de brújula cerca del cable que conduce la corriente. Si se asume que la dirección de la corriente eléctrica es de positivo a negativo, entonces se observará que la aguja magnética situada junto al conductor siempre apuntará con su polo “norte” en una dirección determinada (Matthew et al.,2003).

Esta observación conduce a una regla general conocida como la regla de la mano derecha la cual nos muestra la Figura 5. Si se obtiene un conductor con la mano derecha con el pulgar estirado en la dirección de la corriente; entonces la dirección en la que los dedos se enrollan alrededor del conductor es la dirección de las líneas magnéticas de fuerza (Matthew et al.,2003)).

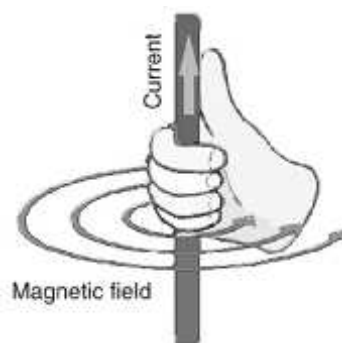


Figura 5 Regla de la mano derecha
Fuente: (Stephen J. Chapman. 2012).
Elaboración: El Autor.

2.2.3 Campos magnéticos

Este campo puede ser producido por corrientes eléctricas e indirectamente mediante el fenómeno de una carga eléctrica puntual q , que se desplaza a una velocidad v , en presencia de un campo magnético, sufre o experimenta los efectos de una fuerza que es perpendicular y proporcional, tanto a la velocidad v como al campo de inducción magnética B , así como lo muestra la ecuación (1) y la Figura 6. (Tzuc & Cetina, 2015).

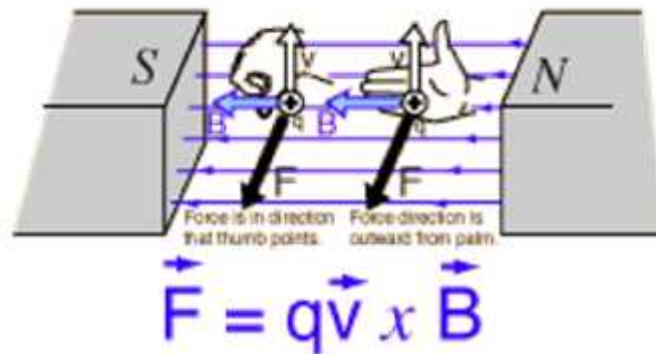


Figura 6 Campo magnético resultante

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Forces/funfor.html>

Elaboración: El Autor.

$$F = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

Dónde:

F : Fuerza magnética.

q : Carga eléctrica puntual.

v : Velocidad.

B : Campo de inducción magnética.

2.2.4 Inducción electromagnética

Existe otra relación importante y es la de la producción de electricidad con la ayuda del magnetismo. Cuando se desplaza un conductor a través de un campo magnético se produce un voltaje en el conductor; en este caso el campo magnético actúa como una fuerza que se resiste al movimiento del conductor. Para desplazar el conductor sobre el campo magnético es necesario un trabajo y esta energía utilizada para desplazar el conductor es igual a la energía eléctrica generada o inducida en el conductor (Matthew et al.,2003).

2.2.5 Ecuación de fuerza electromotriz (f.e.m)

El voltaje inducido en cualquier máquina depende de tres factores:

-) El flujo ϕ en la máquina eléctrica
-) La velocidad angular ω_m del rotor de la máquina
-) Una constante que depende de la construcción de la máquina.

El voltaje del inducido de una máquina real es igual al número de conductores por camino de corriente multiplicado por el voltaje en cada conductor. El voltaje en cualquier conductor nos muestra la ecuación (2) (Matthew et al.,2003).

$$e_{\text{ind}} = e = v \quad (2)$$

Y el voltaje que sale del inducido de una máquina real nos muestra la ecuación (3) (Chapman et al.,2012).

$$E_a = \frac{Z}{a} \quad (3)$$

Donde Z es el número total de conductores y a es el número de caminos de corriente. La velocidad de cada conductor en el rotor se puede expresar como lo muestra la ecuación (4) (Chapman et al.,2012) .

$$v = r\omega_m \quad (4)$$

; donde r es el radio del rotor mostrado en la ecuación (4), y en la ecuación (5) se muestra la fuerza electromotriz generada en la armadura del generador (Chapman et al.,2012).

$$E_a = \frac{Z \omega_m B}{a} \quad (5)$$

El flujo de un polo es igual a la densidad de flujo bajo el polo multiplicado por el área del polo, la cual se muestra en la ecuación (6) (Chapman et al.,2012).

$$\phi = BA_p \quad (6)$$

Como el rotor tiene forma cilíndrica el área esta por $A = 2\pi r l$ y si hay P polos en una maquina, entonces la porción de área asociada con cada polo es el área total A dividida entre el número de polos, está dada en la ecuación (7) (Chapman et al.,2012).

$$A_p = \frac{A}{p} = \frac{2\pi}{p} \quad (7)$$

El flujo por polo total en la maquina está dada por la ecuación (8) (Chapman et al.,2012).

$$\phi = BA_p = \frac{2\pi}{p} \quad (8)$$

El voltaje interno generado en la maquina se puede expresar como nos muestra la ecuación (9) (Chapman et al.,2012).

$$E_A = K \omega_m \quad (9)$$

Donde, k está dada por la ecuación (10).

$$K = \frac{Z}{2\pi} \quad (10)$$

2.2.6 Acción del generador de corriente continua

La acción de generar electricidad se ilustra en la Figura 7 muestra un campo magnético establecido entre los polos norte y sur de un imán, a través de este campo se extiende un conductor que se mueve en la dirección indicada entre los polos del imán produciendo en él una presión eléctrica que hace circular los electrones, en la cual fluye una corriente eléctrica (Sergey, 2008).

Si el circuito se completa en un bucle uniendo los dos extremos del conductor, entonces una corriente eléctrica fluirá por el bucle. La corriente eléctrica solamente fluirá solo cuando el cable se mueve a través del campo magnético (Sergey et al.,2008).

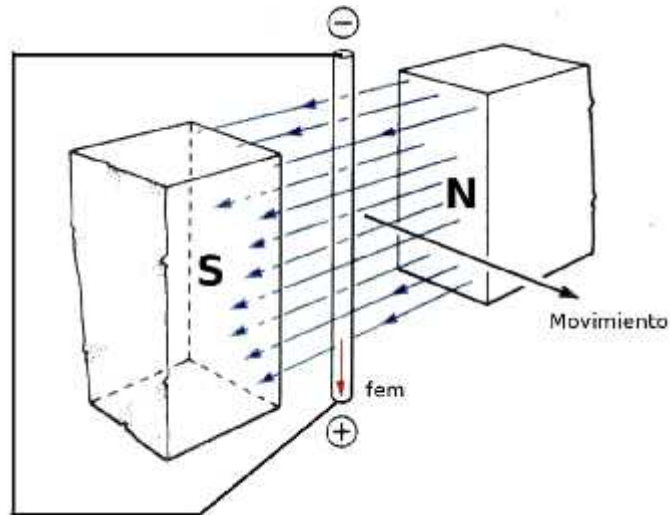


Figura 7 Conductor moviéndose a través de un campo magnético
Fuente: (Stephen J. Chapman. 2012).
Elaboración: El Autor.

2.3 Generador de corriente continua

Estos generadores son accionados por una fuente de potencia mecánica, que normalmente se llama el motor primario del generador, que puede ser una turbina de viento, un motor a diésel o incluso un motor eléctrico. Un generador de corriente continua que se muestra en la Figura 8 está formado por un estator o inductor que es la parte fija del generador y un rotor o inducido que es la parte móvil (Sebastian & Alvarado, 2012).

Los Generadores de corriente continua se asemejan entre sí por su voltaje, potencia nominal, eficiencia y regulación de voltaje (Chapman et al.,2012). La regulación del voltaje la define la ecuación (11):

$$V = \frac{V - V}{V} \times 100\% \quad (11)$$

Dónde:

V : Voltaje de regulación.

V : Voltaje en los terminales del generador a plena carga.

V : Voltaje del generador en vacío.

Se relaciona una forma característica voltaje – corriente del generador; una regulación de voltaje positiva significa una característica descendente y una regulación de voltaje negativa significa una característica ascendente (Chapman et al.,2012).

Un generador de corriente continua puede describirse teóricamente mediante ecuaciones diferenciales. Existen dos parámetros importantes para el modelamiento matemático de una máquina eléctrica: la fuerza electromotriz inducida (f.e.m) y el torque electromagnético o torque mecánico interno (t.m.i) (Matthew et al.,2003). Estos parámetros están descritos por las ecuaciones (12) y (13).

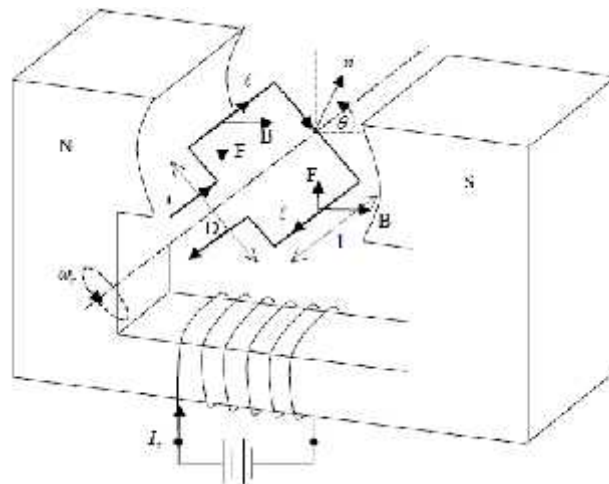


Figura 8 Generador fundamental de corriente continua
Fuente: (Stephen J. Chapman. 2012).
Elaboración: El Autor

Los generadores de excitación independiente o separada se clasifican en:

-) Generadores excitados por una fuente de corriente continua exterior
-) Generadores con imanes permanentes

Los generadores de excitación propia o auto excitados se clasifican en:

-) Generadores shunt, derivación o paralelo
-) Generadores serie
-) Generadores compound, mixto o compuesto

Es necesario tener en cuenta dos expresiones para el análisis de estas máquinas, la expresión de la fuerza electromotriz inducida es la ecuación (12) y del torque electromagnético o torque mecánico es la ecuación (13), estas ecuaciones resultan resolviendo el circuito correspondiente a la Figura 9. (Chapman et al.,2012).

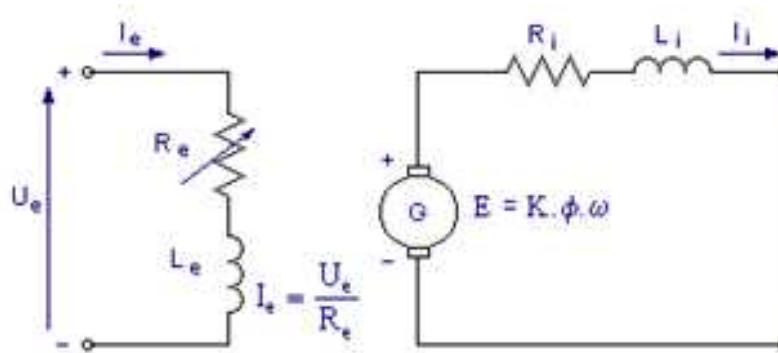


Figura 9 Generador de excitación independiente.

Fuente: (Stephen J. Chapman. 2012).

Elaboración: El Autor

$$E_a = K_a \cdot \phi_p \cdot \omega \quad (12)$$

$$T = K_a \cdot \phi_p \cdot I_a \quad (13)$$

Dónde:

E_a : Fuerza electromotriz generada en voltios (V).

K_a : Constante que depende de las características de la máquina.

ϕ_p : Flujo magnético por cada polo en webers (Wb).

ω : Velocidad de giro en revoluciones por minuto.

La constante K_a es una constante que depende de la reluctancia del núcleo y del número de vueltas por polo N_p . La fuerza electromotriz producida por el generador depende de la constante K_a , del flujo magnético y de la velocidad del rotor (Chapman et al.,2012).

2.3.1 Generadores con excitación independiente o separada

Este generador de excitación independiente tendrá el devanado del inductor conectado a una fuente externa a la máquina, como nos muestra la Figura 10. Este tipo de generador no necesitaría la magnetización previa del inductor para conseguir magnetismo remanente, se hace girar el rotor de la máquina y se conecta una fuente de tensión al bobinado inductor para provocar la corriente de excitación I_e . En este tipo de generadores la corriente de excitación I_e no depende de tensión inducida E_a por el propio generador como lo muestra la ecuación (14), y el torque de torsión mecánica rotacional está dada por la ecuación (15) (Chapman et al.,2012).

$$E_a = K_a \cdot \phi_p \cdot \omega_m \quad (14)$$

Donde:

K_a : velocidad angular del rotor

ϕ_p : flujo del rotor

ω_m : velocidad angular del rotor

$$T = K_a \cdot \phi_p \cdot I_a \quad (15)$$

Donde:

K_a : velocidad angular del rotor

ϕ_p : flujo del rotor

I_a : velocidad angular del rotor

En la Figura 10, se muestra el circuito equivalente de un generador de corriente continua con excitación independiente.

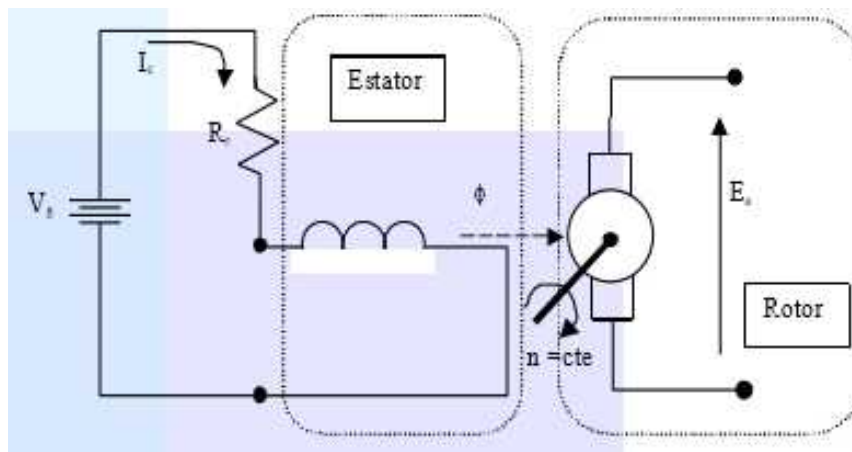


Figura 10 Generador con excitación independiente
Fuente: (Desempeño de máquinas de corriente continua reales)
Elaboración: El Autor

Se aplica la segunda ley de Kirchoff en el circuito y se está cumpliendo lo que nos muestra la ecuación (16) (Chapman, 2012).

$$E_a = L_a \frac{d i_a}{d t} + R_a I_a + u_a \quad (16)$$

En el caso de los generadores la fuerza electromotriz generada es mayor a la velocidad en la armadura del generador como nos muestra la ecuación (17) (Chapman et al.,2012).

$$E_a > u_a \quad (17)$$

La ecuación (18) se puede reordenar para conseguir la primera ecuación diferencial (19) que describe el sistema (Chapman et al.,2012).

$$\frac{d i_a}{d t} = \frac{E_a}{L_a} - \frac{(R_a + R_L)}{L_a} i_a \quad (18)$$

$$\frac{d \omega_r}{d t} = -\frac{k_a}{J} i_a - \frac{B_m}{J} \omega_r + \frac{1}{J} T_p \quad (19)$$

2.3.2 Generadores autoexcitados

La autoexcitación es la excitación de la maquina por medio de una corriente que suministra ella misma o la misma red a la que va conectado el inducido (Torres, 2011).

En este tipo de generador no sería necesaria la magnetización previa del inductor para conseguir magnetismo remanente, simplemente hacemos girar el rotor de la máquina y conectamos una fuente de tensión al bobinado inductor para provocar la corriente de excitación I_e (Torres, 2011).

2.3.3 Generadores shunt, derivación o en paralelo

En este tipo de generador la energía para la alimentación del campo polar se toma de la f.e.m. generada por el mismo generador mediante la conexión en paralelo del devanado de campo con la armadura(Chapman et al.,2012).

En la Figura 11 se muestra el circuito equivalente de un generador con excitación shunt.

