



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Metodología para el diseño de un convertidor DC-DC aplicado a aerogeneradores de baja potencia

Carlos Alejandro Ramírez Gómez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Arquitectura e Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
Manizales, Colombia

2013

Metodología para el diseño de un convertidor DC-DC aplicado a aerogeneradores de baja potencia

Carlos Alejandro Ramírez Gómez

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Automatización Industrial

Director:

Andrés Julián Saavedra Montes Ph.D.

Línea de Investigación:

Modelado y Control de Fuentes de Potencia Eléctrica
Grupo de Automática de la Universidad Nacional (GAUNAL)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Arquitectura e Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
Manizales, Colombia

2013

Methodology for designing a DC-DC converter applied to low-power wind turbines

Carlos Alejandro Ramírez Gómez

Work presented as partial requirement for the degree of:

Magister en Ingeniería - Automatización Industrial

Director:

Andrés Julián Saavedra Montes Ph.D.

Line of research

Modeling and control of alternative sources of electrical energy

Grupo de Automática de la Universidad Nacional (GAUNAL)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Manizales, Colombia

A mis padres: Roberto Ramírez Moreno y Juana Alicia Gómez García, por su amor y apoyo incondicional que me han brindado durante estos años.

A mi hermano David Ricardo Ramírez Gómez quien ha estado presente en todos los momentos de mi vida y al resto de mi familia quienes con su cariño y afecto han contribuido para ser la persona que soy hoy en día.

A Estefanía Flórez Zapata quien con su compañía me ha servido de punto de apoyo para alcanzar este sueño.

Agradecimientos

Agradezco al Profesor Andrés Julián Saavedra Montes quien, gracias a su paciencia y dedicación, ha hecho posible la culminación exitosa de este sueño; también agradezco a los profesores y al personal administrativo del Departamento de Energía Eléctrica y Automática de la Universidad Nacional por su apoyo brindado en los últimos años.

Agradezco al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Colombia, COLCIENCIAS, que a través de la beca-pasantía ofrecida por el PROGRAMA DE JÓVENES INVESTIGADORES E INNOVADORES, en la convocatoria 525 del 2011, me ha permitido el sostenimiento económico necesario para llevar a cabo mis estudios de maestría.

Agradezco también a la Universidad Nacional de Colombia, por haber apoyado la propuesta de investigación titulada “Metodología para el diseño de convertidores y controladores aplicados a aerogeneradores en entornos urbanos”, por el apoyo económico prestado en la cofinanciación de la Beca –pasantía, Además al programa nacional de proyectos para el fortalecimiento de la investigación, la creación y la innovación en posgrados de la Universidad Nacional de Colombia 2013-2015, por apoyar el proyecto “Modelado de una micro-red eléctrica estándar para zonas no interconectadas de Colombia”, con código Hermes 18687.

Agradezco a los miembros del Grupo de Automática de la Universidad Nacional, y en especial a los miembros de la línea en Modelado y Control de Fuentes de Potencia Eléctrica, por su aporte continuo que permitió mi crecimiento y mi formación como magister.

VI Metodología para el diseño de un convertidor DC-DC aplicado a aerogeneradores baja potencia

Resumen

En este trabajo se propone una metodología de diseño de convertidores DC-DC y su control aplicado a aerogeneradores de baja potencia aislados de la red eléctrica. El diseño del convertidor se realiza teniendo en cuenta requerimientos de contenido armónico del generador sincrónico de imanes permanentes y de la carga eléctrica abastecida. Para comenzar con el diseño fue necesario realizar una revisión de la literatura, para identificar las metodologías usadas y los requerimientos de diseño. Como resultado de esta revisión se obtuvo la falencia de una metodología de diseño del convertidor y de su control. Para desarrollar la metodología de diseño del convertidor fue necesario modelar la turbina eólica de tres palas, el generador sincrónico de imanes permanentes y un rectificador trifásico de onda completa no controlado. Con la ayuda del modelo se realizó el diseño de un convertidor DC-DC. Los elementos del convertidor son diseñados para garantizar que los rizados de los voltajes de entrada y salida, y de la corriente del inductor no superen el 5% de los valores de estado estacionario. El control del voltaje de salida se realiza con un controlador proporcional-integral-derivativo y como criterios de diseño se seleccionan un amortiguamiento de 0,707 y una frecuencia de corte de $1/5$ la frecuencia de conmutación del convertidor. El controlador diseñado regula el voltaje de salida frente a perturbaciones de la carga y cambios en la velocidad del viento. Como resultado final se obtiene una metodología para el diseño del convertidor DC-DC y su control aplicado a aerogeneradores de baja potencia.

Palabras clave: Generación eólica, modelado, diseño de convertidor, diseño del control.

Abstract

A method to design a Buck converter and its control, which are associated to a wind generation system that is feeding an isolated load, is presented in this work. The design of DC-DC converters and its control are performed considering harmonic content requirements of the permanent magnet synchronous generator and the electrical load. A literature review was made to identify the methodologies and the design requirements, as a result of this review, it was highlighted that there is not a design methodology of the converter and its control. To develop the converter design methodology, it was necessary to model a three-blade wind turbine, a permanent magnet synchronous generator and a three phase rectifier of full wave uncontrolled. The latter model was used to design a DC-DC converter. The converter elements are designed to guaranty that the ripple in the input and output voltages, and the inductor current do not exceed the 5% of the steady estate values. The output voltage control is performed with a proportional-integral-derivative strategy, as design criteria a damping of 0.707 and a cutoff frequency of 1/5 the switching frequency of the converter are selected. The controller regulates the output voltage versus load disturbances and changes in the wind speed. As end result, a methodology for designing a DC-DC converter and its control applied to low-power turbines is obtained.

Keywords: wind generation, model, convert design, control design.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	V
Lista de figuras	IX
Lista de tablas	XI
Introducción.....	1
1 Revisión de la literatura y formulación del problema de investigación.	3
1.1 Revisión de la literatura para un SMGE.....	3
1.1.1 Definir el problema inicial.....	3
1.1.2 Definir las palabras clave; buscar, seleccionar y recolectar artículos	4
1.1.3 Generar las preguntas de revisión para extraer información de los artículos ..	5
1.1.4 Someter los artículos a las preguntas de revisión consignando los resultados sistemáticamente.....	6
1.2 Formulación del problema de investigación.....	11
1.2.1 Analizar y discutir los resultados.....	11
1.2.2 Definir las preguntas de investigación.....	16
1.2.3 Definir el problema de investigación	18
1.3 Conclusiones.....	19
2 Modelado de la turbina eólica, el generador y el rectificador.	21
2.1 Modelo de la turbina, el generador y el rectificador	22
2.1.1 Modelo de la turbina eólica	22
2.1.2 Ecuación mecánica de la turbina y el generador.....	23
2.1.3 Modelo del generador sincrónico de imanes permanentes	23
2.1.4 Modelo del rectificador trifásico.....	24
2.1.5 Diagrama de bloques de la turbina, el generador y el rectificador.....	25
2.2 Estimación de parámetros del modelo de la fuente del SMGE.	25
2.2.1 Estimación de los parámetros del modelo estático de una turbina eólica de baja potencia.....	25
2.2.2 Estimación de los parámetros de la ecuación mecánica y del modelo del generador.....	37
2.3 Selección del modelo reducido estático equivalente de la turbina, el generador y el rectificador	41
2.4 Conclusiones.....	43
3 Diseño del convertidor y de su controlador para un SMGE.....	45

3.1	Análisis matemático del convertidor Buck con el equivalente estático de la fuente	45
3.2	Requerimientos para el diseño del convertidor Buck.....	48
3.2.1	Cálculo del rango de la corriente de carga.	48
3.3	Diseño del convertidor Buck	49
3.3.1	Cálculo del ciclo de trabajo del convertidor.....	50
3.3.2	Cálculo de la magnitud de rizado en el convertidor.	52
3.3.3	Cálculo de los elementos del convertidor.	53
3.4	Diseño del control del convertidor Buck y el modelo reducido equivalente.....	55
3.4.1	Cálculo del punto de operación del convertidor Buck y el modelo reducido equivalente	55
3.4.2	Cálculo de la función de transferencia del convertidor Buck y el modelo reducido equivalente.....	56
3.4.3	Cálculo de los parámetros del controlador del convertidor Buck y del modelo reducido.....	57
3.5	Evaluación del diseño del convertidor.	58
3.5.1	Evaluación del contenido armónico hacia la carga	59
3.5.2	Evaluación del contenido armónico hacia el generador	63
3.6	Diagrama del diseño del convertidor y su control.	68
3.7	Conclusiones	69
4	Resultados y discusión.	71
4.1	Evaluación del diseño del convertidor	71
4.2	Evaluación del diseño del controlador.....	74
4.3	Sumario	79
5	Conclusiones	81
6	Publicaciones.....	83

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Sistema de micro generación eólica con un convertidor back to back	13
Figura 1-2. Sistema de micro generación eólico típico conectado a la red eléctrica	13
Figura 1-3. Sistema de generación eólico típico conectado a una carga aislada	13
Figura 2-1. Diagrama de bloques sistema de generación eólico.....	25
Figura 2-2. Montaje para registrar datos y determinar la función del coeficiente de potencia	27
Figura 2-3. Montaje del aerogenerador y la estación meteorológica.....	29
Figura 2-4. Montaje para caracterizar el anemómetro.	30
Figura 2-5. Interfaces del osciloscopio y la estación meteorológica para un mismo instante de tiempo.	31
Figura 2-6. Curva característica del anemómetro	31
Figura 2-7: Señales de voltaje de salida del anemómetro y el generador.....	32
Figura 2-8. Curvas de potencia versus corriente	33
Figura 2-9. Curvas de voltaje versus corriente.	34
Figura 2-10. Datos de C_p versus λ	37
Figura 2-11. Diagrama de bloques la ecuación mecánica y del modelo del generador. .	38
Figura 2-12: Datos medidos de la simulación.	39
Figura 2-13. Comparación de datos estimados y datos medidos.	40
Figura 2-14. Modelos reducidos.....	41
Figura 2-15. Curvas de carga del sistema de generación eólico.	42
Figura 2-16. Comparación de las curvas características generadas con los equivalentes de fuente y el sistema para una $v = 4$ [m/s].....	43
Figura 3-1. Circuito del equivalente Thevenin, el convertidor Buck y la carga resistiva.	46
Figura 3-2. Corriente de carga versus el ciclo de trabajo.....	49
Figura 3-3. Selección del ciclo de trabajo del convertidor	52
Figura 3-4. Rizados de corriente en inductor y voltaje en capacitor de entrada versus la corriente de carga	54
Figura 3-5. Valor de: el capacitor de entrada, el capacitor de salida y el inductor en función de la velocidad del viento.	55
Figura 3-6. Forma del rizado de la corriente en el inductor.....	60
Figura 3-7. Comparación de la simulación con las series de Fourier.	62
Figura 3-8. Comparación de los coeficientes C_n serie de Fourier y la simulación.	62
Figura 3-9. Función del ciclo de trabajo.....	63
Figura 3-10. Sistema reducido del SMGE.....	64

Figura 3-11.	Rizado en el torque mecánico del generador	65
Figura 3-12.	Rizado del torque versus el capacitor de entrada.....	68
Figura 3-13.	Distorsión total de armónicos versus el capacitor de entrada	68
Figura 3-14.	Diagrama del diseño del convertidor y su control	69
Figura 4-1.	Corriente máxima versus la velocidad del viento	72
Figura 4-2.	Diseño del convertidor Buck	74
Figura 4-3.	Método de ubicación geométrica de las raíces	75
Figura 4-4.	Diagrama de bode de lazo cerrado.....	76
Figura 4-5.	Sistema de micro generación con el control.....	76
Figura 4-6.	Perturbaciones en la velocidad del viento y en la corriente de la carga.....	77
Figura 4-7.	Cambios en el voltaje de referencia.	78
Figura 4-8.	Comportamiento de SMGE ante un perfil de viento	78

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Matriz de respuestas de generalidades del SMGE.....	7
Tabla 1-2. Matriz de respuestas a las preguntas de revisión del modelado del SMGE. 8	8
Tabla 1-3. Matriz de respuestas a las preguntas de revisión del diseño del convertidor.	9
Tabla 1-4. Matriz de respuestas a las preguntas de revisión acerca del control del convertidor.	10
Tabla 1-5: Continuación	11
Tabla 2-1. Datos de placa del aerogenerador Brezze® 40.....	26
Tabla 2-2. Valores de resistencia de máxima potencia.	35
Tabla 2-3. Parámetros del modelo de la turbina.....	37
Tabla 2-4. Parámetros estimados del modelo dinámico del sistema de generación eólico.	40
Tabla 3-1. Parámetros de simulación del sistema de generación.....	67
Tabla 4-1. Datos de las curvas de los modelos equivalentes.	72
Tabla 4-2. Valores del ciclo de trabajo	73
Tabla 4-3. Parámetros del convertidor	74

Introducción

Actualmente se quiere disminuir la dependencia de los combustibles fósiles para proveer energía eléctrica, dado que son una de las causas del calentamiento global y sus consecuencias [1]. Una de las estrategias para remplazar los combustibles fósiles son las fuentes alternativas de energía eléctrica. En estas condiciones, la generación eólica ha cobrado gran importancia, impulsando un crecimiento en el desarrollo de esta tecnología en los últimos años [2].