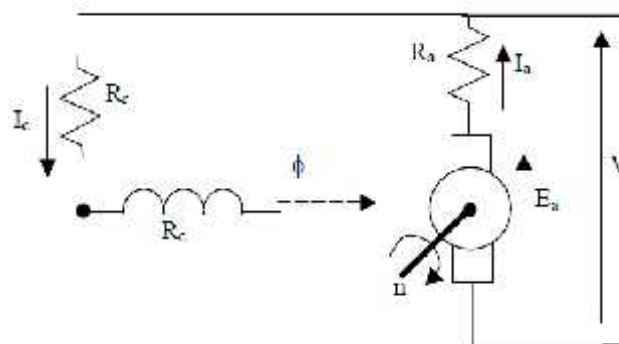


Figura 11 Generador shunt, derivación o en paralelo
Fuente: (Stephen J. Chapman. 2012).
Elaboración: El Autor

Si se suman las corrientes en uno de los nodos del circuito, se cumple que la corriente de armadura I_a de la ecuación (20) es igual a la suma de las corrientes de excitación I_f y de carga I_L (Chapman et al.,2012).

$$I_a = I_p + I_q \quad (20)$$

La corriente de excitación depende de la tensión en los bornes V_T de la máquina, esta corriente también está dada por la ecuación (21) (Chapman et al.,2012).

$$I_p = \frac{V_T}{R_f + R_e} \quad (21)$$

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff, en el circuito de la armadura, se tiene que la ecuación (22) es el voltaje en la armadura (Chapman et al.,2012).

$$E_a = V_T + I_a \cdot r_a \quad (22)$$

En vacío o circuito abierto se cumplen las siguientes igualdades como se muestra en la ecuación (23).

$$I_q = 0 \text{ y } I_a = I_p. \quad (23)$$

2.3.4 Generadores en serie

En este generador la energía para la alimentación del campo polar se toma de la fuerza electromotriz generada mediante la conexión en serie del devanado de campo con la armadura (Galvanica, 2013).

En la Figura 12, se puede observar el esquema de un generador en serie.

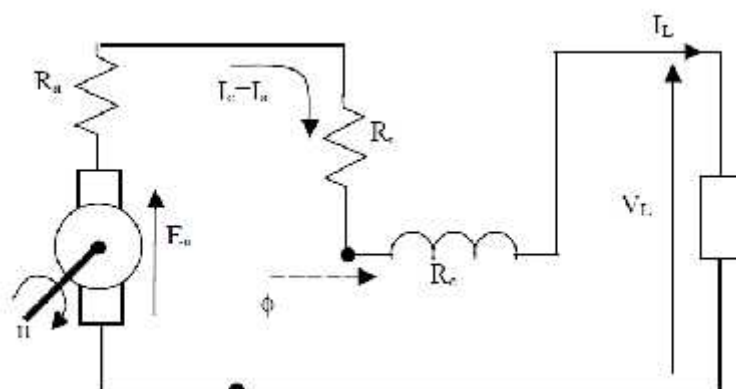


Figura 12 Generador en serie
Fuente: (Stephen J. Chapman. 2012).
Elaboración: El Autor

Este generador cumple que todas las corrientes son iguales; corriente de armadura, corriente de excitación y corriente de carga como se muestra en la ecuación (24) (Chapman et al.,2012).

$$I = I_e = I_q = I_a \quad (24)$$

2.3.5 Generadores compound, mixto o compuesto

Es un generador de corriente continua el cual está compuesto con un campo en derivación, conectados de tal manera que las fuerzas electromotrices de los dos se suman, tal como nos muestra la Figura 13 (Weber, 2009).

Las características relevantes son que conforme se eleva I_A , aumenta también la caída de voltaje debido a la ecuación (25) (Chapman et al.,2012).

$$I_A(R_A + R_S) \quad (25)$$

Esto causa un incremento en los terminales del generador en V_T ; a medida que se eleva I_A , aumenta la fuerza magnetomotriz y esto a su vez aumenta el flujo del generador. Estos dos efectos se oponen el uno al otro, uno tiende a incrementar V_T y el otro a disminuir el V_T (Chapman et al.,2012).

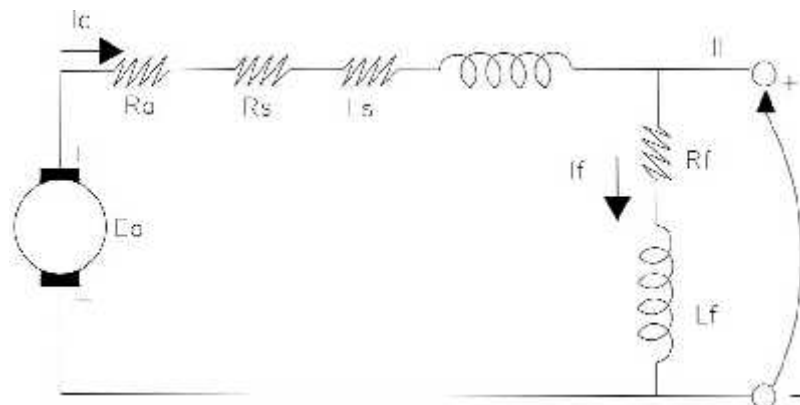


Figura 13 Generador compound, mixto o compuesto
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

2.4 Máquina lineal de corriente continua

Una máquina lineal de cd, consta de una batería y una resistencia conectadas a un par de rieles como se muestra en la Figura 14, donde existe un campo magnético constante de densidad uniforme, sobre el cual se dispone una barra de metal(Chapman et al.,2012).

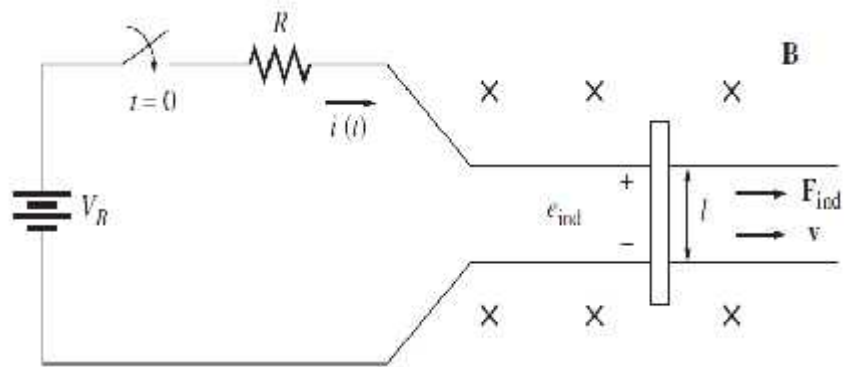


Figura 14 Máquina lineal (campo magnético dirigido hacia el interior de la página)
 Fuente: (E.Sergey,Lyshevski)
 Elaboración: El Autor

El comportamiento de la máquina eléctrica se puede explicar utilizando 4 ecuaciones fundamentales.

La primera ecuación relaciona la fuerza aplicada al alambre conductor en presencia de un campo magnético como nos muestra la ecuación (26) (Chapman et al.,2012).

$$F = i(l \times B) \quad (26)$$

Donde:

F : fuerza aplicada al alambre

i : magnitud de la corriente en el alambre

l : longitud del alambre, la dirección de este vector está dada por el flujo de la corriente

B : vector de densidad de flujo magnético.

La segunda ecuación menciona el voltaje inducido en el alambre que se mueve en un campo magnético el cual está dado por la ecuación (27) (Chapman et al.,2012).

$$e_{\text{ind}} = (v \times B) \cdot l \quad (27)$$

Donde:

e_{ind} : voltaje inducido en el conductor

v : velocidad en el alambre

B : vector de densidad de flujo magnético.

l : longitud del conductor

La tercera ecuación está dada por la aplicación de la ley de voltajes de Kirchhoff que nos muestra la ecuación (28) (Chapman et al.,2012).

$$V_B - il - e_{\dot{h}} = 0 \quad (28)$$

Y la cuarta ecuación es la fuerza neta sobre la barra que se mueve sobre los rieles está dada por la ley de Newton que nos muestra la ecuación (29) (Chapman et al.,2012).

$$F_n = m \quad (29)$$

Cuando la barra está en reposo como nos muestra la ecuación (30) y se puede deducir de la ecuación de la corriente que fluye por los rieles y por de la barra es igual a la ecuación (31) (Chapman et al.,2012).

$$e_{\dot{h}} = 0 \quad (30)$$

$$i = V_B/R \quad (31)$$

La corriente que fluye por un conductor dentro de un campo magnético induce una fuerza en el conductor dada por la ecuación (32) (Chapman et al.,2012).

$$F_{\dot{h}} = il \quad (32)$$

La barra se acelera hacia la derecha induciéndose en ella un voltaje $e_{\dot{h}}$ a medida que incrementa la velocidad. El voltaje inducido reduce la corriente que fluye por la barra provocando que la fuerza inducida disminuya hasta hacerse cero (Chapman et al.,2012).

En ese momento la ecuación (33) nos muestra que:

$$e_{\dot{h}} = V_B \quad (33)$$

y la barra se mueve a velocidad de vacío constante (Chapman et al.,2012).

2.5 Máquina lineal de corriente continua como generador

Para que la máquina de corriente directa funcione como generador se aplica una fuerza F_a en la dirección del movimiento de la barra, que hará que la barra acelere en la dirección del movimiento aumentando la velocidad de la misma. Si se aumenta la velocidad el voltaje inducido se incrementa $e_{\dot{h}}$ como nos muestra la ecuación (34) (Sergey et al.,2008).

$$\epsilon_{\text{b}} = \bar{v} \quad (34)$$

y será mayor que el voltaje de la batería V_B . Cuando $\epsilon_{\text{b}} > V_B$, la corriente se invierte y está dada por la ecuación (35) (Sergey et al.,2008).

$$i = \frac{\epsilon_{\text{b}} - V_B}{R} \quad (35)$$

**CAPÍTULO III: MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE
GENERADORES ELÉCTRICOS DE CORRIENTE CONTINUA**

3.1 Introducción

Para poder analizar y desarrollar estos modelamientos matemáticos se requiere tener conocimientos físicos del sistema, unidades de las constantes que aparecen en el diseño, la selección adecuada de las variables de estado de cada generador y tener conocimientos en el desarrollo de ecuaciones diferenciales y a su vez poder realizar la simulación en la plataforma Simulink una herramienta del programa Matlab (Aung, 2014).

En esta propuesta se analiza tres modelos matemáticos de generadores de corriente continua los mismos que son el generador compound, shunt y serie; se presenta un análisis físico que expone el conocimiento sobre los parámetros y las unidades físicas de los generadores de corriente continua. Dentro de este trabajo investigativo se presenta los modelos matemáticos obtenidos y las simulaciones de cada uno de ellos y se determina el comportamiento del generador con respecto al voltaje y potencia generada, el objetivo principal de este capítulo es modelar los tres generadores de corriente continua antes mencionados y analizar el tiempo de inicialización de cada uno de los generadores.

Es importante mencionar que cada modelo matemático se obtuvo mediante ecuaciones diferenciales y para resolver las mismas se utilizó la ayuda del software Matlab/Simulink, y se presenta tres modelos de generadores de corriente continua.

Se empieza derivando tres modelos matemáticos y se realiza las simulaciones que aumenten la dinámica del generador. Las simulaciones de los modelos se realizan utilizando Matlab/Simulink. Estas simulaciones se pueden dar de diversas formas (espacio de estados, transformada de Laplace, ecuaciones diferenciales o mediante diagrama de bloques).

3.2 Modelamiento matemático de los generadores de corriente continua

El modelo matemático que estudia la dinámica del circuito del generador de corriente continua, se encuentra utilizando la ley de Kirchhoff de voltajes estudiando la carga resistiva, como nos muestra la ecuación (6); y la segunda ley de movimiento de Newton mapea la dinámica torsional-mecánica del generador, que se muestra en la ecuación (36) y (37).

Estas dos leyes permiten modelar los generadores y obtener sus ecuaciones para el respectivo análisis transitorio y poderlas así simular y obtener los respectivos resultados. Se obtiene la ecuación (36) de la dinámica del generador con el análisis transitorio se obtiene la ecuación (37) la que detalla la corriente en la armadura. La Figura 15 presenta un generador de corriente continua accionado por una maquina impulsadora externa.

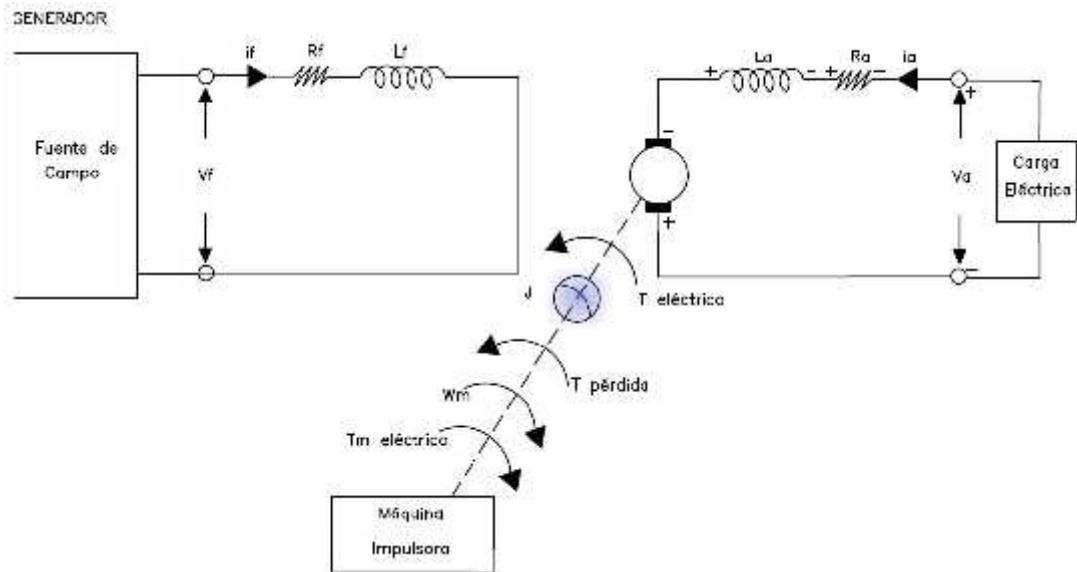


Figura 15 Generador de corriente continua
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

$$-V_a i_a + \frac{d_a}{d} L_a + R_a i_a + V_a = 0 \quad (36)$$

$$-K_a W_m + \frac{d_a}{d} L_a + R_a i_a + V_a = 0 \quad r \quad V_a = K_a W_m$$

$$\frac{d_a}{d} = -\frac{V_a}{L_a} - \frac{R_a i_a}{L_a} + \frac{K_a W_m}{L_a} \quad (37)$$

Donde i_a es la corriente de armadura del generador; W_m es la velocidad angular del motor primario y generador; R_a es la resistencia de la armadura y L_a es la inductancia del devanado del rotor del generador. El par de carga para el motor primario es el par electromagnético del generador, como lo muestra la ecuación (38).

$$T_L = k_a i_a \quad (38)$$

Y así tenemos, las ecuaciones que modelan el análisis transitorio de un generador de corriente continua, desde la ecuación (39) a la ecuación (42).

$$\frac{d_x}{d} = A_x + B_u \quad (49)$$

$$y = H_x + D_u \quad (40)$$

$$\frac{d_a}{d} = -\frac{R_a i_a}{L_a} - \frac{K_a W_m}{L_a} + \frac{1}{L_a} U_a \quad (41)$$

$$\frac{d}{dt} r = \frac{K_a i_a}{J} - \frac{B_m W_r}{J} - \frac{1}{J} T_L \quad (42)$$

Se desarrolla la ecuación (41) y (42) mediante matrices, obteniendo los siguientes resultados que se muestran a continuación:

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} W_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_a}{L_a} \\ \frac{K_a}{J} & -\frac{B_m}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ W_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} U_a - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} T_L$$

$$X_1 = i_a \quad X_2 = W_r \quad U = U_a \quad \begin{bmatrix} i_a \\ W_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$$

$$Y = W_r = H_X + L_U = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ W_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} U_a$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} U$$

3.3 Diseño del modelo de generador DC compound

Este diseño de generador, posee enrollado paralelo y serie las cuales son posibles de configurar como máquinas compound. Este modelo de configuración tiene las características de emplear el campo en disposición serie-paralelo de modo de combinar las características de operación shunt y serie. Esta configuración suma los flujos generados por el campo serie y paralelo y se la conoce como configuración compound aditiva. Existe también la configuración compound diferencial en donde los campos se restan (Siemens, 2009).

3.3.1 Circuito equivalente del generador DC compound

La Figura 16 muestra el circuito equivalente del generador compound cuyas variables son:

R_L : resistencia de carga del generador

V_L : voltaje en la carga

I_L : corriente de carga

E_a : voltaje en la armadura

R_a : resistencia de armadura

I_a : corriente en armadura

R_c : resistencia del campo en serie

R_c : resistencia del campo en paralelo

I_c : corriente de campo en paralelo

$n = T_1$: velocidad del rotor

R_r : resistencia variable

R_L : resistencia de carga

ϕ_s : flujo de campo en serie

ϕ_p : flujo de campo en paralelo

Es importante mencionar que el generador compound aditivo con derivación corta, se conecta en paralelo inmediatamente en los bornes de la armadura (Siemens, 2009).

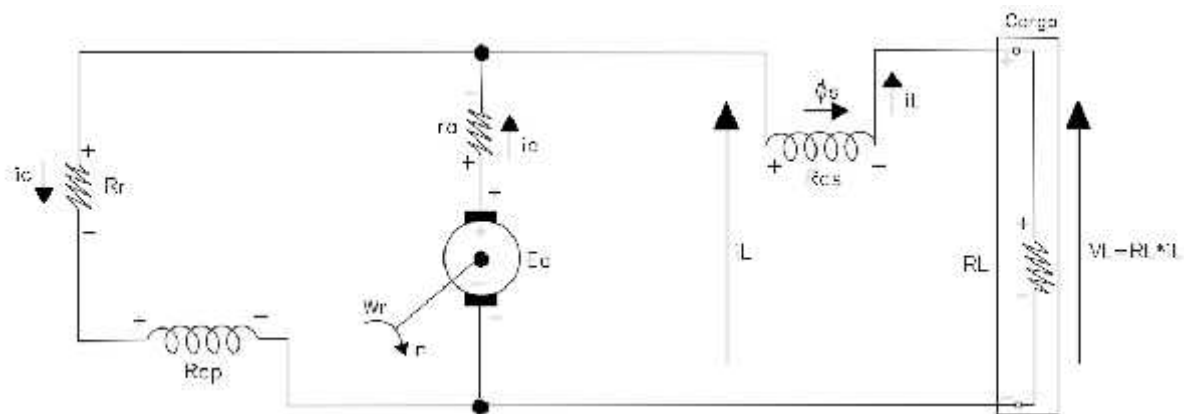


Figura 16 Generador DC compound
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

3.3.2 Desarrollo del circuito del generador DC compound mediante teoría de circuitos básicos

La Figura 17 nos permite desarrollar las siguientes relaciones, expresadas en ecuaciones desde la (43) hasta la (46).

$$i_a = i_L + i_c \quad (43)$$

$$E_a = k \phi \quad (44)$$

$$\phi = \phi_s + \phi_p \quad (45)$$

$$E_a - R_a i_a - V_a = 0 \quad (46)$$

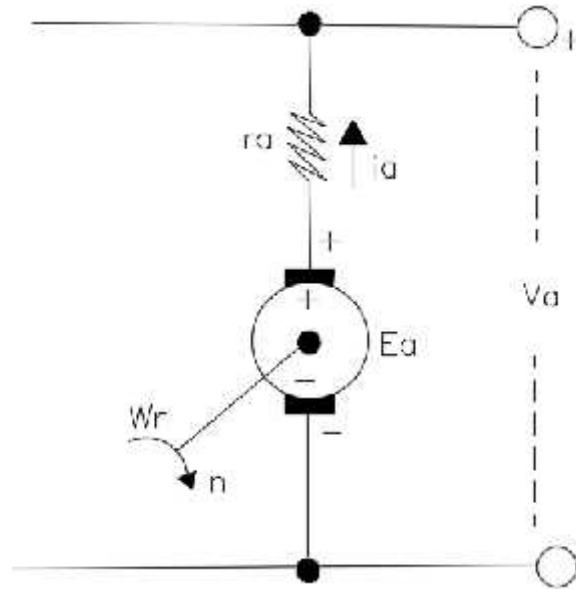


Figura 17 Resolviendo por leyes de Kirchoff el generador compound parte 1
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

La Figura 18 nos permite resolver el circuito y establecer la ecuación (47).

$$V_a - R_c i_L - V_L = 0 \quad (47)$$

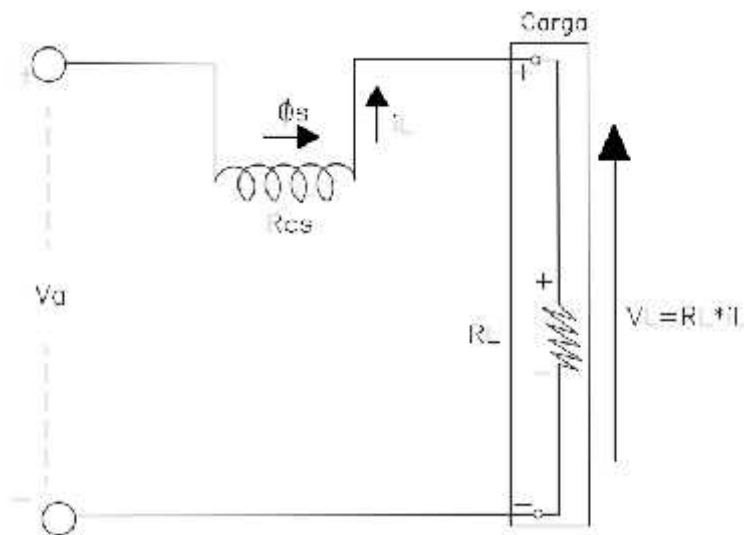


Figura 18 Resolviendo por leyes de Kirchoff el generador compound parte 2
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

La Figura 19 nos permite resolver el circuito y establecer la ecuación (48).

$$V_a - R_r i_c - R_c i_c = 0 \quad (48)$$

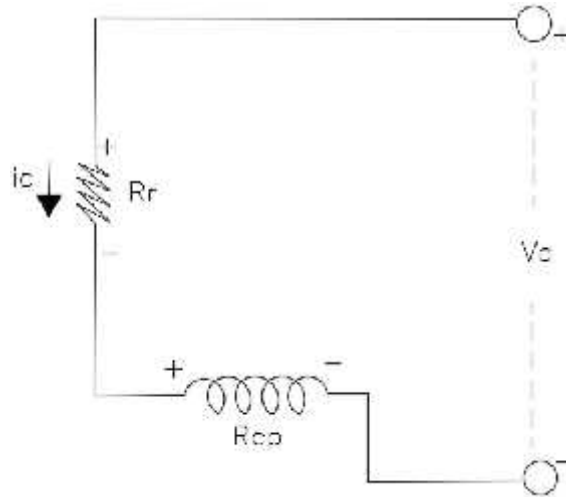


Figura 19 Resolviendo por leyes de Kirchoff el generador compound parte 3
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

3.3.3 Desarrollo del circuito del generador DC compound mediante análisis transitorio

Se escribe nuevamente la ecuación diferencial que describe el modelo de la segunda ley de movimiento de Newton la cual mapea la dinámica torsional-mecánica del generador dada por la ecuación (49).

$$\frac{d}{dt} \omega_r = -\frac{k_a}{J} I_a - \frac{B_m}{J} \omega_r + \frac{1}{J} T_r \quad (49)$$

La Figura 20 permite establecer las siguientes relaciones, las ecuaciones obtenidas a partir de la Figura 16, están desarrolladas mediante el software Matlab/Simulink como nos muestra el Anexo 1.

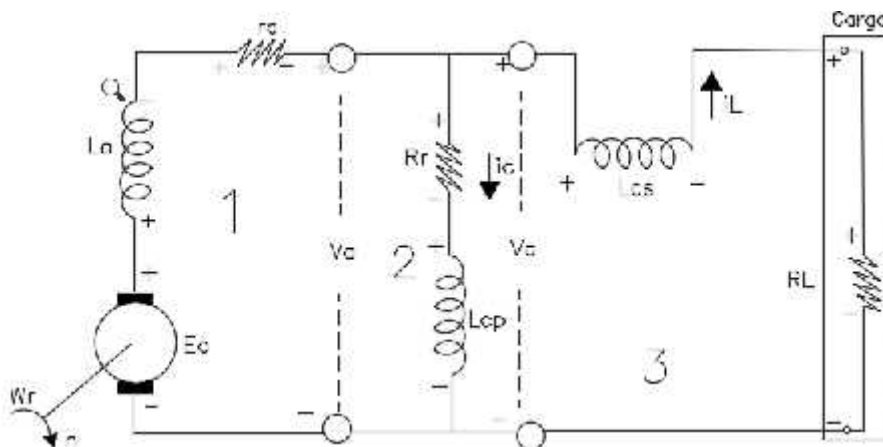


Figura 20 Análisis transitorio del generador dc compound
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

PARTE 1

$$E_a - L_a \frac{d i_a}{d t} - r_a i_a - V_a = 0 \quad (50)$$

$$L_a \frac{d i_a}{d t} = E_a - r_a i_a - V_a = 0$$

El eje ón 51 s, r e v d E a a k Ø W

$$\frac{d i_a}{d t} = - \frac{k Ø W}{L_a} - \frac{r_a i_a}{L_a} - \frac{V_a}{L_a} \quad (51)$$

PARTE 2

$$V_a - R_r i_c - L_c \frac{d i_c}{d t} = 0 \quad (52)$$

$$L_c \frac{d i_c}{d t} = V_a - R_r i_c$$

$$\frac{d i_c}{d t} = \frac{V_a}{L_c} - \frac{R_r i_c}{L_c} \quad (53)$$

PARTE 3

$$V_a - L_c \frac{d i_L}{d t} - V_L = 0 \quad (54)$$

$$L_c \frac{d i_L}{d t} = V_a - V_L$$

$$\frac{d i_L}{d t} = \frac{V_a}{L_c} - \frac{V_L}{L_c} \quad (55)$$

3.3.4 Parámetros para el diseño del generador DC compound

Se deben establecer los parámetros eléctricos de la maquina eléctrica. La Tabla 1 muestra los parámetros utilizados para la simulación. En el entorno de Matlab/Simulink, se simula el modelo matemático derivado del generador de corriente continua compound.

Se desarrolla un diagrama en Simulink basado en un conjunto de ecuaciones diferenciales. Para la simulación en el entorno Matlab/Simulink se utiliza los siguientes valores de parámetros tanto en los componentes del generador, como las variaciones de cada elemento, que se muestran a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros del generador DC compound

Parámetro	Unidad	valor	unidad
Resistencia de armadura	ra	0.9	
Resistencia Carga	RL	3	
Resistencia reóstato(variable)	Rr	40	
Inductancia de la armadura del generador	La	0.4	Henrios
Inductancia en el campos	Lcs	0.4	Henrios
Constante voltaje	Kg	0.27	
Constante carga	KL	0.11	
Coefficiente de fricción	Bm	0.1	
Inductancia de la armadura del motor	J	0.01	Henrios
Voltaje	ua	10	V
Torque	Tpm	185	Nm
Flujo campo serie	phi1	0.15	
Flujo campo paralelo	phi2	0.15	

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

3.4 Diseño del modelo de generador DC shunt

Este generador es denominado generador auto-excitado, debido a que existe un proceso de realimentación positiva como el que muestra la Figura 21.

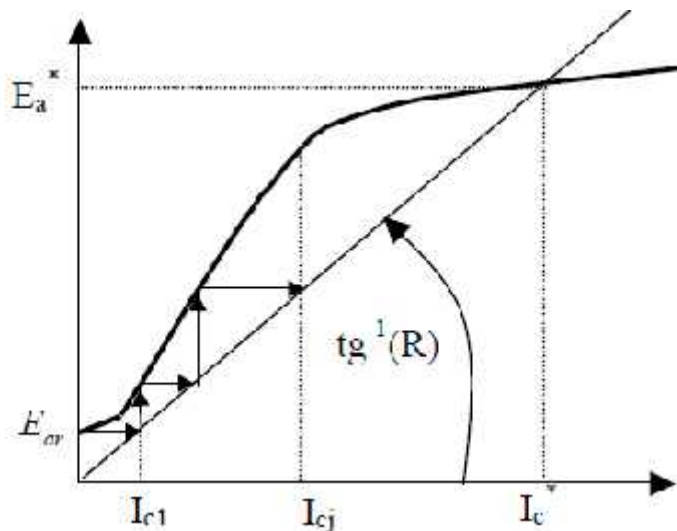


Figura 21 Fenómeno de auto – excitación de un generador shunt.

Fuente: (Siemens, W).

Elaboración: El Autor.

Si el generador genera la tensión al menos una vez, existe un flujo remanente que permite

que aparezca una tensión inducida en la armadura. La resistencia de campo es muy elevada, la corriente al conectar la carga resulta insuficiente para elevar la tensión y el fenómeno de auto-excitación no se produce (Siemens, 2009).

El proceso de auto-excitación limita gracias a la característica de saturación del material ferromagnético estabilizando los valores de tensión y corriente generadas de acuerdo a la velocidad de giro del eje y al valor de la resistencia de campo nos muestra la ecuación (56)(Siemens, 2009).

Para que exista este proceso se debe requerir de las siguientes condiciones:

-) El flujo generado en primera instancia debe sumarse al flujo remanente existente, si esto no se da el campo se debilita y no se produce la generación.
-) El valor de la resistencia de campo nos muestra la ecuación (56) donde la R Debe ser menor a un cierto valor crítico R_c (Chapman et al.,2012).

$$R = R_c + R_r \quad (56)$$

3.4.1 Circuito equivalente del generador DC shunt

La Figura 22 muestra el circuito equivalente de un generador shunt, las variables son las siguientes:

R_L : resistencia de carga

V_L : voltaje de carga

I_L : corriente de carga

E_a : voltaje en la armadura

R_a : resistencia de armadura

I_a : corriente en armadura

V_a : voltaje de armadura

R_c : resistencia de campo

I_c : corriente de campo

$n = T_1$: velocidad del rotor

R_r : resistencia variable

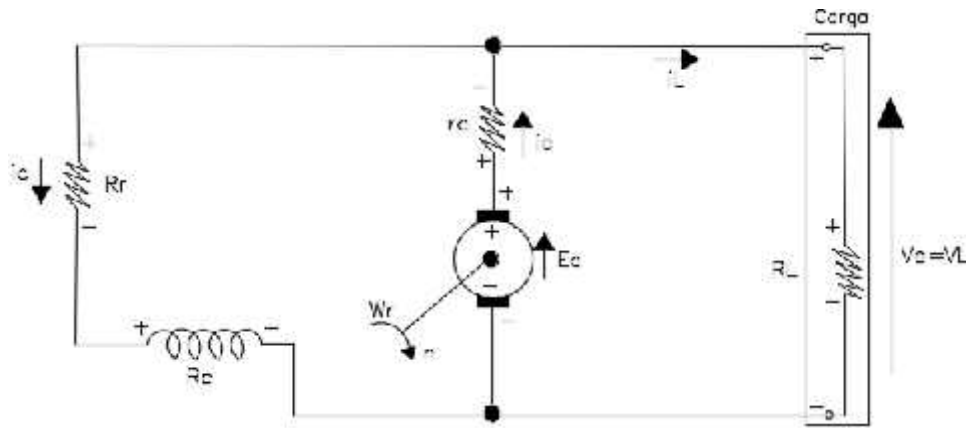


Figura 22 Generador DC shunt
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

3.4.2 Desarrollo del circuito del generador DC shunt mediante teoría de circuitos básicos

La Figura 23 permite resolver el circuito y establecer la siguiente ecuación (57).

$$V_c - i_c R_f - i_c R_c = 0 \quad (57)$$

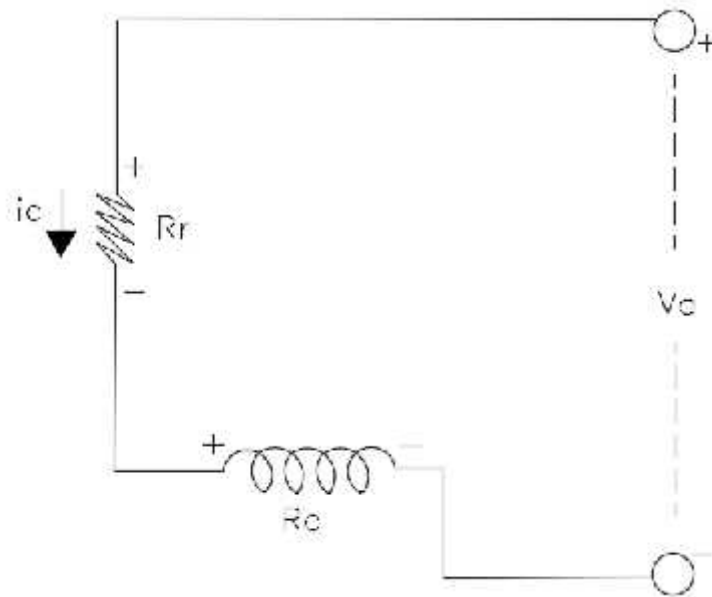


Figura 23 Resolviendo por leyes de Kirchhoff del generador shunt parte 1
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

La Figura 24 permite resolver el circuito y establecer las ecuaciones (58) y (59)

$$E_c - R_a i_a - V_c = 0 \quad (58)$$

$$V_c = V_e = V_L = 0 \quad (59)$$

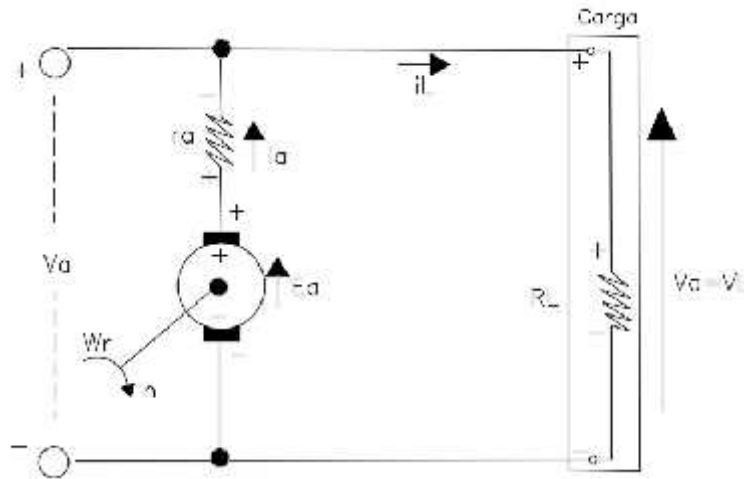


Figura 24 Resolviendo por leyes de Kirchhoff del generador shunt parte 2
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

3.4.3 Desarrollo del circuito del generador DC shunt mediante análisis transitorio

La ecuación (60), nos muestra la segunda ley de Newton la cual nos muestra el análisis transitorio de la dinámica del generador shunt.

$$\frac{d}{dt} \omega_r = -\frac{k_a}{J} i_a - \frac{B_m}{J} \omega_r + \frac{1}{J} T_p \quad (60)$$

En las siguientes ecuaciones se presenta el modelo matemático de una maquina eléctrica de DC shunt, y la Figura 25 nos muestra el análisis transitorio del generador DC shunt.