Entre la generación eólica, se destacan los Sistemas de Micro Generación Eólica SMGE, los cuales son usados para aprovechar el recurso energético de los vientos en zonas urbanas y en zonas rurales, esto mediante la instalación de generadores eólicos en los techos de casas y azoteas de edificios [3]. Los SMGE están conformados por una turbina eólica, un generador sincrónico de imanes permanentes, un rectificador y un convertidor DC-DC [4]. En los SMGE, el convertidor DC-DC es utilizado para controlar el voltaje de salida y reducir el contenido armónico hacia la fuente y la carga [4]. El control del voltaje de salida del convertidor se realiza a través del ciclo de trabajo del mismo y la reducción de armónicos se realiza diseñando los elementos del convertidor.

Para que el convertidor DC-DC pueda cumplir con estas funciones, es necesario tener en cuenta los requerimientos del sistema de generación para el diseño del convertidor DC-DC. Para realizar el diseño se parte de una revisión de la literatura sobre el tema para encontrar las brechas presentes en el área de interés. La revisión incluye 17 artículos específicos en el área y destaca aspectos relevantes como la ausencia de una metodología de diseño de convertidores DC-DC y aspectos básicos tales como los elementos que componen una cadena de generación, sus modelos, el tipo de convertidores y sus controladores.

En la revisión de la literatura se encontró que el diseño de los convertidores basado en los requerimientos de la fuente de generación y de la carga eléctrica puede mejorar la eficiencia de la cadena de generación y prolongar la vida útil de los elementos [5], a pesar de esto no se cuenta con una metodología clara para la selección de los parámetros de los convertidores usados en los sistemas de micro generación eólica, que incluya los requerimientos de la carga y del generador.

Para desarrollar la metodología fue necesario modelar la fuente conformada por una turbina eólica de tres palas, un generador sincrónico de imanes permanentes y un rectificador trifásico de onda completa no controlado. Con la ayuda del modelo se realizó el diseño del convertidor DC-DC, el cual debe garantizar rizados de los voltajes de entrada y salida, y de la corriente del inductor inferiores al 5%. El control del voltaje de salida se realiza con un controlador proporcional-integral-derivativo y como criterios de ajuste se seleccionan un amortiguamiento de 0.707 y una frecuencia de corte de $1/5$ la frecuencia de conmutación del convertidor. El controlador diseñado regula el voltaje de salida del convertidor frente a perturbaciones de la carga y cambios en la velocidad del viento. Como resultado final se obtiene una metodología para el diseño de un convertidor DC-DC y su control aplicado a aerogeneradores de baja potencia.

El desarrollo de este trabajo se presenta en cinco capítulos: en el primer capítulo se presenta la revisión de la literatura y la formulación del problema de investigación. En el segundo capítulo se presenta el modelado de la fuente del SMGE. En el tercer capítulo se presenta el diseño del convertidor y de su control. En el capítulo cuatro se presentan los resultados. Por último en el quinto capítulo se presentan las conclusiones.

1 Revisión de la literatura y formulación del problema de investigación

En este capítulo se presenta una revisión de la literatura acerca de los convertidores de potencia utilizados en los SMGE y la formulación del problema de investigación. La revisión se realiza analizando cuatro tópicos de los SMGE que son: la topología, el modelado, el diseño de los convertidores de potencia y el control de los mismos. Para la formulación del problema de investigación se parte de un análisis de los resultados obtenidos en la revisión de la literatura, para con esto encontrar brechas en la literatura en las cuales se puede hacer un aporte.

1.1 Revisión de la literatura para un SMGE.

Para realizar la revisión se siguieron cuatro pasos: en el primer paso se define un problema inicial de investigación, a partir del cual comienza la investigación. En el segundo paso se definen las palabras clave, para la búsqueda de artículos, además de hacer la colección y la selección de los mismos. En el paso tres se generaron preguntas de revisión con el fin de extraer la información de los artículos. En el cuarto paso se someten los artículos seleccionados a las preguntas de revisión y se consignan los resultados de forma sistemática en cuatro matrices de resultados.

1.1.1 Definir el problema inicial.

El problema inicial es la base para desarrollar la revisión de la literatura ya que determina el enfoque para realizar la revisión. Para escoger nuestro problema inicial se partió de un proyecto de investigación que está desarrollando el Grupo de Automática de la Universidad Nacional (GAUNAL) en alianza con el Grupo de

Investigación en Integraciones Telemáticas (GIT) del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), titulado “Maximización de extracción de energía en aerogeneradores para cogeneración urbana en el Valle de Aburrá”. La problemática identificada es “la necesidad de una metodología para diseñar convertidores DC-DC, y sus controladores, utilizados con aerogeneradores en zonas urbanas”.

1.1.2 Definir las palabras clave; buscar, seleccionar y recolectar artículos

Las palabras clave extraídas del problema inicial planteado en el paso uno son: convertidor DC-DC, control del convertidor, zona urbana y aerogenerador. A partir de éstos términos surgen otros elementos relacionados o sinónimos, tales como: aplicación residencial, turbina eólica, energía del viento y topología urbana. En las primeras búsquedas se detectaron nuevas palabras claves como “WECS” que es una sigla de “Wind Energy Conversion System”, o “PMSG”, sigla de “Permanent Magnet Synchronous Generator”. Las bases de datos consultadas fueron: IEEExplorer, ScienceDirect y Scopus; esta última es una base de datos referencial donde se encuentran artículos de Elsevier, IEEE y otras editoriales especializadas en ingeniería.

Para ilustrar el resultado de buscar y seleccionar un artículo, se comienza por utilizar las palabras claves “turbina eólica” y “aplicación residencial”, en inglés “wind turbine” y “residential application”. La búsqueda se realizó en IEEExplore y se encontró el artículo “PMSG wind turbine system for residential application”. El resumen del artículo se sometió a las preguntas: ¿Qué se hace?, ¿Por qué se hace?, ¿Cómo lo hace? y ¿Qué resulta? El resumen contesta las dos primeras preguntas evidenciando que se utiliza un pequeño sistema de generación eólica para suplir una carga residencial. Estos elementos se consideran suficientes para conservar el artículo. Repitiendo este procedimiento, un total de 17 artículos que tratan el tema de interés y que han sido publicados en los últimos 5 años, fueron seleccionados y analizados.

1.1.3 Generar las preguntas de revisión para extraer información de los artículos

Para generar las preguntas de revisión, se dividió el problema inicial en cuatro subtemas, para cada uno de los cuales se formuló una pregunta asociada. A partir de este primer interrogante se proponen las preguntas de revisión del subtema.

El subtema 1 se refiere a las generalidades del sistema de micro generación eólica y la pregunta formulada para indagar acerca de este subtema es: *¿Cómo se define un sistema de generación eólica en zonas urbanas?* Posteriormente esta pregunta se divide en tres preguntas de revisión.

- a. ¿Cuál es el tipo de conexión que se reporta para sistemas de generación eólica?
- b. ¿Cuál es la potencia del sistema de generación?
- c. ¿Cuáles son los elementos que componen el sistema de generación?

El modelado del sistema de generación eólica es abordado en el subtema 2 y la pregunta asociada es: *¿Cuáles son los modelos usados para representar los elementos que componen un sistema de micro generación eólica?* A continuación se definieron tres preguntas de revisión:

- a. ¿Cuál es el modelo usado para el generador?
- b. ¿Cuál es el modelo usado para el rectificador?
- c. ¿Cuál es el modelo usado para la turbina eólica?

El subtema 3 presenta el diseño del convertidor DC-DC de potencia y la pregunta asociada a este subtema es: *¿Cómo se seleccionan y se diseñan los convertidores DC-DC para aplicaciones eólicas?* Las preguntas de revisión definidas a partir de la pregunta del subtema son:

- a. ¿Qué convertidor se usa?

- b. ¿Qué problemas causa el convertidor DC-DC en el generador eléctrico y en la carga?
- c. ¿Qué método es usado para calcular los parámetros de los convertidores DC-DC usados en generación eólica?

Finalmente el subtema 4 se refiere al diseño del control de convertidor DC-DC. De este subtema se genera la pregunta: *¿Cómo se selecciona y diseña la estrategia de control del convertidor DC-DC?* Las correspondientes preguntas de revisión son:

- a. ¿Qué estrategias son usadas para el control de convertidores?
- b. ¿Cuáles son las variables controladas en los convertidores?
- c. ¿Cuáles son los criterios de desempeño que son usados para el diseño de los controladores?

1.1.4 Someter los artículos a las preguntas de revisión consignando los resultados sistemáticamente

Para consignar la información se utilizará una matriz de resultados, dividida en cuatro tablas: Tabla 1-1 sintetiza las respuestas a las preguntas de revisión acerca de las generalidades del SMGE. La Tabla 1-2 incluye las respuestas acerca del modelado del SMGE. La Tabla 1-3 presenta las respuestas a las preguntas del diseño del convertidor y la Tabla 1-1 incluye las respuestas a las preguntas de revisión del control del convertidor. Cuando el artículo en revisión no especifica una respuesta para alguna pregunta, la celda es marcada con la letra "X". En cada tabla se presenta un porcentaje, el cual indica el número artículos que contesta una pregunta específica; esto se usará luego para la formulación del problema de investigación. Al final de cada columna aparece un porcentaje, cual se refiere a porcentaje de artículos que contestan a cada pregunta en particular, esta información es usada en la formulación del problema de investigación.

Tabla 1-1. Matriz de respuestas de generalidades del SMGE.

Artículos		Pregunta a	Pregunta b	Pregunta c
[6]	Bisenieks, 2011	Red eléctrica	1250W	CE, I
[7]	Arifujjaman, 2010	Red eléctrica	1800 W	C, I
[8]	Alepuz, 2010	Red eléctrica	1000 W	I
[9]	Meiqin, 2010	Red eléctrica	X	I, Filtro
[10]	Hua, 2010	Carga AC aislada	200 W	C, I, y C bidireccional, B
[11]	Sinha, 2009	Carga AC aislada	200 W	C, I
[12]	Nagliero, 2009	Red eléctrica	X	I, filtro LC
[13]	Lazarov, 2009	Red eléctrica	1500 W	C, I, Transformador
[14]	Morales, 2009	Carga AC aislada	X	C, I
[15]	López, 2009	Carga DC aislada	X	C, B
[16]	Goto,2009	Carga DC aislada	250 W	C, Step down chooper , EDLC
[17]	Sinha, 2008	Carga AC aislada	X	C, B, I
[18]	Chiniforoosh, 2008	Carga DC aislada	X	Filtro LC, C
[19]	Arifujjaman, 2008	Carga CA aislada	X	I
[20]	Eren,2006	Carga DC aislada	X	C, B
[21]	Tafticht, 2006	Carga DC aislada	X	C, B
[22]	Whaley, 2006	Red eléctrica	X	CE, I
PAR%		100 %	41.17 %	100 %

Tabla 1-2. Matriz de respuestas a las preguntas de revisión del modelado del SMGE

Artículos		Pregunta a	Pregunta b	Pregunta c
[6]	Bisenieks, 2011	M. fuente trifásica	M. rectificador controlado	X
[7]	Arifujjaman, 2010	M. fuente trifásica	M. rectificador no controlado	Modelo dinámico
[8]	Alepuz, 2010	Modelo de Park	X	X
[9]	Meiqin, 2010	Modelo fuente de corriente considerando el rectificador	Modelo fuente de corriente considerando el generador	X
[10]	Hua, 2010	X	X	Modelo estático
[11]	Sinha, 2009	X	M. rectificador no controlado	X
[12]	Nagliero, 2009	X	X	X
[13]	Lazarov, 2009	M. fuente trifásica	X	X
[14]	Morales, 2009	Modelo de Park	X	X
[15]	López, 2009	X	X	Modelo estático
[16]	Goto, 2009	Modelo del PMRG	X	Modelo estático
[17]	Sinha, 2008	X	M. rectificador no controlado	Modelo estático
[18]	Chiniforoosh, 2008	Modelo de Park	X	X
[19]	Arifujjaman, 2008	Modelo de Park	M. rectificador no controlado	Modelo estático
[20]	Eren, 2006	X	M. rectificador no controlado	Modelo estático
[21]	Tafticht, 2006	M. fuente trifásica	M. rectificador no controlado	Modelo estático
[22]	Whaley, 2006	M. fuente trifásica	X	X
PAR%		64.70 %	47.05 %	47.05 %

Tabla 1-3. Matriz de respuestas a las preguntas de revisión del diseño del convertidor.