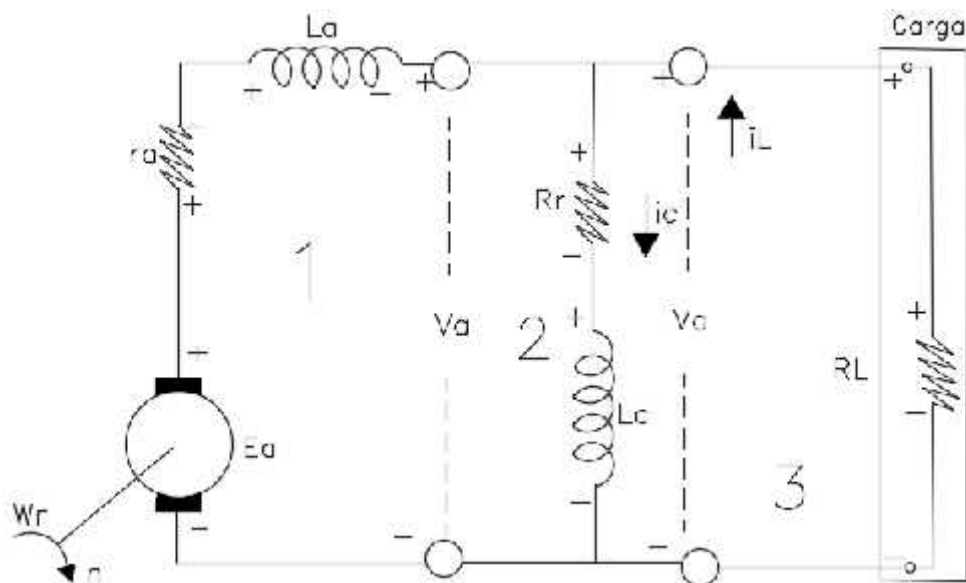


Figura 25 Análisis transitorio del generador dc shunt.
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

Para realizar el análisis transitorio se divide en tres partes, las mismas ecuaciones que se

muestran a continuación son las ecuaciones diferenciales resultantes del desarrollo del circuito del generador DC shunt (Siemens, 2009).

Las ecuaciones (61), (62), (63), (64), (65), (66), están desarrolladas en el Anexo 2, con la ayuda del software Matlab/Simulink.

PARTE 1

$$E_a - r_a i_a - L_a \frac{d i_a}{d t} - V_a = 0 \quad (61)$$

$$L_a \frac{d i_a}{d t} = E_a - r_a i_a - V_a = 0$$

E l i e ó n 51 s i r e v d E a a k Ø W

$$\frac{d i_a}{d t} = \frac{k Ø W}{L_a} - \frac{r_a i_a}{L_a} - \frac{V_a}{L_a} \quad (62)$$

PARTE 2

$$V_e - i_e R_r - L_e \frac{d i_e}{d t} = 0 \quad (63)$$

$$L_e \frac{d i_e}{d t} = V_e - i_e R_r$$

$$\frac{d i_e}{d t} = \frac{V_e}{L_e} - \frac{i_e R_r}{L_e} \quad (64)$$

PARTE 3

E l i e ó n 65 s i r l i i a i a - i e

$$\frac{d i_a}{d t} = \frac{k Ø W}{L_a} - \frac{r_a i_a}{L_a} - \frac{V_a}{L_a} \quad (65)$$

$$\frac{d i_e}{d t} = \frac{V_e}{L_e} - \frac{i_e R_r}{L_e}$$

$$\frac{d i_a}{d t} = \frac{k Ø W}{L_a} - \frac{r_a i_a}{L_a} - \frac{(i_a - i_e) R_r}{L_a}$$

$$\frac{d i_e}{d t} = \frac{(i_a - i_e) R_r}{L_a} - \frac{i_e R_r}{L_a} \quad (66)$$

Donde R_L es la resistencia de carga; K_{α} es la constante f.e.m (torque) del generador; B_m y W_f son los coeficientes de fricción; J y L_{α} son los momentos de inercia del motor primario y generador.

3.4.4 Parámetros para el diseño del generador DC shunt

El software Matlab/Simulink se utiliza para realizar las respectivas simulaciones con los siguientes valores tanto en los componentes del generador, como las variaciones de carga, la Tabla 2 muestra los parámetros para la simulación del generador de corriente continua shunt.

Tabla 2 Parámetros del generador DC shunt

Parámetro	Simbología	valor	unidad
Resistencia de armadura	ra	1.1	
Resistencia Carga	RL	3	
Resistencia reóstato(variable)	Rr	40	
Inductancia de la armadura del generador	La	0.4	Henrios
Inductancia en el campos	Lc	0.4	Henrios
Constante voltaje	Kg	0.27	V
Constante carga	KL	0.11	
Coeficiente de fricción	Bm	0.1	
Inductancia de la armadura del motor	J	0.01	Henrios
Voltaje	ua	10	V
Torque	Tpm	185	Nm
Flujo campo	phi	0.30	

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

3.5 Diseño del modelo del generador DC en serie

Este generador funciona de una manera similar que el generador shunt, en el cual el flujo remanente posibilita la existencia de una corriente inicial que excita el campo y este aumenta la tensión generada, consecuentemente la corriente y así sucesivamente hasta saturar el núcleo. Cuando la corriente es constante la caída de tensión se explica por un efecto predominante de la reacción de armadura que se suma a las pérdidas de Joule del generador, esta característica es aprovechada sobre todo en aplicaciones de soldadura de arco, donde al momento antes de soldar, el voltaje es bajo y la corriente que fluye es alta y al momento de comenzar a soldar el voltaje aumenta bruscamente y la corriente se mantiene en un valor alto (Siemens, 2009).

3.5.1 Circuito equivalente del generador DC en serie

La Figura 26 muestra el circuito equivalente de un generador en serie, cuyas variables en la figura son las siguientes:

R_L : resistencia de carga alimentada por el generador

V_L : voltajes en los terminales de la carga

I_L : corriente en la carga

E_a : voltaje generado en la armadura

R_a : resistencia del enrollado de armadura

I_a : corriente en armadura

V_a : voltaje en los terminales de armadura

R_c : resistencia del enrollado de campo

I_c : corriente por el enrollado de campo

$n = T_1$: velocidad del rotor, proporcionada por una fuente externa.

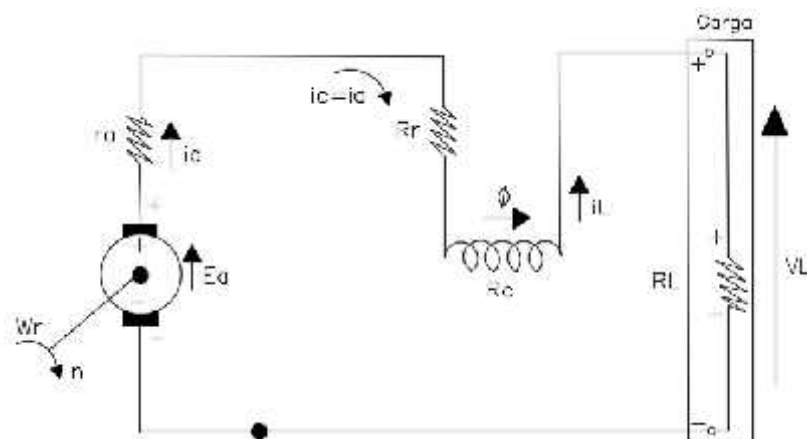


Figura 26 Generador DC en serie
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

3.5.2 Desarrollo del circuito del generador DC en serie mediante análisis transitorio

En las siguientes ecuaciones se presenta el modelo matemático de una máquina eléctrica de DC en serie, y la Figura 27 nos muestra el análisis transitorio del generador dc shunt.

Para realizar el análisis transitorio se lo divide en tres partes las mismas ecuaciones que se muestran a continuación son las que nos dan las ecuaciones diferenciales del desarrollo del circuito del generador dc shunt. Es importante mencionar que en la ecuación 67, está definida la segunda ley de Newton la cual nos muestra el análisis transitorio de la dinámica del generador en serie. El Anexo 3 presenta el desarrollo de las ecuaciones (68), (69), y (70).

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{k_a}{J} i_a - \frac{B_m}{J} \omega_r + \frac{1}{J} T_{pm} \quad (68)$$

PARTE 1

$$E_a - L_a \frac{d i_a}{d t} - r_a i_a - r_s i_a - L_s \frac{d i_a}{d t} - R_L i_a = 0 \quad (69)$$

$$L_a \frac{d i_a}{d t} + L_s \frac{d i_a}{d t} = E_a - r_a i_a - r_s i_a - R_L i_a$$

Eléctrico ón 51 s, r e e v d E a a k Ø W

$$\frac{d i_a}{d t} = \frac{k \Phi \omega}{(L_a + L_s)} - \frac{(r_a + R_s + R_L) i_a}{(L_a + L_s)} \quad (70)$$

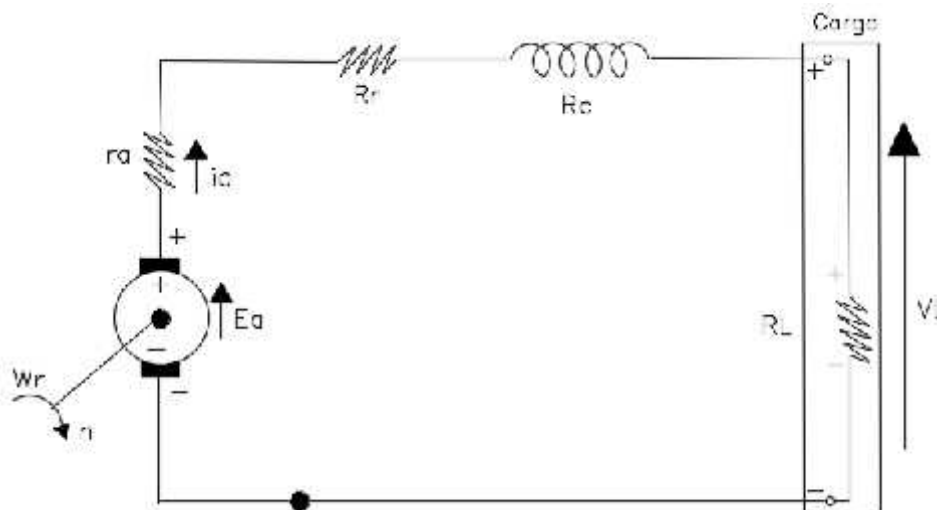


Figura 27 Resolviendo por leyes de Kirchoff el generador en serie

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

3.5.3 Parámetros del diseño del generador DC en Serie

La Tabla 3 nos muestra los parámetros para la simulación en el entorno Matlab/Simulink dándonos a conocer los valores tanto en los componentes del generador.

Tabla 3 Parámetros del generador DC en serie

Parámetro	Simbología	valor	unidad
Resistencia de armadura	ra	1	
Resistencia Carga	RL	3	
Resistencia s	Rs	0.05	
Inductancia de la armadura del generador	La	0.4	Henrios
Inductancia s	Ls	0.01	Henrios
Constante voltaje	Kg	0.27	V
Constante carga	KL	0.11	
Coefficiente de fricción	Bm	0.1	
Inductancia de la armadura del motor	J	0.01	Henrios
Voltaje	ua	10	V
Torque	Tpm	185	Nm
Flujo campo	phi	0.30	

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

CAPÍTULO IV: RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Análisis comparativo entre generadores

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos, gráficas, análisis y comparaciones de los tres modelos de generadores propuestos para que funcionen con la energía que proporciona el viento para convertirla en energía eléctrica. Se expone los tres modelos de generadores modelados y se comparan los resultados obtenidos en las simulaciones con ayuda del software Matlab/Simulink.

Los resultados obtenidos son de las tres simulaciones de cada uno de los generadores modelados y simulados en el entorno Matlab/Simulink, se presenta las respectivas gráficas y tablas comparativas de los generadores y se debate entre cuál de los tres generadores de corriente continua tiene mayores características de funcionalidad y funcionamiento en un régimen estable de cada generador.

4.2 Análisis del voltaje

Para el análisis de los respectivos voltajes se utiliza las velocidades del viento de la ciudad de Loja descritas en el capítulo 1, cuando el viento está un nivel tipo ráfaga a 3.5 m/s este dato de entrada se utiliza para simular cada uno de los generadores, la Figura 28 nos presenta el voltaje de los generadores compound, shunt y serie para un viento constante de 3.5 m/s.

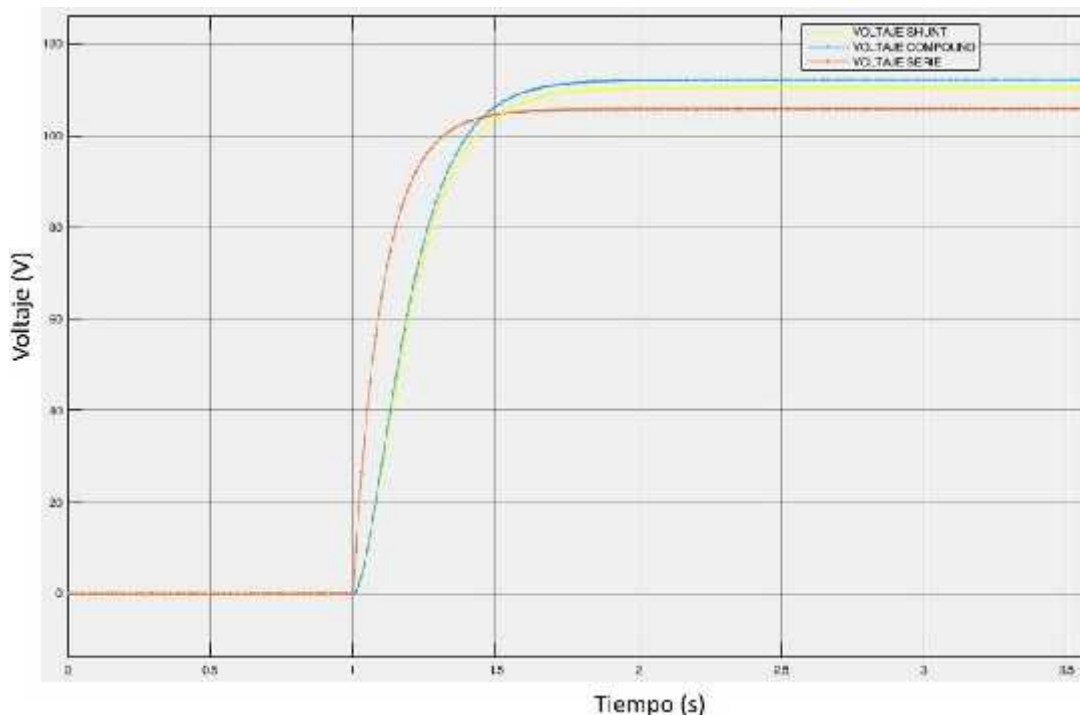


Figura 28 Voltaje de los generadores compound, shunt y serie para un viento constante de 3.5 m/s

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

4.3 Análisis de la potencia

Para el análisis de las respectivas potencias se utiliza de igual manera las variables de entrada de las velocidades del viento de la ciudad de Loja descritas en el capítulo 1 para con estos datos de entrada simular cada uno de los generadores. La Figura 29 nos presenta la potencia de los generadores compound, shunt y serie para un viento constante de 3.5 m/s

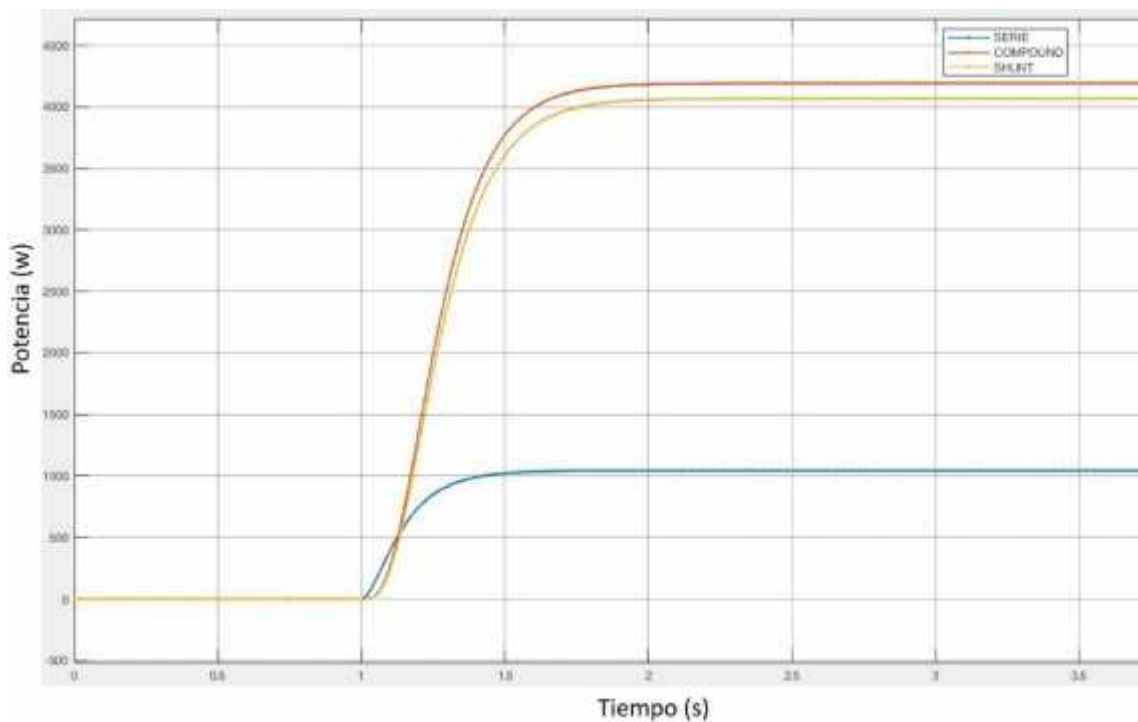


Figura 29 Potencia de los generadores compound, shunt y serie para un viento constante de 3.5 m/s

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

4.4 Tablas comparativas respecto a velocidades de vientos de 3.5 m/s y 7 m/s

Se menciona anteriormente que se utiliza dos parámetros de entrada con diferentes valores de velocidades del viento, los apartados anteriores están presentados con un viento de una velocidad de 3 m/s siendo este un viento tipo ráfaga.

La Figura 30, nos muestra los tiempos de inicialización de cada uno de los generadores. La Tabla 4, nos muestra la variación del voltaje y potencia para un viento con una velocidad a 7 m/s. Para el análisis de las respectivas variables de los generadores se ha realizado tablas comparativas para obtener el tiempo de estabilización de cada uno de los generadores.

Desde la Figura 30 a la 34 nos presenta análisis de potencias y voltajes para velocidad de viento de 3.5 m/s y de 7 m/s.

Tabla 4 Tabla comparativa de los diferentes tiempos de estabilización de cada generador

Generadores	Tiempo de estabilización
<i>Generador en Serie</i>	1.471 s
<i>Generador Compound</i>	1.720 s
<i>Generador Shunt</i>	1.801 s

Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

Para el análisis de las respectivas variables de los generadores se ha realizado tablas comparativas para obtener voltajes y potencias de operación, como nos muestra la Tabla 5 hasta la Tabla 7, para una velocidad de viento diferente, como son vientos modo ráfagas y constantes, 3.5 m/s y 7m/s respectivamente.

Tabla 5 Tabla comparativa de voltajes de los generadores para diferentes velocidades

Velocidad 3.5 m/s			
<i>Generadores</i>	COMPOUND	SHUNT	SERIE
Voltajes	110V	110V	110V
Potencias	4.2 kW	4.05 kW	1038 kW
<i>Tiempo de estabilización</i>	1.720	1.801	1.471

Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

Tabla 6 Tabla comparativa de potencia de los generadores para diferentes velocidades

Velocidad 7 m/s			
<i>Generadores</i>	COMPOUND	SHUNT	SERIE
Voltajes	220 V	220 V	110V
Potencias	16.21kW	16 kW	4138 kW
<i>Tiempo de estabilización</i>	1.720 S	1.801 S	1.471 S

Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

Tabla 7 Tabla comparativa de RPM de los generadores para diferentes velocidades

Velocidad del Viento	RPM		
<i>Generadores</i>	COMPOUND	SHUNT	SERIE
3 m/s	1850	1800	35
7 m/s	3600	3500	50
<i>Tiempo de estabilización</i>	1.718	1.800	1.469

Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

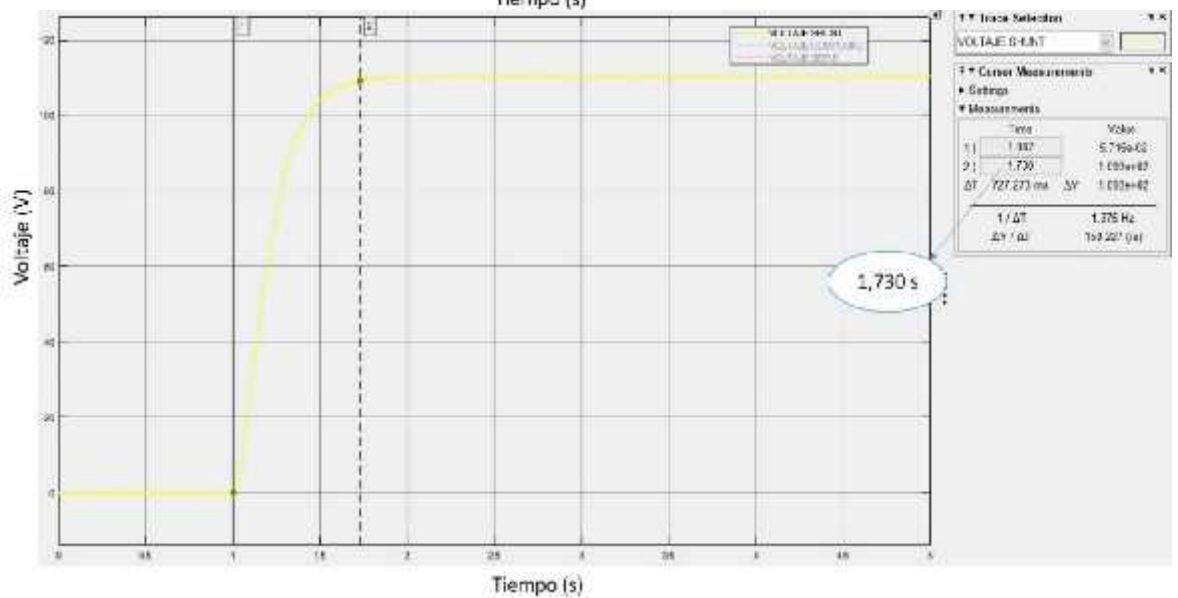
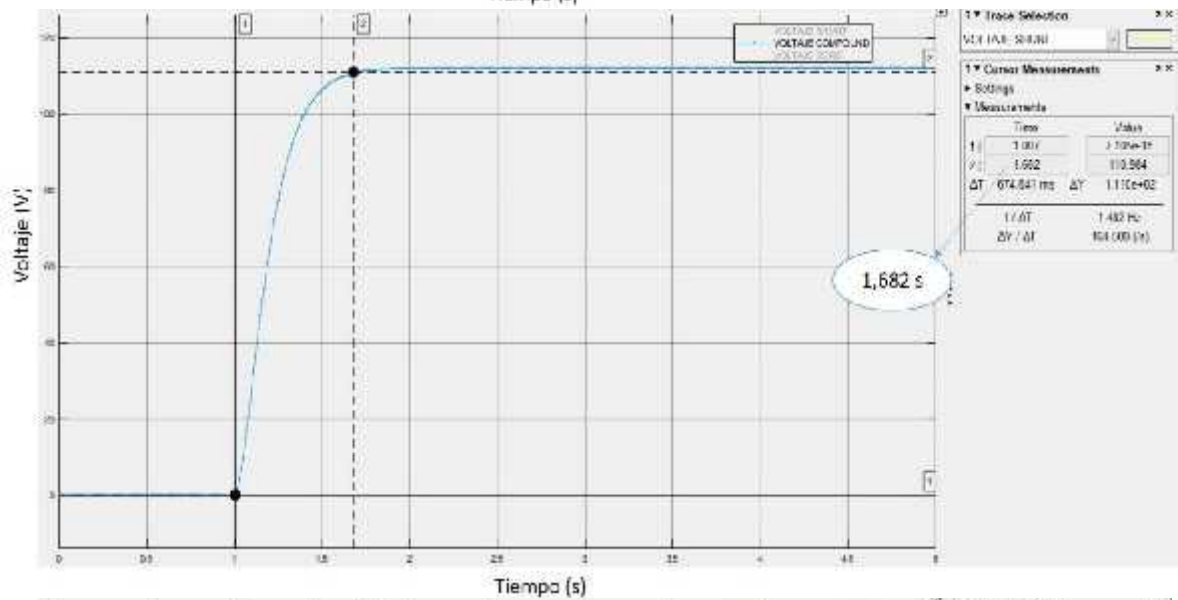
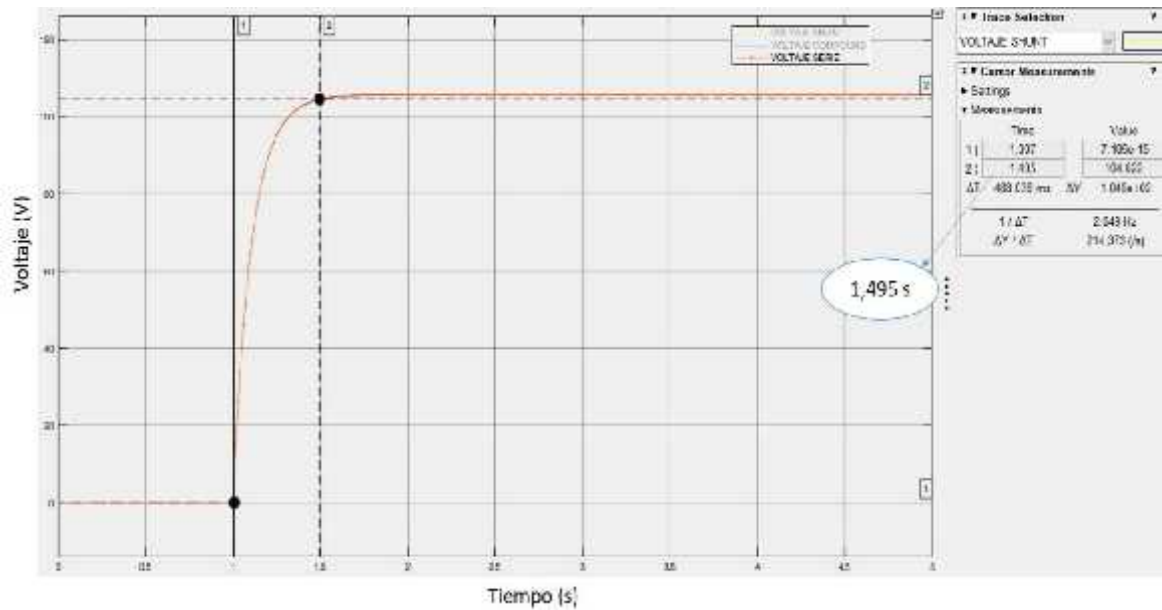


Figura 30 Tiempo de estabilización de cada generador
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

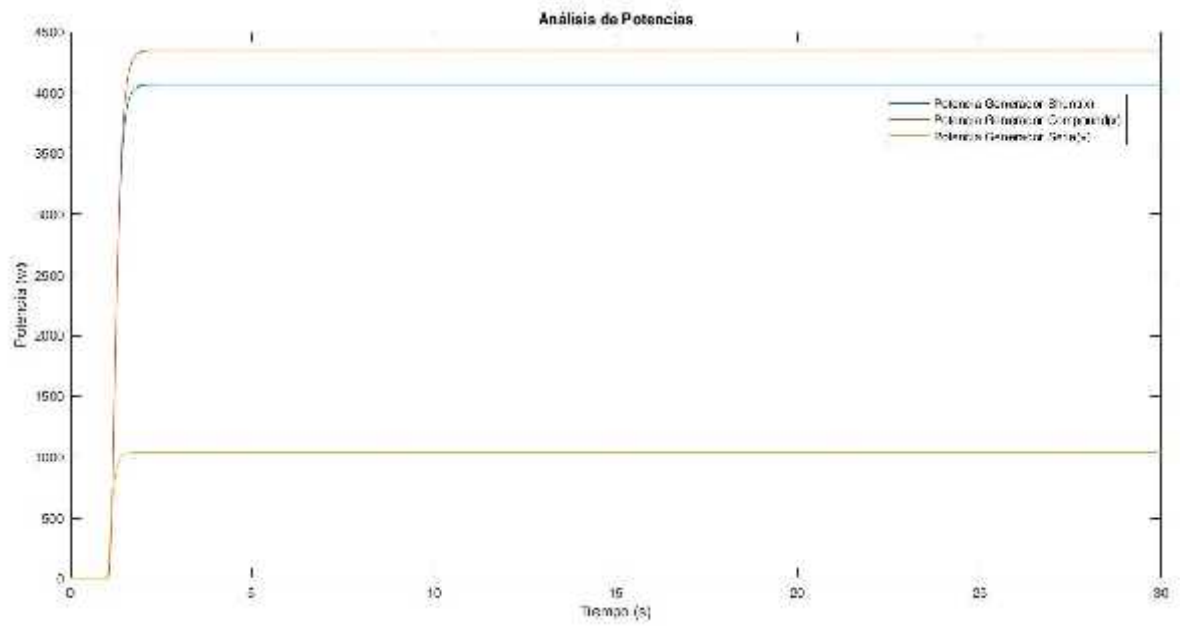


Figura 31 Análisis de potencias de los tres generadores con un valor constante de 3.5 m/s.
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

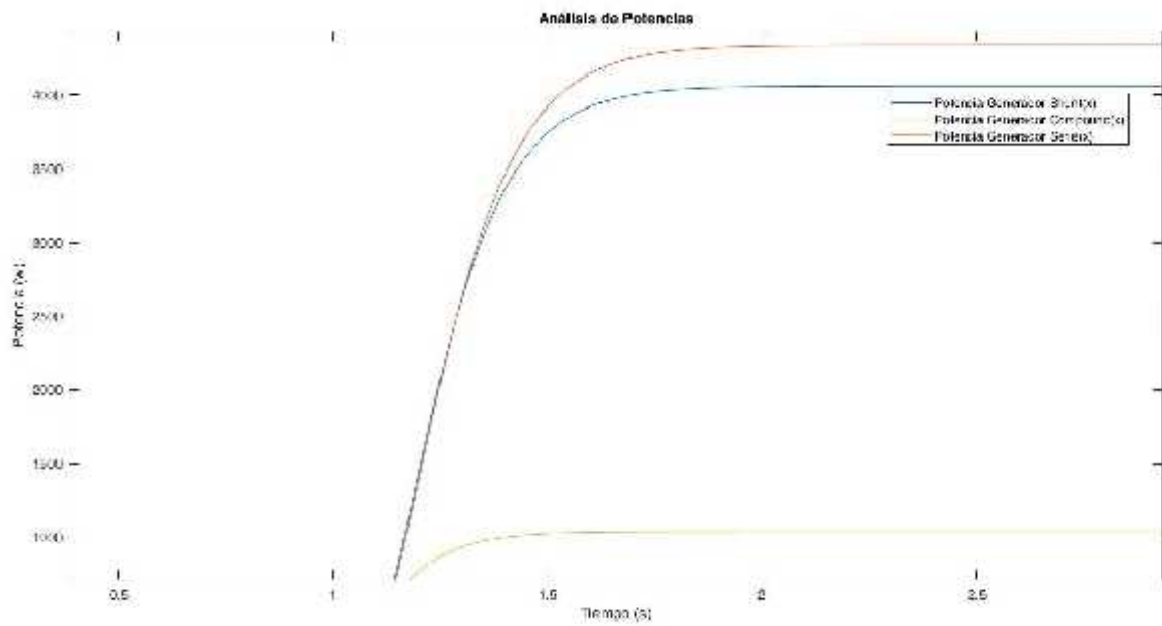


Figura 32 Tiempo de estabilización de cada generador (3.5 m/s)
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