Artículos		Pregunta a	Pregunta b	Pregunta c
[6]	Bisenieks, 2011	qZS	X	X
[7]	Arifujjaman, 2010	Boost	X	X
[8]	Alepuz, 2010	Back to back	X	X
[9]	Meiqin, 2010	X	X	X
[10]	Hua, 2010	Boost y un bidireccional	X	X
[11]	Sinha, 2009	Buck	X	X
[12]	Nagliero, 2009	Back to back	X	X
[13]	Lazarov, 2009	Boost	Los armónicos disminuyen la eficiencia	X
[14]	Morales, 2009	Boost	X	X
[15]	López, 2009	Boost + buck	X	X
[16]	Goto, 2009	Buck-boost	X	X
[17]	Sinha, 2008	Buck	X	El máximo rizado es del 5%
[18]	Chiniforoosh, 2008	Boost	X	X
[19]	Arifujjaman, 2008	X	X	X
[20]	Eren, 2006	Buck	X	El máximo rizado es del 5%
[21]	Tafticht, 2006	Buck-boost	X	X
[22]	Whaley, 2006	X	X	X
PAR%		82.35 %	5.88 %	11.76 %

Tabla 1-4. Matriz de respuestas a las preguntas de revisión acerca del control del convertidor.

Artículos		Pregunta a	Pregunta b	Pregunta c
[6]	Bisenieks, 2011	X	X	X
[7]	Arifujjaman, 2010	PI	Corriente de entrada	Regular el voltaje en el enlace DC
[8]	Alepuz, 2010	PI	Velocidad del generador, voltaje de salida y flujo de potencia reactiva. En LVRT, voltaje de salida y potencia reactiva	Durante LVRT, mantener la potencia demandada
[9]	Meiqin, 2010	PI	Velocidad del generador y corriente a la red	Proveer una forma de onda sinusoidal de la corriente a la red
[10]	Hua, 2010	Algoritmo de carga y descarga de una batería	Potencia en la carga	Mantener constante la potencia en la carga
[11]	Sinha, 2009	PI	Voltaje de salida	Seguir y regular el voltaje en el enlace DC
[12]	Nagliero, 2009	PI y P + resonante	Voltaje de salida y factor de potencia hacia la red	Regular el voltaje constante en el enlace DC y proveer una corriente sinusoidal en fase con el voltaje de la red
[13]	Lazarov, 2009	X	Voltaje de salida	Frecuencia de corte 400Hz y 20db/dec
[14]	Morales, 2009	PI	Voltaje de salida	Regular el voltaje de salida y la frecuencia en una carga ca
[15]	López, 2009	PI en cascada	Voltaje de entrada y salida	X

Tabla 1-5: Continuación

[16]	Goto, 2009	Algoritmo de control MPPT y carga y descarga de EDLC	La potencia extraída y el voltaje en la carga	X
[17]	Sinha, 2008	X	Voltaje de salida	Seguir y regular el voltaje constante en el enlace DC
[18]	Chiniforoosh, 2008	PI	Voltaje de salida	X
[19]	Arifujjaman, 2008	PID	El valor efectivo de la carga	X
[20]	Eren, 2006	X	Corriente a la salida, voltaje la salida	Cargar la batería
[21]	Tafticht, 2006	Algoritmo de control MPPT	Voltaje-corriente constante y pulso de carga	X
[22]	Whaley, 2006	Controlador basado en una tabla de búsqueda	La corriente a la red	Proveer una corriente sinusoidal en fase con el voltaje de la red
PAR%		76.64 %	94.11 %	64.70 %

1.2 Formulación del problema de investigación.

Para formular el problema de investigación se parte del análisis de las matrices de resultados construidas en la revisión de la literatura, con el fin de repasar las técnicas y metodologías reportadas, e identificar las posibles brechas de investigación que puedan existir. Al identificar las brechas se definen preguntas de investigación que no han sido resueltas en la literatura, y con la intención de resolverlas se propone el problema de investigación.

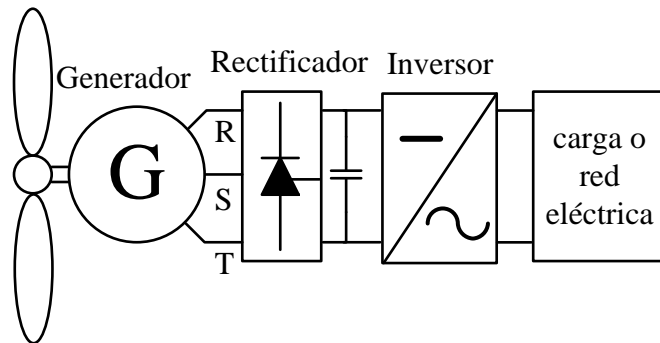
1.2.1 Analizar y discutir los resultados

En la **Tabla 1-1**, la pregunta a del subtema 1 fue contestada por el 100 % de los artículos y muestra que los sistemas de micro generación eólica tienen dos

formas de conexión. El 41.18 % de los artículos reporta conexión a la red eléctrica, el 58.82 % está conectado a una carga aislada y de estos, el 50 % de los artículos reporta conexión a una carga CA y el otro 50 % a una carga DC. La pregunta *b* del subtema 1 fue contestada por el 41.17% y el rango de potencia reportado está entre 200 W y 1800 W. Los micro generadores con potencias iguales o mayores a 1000 W están conectados a la red eléctrica y los demás alimentan cargas aisladas. La pregunta *c* del subtema 1 fue respondida por el 100% de los trabajos seleccionados. Se observó que todos los sistemas de micro generación eólica cuentan con una turbina eólica, un generador de imanes permanentes, y solamente en [16], [22] un generador sincrónico de reluctancia, y un rectificador, por lo tanto estos elementos no son reportados en la **Tabla 1-1**. Los demás elementos en la cadena de generación varían dependiendo del tipo de conexión. El 70.58 % de los trabajos reportan el uso de un inversor, el cual se muestra en la tabla con la letra "I". En estos casos el sistema de micro generación está conectado a la red eléctrica o a una carga CA. El 29.41% de los artículos revisados reportan el uso de una batería, la cual se muestra en la tabla con la letra "B". [15], [20],[21] reportan conexión a una carga DC y [10],[17] una carga CA. En [10] se reporta una link de DC a la cual se conecta la batería mediante un convertidor bidireccional. El uso de la batería ofrece respaldo al suministro de energía hacia la carga. El 64.70 % de los artículos reporta el uso de convertidores convencionales, estos convertidores son mostrados en la tabla con la letra "C". Los tipos de convertidores utilizados en los sistemas de micro generación son analizados en el Tabla 1-2.

Después de someter los artículos a las preguntas acerca de las generalidades del sistema de generación eólico se encontró que estos sistemas están divididos en dos etapas: Una primera etapa de generación que está conformada por la turbina eólica y el generador. La segunda etapa adecúa la energía eléctrica entregada por el generador a las condiciones de la carga. Esta segunda etapa está conformada por varias estructuras, por ejemplo, un convertidor back to back, ver Figura 1-1; ó un rectificador, un convertidor DC-DC y un inversor, ver Figura 1-2 y Figura 1-3.

Figura 1-1. Sistema de micro generación eólica con un convertidor back to back



La Figura 1-2 muestra un banco de baterías, las cuales son usadas para suplir la carga cuando el recurso del viento no está disponible y ser cargadas cuando hay presencia del mismo.

Figura 1-2. Sistema de micro generación eólico típico conectado a la red eléctrica

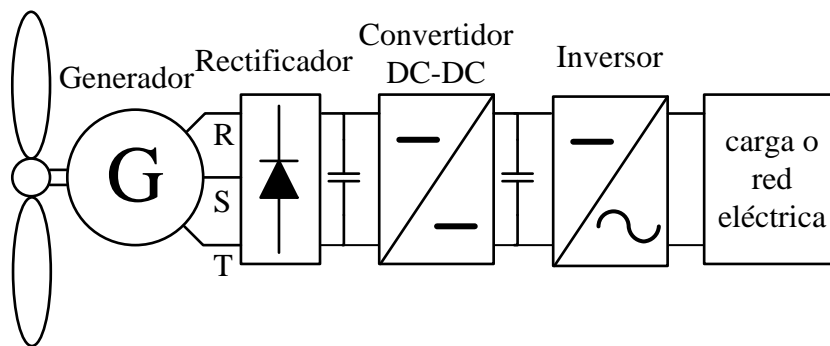
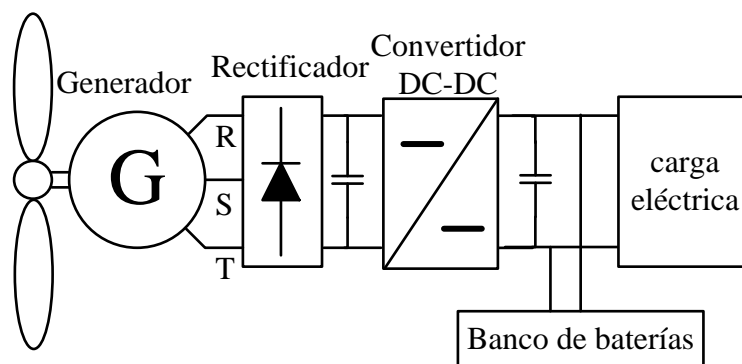


Figura 1-3. Sistema de generación eólico típico conectado a una carga aislada



La Tabla 1-2 muestra las respuestas a las preguntas en el tema de modelado del sistema de generación eólica. La pregunta *a* del subtema 2 fue contestada por el 64.70 % de artículos y se encontraron tres formas diferentes de modelar el generador sincrónico de imanes permanentes. La representación más común del generador es el modelo de una fuente trifásica en serie con una reactancia, el cual es reportado por el 35.52 % de los trabajos revisados [6], [7], [9], [13], [21], [22]. El modelo del generador basado en la transformación de Park es reportado por el 23.52% de los artículos revisados [8], [14], [18], [19] y la referencia [16] reporta un modelo circuital de un generador sincrónico de imanes permanentes de alta reluctancia.

La pregunta *b* subtema 2 fue contestada por el 47.05 % de los trabajos revisados [6], [7], [11], [17], [19–21], de los cuales el 35.29 % reporta el modelo de un rectificador no controlado. En [6] se presenta el modelo de un rectificador controlado y en [9] se presenta el rectificador en conjunto con el generador como una fuente de corriente. La pregunta *c* del subtema 2 fue contestada por el 47.05 % de los artículos, de los cuales el 41.17 % presentan un modelo estático de la turbina [7], [15–17], [20], [21], [23] y solamente en la referencia [7] se menciona un modelo dinámico de la turbina eólica. Aunque la naturaleza del viento no es predecible, la mayoría de artículos modela el sistema de conversión de energía eólica frente a entradas constantes o cambios de tipo escalón. Algunas de las soluciones propuestas en los artículos revisados pueden ser extendidas probando su efectividad frente al comportamiento natural del viento.

En la Tabla 1-3 la pregunta *a* subtema 3 fue contestada por el 82.35 % de los artículos revisados; de estos, el 35.29 % [7], [10], [13–15], [18] reporta el uso de un convertidor tipo boost, el 23.53 % [11], [17], [20] reporta el uso de un buck, el 11.76 % [16], [21] reporta el uso de un buck-boost, el 11.76 % [8], [12] un back to back y la referencia [6] un convertidor DC-DC qZs .

La pregunta *b* del subtema 3 fue contestada por el artículo [13], el cual reporta que la presencia de armónicos aumenta las pérdidas en el generador, y por tal motivo se disminuye la eficiencia del sistema de generación. La pregunta *c* subtema 3 fue contestada por el 11.76% de los artículos [17], [20], en los cuales se indica que el rizado no puede superar el 5%, con este tope se calcula un L mínimo y un C mínimo y ambos casos se basan en la referencia [24], donde se obtienen las ecuaciones para el cálculo de L y C en el caso de un convertidor buck. La elección del tipo de convertidor de potencia depende de los requerimientos dados por el generador y por la carga, los cuales son: los niveles de tensión y corriente a la salida del generador, el nivel de armónicos permisibles en el generador y en la carga y los niveles de tensión y corriente demandados por la carga.

Las ventajas de utilizar un convertidor son: el control de la generación se realiza con el ciclo de trabajo del convertidor, se mantiene un voltaje apropiado para el inversor, permite seleccionar la eliminación de armónicos generando una reducción en las pérdidas, y el control del inversor es más sencillo al no tener que regular la tensión.

En la Tabla 1-3 se muestran los resultados de las preguntas de revisión acerca del control del convertidor DC-DC. La pregunta *a* subtema 4 fue contestada por el 76.64 % de los artículos. La estrategia de control más usada es la proporcional integral PI con un 41.17 % de los artículos reportados, [7–9], [11], [12], [14], [18]; además, son usados algoritmos propios para cumplir algunas tareas específicas como son: la carga y descarga de un banco de baterías, la obtención de potencia máxima y la conexión con la red eléctrica.

La pregunta *b* subtema 4 es contestada por el 94.11%. La variable de control depende del tipo de aplicación y por este motivo cada artículo tiene una o más variables de interés, entre las cuales se encuentran: el voltaje de salida del convertidor, la velocidad del generador, la corriente de salida del generador y la potencia entregada a la carga, entre otras. La pregunta *c* del subtema 4 es

contestada por el 64.70 % de los artículos y el criterio más usado es el seguimiento de la referencia en un 52.94% de los casos corresponde a la corriente de salida del generador o la tensión que se suministra a la carga [7–13], [17], [22]. En el artículo [13] se recomienda usar una frecuencia de corte y ganancia con el fin de garantizar el rechazo de perturbaciones.

1.2.2 Definir las preguntas de investigación

Las preguntas de investigación se definen a partir de las brechas que aparecen en las matrices. Para establecer cuando existe una brecha, primero se calcula el porcentaje de artículos que responden cada una de las preguntas de revisión (PAR%) utilizando la Ecuación (1-1); posteriormente se promedian estos porcentajes Ecuación (1-2) y el resultado o porcentaje promedio de artículos que responden la pregunta de revisión (PPAR%) se divide entre tres para obtener un porcentaje promedio mínimo o porcentaje de corte (PPMAR%) el cual se utiliza para seleccionar la preguntas revisión, que se tomara definir las preguntas de investigación. Según la Ecuación (1-3). Cuando el PAR% de una pregunta es menor al PPMAR% se revisan en detalle los artículos incluidos en el PAR% para evaluar si resuelven completamente la pregunta de revisión o si por el contrario son necesarios esfuerzos adicionales para resolverla. Cuando esto ocurre se considera que se ha identificado una brecha en la literatura. En este paso pueden surgir una o más preguntas de investigación.

$$PAR\%(n) = \frac{\text{Número total de artículos que contestan la pregunta } n}{\text{Número total de artículos}} * 100\% \quad (1-1)$$

$$PPAR\% = \frac{PAR\%(1) + PAR\%(2) + \dots + PAR\%(n)}{\text{Número total de preguntas}} \quad (1-2)$$

$$PPMAR\% = \frac{PPAR\%}{3} \quad (1-3)$$

Para llegar a las preguntas de investigación empezamos analizando cómo fueron contestadas las preguntas de revisión, para esto vamos a la matriz que se obtuvo en el paso 4. Al tener los PAR% de todas las preguntas se calcula el PPAR% = 61.28 % y con este se calcula el PPMAR% = 20.42 %. A raíz de este último porcentaje fueron seleccionadas: la pregunta *b* del subtema tres con un PAR% = 5.88 % y la pregunta *c* con un PAR% = 11.76 % del subtema tres de diseño de convertidores.

La primera pregunta en ser revisada es la pregunta *b* del subtema tres: *¿qué problemas causa el convertidor DC-DC en el generador eléctrico y en la carga?* Al analizar esta pregunta se encontró que la presencia de armónicos en el sistema de generación disminuye la eficiencia del sistema [13]; además, no se pueden superar niveles de armónicos en el generador ni en la carga [25]. Luego de ser detectada la presencia de armónicos como un problema, queda el interrogante cómo llevar esto a criterios de diseño que permitan mitigar el problema, por esto se formuló la siguiente pregunta de investigación: *¿qué efecto tienen los armónicos sobre el generador y cómo esto se traduce en un factor para seleccionar los valores de *L* y *C*?*

La siguiente es la pregunta *c* del subtema 3: *¿qué método es usado para calcular los parámetros de los convertidores DC-DC usados en generación eólica?* En la literatura no se encontró información relacionada con el cálculo de los parámetros del convertidor a excepción de una referencia [17], en la cual se presenta un criterio de rizado máximo de 5% para el cálculo de los componentes. Por esta razón surge la interrogante de cómo hacer la elección adecuada de los parámetros del convertidor para aplicaciones de micro generación eólica, y con esto sale la pregunta de investigación: *¿cómo se pueden escoger de manera adecuada de los parámetros de los convertidores para aplicaciones de micro generación eólica en zonas urbanas?*

1.2.3 Definir el problema de investigación

Para definir el problema de investigación se analizan las preguntas de investigación, en las cuales se puede observar que existen interrogantes relacionados con el diseño de los convertidores DC-DC, y a partir de las cuales el problema queda definido como se propone en los renglones subsiguientes.

En los sistemas de micro-generación eólica, el convertidor DC-DC cumple varias tareas que son: control del punto de operación del aerogenerador, regulación del nivel de tensión en la carga y disminución los armónicos en la misma [4]. Para que el convertidor DC-DC cumpla a cabalidad estas tareas su diseño debe cumplir con requerimientos impuestos por la fuente de generación y la carga. La revisión de los resultados obtenidos en el paso 4, mostró la ausencia de una metodología de diseño que calcule los parámetros de un convertidor DC-DC sin pérdidas, utilizado en aerogeneradores de baja potencia (menor a 1500 W), que alimentan cargas independientes de la red eléctrica, en términos de los requerimientos del sistema de generación eólica. Los requerimientos de un sistema de generación eólica son: la potencia del sistema, las tensiones y corrientes a la entrada y a la salida del convertidor DC-DC [26], y el nivel de armónicos inyectados a la carga y al generador [11]. Si los convertidores son diseñados teniendo en cuenta estos requerimientos, se puede alargar la vida útil de los elementos de generación y consumo, y así mismo mejorar la eficiencia del sistema de generación [27]. A partir de esta necesidad se llega al objetivo general del proyecto de investigación, que es la solución de dicho problema; el objetivo queda formulado la siguiente manera:

Proponer una metodología de diseño para convertidores DC-DC ideales que sean aplicados a aerogeneradores de baja potencia, menor a 1500 W, y ubicados en zonas urbanas, que garantice el cumplimiento de los requerimientos para el sistema de generación eólica: voltajes, corrientes, potencia y niveles de contenido armónico a la salida y entrada de los convertidores.

1.3 Conclusiones

En este capítulo se presentó un método para realizar revisiones sistemáticas de literatura especializada. Algunos de los resultados que entregó el método de revisión fueron: Los SMGE están conformados por una turbina eólica, un generador sincrónico de imanes permanentes, un rectificador no controlado, un convertidor DC-DC y un banco de baterías para la operación aislada y/o un inversor si la carga es de CA o está conectada a la red eléctrica. En el caso de los convertidores DC-DC se encontró que los más usados son el Boost y el Buck. Otro resultado relevante fue la ausencia de una metodología para el diseño de los convertidores DC-DC acorde con los requerimientos del sistema de micro generación eólica, como son la potencia del sistema, los niveles de las tensiones y corrientes a la entrada y a la salida del convertidor DC-DC y los niveles de armónicos inyectados a la carga y al generador de imanes permanentes. A partir del último resultado se define la necesidad de una metodología para diseñar el convertidor DC-DC teniendo en cuenta los requerimientos del generador y la carga.

2 Modelado de la turbina eólica, el generador y el rectificador

En el capítulo uno se presentó una revisión de la literatura en la cual se resalta la necesidad de desarrollar una metodología para diseñar convertidores DC-DC para un SMGE. Para el desarrollo y la evaluación de esta metodología es necesario modelar la turbina eólica, el generador de imanes permanentes y el rectificador trifásico. Por este motivo, en este capítulo se presentan el modelo y la estimación de parámetros.

En este capítulo se presenta el modelo de la turbina, el generador sincrónico de imanes permanentes y el rectificador trifásico de onda completa y se selecciona un modelo reducido equivalente. El modelo de la turbina, el generador y el rectificador cumplen con dos objetivos: permitir la construcción del modelo equivalente estático y la validación del diseño del convertidor y del control del convertidor. El modelo equivalente es usado para el diseño del convertidor y del controlador, dado que permite representar la fuente en estado estacionario alrededor de un punto de operación y permite simplificar el diseño del convertidor y del control. Este capítulo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2.1 se presenta el modelado de la turbina, el generador y el rectificador, en la sección 2.2 se realiza la identificación del modelo, en la sección 2.3 se hace la selección del modelo equivalente y por último, se presentan las conclusiones del capítulo.

2.1 Modelo de la turbina, el generador y el rectificador

A continuación se presentan los modelos de: la turbina eólica, el generador sincrónico de imanes permanentes y el rectificador, además se presenta el modelo mecánico que conecta la turbina y el generador.

2.1.1 Modelo de la turbina eólica

Para modelar la turbina eólica se calcula la potencia disponible en el viento P_v , la cual se calcula para un área específica A , y está dada por (2-1) [28]:

$$P_v = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2-1)$$

donde la potencia está dada en W , ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , v es la velocidad del viento en m/s y A está dada en m^2 . Las turbinas eólicas solo pueden extraer una porción de la potencia presente en el viento; esta porción está representada por el coeficiente de potencia C_p en (2-2), en donde P_t es la potencia aprovechada por la turbina en W :

$$C_p = P_t / P_v \quad (2-2)$$

El coeficiente de potencia del rotor de una turbina eólica varía en función de la relación de velocidades λ , definida como la relación entre la velocidad de barrido de la turbina y la velocidad del viento. Esta relación se presenta en (2-3), en donde R es el radio de la turbinan:

$$\lambda = \omega \cdot R / v \quad (2-3)$$

El modelo estático de una turbina eólica de tres palas se obtiene a despejar P_t de (2-2) y sustituir P_v ; si además se divide por la velocidad angular, se obtiene el torque mecánico T_m en $N.m$, como se presenta en (2-4).

$$T_m = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda)}{\omega} \quad (2-4)$$

Los parámetros que se deben obtener para modelar una turbina eólica son la densidad del aire ρ , el área de barrido del rotor A y la función $C_p(\lambda)$.

2.1.2 Ecuación mecánica de la turbina y el generador

La ecuación mecánica de la turbina y el generador está dado por la ley de Newton para el movimiento rotacional, como se muestra en (2-5) [29].

$$T_m = T_e + J \cdot \frac{d\omega}{dt} + F \cdot \omega \quad (2-5)$$

T_m y T_e son el torque mecánico y el torque eléctrico, respectivamente, en N·m; J es la inercia mecánica en kg·m², ω es la velocidad angular en rad/s y F es la constante de fricción del sistema kg·m/s. Si se lleva (2-5) al dominio de Laplace, se puede encontrar la siguiente función de transferencia que se presenta en (2-6), con condiciones iniciales iguales a cero:

$$\frac{\omega(s)}{T_m(s) - T_e(s)} = \frac{1}{J \cdot s + F} \quad (2-6)$$

2.1.3 Modelo del generador sincrónico de imanes permanentes

El modelo dinámico del generador sincrónico de imanes permanentes se puede expresar con la transformación de Park, utilizando las ecuaciones (2-7) y (2-8). Los subíndices d y q se refieren al eje directo y al eje de cuadratura; v es el voltaje, i la corriente; L_s y R_s son la inductancia y la resistencia estator y e_q y e_d son las componentes de flujo electromagnético, las cuales se obtiene con las ecuaciones (2-9) y (2-10) en donde λ_{pm} es el flujo magnético del generador de imanes permanentes

$$v_d(t) = R_s \cdot i_d(t) + L_s \cdot \frac{di_d(t)}{dt} - e_q(t) \quad (2-7)$$

$$v_q(t) = R_s \cdot i_q(t) + L_s \cdot \frac{di_q(t)}{dt} + e_d(t) \quad (2-8)$$

$$e_d(t) = \omega_e(t) \cdot (L_s \cdot i_d(t) + \lambda_{pm}) \quad (2-9)$$

$$e_d(t) = \omega_e(t) \cdot L_s \cdot i_q(t) \quad (2-10)$$

El torque electico del generador se obtiene con la ecuación (2-11), en donde p es el número de polos [29].