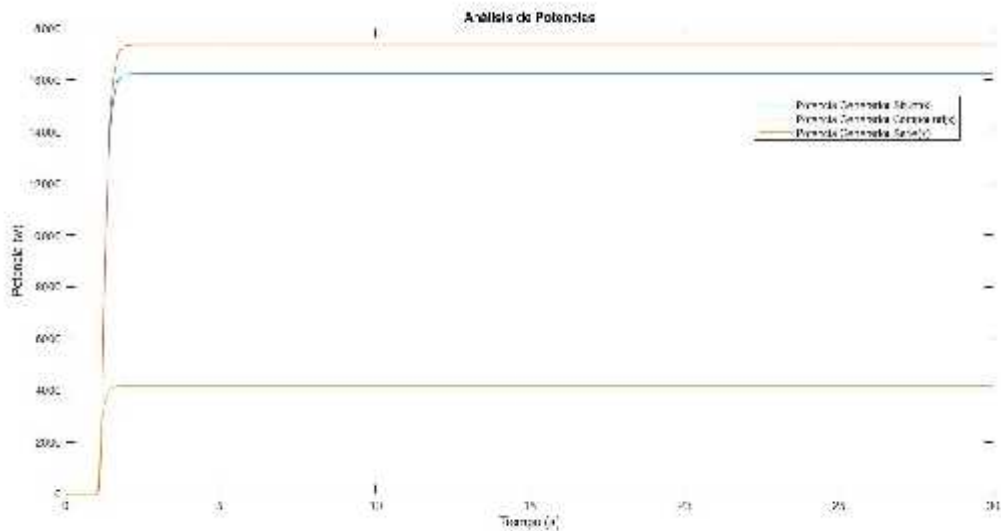


Figura 33 Análisis de las potencias de los tres generadores con un valor constante de 7 m/s
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

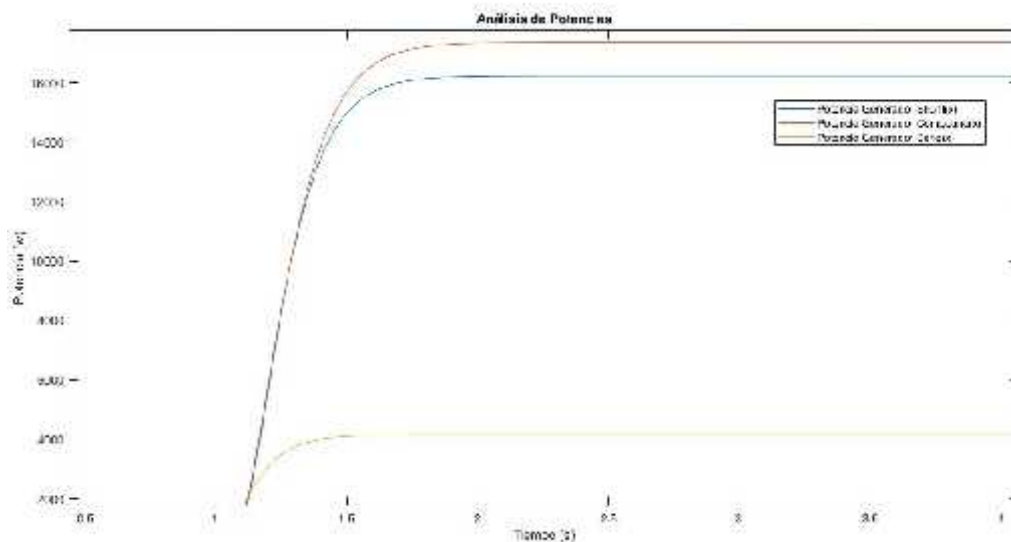


Figura 34 Tiempo de estabilización de cada generador (7 m/s)
 Fuente: El Autor
 Elaboración: El Autor

4.5 Tablas comparativas con respecto a una señal de prueba

En esta sección se utiliza una señal de prueba de entrada utilizando la energía cinética del viento que viene dada por la ecuación (71).

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (71)$$

Dónde:

$$E_c = e \quad \text{í a c} \quad \text{é c} \quad d \quad v$$

$$m = \rho \quad t$$

$$v = \dot{v} \quad d \quad v$$

Para obtener la energía cinética del viento se utiliza los siguientes parámetros:

$$m = 0,923k$$

$$v = 3,5 \frac{m}{s}$$

Utilizando la ecuación (72) se obtiene el siguiente resultado:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (72)$$

$$E_c = \frac{1}{2} (0,923k) \left(3,5 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$E_c = (0,4615)(12,25) \left(k * \frac{m^2}{s^2}\right)$$

$$E_c = 5,65 \left(\frac{k * m}{s^2}\right) * m$$

$$E_c = 5,65 N$$

Se obtuvo el área del rotor con la ecuación (73), con un radio de 8.1 m.

$$A = \pi r^2 \quad (73)$$

$$A = \pi(8.1)^2$$

$$A = 206,12 m^2$$

Para obtener la potencia se utiliza los siguientes parámetros:

$$\delta = 0,923 \frac{k}{m^3}$$

$$v = 3,5 \frac{m}{s}$$

La ecuación (74) determina la potencia para la cual el viento es de 3,5 m/s.

$$P = A \frac{1}{2} \delta v^3 \quad (74)$$

$$P = (206,12 m^2) \frac{1}{2} (0,923 \frac{k}{m^3}) (3,5)^3$$

$$P = 4.078 K$$

La Figura 34, nos presenta la señal de prueba de entrada para los tres generadores. La Tabla 8, nos presenta los tiempos de inicialización de cada generador.

Tabla 8 Tabla comparativa de los diferentes tiempos de estabilización de cada generador

Generadores	Tiempo de estabilización
<i>Generador en Serie</i>	1.495 s
<i>Generador Compound</i>	1.682 s
<i>Generador Shunt</i>	1.730s

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

Para el análisis de las respectivas variables de los generadores se presenta la Figura 35, 36, 37 y 38 las cuales presentan el análisis de la estabilidad transitoria de los generadores, cuando existan cambios significativos del viento. En el Anexo 4, se presenta el esquema general de los tres modelos de generadores utilizando la señal de entrada que nos muestra la Figura 34.

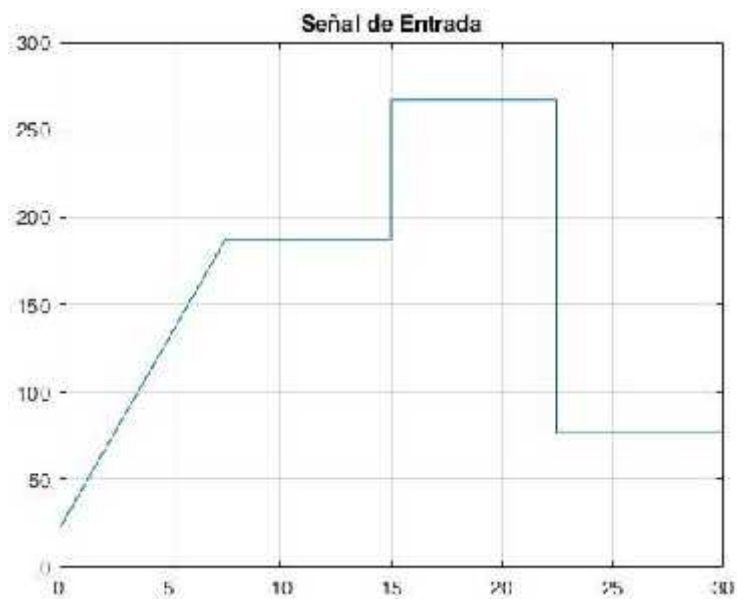


Figura 35 Señal de prueba de entrada

Fuente: El Autor

Elaboración: El Autor

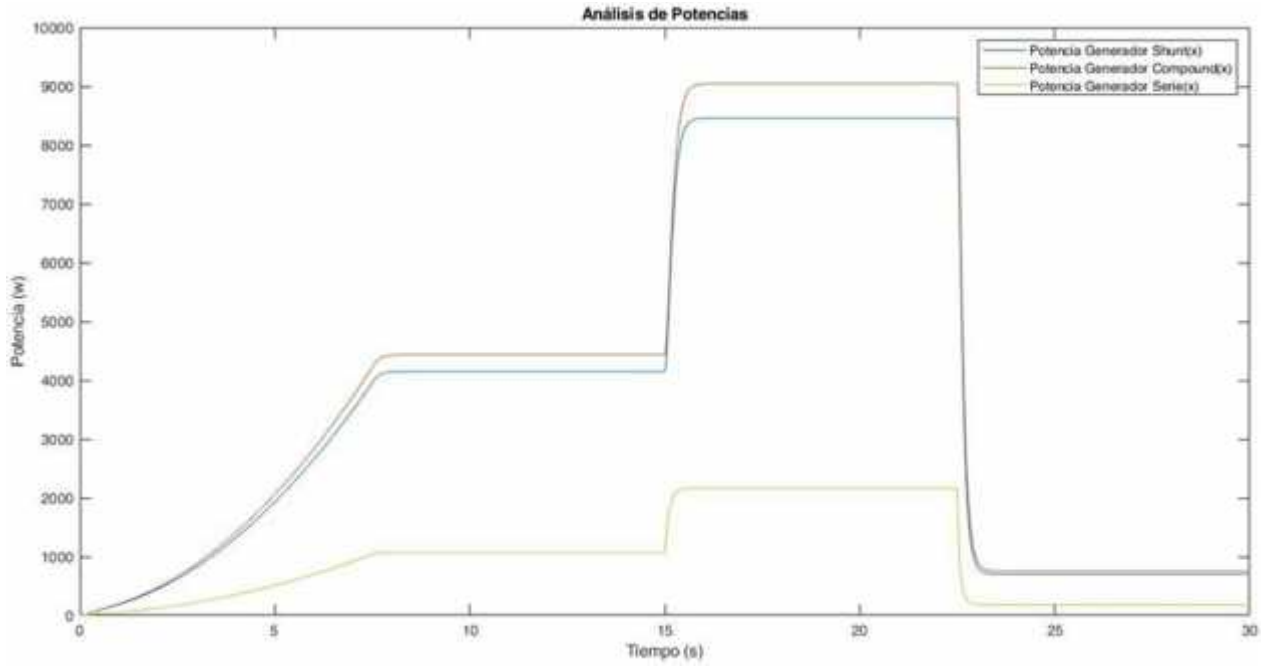


Figura 36 Análisis de Potencias con la señal de entrada para los tres generadores.
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

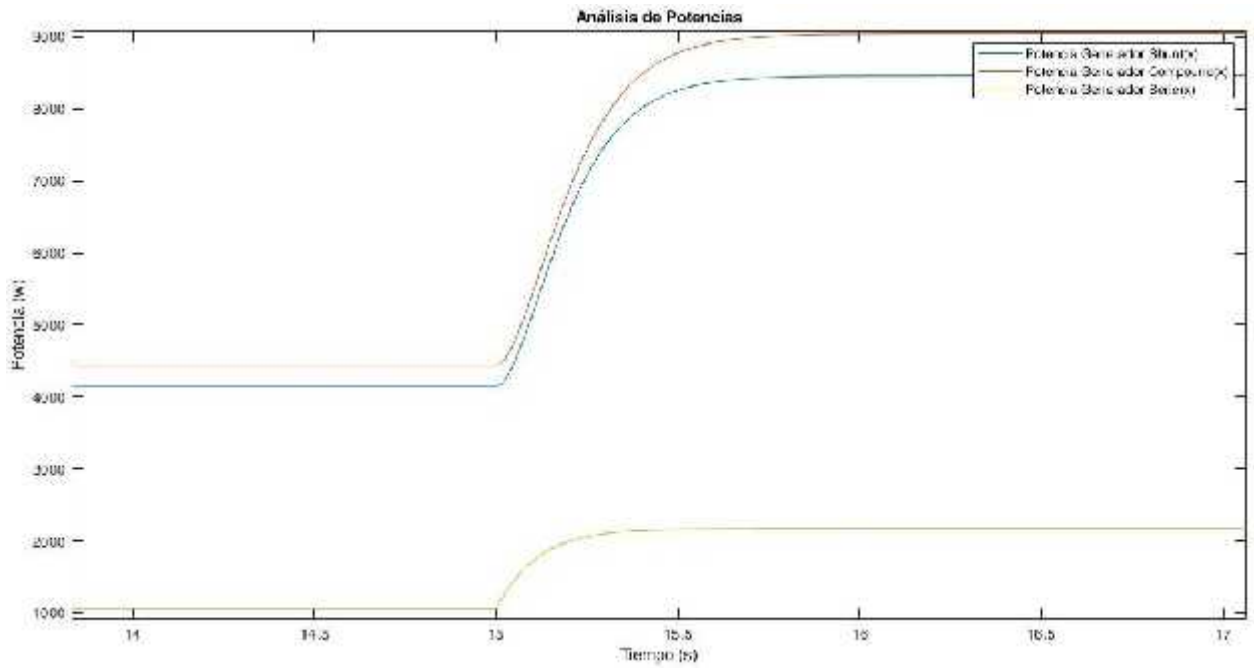


Figura 37 Tiempo de Estabilización de cada generador con respecto a la señal de prueba de la entrada
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

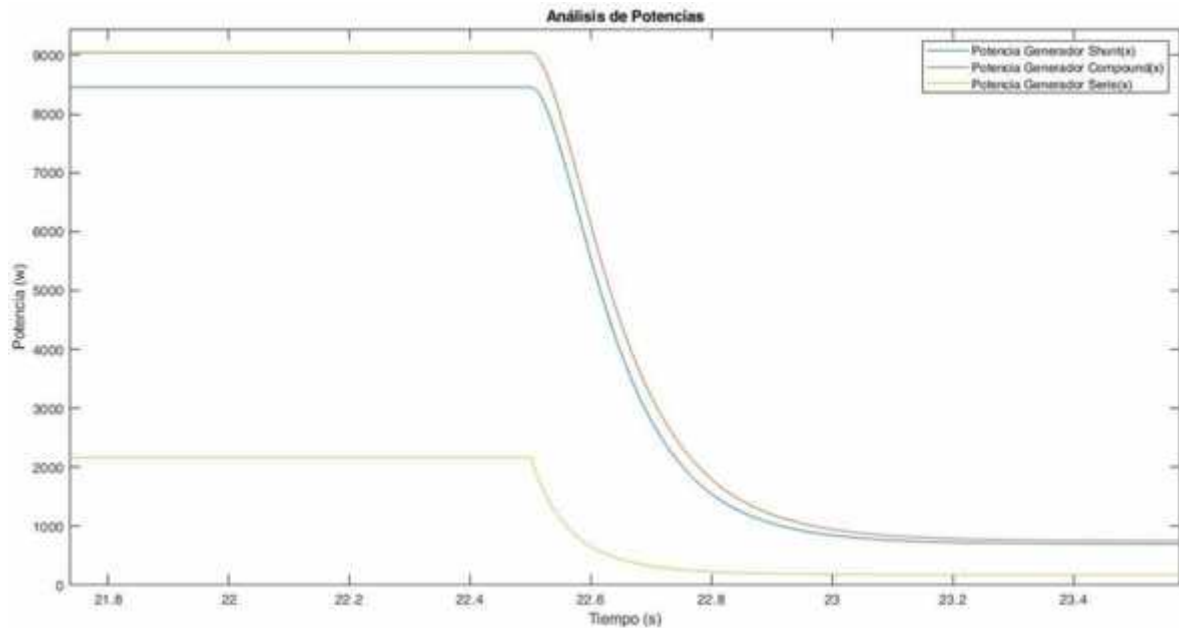


Figura 38 Análisis de la Estabilidad transitoria de los generadores
Fuente: El Autor
Elaboración: El Autor

4.6 Análisis comparativo entre generadores

Las características del generador compound comprenden ciertas características del generador shunt y del generador serie, se utilizan en grúas, ventiladores, prensas, limadores, tranvías, trenes, etc.; y en máquinas que requieran elevado par de arranque como compresores, laminadores, etc.

Gracias a la combinación de las configuraciones en serie y derivación en la excitación de la armadura, se consigue una tensión que suministra el generador a la carga para que esta sea más estable para cualquier régimen de carga. Esta gran estabilidad permite recomendar el uso de este generador para la generación de energía. La principal desventaja de este generador es la complejidad de su construcción y necesitan de colectores de delgas y escobillas para su funcionamiento, necesitando trabajos de mantenimiento debido al desgaste por rozamiento de estas piezas. Poseen un par de arranque elevado y la velocidad puede ser regulada fácilmente entre amplios límites, haciéndolos ideales para las aplicaciones antes mencionadas.

La tensión del generador shunt que proporciona, se reduce drásticamente con los aumentos de la intensidad en la carga, esto sucede a que al momento de aumentar la tensión en el inducido con la carga se produce una disminución de la tensión en la carga, que provoca a su vez una reducción en la corriente de excitación, esto hace que la f.e.m se vea reducida, pudiendo así llegar a perder la excitación de la dinamo para cargas muy elevadas.