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \lambda_{pm} \cdot i_q \quad (2-11)$$

Al transformar (2-7) y (2-8) al dominio de Laplace, multiplicar (2-8) por el operador j y luego sumarle (2-7) se obtiene (2-12), en donde V_s , I_s son el voltaje y la corriente de fase respectivamente.

$$I_s(s) = \frac{1}{R_s + L_s \cdot s} \cdot [-V_s(s) + p \cdot \lambda_{pm} \cdot (s)] \quad (2-12)$$

De la ecuación (2-12) se obtiene la función de transferencia que se presenta en (2-13), en donde ω se obtiene al multiplicar ω_e por el par de polos y en donde Z_L es la impedancia equivalente a la salida del generador:

$$\frac{I_s}{\omega} = \frac{p \cdot \lambda_{pm}}{(Z_L + R_s) + L_s \cdot s} \quad (2-13)$$

2.1.4 Modelo del rectificador trifásico

El rectificador trifásico se modela como una ganancia para el sistema de tal forma que el voltaje y la corriente dc se obtienen con (2-14) y (2-15) [29], en donde V_{DC} e I_{DC} son el voltaje y la corriente a la salida.

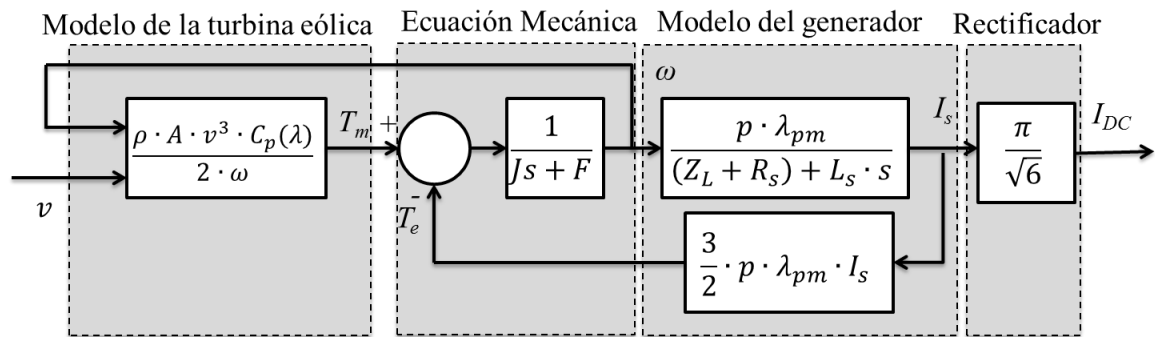
$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_s \quad (2-14)$$

$$I_{DC} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \cdot I_s \quad (2-15)$$

2.1.5 Diagrama de bloques de la turbina, el generador y el rectificador

Para ilustrar la conexión de los modelos que se presentaron anteriormente, se construyó un diagrama de bloques el cual se presenta en la Figura 2-1. En este se puede ver la entrada y la salida del modelo acoplado, que son la velocidad del viento y la corriente DC entregada por el rectificador respectivamente.

Figura 2-1. Diagrama de bloques sistema de generación eólico.



2.2 Estimación de parámetros del modelo de la fuente del SMGE.

Para llevar a cabo la estimación de parámetros de la turbina, el generador y el rectificador, se parte por la estimación de los parámetros del modelo estático de la turbina eólica, y luego se estimarán los parámetros de la ecuación mecánica y del modelo del generador.

2.2.1 Estimación de los parámetros del modelo estático de una turbina eólica de baja potencia

La turbina eólica de baja potencia que se seleccionó para ser caracterizada está localizada en la sede del Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM de la Ciudad Medellín, con coordenadas de latitud 6.245 N y longitud 75.550 W. La turbina eólica hace parte de un aerogenerador Air Brezze® 40 cuyos datos de placa se muestran en la Tabla 2-1

Tabla 2-1. Datos de placa del aerogenerador Air Brezze® 40

Peso	6,00	kg
Velocidad de arranque	2,70	m/s
Máxima velocidad del viento	49,17	m/s
Potencia Nominal	160 W a 12,50	m/s
Radio	0,58	m

A continuación se describe la estimación de los tres parámetros del modelo estático de la turbina eólica: la densidad del aire ρ , el área de barrido del rotor A y la función $C_p(\lambda)$.

El valor de la densidad del aire depende de la temperatura y la presión del lugar donde se registran los datos. Para calcular un valor promedio de la densidad del aire se instaló una estación meteorológica que registra datos de temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad del viento y dirección del viento cada 48 s. La estación almacena cada 5 minutos el promedio de los datos registrados.

El rango de medida para la velocidad del viento es 0 - 44.4 m/s. El valor de la densidad del aire es calculado con (2-16), esta ecuación es propuesta en la norma IEC 61400 [30], donde B es la presión atmosférica dada en $\text{kg/m}\cdot\text{s}^2$, T es la temperatura absoluta del aire en K y R_0 es la constante del aire seco 287,05 J.kg/K. Los datos de presión y temperatura corresponden a la información almacenada por la estación entre el 11 de abril del 2011 y el 13 de Julio del 2012. Estos datos se encuentran disponible en un sitio web [31]. El valor promedio de la densidad es $\rho = 0,9838 \text{ Kg/m}^3$:

$$\rho = B / (R_0 \cdot T) \quad (2-16)$$

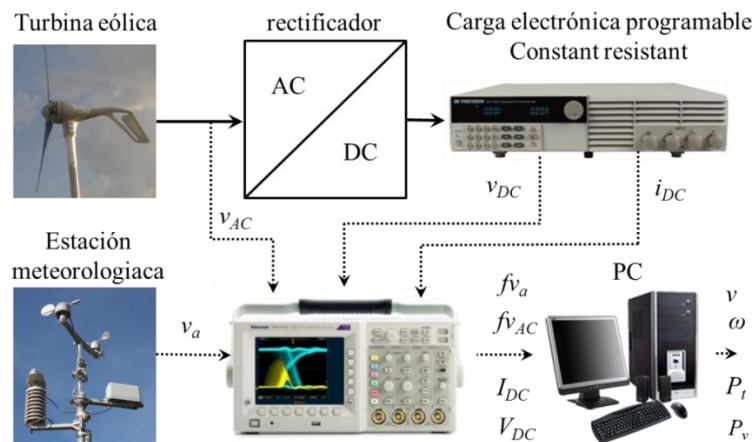
El área de barrido es el área que está delimitada por las palas de la turbina. En el caso de una turbina de eje horizontal y tres palas, el área de barrido corresponde al área de un círculo de radio R y está dada por la Ecuación (2-17), por lo tanto $A = 1,075 \text{ m}^2$.

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (2-17)$$

Para determinar la función $C_p(\lambda)$ es necesario el cálculo de C_p y de λ , durante un intervalo de tiempo determinado hasta lograr describir la función de $C_p(\lambda)$. Para calcular el C_p se utiliza la ecuación (2-2), y es necesario medir o calcular la potencia de la turbina y la potencia disponible en el viento. Para calcular λ se utiliza la ecuación (2-3), y es necesario medir la velocidad del viento y la velocidad angular del rotor.

En la Figura 2-2 se presenta el montaje propuesto para registrar la señal de voltaje AC de salida del generador v_{CA} , la señal de voltaje de salida del anemómetro v_a y las señales de voltaje DC v_{DC} y corriente DC i_{DC} en la carga electrónica. Las señales son registradas con un osciloscopio digital. El osciloscopio está programado para enviar los valores de las siguientes señales: la frecuencia de la señal voltaje CA de salida del generador $f_{V_{CA}}$, la cual se utiliza para calcular la velocidad angular del rotor ω . El osciloscopio también entrega la frecuencia de la señal de voltaje de salida del anemómetro f_{v_a} , la cual se utiliza para calcular la velocidad del viento, y el voltaje promedio V_{DC} y la corriente promedio I_{DC} en la carga, los cuales se utilizan para calcular la potencia de salida de la turbina. Cabe notar que la eficiencia del GSIP y la eficiencia del rectificador se asumen iguales a uno, con esto la potencia eléctrica medida en la carga se aproxima a la potencia de salida de la turbina y se calcula como el producto del voltaje y la corriente promedio de la carga electrónica.

Figura 2-2. Montaje para registrar datos y determinar la función del coeficiente de potencia



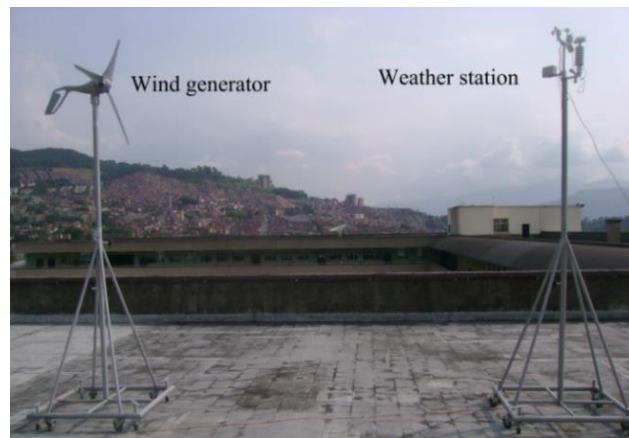
Para la ubicación de la estación meteorológica y del aerogenerador se siguieron las recomendaciones dadas por la norma IEC 64100 [30], según la cual la estación meteorológica debe colocarse a una distancia del aerogenerador entre 2 y 4 veces el diámetro del rotor, y entre estas se recomienda una distancia de 2,5 veces el diámetro del rotor. Además, la estación meteorológica debe localizarse en el sentido contrario de la dirección de viento más esperada durante la prueba. En nuestro caso la distancia tomada es de 3 metros en dirección noroccidente, ver Figura 2-3.

Las señales son registradas con un osciloscopio digital Tektronix TDS3034C. El osciloscopio está programado para registrar las señales durante un tiempo de medida $a_{tm} = 4s$ y para enviar los datos durante un tiempo de envío $te = 1s$. Además la frecuencia de muestreo es 2,5 kHz. Por lo tanto el osciloscopio envía al computador paquetes de datos cada 5 s. Los paquetes de datos contienen a $f_{v_{AC}}$, f_{v_a} , V_{DC} e I_{DC} .

La carga electrónica DC programable BK Precisión 8514 puede ser programada para operar en cuatro modos: voltaje constante, corriente constante, resistencia constante y potencia constante. Los rangos de operación son: 0.1 – 120 V, 240 A, y 1200 W. La carga es programada en el modo resistencia constante durante la prueba. El valor de la resistencia de carga RL se selecciona para extraer el

máximo de la potencia de la turbina frente a diferentes velocidades de viento. El procedimiento para seleccionar el valor de la resistencia es presentado en 2.2.1.2. Los datos enviados al computador corresponden a las señales f_{vAC} , f_{va} , V_{DC} e I_{DC} , con esta información se deben calcular las variables v , ω , P_v y P_t , para esto es necesario establecer las relaciones entre señales medidas por el osciloscopio y las variables requeridas para obtener la función $C_p(\lambda)$.

Figura 2-3. Montaje del aerogenerador y la estación meteorológica.



2.2.1.1 Caracterización del anemómetro y de la relación entre la velocidad angular y la frecuencia del generador

Para medir la velocidad del viento fue necesario caracterizar el anemómetro que viene integrado en la estación meteorológica. El anemómetro funciona con un *encoder*, el cual genera una señal rectangular de voltaje cuya frecuencia está dada por la velocidad de giro del anemómetro, la cual está dada a su vez por la velocidad del viento. Para caracterizar el anemómetro se usó un motor DC para emular la rotación provocada por el viento en el sensor. Para medir la señal de voltaje de salida del anemómetro se usó el osciloscopio digital Tektronix TDS 1000C-EDU, y simultáneamente se registró la velocidad de viento mostrada por la

interfaz de la estación meteorológica. La Figura 2-4 presenta el montaje realizado para caracterizar el anemómetro.

La velocidad del motor DC fue incrementada a través de su voltaje de alimentación y consecuentemente aumentó el registro de velocidad de viento medido por la estación meteorológica. Los datos fueron registrados con un intervalo de 2 min después del cambio del voltaje de alimentación para que la estación y el sistema logaran condiciones de estado estacionario. En la Figura 2-5 se muestran simultáneamente las interfaces del osciloscopio (izquierda) y la estación meteorológica (derecha) registradas en un mismo instante de tiempo. La interfaz del osciloscopio muestra la señal de voltaje del anemómetro y la frecuencia de la misma y la interfaz de la estación muestra la velocidad del viento equivalente a la velocidad de rotación del motor. Para cada velocidad del motor se registraron la frecuencia de la señal de salida del anemómetro y la velocidad de viento equivalente. Los datos registrados se muestran en la Figura 2-6 y su relación es ajustada por la ecuación (2-18)

$$v = 0.6798fv_a - 0.1307 \quad (2-18)$$

Figura 2-4. Montaje para caracterizar el anemómetro.