4.7 Ventajas de los generadores de corriente continua

- J Con el estudio de este tema de investigación se podría reducir las limitantes de generar corriente eléctrica DC con respecto a generar en AC y así poder sugerir que las nuevas energías sean en DC.
- J Uno de los usos principales del generador de corriente continua en la energía eólica, el viento hace rotar las veletas conectadas al generador produciendo así electricidad y aprovechando esta fuente de energía renovable.
- J Se puede utilizar un generador de corriente continua para alimentar sistemas pequeños de manera eficiente.
- J Realiza de forma automática y correcta la inversión de corriente de sus conductores, independientemente de cual sea su velocidad.
- J La velocidad del generador es directamente proporcional a la tensión continua de su generación.
- J En la actualidad el inductor de diferentes generadores de corriente continua se realiza a base de imanes permanentes, esto da una mayor fiabilidad, bajo costo, menor volumen, mayor ligereza y mayor rendimiento.
- J Es importante mencionar que un generador de corriente continua no requiere de un inversor.

4.8 Desventajas de los generadores de corriente continua

- J El costo de mantenimiento es muy elevado con respecto a los generadores de corriente alterna.
- J Imposibilidad de empleo de transformadores, lo que dificulta el cambio de nivel de tensión.

CONCLUSIONES

-) Es importante seleccionar una energía renovable de acuerdo al lugar de emplazamiento para comenzar a trabajar con los generadores y así obtener resultados de acuerdo al porcentaje de energía que estos lugares nos puedan abastecer.
-) Los generadores de corriente continua solamente necesitan de una fuente de energía mecánica o fuente externa (solar, hidroeléctricas, eólicas) confiable para generar electricidad.
-) Los generadores eléctricos de corriente continua son de suma importancia en la actualidad, debido a las diferentes aplicaciones industriales a las que son sometidas, por ello es importante tener el conocimiento detallado de su principio de funcionamiento y se deben analizar todas las partes que conforman a cada generador para el correcto funcionamiento.
-) Los generadores de corriente continua tienen ciertas ventajas en diversas aplicaciones, las fábricas (galvanoplastia o producción de materiales industriales y compuestos como el aluminio y el cloro) con grandes demandas de energía de corriente continua son lugares ideales para estos generadores.
-) Para la construcción del generador compound se necesita de colectores de delgas y escobillas para su funcionamiento, necesitando trabajos de mantenimiento debido al desgaste por rozamiento de estas piezas. Poseen un par de arranque elevado y la velocidad puede ser regulada fácilmente entre amplios límites, ideales para las aplicaciones antes mencionadas.
-) El generador shunt nos proporciona una inestabilidad al momento de que el generador proporciona la tensión esta se reduce drásticamente con los aumentos de la intensidad en la carga, es recomendable utilizarlo cuando no existan variaciones frecuentes o cambios en la carga.
-) El generador en serie, tiene ciertos inconvenientes al momento de aumentar la intensidad en la carga, también lo hace el flujo del inductor por lo que la tensión en la carga del generador se eleva y por consiguiente es muy inestable.
-) Posibilidad del almacenamiento de esta energía en grandes cantidades, por medio de baterías.

BIBLIOGRAFÍA

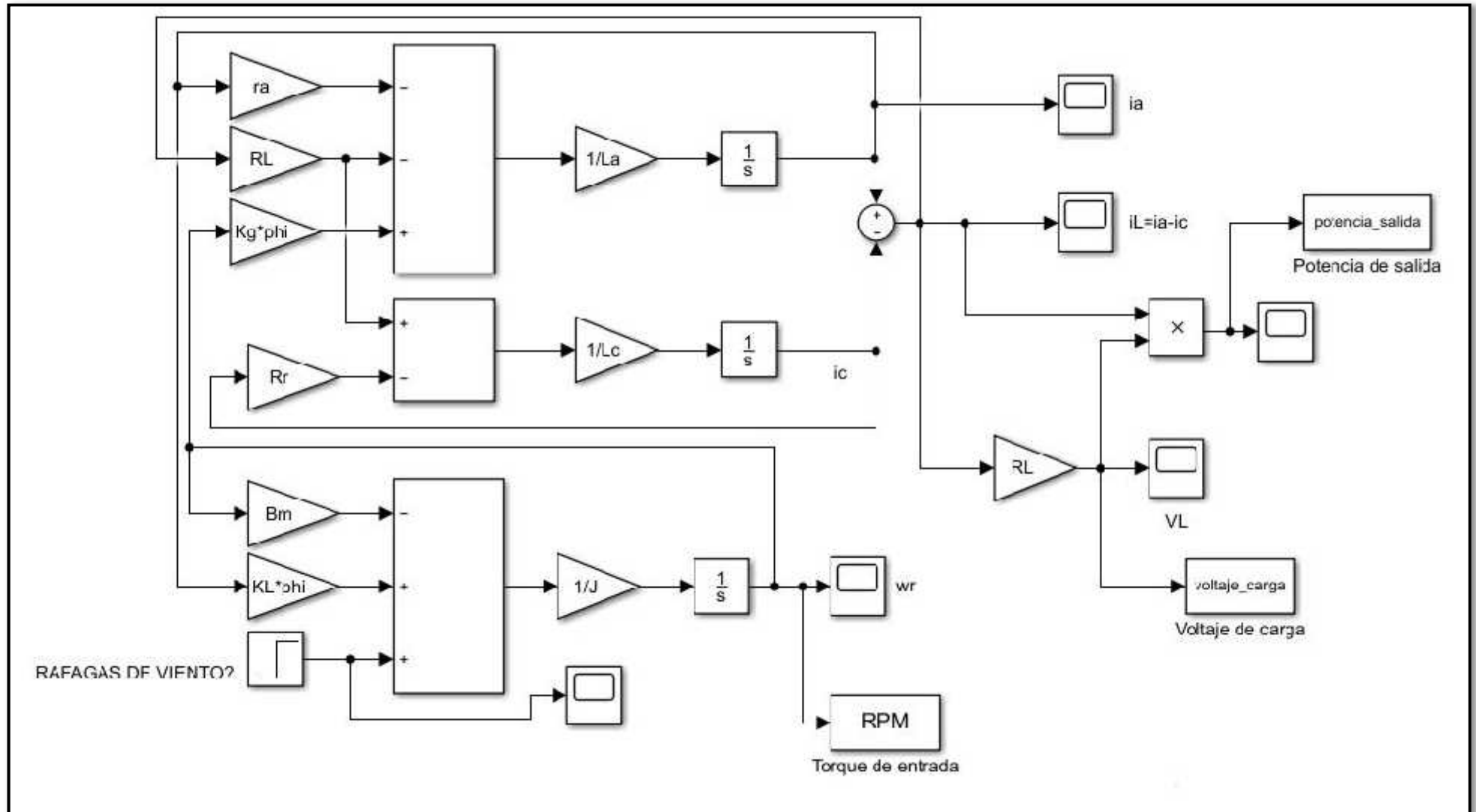
- Abolhosseini, S., Heshmati, A., & Altmann, J. (2014). A Review of Renewable Energy Supply and Energy Efficiency Technologies, (8145).
- Aguilar, I. E. S. (2010). Interacción electromagnética Inducción electromagnética, 21.
- Alrikabi, N. K. M. A., & Benefits, A. E. (2014). Renewable Energy Types, 2(1).
<https://doi.org/10.7763/JOCET.2014.V2.92>
- Álvarez, C. L. (2013). MAQUINAS ELECTRICAS, 1–63.
- Araujo G., S. (1992). Generalidades de los campos electromagnéticos, 31–68.
- Aung, W. P. (2014). Analysis on Modeling and Simulink of DC Motor and its Driving System Used for Wheeled Mobile Robot. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 8, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 1(8), 299–306. Retrieved from <https://waset.org/Publications/?path=Publications&q=Analysis+on+Modeling+and+Simulink+of+DC+Motor+and+its+Driving+System+Used+for+Wheeled+Mobile+Robot+&search=Search>
- Beato, P., & Fuente, C. (2016). Retail Competition in Electricity Retail Competition in Electricity.
- Benito, A. B. (2014). Máquinas Eléctricas Prefacio.
- Boldea, I. (2017a). Electric Generators and Motors: An Overview. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 1(1), 3–14.
<https://doi.org/10.23919/TEMS.2017.7911104>
- Boldea, I. (2017b). Electric Generators and Motors: An Overview. *Ieee*, 1(1), 12.
<https://doi.org/10.23919/TEMS.2017.7911104>
- Buitrago, R. (2005). La Energía del Sol. *ConCiencia*, (14), 8–9.
<https://doi.org/10.14409/cc.v1i14.2184>
- CELEC.EP. (2015). CENTRAL EÓLICA VILLONACO GENERA EL 152. Retrieved from <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/67-central-eolica-villonaco-genera-el-152-de-lo-planificado>
- Chapman. (2012). *Máquinas Eléctricas* (Quinta edi). México, D.F.
- Chemwiki, U. C. D., Alike, C. C. A., & License, U. S. (2016). *Systems Systems*.
- Clave, A. C. (2017). Centrales hidroeléctricas en Ecuador, 1–10.
- Coballes, A. M. (2016). Electromagnetismo, 8.
- CONELEC. (2009). Balance de Energía. *Estadística Del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2008*.
<https://doi.org/10.1109/CBMS.2005.6>
- Erazo, M. G. (2017). Análisis de la producción de energía de la Central Eólica Villonaco, 1, 79. Retrieved from

- http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/17842/1/Erazo_Mogrovejo_Geovanny_Alexander.pdf
- Galvanica, C. (2013). Corriente Continua, 3–9. Retrieved from <http://www.electrosector.com/wp-content/ftp/descargas/basico.pdf?0ad197>
- Guisasola, J., Montero, A., & Fernández, M. (2008). La historia del concepto de fuerza electromotriz en circuitos eléctricos y la elección de indicadores de aprendizaje comprensivo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(1), 1604.1-1604.8. <https://doi.org/10.1590/s1806-11172008000100018>
- lit, E. E. (2015). and Distribution of Overview.
- Instituto Tecnológico de Canarias. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética ISLAS CANARIAS ESPAÑA Torres, Mercedes Díaz*. <https://doi.org/10.1684/epd.2018.0960>
- Jørgensen, P. J. (2015). Biogas - green energy.
- Khan, A. ., Memon, S. ., & Sattar, T. . (2018). Analyzing Integrated Renewable Energy and Smart-Grid Systems to Improve Voltage Quality and Harmonic Distortion Losses at Electric-Vehicle Charging Stations. *IEEE Access*, 6(c), 26404–26415. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2830187>
- Leijon, M. (2014). Ocean Energy, (January 2001). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1402-1>
- López P, J. P. M. (2008). EL PROYECTO DE LAS TRES GARGANTAS DE CHINA: SU HISTORIA Y SUS CONSECUENCIAS, 71. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/586/58611186001.pdf%0A>
- Luna, E., Perez-Negron, C., Fernandez, E., & Tequitlalpa, G. (2014). Active power control of wind farms in Mexico to mitigate congestion energy problems and contribute to frequency regulation. *2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC 2014*, (7036356), 7036356. <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2014.7036356>
- Matthew N, O, S. (2003). Elementos de Electromagnetismo, 3, 776.
- Narciso B, R. (2013). Máquinas Rotantes. *Maquinas Electricas*, 1–17.
- Of, N. T., & Of, A. T. E. S. (2001). AND Renewable Energy :
- Raposo, F. (2009). Electricidad y electrónica, 22.
- Renewable, I., & Agency, E. (2013). *GLOBAL ENERGY*.
- Renovable, M. de E. y E. (2013). ATLAS EÓLICO DEL ECUADOR, 56. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/228987678/Atlas-Eolico-Ecuador-Meer-2013>
- Saibi, H., Finsterle, S., Berkeley, L., Bertani, R., & Nishijima, J. (2013). Geothermal Energy, (May). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8939-8>
- Sebastian, M., & Alvarado, A. (2012). Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado : Control de velocidad por corriente de armadura. *Instituto de*

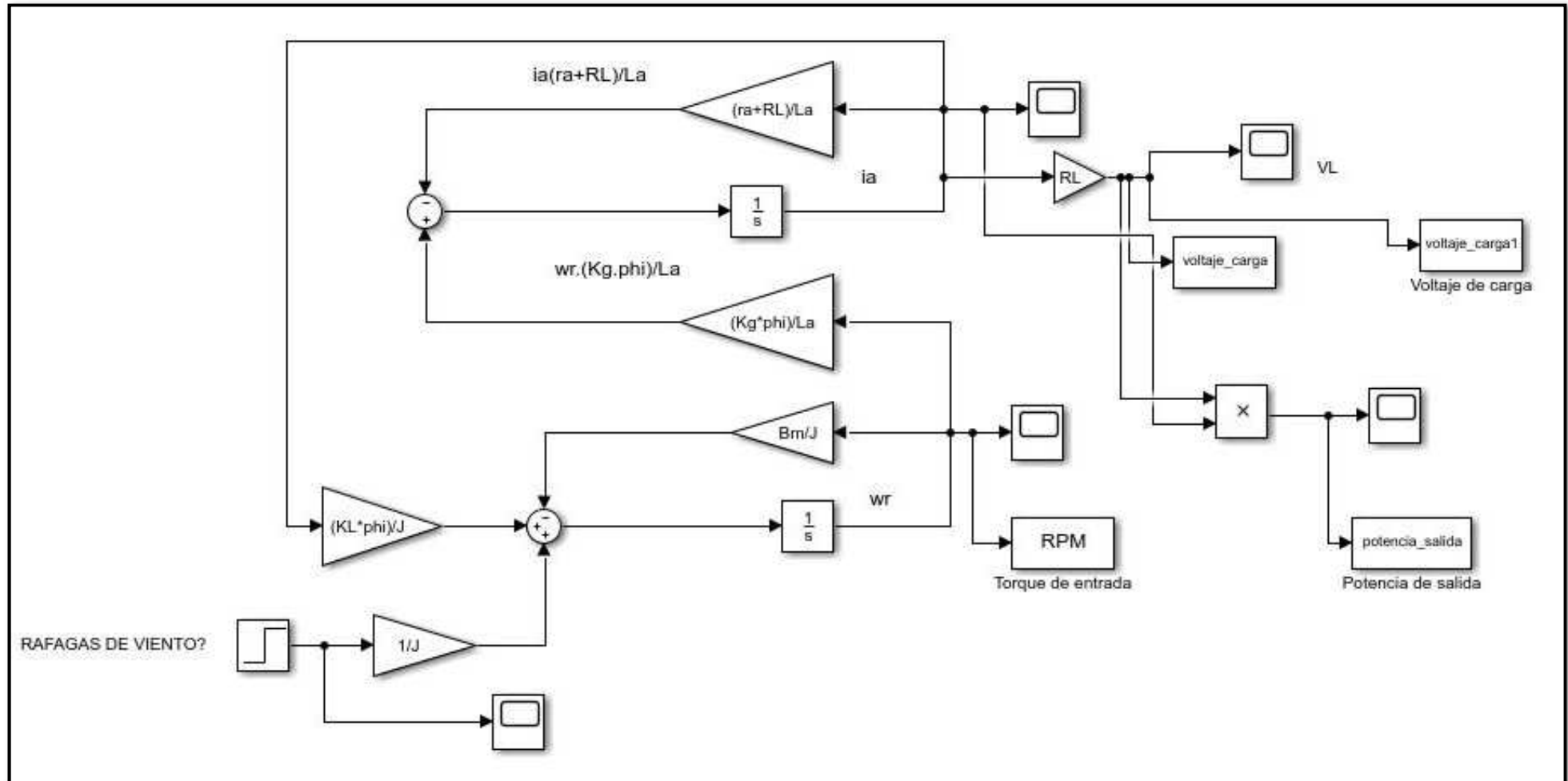
- Ciencias Físicas, Escuela Superior Politécnica Del Litoral*, 6(1), 154–161.
- Sergey. (2008). *Electromechanic Systems and Devices*, 584.
- Sets, C. G. (2009). *Operation Residential / Commercial Generator Sets*.
- Siemens, W. (2009). 5. Máquinas De Corriente Continua 5.1.
- Sriram, N., & Shahidehpour, M. (2017). *Renewable Biomass Energy*, 1–6.
- Torres. (2011). *Generador de Inducción Auto-excitado*, 67–72.
- Tzuc, O. M., & Cetina, R. Q. (2015). *Generador de Campo Magnético Variable “ Generador de Campo Magnético Variable ,”* (August).
- Vargas, F. M. (2013). *Máquinas Eléctricas Rotativas*, 275.
- Weber. (2009). *Máquinas de corriente continua 5.1*.

ANEXOS

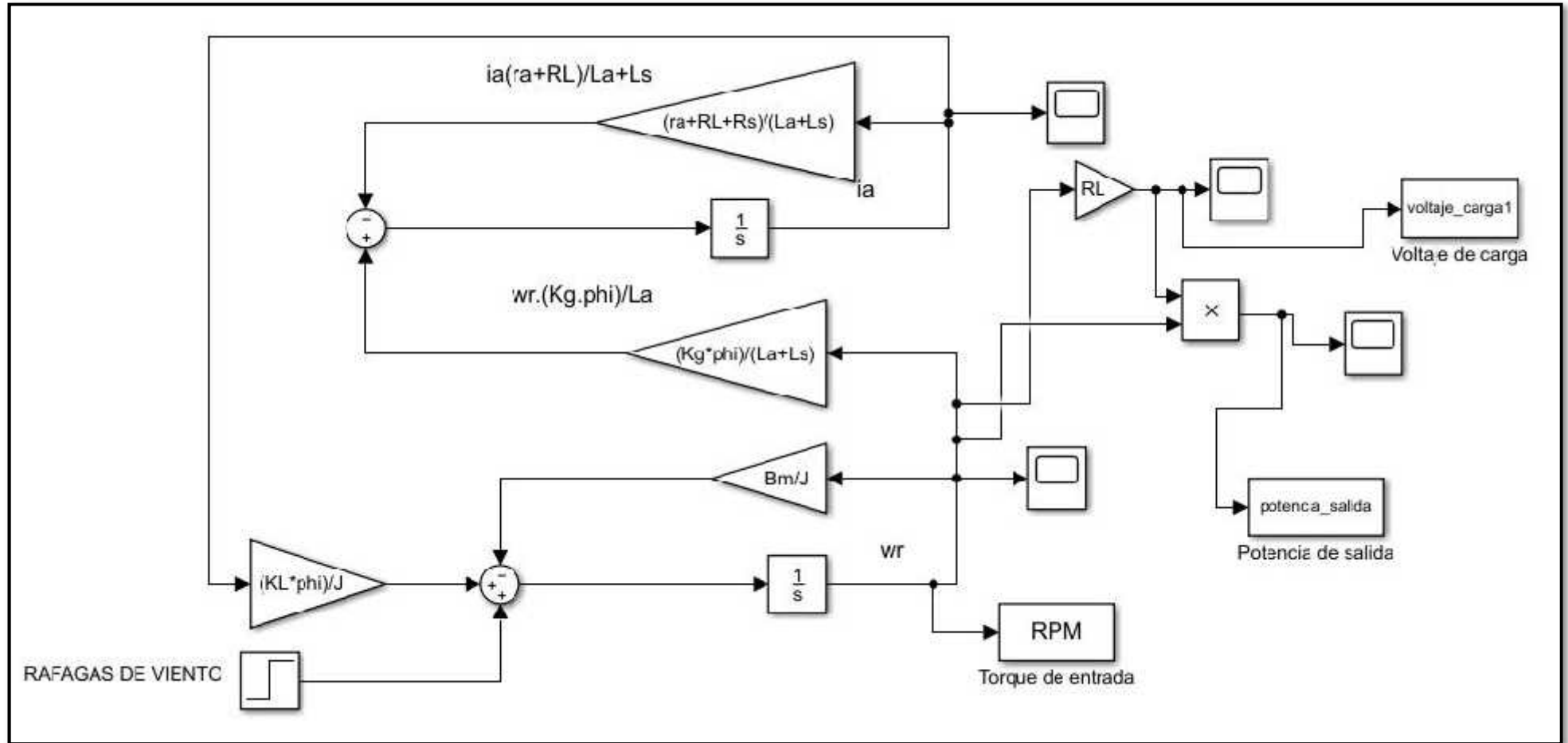
ANEXO 1: Generador de corriente continua compound en el entorno Matlab/Simulink



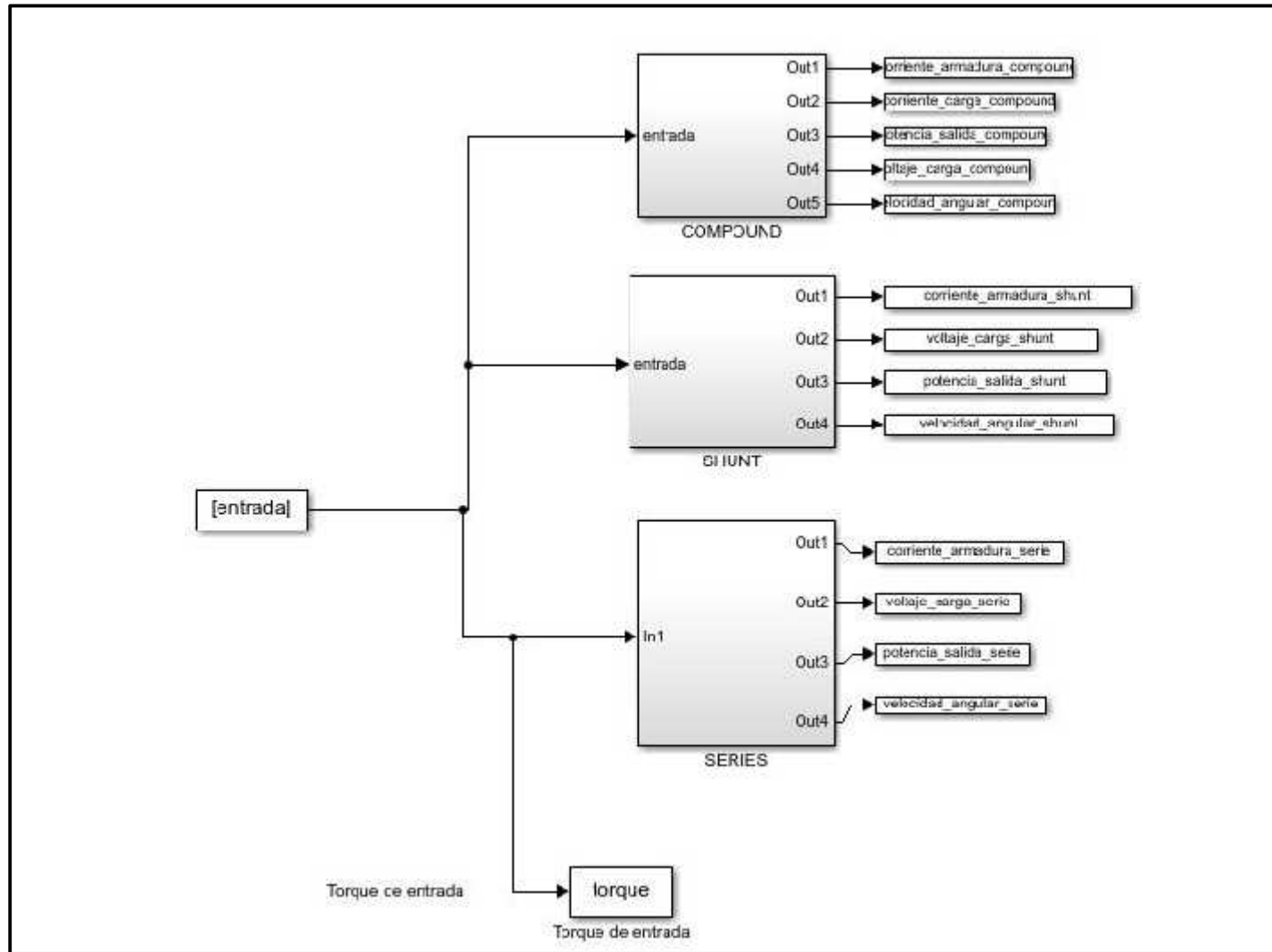
ANEXO 2: Generador de corriente continua shunt en el entorno Matlab/Simulink



ANEXO 3: Generador de corriente continua serie en el entorno Matlab/Simulink



ANEXO 4: Modelo resultante de generadores conectados a una señal de prueba



Anexo 5: Códigos en el entorno Matlab respecto a las velocidades de vientos constantes (3 m/s y 7 m/s)

POTENCIA 4KW (3.5 m/s)

GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA SHUNT

```
% CONSTANTES
Sim_time = 5;% tiempo de simulación
ra = 1.1;      % resistencia de armadura
RL = 3;       % resistencia de la carga
Rr= 0.25     % resistencia reostato
La = 0.4;    % inductancia de armadura
Kg = 0.27;   % constante
KL = 0.11;  % constante
J = 0.01;   % momento de inercia
Bm = 0.1;   % friccion viscosa

% VARIAN ENTRE VARIAS SIMULACIONES
Tpm = 3.5 * 5,65; % par del eje, puede variar ?
phi = 0.70; % constante, pero puede variar ?
% %% PARA las graficas

figure(1)%% RPM
plot(RPM.time,RPM.data, 'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('RPM (m)');
title('RPM');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(RPM.data)+200])

figure(2)%% voltaje de salida
plot(voltaje_carga.time,voltaje_carga.data, 'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Voltaje (V)');
title('Voltaje');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(voltaje_carga.data)+20])

figure(3)%%potencia
plot(potencia_salida.time,potencia_salida.data, 'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Potencia salida (P)');
title('Potencia');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(potencia_salida.data)+200])
```

GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA COMPOUND

```
% CONSTANTES
Sim_time = 5;% tiempo de simulación
ra = 0.9;      % resistencia de armadura
RL = 3;       % resistencia de la carga
La = 0.4;    % inductancia de armadura
Lcp= 0.4;    % resistencia de
Lcs= 0.4;    % resistencia de
Kg = 0.27;   % constante
```

```

KL = 0.11; % constante
J = 0.01; % momento de inercia
Bm = 0.1; % friccion viscosa
Lc = 0.4;
Rr = 40;

% VARIAN ENTRE VARIAS SIMULACIONES
Tpm = 3.5 * 5,65; % par del eje, puede variar ?
phi = 0.70; % constante, pero puede variar ?

% %% PARA las graficas

figure(1)%% RPM
plot(RPM.time,RPM.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('RPM (m)');
title('RPM');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(RPM.data)+200])

figure(2)%% voltaje de salida
plot(voltaje_carga.time,voltaje_carga.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Voltaje (V)');
title('Voltaje');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(voltaje_carga.data)+20])

figure(3)%%potencia
plot(potencia_salida.time,potencia_salida.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Potencia salida (P)');
title('Potencia');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(potencia_salida.data)+200])

```

GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA SERIE

```

% CONSTANTES
Sim_time = 5;% tiempo de simulación
ra = 1; % resistencia de armadura
RL = 3; % resistencia de la carga
La = 0.4; % inductancia de armadura
Kg = 0.27; % constante
KL = 0.11; % constante
J = 0.01; % momento de inercia
Bm = 0.1; % friccion viscosa
Rs=0.05;
Ls=0.01;

% VARIAN ENTRE VARIAS SIMULACIONES
Tpm = 3.5 * 5,65; % par del eje, puede variar ?
Phi1 = 0.35; % constante, pero puede variar ?
Phi2 = 0.35; % constante, pero puede variar ?
phi = 0.70; % constante, pero puede variar ?

% %% PARA las graficas

```

```

figure(1)% RPM
plot(RPM.time,RPM.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('RPM (m)');
title('RPM');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(RPM.data)+5])

figure(2)% voltaje de salida
plot(voltaje_carga.time,voltaje_carga.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Voltaje (V)');
title('Voltaje');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(voltaje_carga.data)+20])

figure(3)% potencia
plot(potencia_salida.time,potencia_salida.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Potencia salida (P)');
title('Potencia');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(potencia_salida.data)+200])

```

POTENCIA 16KW (7 m/s)

GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA SHUNT

```

% CONSTANTES
Sim_time = 5;% tiempo de simulación
ra = 1.13;    % resistencia de armadura
RL = 3;      % resistencia de la carga
La = 0.4;    % inductancia de armadura
Kg = 0.27;   % constante
KL = 0.11;   % constante
J = 0.01;    % momento de inercia
Bm = 0.1;    % friccion viscosa

% VARIAN ENTRE VARIAS SIMULACIONES
Tpm = 7.5 * 84.88; % par del eje, puede variar ?
phi = 0.70; % constante, pero puede variar ?

% %% PARA las graficas

figure(1)% RPM
plot(RPM.time,RPM.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('RPM (m)');
title('RPM');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(RPM.data)+200])

figure(2)% voltaje de salida
plot(voltaje_carga.time,voltaje_carga.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Voltaje (V)');
title('Voltaje');
grid on;

```

```

axis([0 Sim_time -1 max(voltaje_carga.data)+20])

figure(3)%potencia
plot(potencia_salida.time,potencia_salida.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Potencia salida (P)');
title('Potencia');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(potencia_salida.data)+200])

```

GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA COMPOUND

```

% CONSTANTES
Sim_time = 5;% tiempo de simulación
ra = 1;      % resistencia de armadura
RL = 3;      % resistencia de la carga
La = 0.4;    % inductancia de armadura
Kg = 0.27;   % constante
KL = 0.11;   % constante
J = 0.01;    % momento de inercia
Bm = 0.1;    % fricción viscosa
Lc = 0.4;
Rr = 40;

% VARIAN ENTRE VARIAS SIMULACIONES
Tpm = 7.5 * 84.88; % par del eje, puede variar ?
phi = 0.70; % constante, pero puede variar ?

% %% PARA las graficas

figure(1)% RPM
plot(RPM.time,RPM.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('RPM (m)');
title('RPM');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(RPM.data)+200])

figure(2)% voltaje de salida
plot(voltaje_carga.time,voltaje_carga.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Voltaje (V)');
title('Voltaje');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(voltaje_carga.data)+20])

figure(3)%potencia
plot(potencia_salida.time,potencia_salida.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Potencia salida (P)');
title('Potencia');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(potencia_salida.data)+200])

```

GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA SERIE

```
% CONSTANTES
Sim_time = 5;% tiempo de simulación
ra = 1;      % resistencia de armadura
RL = 3;      % resistencia de la carga
La = 0.4;    % inductancia de armadura
Kg = 0.27;   % constante
KL = 0.11;   % constante
J = 0.01;    % momento de inercia
Bm = 0.1;    % friccion viscosa
Rs=0.05;
Ls=0.01;

% VARIAN ENTRE VARIAS SIMULACIONES
Tpm = 7.5 * 84.88; % par del eje, puede variar ?
phi = 0.70; % constante, pero puede variar ?

%% PARA las graficas

figure(1)%% RPM
plot(RPM.time,RPM.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('RPM (m)');
title('RPM');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(RPM.data)+5])

figure(2)%% voltaje de salida
plot(voltaje_carga.time,voltaje_carga.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Voltaje (V)');
title('Voltaje');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(voltaje_carga.data)+20])

figure(3)%%potencia
plot(potencia_salida.time,potencia_salida.data,'LineWidth',1.5);
xlabel('tiempo(s)');
ylabel('Potencia salida (P)');
title('Potencia');
grid on;
axis([0 Sim_time -1 max(potencia_salida.data)+200])
```

Anexo 6: Códigos y parámetros en el entorno Matlab de la señal de prueba

```
close all
clear all
clc
% Energía cinética del viento = 25,96(velocidad a 7m/s)
int = 22,6135;      %% parametro inicial
t=0:0.5:7.5;      %% primer intervalo de tiempo
x=int*t+int;      %% variacion lineal del torque

t1=7.5:0.5:15;    %% segundo intervalo de tiempo
sized1=size(t1);
var1=sized1(2);
x1=((7.5*int)+int)*ones(1,var1);

t2=15:0.5:22.5;
sized2=size(t2);
var2=sized2(2);
x2=((7.5*int)+int)+80)*ones(1,var2);

t3=22.5:0.5:30;
sized3=size(t3);
var3=sized3(2);
x3=((7.5*int)+int)-110)*ones(1,var3);

Tiempo=[t t1 t2 t3];
Torque=[x x1 x2 x3];
entrada=[Tiempo' Torque'];
```


Anexo 7: Códigos en el entorno Matlab de los tres generadores con una señal de prueba entrante

```
senal_prueba;
Sim_time = Tiempo(end);% tiempo de simulación
%% Generador Compound
ra_sh = 0.9;
La_sh = 0.4;
RL_sh = 3;
Rr_sh = 40;
Lc_sh = 0.4;
%% Generador Shunt
ra_i = 1.1;
La_i = 0.4;
RL_i = 3;
Rr_i = 0.25;
%% Generador en serie
ra_s = 1;
La_s = 0.4;
RL_s = 3;
Rs_s = 0.05;
Ls_s = 0.01;

%% Constantes de los tres generadores
Kg = 0.27; % constante
KL = 0.11; % constante
J = 0.01; % momento de inercia
Bm = 0.1; % friccion viscosa
phi = 0.30; % constante, pero puede variar ?
Tpm = 370;

sim('GENERADORES');

%% PARA las graficas
figure(1)%% RPM
plot(torque.time,torque.data);
title('Señal de Entrada');
grid on

figure(2)%% POTENCIA
plot(potencia_salida_shunt.time,potencia_salida_shunt.data,...
     potencia_salida_compound.time,potencia_salida_compound.data,...
     potencia_salida_serie.time,potencia_salida_serie.data);
legend('Potencia Generador Shunt(x)', 'Potencia Generador
Compound(x)', 'Potencia Generador Serie(x)')
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Potencia (w)');
title('Análisis de Potencias');
axis([0 Sim_time -1 max(RPM.data)+200])
grid on
```