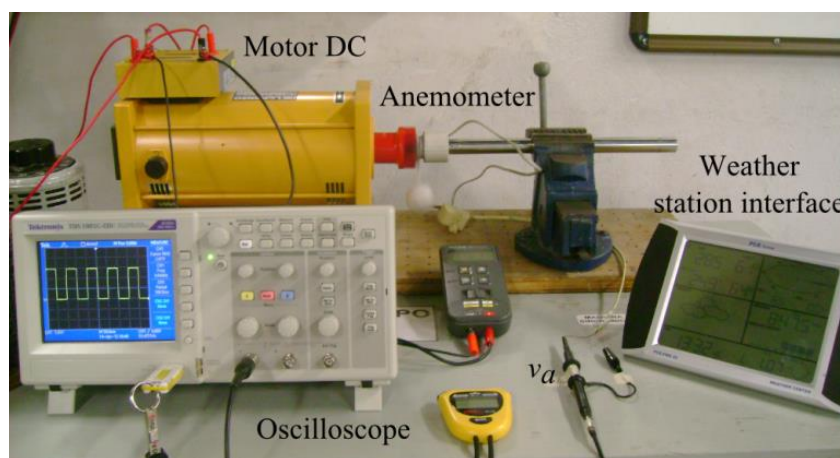


Figura 2-5. Interfaces del osciloscopio y la estación meteorológica para un mismo instante de tiempo.

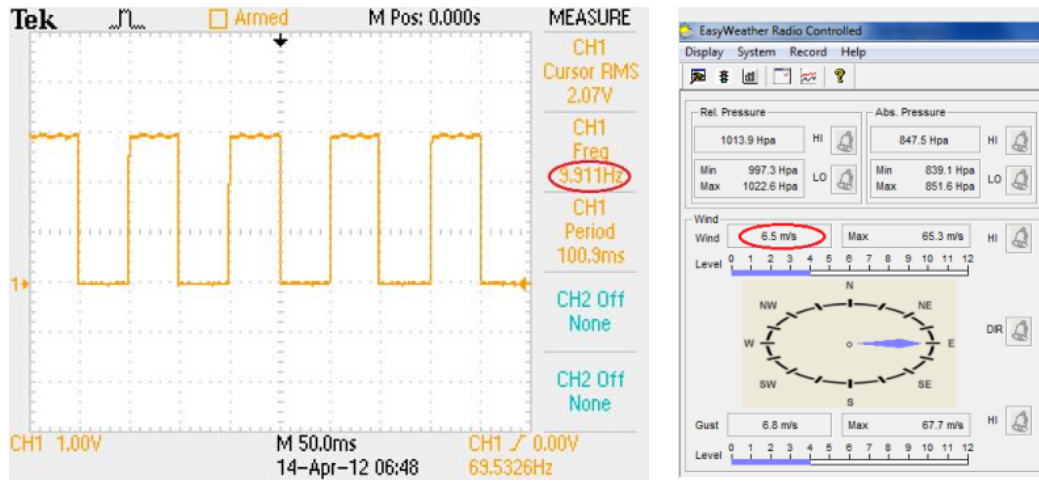
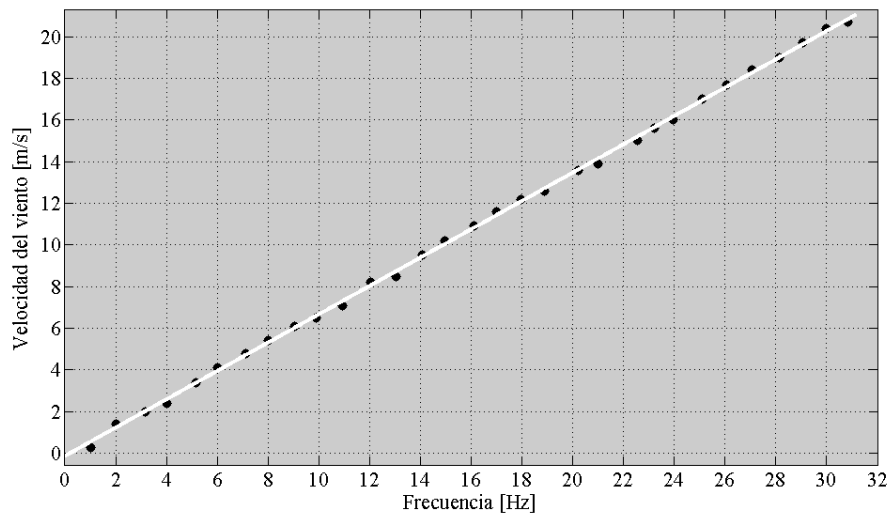


Figura 2-6. Curva característica del anemómetro



La ecuación (2-19) es utilizada para calcular la velocidad del rotor de la turbina, esta expresión muestra la relación que existe entre la velocidad angular de un generador y la frecuencia de su señal de voltaje de salida. P es el número de polos del generador.

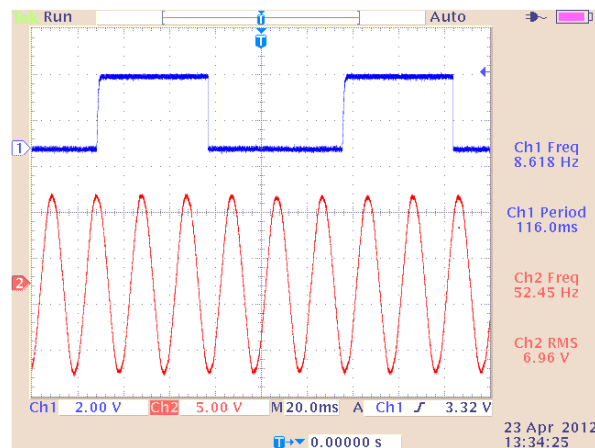
$$\omega = 4. \pi. f v_{CA} / P \tag{2-19}$$

En la Figura 2-7 se presenta la señal v_a en el canal uno y la señal v_{CA} en el canal dos. Adicionalmente la interfaz muestra las frecuencias de las señales, $f_{v_a} = 8,618$ Hz y $f_{v_{AC}} = 52,45$ Hz. P_v es calculada con la ecuación (2-1), el valor de velocidad de viento calculado con la ecuación(2-18) y el valor estimado de la densidad del aire. P_t es aproximada a la potencia eléctrica consumida por la carga, la cual es calculada con I_{DC} , V_{DC} y la ecuación (2-20):

$$P_t \cong P_e = I_{DC} \cdot V_{DC} \quad (2-20)$$

La aproximación de la ecuación (2-20) es necesaria ya que no se cuenta con un medidor de torque para calcular la potencia mecánica de la turbina. Esta aproximación incluye la eficiencia del generador y del rectificador en el cálculo de C_p .

Figura 2-7: Señales de voltaje de salida del anemómetro y el generador



2.2.1.2 Cálculo de la resistencia de carga RL

Para programar la carga electrónica DC fue necesario calcular el valor de la resistencia de carga, que garantice la extracción de la máxima potencia de la turbina frente a diferentes velocidades de viento. Para esto se construyeron las curvas características de potencia versus corriente y de voltaje versus corriente,

con las cuales se calculó la carga correspondiente a la entrega de la máxima potencia.

La prueba para construir las curvas características de potencia versus corriente y de voltaje versus corriente del generador consiste en incrementar gradualmente la carga conectada al generador para una velocidad constante del mismo, mientras se registran la corriente y el voltaje que se entregan a la carga; este proceso se repite para diferentes velocidades de giro del rotor del generador.

Para realizar la prueba se retiró el conjunto de las palas y el buje del aerogenerador y se acopló un motor DC para emular el giro producido por el viento. A fin de mantener la velocidad constante se usó el driver del motor DC, y para incrementar la carga conectada al generador se usó una carga electrónica programable DC en modo corriente constante, con la cual se incrementó la corriente demandada por la carga en pasos de 0,1 A. Con la información recolectada de las pruebas se construyeron las curvas las Figura 2-8 y Figura 2-9

Figura 2-8. Curvas de potencia versus corriente

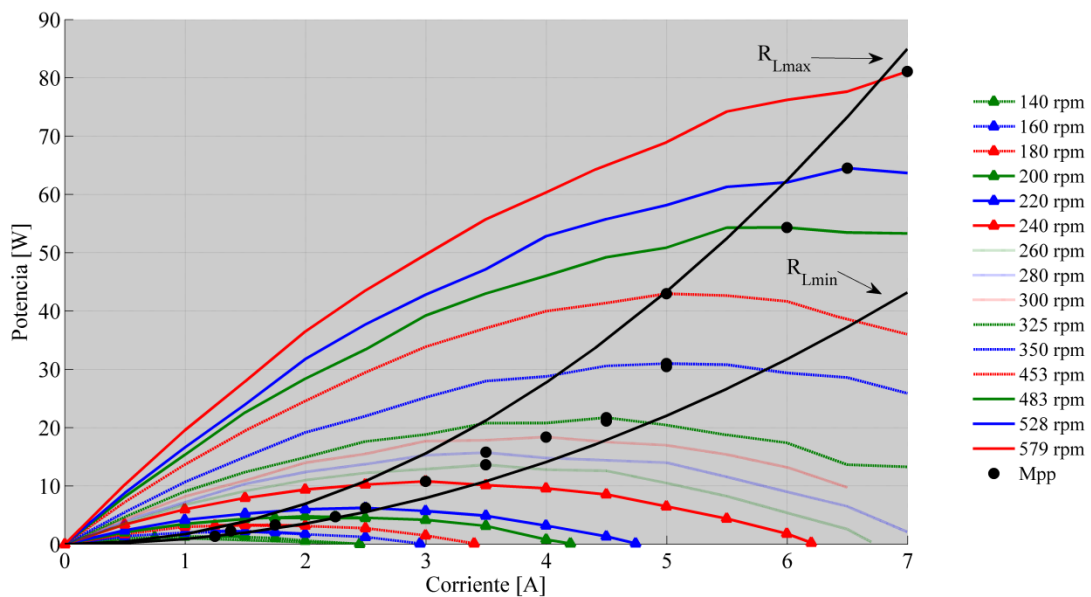
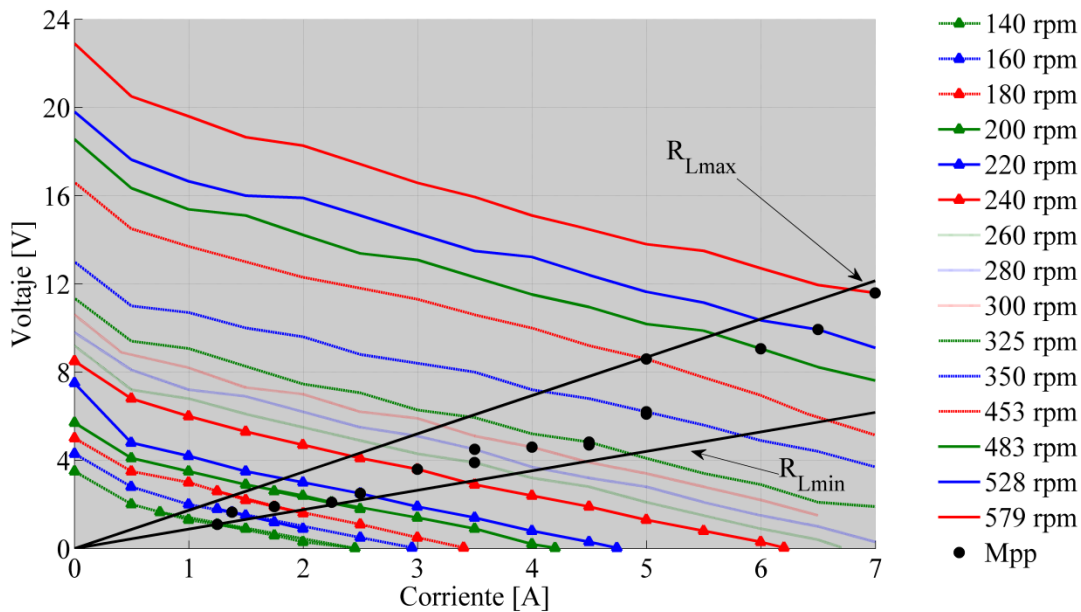


Figura 2-9. Curvas de voltaje versus corriente.

En la Figura 2-8 se puede ver como la potencia que entrega el generador para cada velocidad angular tiene un punto de máxima potencia, este punto se denomina punto de máxima potencia M_{pp} , punto en el que se puede calcular la resistencia equivalente $R_{M_{pp}}$ a partir de los valores de corriente y voltaje correspondientes. En la Figura 2-8 y en la Figura 2-9 se trazaron las líneas de resistencia constante correspondientes a los valores R_L mínimo y R_L máximo, entre las que se encuentran las resistencias $R_{M_{pp}}$ para las diferentes velocidades de giro del rotor. Los valores de $R_{M_{pp}}$ se muestran en la Tabla 2-2.

El valor de la resistencia de carga R_L , se calcula tal que con cualquier valor de velocidad de giro de la turbina se pueda extraer la máxima potencia del generador. Como se puede ver en la Figura 2-8, este valor de R_L debe estar dentro del intervalo de R_L mínimo y R_L máximo; por esto se tomó el promedio de los valores de $R_{m_{pp}}$ arrojando un valor de $R_L=1,269 \Omega$.

Tabla 2-2. Valores de resistencia de máxima potencia.

Velocidad angular [rpm]	I_{Mpp} [A]	V_{Mpp} [V]	R_{Mpp} [Ω]
579	6,997	11,590	1,656
528	6,498	9,930	1,528
486	5,997	9,060	1,511
453	4,997	8,600	1,721
350	4,997	6,200	1,241
325	4,497	4,830	1,074
300	3,997	4,600	1,151
280	2,997	5,200	1,735
260	3,496	3,900	1,116
240	2,996	3,600	1,201
220	2,497	2,500	1,001
200	2,247	2,100	0,935
180	1,747	1,900	1,088
160	1,377	1,650	1,198
140	1,247	1,100	0,882

2.2.1.3 El método de Bines para procesar la información recolectada

Para procesar la información obtenida de las medidas de la velocidad del viento, la velocidad angular y la potencia eléctrica con el fin de obtener la función del C_p (λ), usaremos el método de bins que se presenta en el estándar IEC 61400-12-1 [30], [32]. En este método los datos se agrupan en función de la velocidad de viento en intervalos de 0,5 m/s y para cada intervalo se encuentra el valor promedio de cada variable. Para el caso del C_p , el método de bins usa las ecuaciones (2-21), (2-22), (2-23) y (2-24).

$$v_i = (1/N_i) \sum_{j=1}^{N_i} v_{n,i,j} \quad (2-21)$$

$$\omega_i = (1/N_i) \sum_{j=1}^{N_i} \omega_{n,i,j} \quad (2-22)$$

$$P_i = (1/N_i) \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (2-23)$$

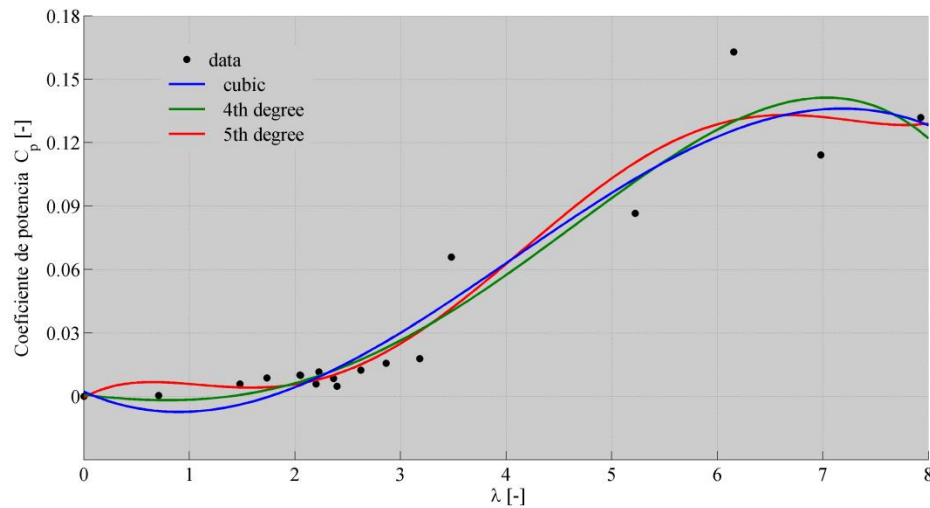
$$C_{p,i} = (P_i / 0,5 \cdot \rho A v_i^3) \quad (2-24)$$

En estas ecuaciones, v_i es la velocidad del viento normalizada y promedio en el bin i ; $v_{n,i,j}$ es la velocidad del viento normalizada del conjunto de datos j en el bin i ; ω_i es la velocidad angular normalizada y promedio en el bin i ; $\omega_{n,i,j}$ es la velocidad del viento normalizada del conjunto de datos j en el bin i ; P_i es la potencia eléctrica normalizada y promediada en el bin i ; $P_{n,i,j}$ es la potencia eléctrica normalizada del conjunto de datos j en el bin i ; $C_{p,i}$ es el coeficiente de potencia en el bin i ; y N_i es el número de datos en el bin i .

Los datos tomados entre el 19 y el 28 de julio del 2012 fueron procesados con el método de bins y a partir de los datos obtenidos de C_p y λ se construyó la Figura 2-10. En esta figura se trazaron tres funciones con el fin de describir la relación entre C_p y λ , las funciones usadas fueron: un polinomio de tercer orden, uno de cuarto y uno de quinto orden. Los polinomios de orden tres y cuatro presentan valores negativos lo cual no es válido para C_p , por este motivo se seleccionó el polinomio de quinto orden que se presenta en la ecuación (2-25). Por último los parámetros del modelo de la turbina se presentan en Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Parámetros del modelo de la turbina

Parámetro	Valor
c_1	0,000104
c_2	-0,002167
c_3	0,014742
c_4	-0,033909
c_5	0,027660
c_6	-0,000512
ρ	0,9838 kg/m ³
A	1,075 m ²

Figura 2-10. Datos de C_p versus λ 

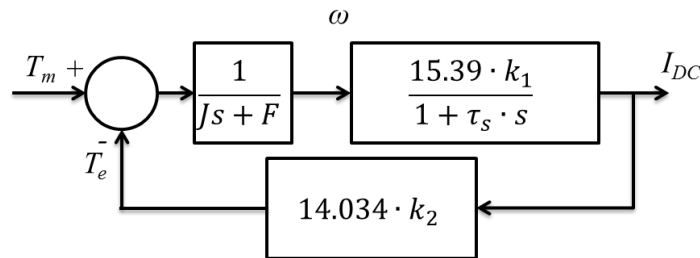
$$C_p = c_1 \cdot \lambda^5 + c_2 \cdot \lambda^4 + c_3 \cdot \lambda^3 + c_4 \cdot \lambda^2 + c_5 \cdot \lambda + c_6 \quad (2-25)$$

2.2.2 Estimación de los parámetros de la ecuación mecánica y del modelo del generador

Para la estimación de los parámetros de la ecuación mecánica y del modelo del generador, se siguieron los siguientes pasos: el primero fue la selección del modelo del sistema de generación eólico; en segundo lugar, se diseñó la señal de perturbación; el tercer paso consistió en la simulación del sistema y recolección de datos; el cuarto paso fue el procesamiento de los datos; luego se realizó la estimación de los parámetros y por último la validación del modelo.

En primer lugar, para modelar el sistema de generación se utiliza el modelo que se presenta en la Figura 2-1. Sin embargo, para realizar la identificación del modelo dinámico se tomó el modelo original y se transformó al modelo que se muestra en la en la Figura 2-11. En este último, la entrada del sistema corresponde al torque de la turbina y las salidas son ω e I_{DC} en la carga, y donde k_1 , k_2 , y τ_1 están dados por las ecuaciones (2-26), (2-27) y (2-28)

Figura 2-11. Diagrama de bloques la ecuación mecánica y del modelo del generador.



$$k_1 = \frac{\lambda_{pm} \cdot p \cdot \pi}{(Z_L + R_s) \cdot \sqrt{6}} \quad (2-26)$$

$$k_2 = \frac{3 \cdot \sqrt{6} \cdot \lambda_{pm} \cdot p}{2 \cdot \pi} \quad (2-27)$$

$$\tau_s = \frac{L_s}{Z_L + R_s} \quad (2-28)$$

El segundo paso es el diseño de la señal de perturbación. Para construir la señal, se partió de un perfil de viento tomado en el laboratorio de Energías Alternativas del Instituto Tecnológico Metropolitano de la ciudad de Medellín (ITM). El perfil de viento se modificó con el fin de poder excitar todo el rango de frecuencias de interés [33]. En la parte superior de la Figura 2-12 se presenta la señal de viento que se usó para excitar al sistema de generación eólico.

En el tercer paso se hace la recolección de datos, para realizar la recolección de los datos se tomó el perfil de viento, el cual se utilizó como entrada a un sistema detallado del sistema de generación, que se programó en el PSIM. Con el sistema

detallado se tomaron las medidas del torque mecánico, la velocidad angular y la corriente DC.

En la Figura 2-12 se muestran las variables medidas: la velocidad del viento v , la velocidad angular ω , el torque mecánico T_m de la turbina y la corriente I entregada a la carga. En el paso siguiente, correspondiente al procesamiento de los datos, se realizó un filtrado con el fin de remover el rizado de las señales medidas. En quinto lugar, para la estimación de los parámetros se utilizó la herramienta de “Parameter estimation” de Simulink de Matlab. Para la estimación de los parámetros se tomaron el 50% de los datos que su muestran en la Figura 2-12 el 50% de los datos restantes se usaron para la validación del modelo. En la Figura 2-13 se puede ver la comparación de la respuesta del sistema detallado del sistema de generación y la respuesta del modelo estimado para la velocidad angular y la corriente DC; además, los parámetros obtenidos se presentan en la Tabla 2-4

Figura 2-12: Datos medidos de la simulación.

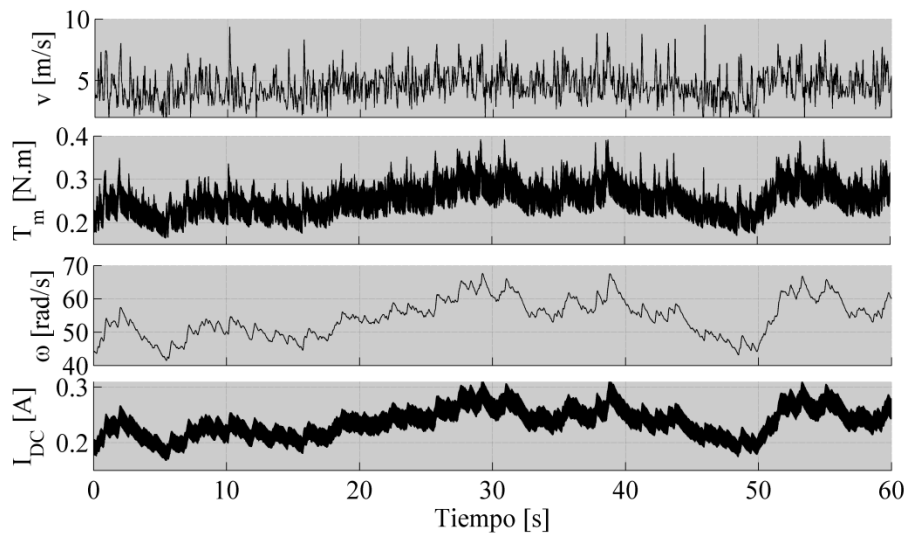
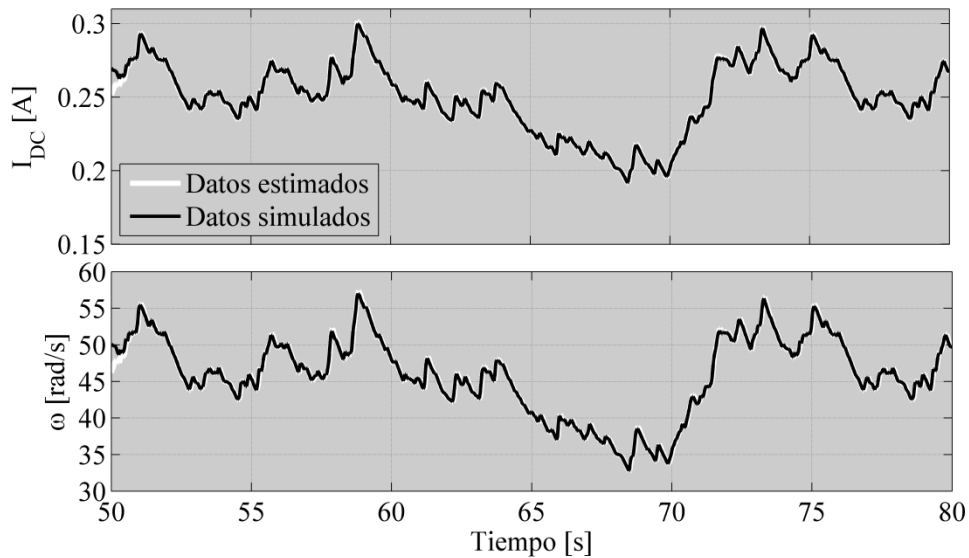


Tabla 2-4. Parámetros estimados del modelo dinámico del sistema de generación eólico.

Parámetro	Valor
F	0.004891
J	0.001024
K ₁	0.000291
K ₂	4.554e-8
τ _s	0.006552

Figura 2-13. Comparación de datos estimados y datos medidos.

Finalmente, para la validación del modelo obtenido se usó la suma normalizada de los errores cuadráticos modificada MNSSE [33], presentado en la ecuación (2-29), en donde y_i es el dato medido, \hat{y}_i el dato estimado, y n es el número de datos.

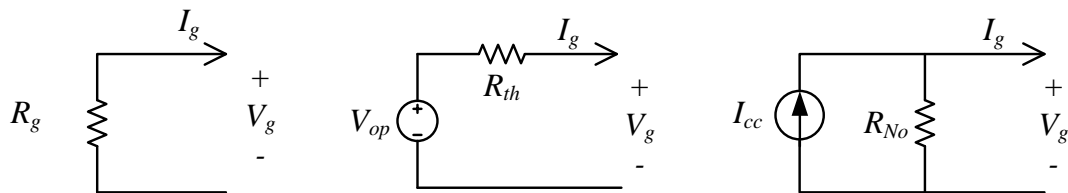
$$MNSSE = \sqrt{100^2 \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i)^2} \right)} \quad (2-29)$$

El índice se calculó para cada una de señales de salida del sistema de generación eólica. Para la velocidad angular ω el MNSSE es de 0.6696%, y para la señal de la corriente I el MNSSE es de 0.5383%. Con estos dos valores de error se puede determinar que el modelo encontrado es satisfactorio para representa el comportamiento del sistema de generación eólico.

2.3 Selección del modelo reducido estático equivalente de la turbina, el generador y el rectificador

Para diseñar el convertidor Buck es necesario seleccionar un modelo reducido, el cual facilita el cálculo de los parámetros del convertidor. Los tres modelos reducidos que se analizan para representar la turbina, el generador de imanes permanentes y el rectificador son: un modelo de resistencia diferencial, un equivalente Thevenin y un equivalente Northon. Estos modelos se muestran en la Figura 2-14 y son representados por (2-30), (2-31) y (2-32) respectivamente, en donde V_g e I_g son el voltaje y la corriente del aerogenerador, V_{op} es el voltaje de circuito abierto e I_{cc} es la corriente de corto circuito.

Figura 2-14. Modelos reducidos.



$$|R_g| = V_g/I_g \quad (2-30)$$

$$R_{th} = (V_{op} - V_g)/I_g \quad (2-31)$$

$$R_{No} = V_g/(I_{cc} - I_g) \quad (2-32)$$

El primer paso para evaluar los equivalentes es ver el comportamiento del sistema eólico, para esto se construyeron las curvas características potencia-corriente y voltaje-corriente que se presentan en la Figura 2-15. Cada característica está trazada para una velocidad de viento, en la Figura 2-15 se

presentan las curvas para las velocidades de 5, 5.5 y 6 m/s. En la figura se resalta el punto de máxima potencia para la curva de 5 m/s, el cual tiene asociados una corriente y un voltaje de máxima potencia (I_{MPP} , V_{MPP}). De cada curva se pueden obtener el voltaje de circuito abierto y la corriente de cortocircuito V_{op} e I_{cc} .

Con los datos obtenidos de voltaje de circuito abierto, corriente de cortocircuito, voltaje de máxima potencia y corriente de máxima potencia, se calculan los parámetros de los equivalentes para el punto de máxima potencia. Utilizando los equivalentes se construyen las curvas características y se comparan con la curva característica del sistema. Los resultados de la comparación se muestran en la Figura 2-16, en la cual se observa que los tres equivalentes representan el sistema en el punto de máxima potencia, pero el equivalente Thevenin describe el comportamiento del sistema de generación eólico para un mayor rango de corriente de carga, por tanto el equivalente Thevenin se selecciona para diseñar el convertidor Buck y el control del mismo.

Figura 2-15. Curvas de carga del sistema de generación eólico.

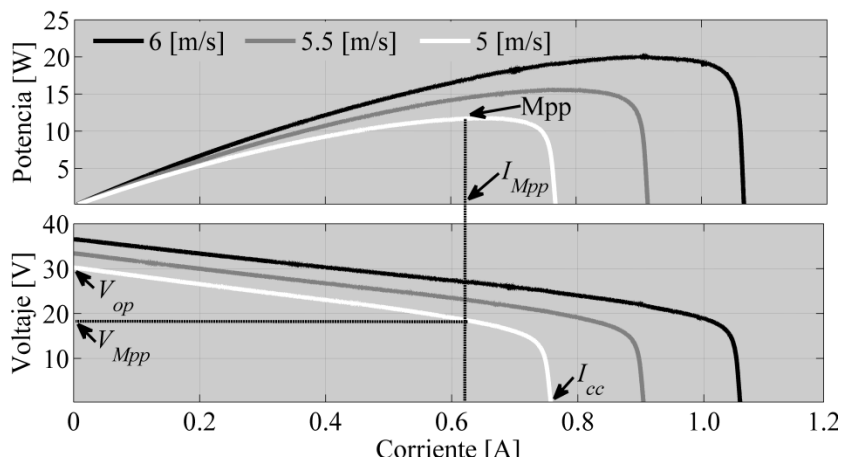
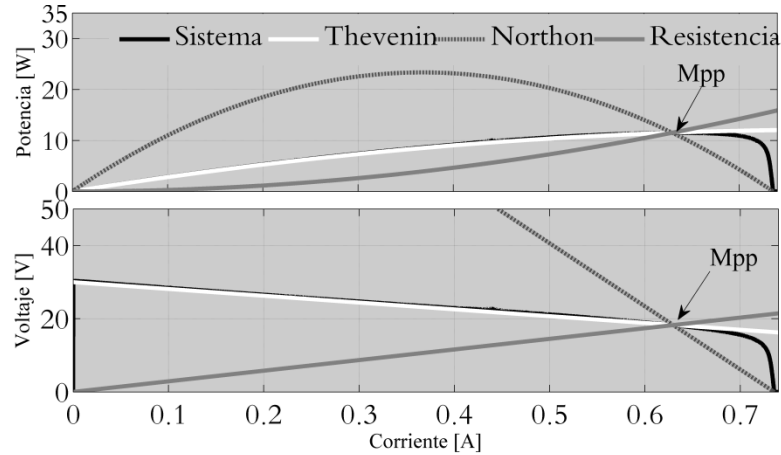


Figura 2-16. Comparación de las curvas características generadas con los equivalentes de fuente y el sistema para una $v = 4$ [m/s].



2.4 Conclusiones

En este capítulo se presentó el modelado de la turbina eólica, el generador sincrónico de imanes permanentes y el rectificador trifásico. Para esto se presentó el modelo de cada uno de los elementos, y se realizó la identificación de los parámetros de cada uno de los mismos. Además se presenta un diagrama de bloques que permite ver la conexión entre cada uno de los elementos.

Para realizar la estimación de parámetros de la turbina eólica se presentó un procedimiento experimental que permite la estimación de: la densidad del aire, el área de barrido de la turbina y la función del $C_p(\lambda)$, para este último se propuso una metodología que incluye la caracterización del anemómetro, el cálculo de una expresión para la medición de la velocidad angular y el cálculo de la resistencia de carga para la prueba, además se presenta el método para procesar la información de tal forma que permita la construcción de la función $C_p(\lambda)$. Para la estimación de los parámetros de la ecuación mecánica y del modelo del generador, se usó el Programa PSIM, para programar un modelo detallado del sistema de generación eólico, con el cual se tomaron las medidas para realizar la estimación de los parámetros. Por último se hace la selección de un modelo

reducido equivalente, el cual se usa para simplificar el diseño del convertidor y de su controlador.

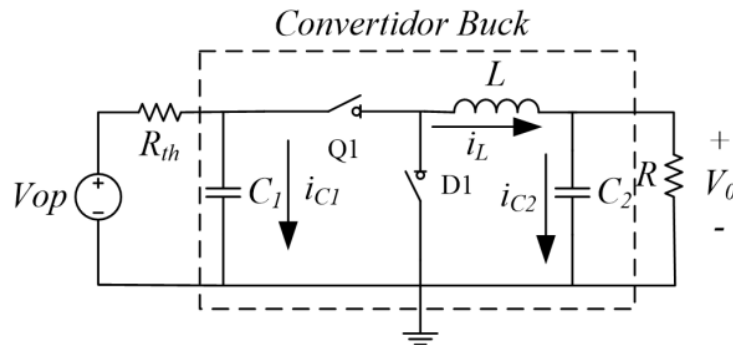
3 Diseño del convertidor y de su controlador para un SMGE

A partir del modelo estático equivalente de la fuente, que se presentó en el capítulo anterior, se procedió a realizar el análisis del convertidor y la fuente, para obtener las ecuaciones de estado del sistema y los valores de estado estacionario de los estados del convertidor, y este análisis se presenta en 3.1. Antes de realizar el diseño del convertidor y de su control, se deben definir los requerimientos que se deben cumplir, lo cual se muestra en la sección 3.2. En 3.3 se presenta el diseño del convertidor el convertidor, mientras que en 3.4 se describe el diseño del control, en la sección 3.5 se presenta la evaluación del diseño del convertidor, en la sección 3.6 se sintetiza el diseño del convertidor y de su control en mapa conceptual.

3.1 Análisis matemático del convertidor Buck con el equivalente estático de la fuente

En la Figura 3-1 se presenta el convertidor con el modelo reducido equivalente de la turbina, el generador y el rectificador. El convertidor Buck tiene dos etapas, que son: el momento ON el cual se presenta cuando está activado el mosfet y el diodo se encuentra en polarización negativa y el otro es el momento OFF el cual se presenta cuando el mosfet está desactivado y es diodo se encuentra en polarización positiva. Para cada uno los momentos es posible obtener las ecuaciones de estado, para el estado ON las ecuaciones están dadas por (3-1), (3-2) y (3-3).

Figura 3-1. Circuito del equivalente Thevenin, el convertidor Buck y la carga resistiva.



$$v_L = v_{C1} - v_{C2} \quad (3-1)$$

$$i_{C1} = \frac{v_{op} - v_{C2}}{R_{th}} - i_L \quad (3-2)$$

$$i_{C2} = i_L - \frac{v_{C2}}{R} \quad (3-3)$$

En las ecuaciones anteriores, i_L es la corriente en el inductor, v_{C1} y v_{C2} son los voltajes el capacitor de entrada y de salida respectivamente, d es el ciclo de trabajo, Q_1 es el mosfet y D_1 es el diodo, R es la resistencia de la carga, L , C_1 , C_2 son el inductor, y los capacitores de entrada y de salida respectivamente. Para el estado OFF las ecuaciones están dadas por (3-4), (3-5) y (3-6).

$$v_L = -v_{C2} \quad (3-4)$$

$$i_{C1} = \frac{v_{op} - v_{C2}}{R_{th}} \quad (3-5)$$

$$i_{C2} = i_L - \frac{v_{C2}}{R} \quad (3-6)$$

Con las ecuaciones (3-1)-(3-6) se calculan el balance de carga y el balance volt-seg, con lo cuales se calculan el voltaje promedio en L , la corriente promedio por C_1 y la corriente promedio por C_2 los cuales se presentan en las ecuaciones (3-7), (3-8) y (3-9) respectivamente.

$$\langle v_L \rangle = v_{C1} \cdot d - v_{C2} \quad (3-7)$$

$$\langle i_{C1} \rangle = \frac{v_{op} - v_{C2}}{R_{th}} - i_L \cdot d \quad (3-8)$$

$$\langle i_{C2} \rangle = i_L - \frac{v_{C2}}{R} \quad (3-9)$$

Con las ecuaciones (3-7),(3-8) y (3-9) se calculan las derivadas de las variables de estado del convertidor, las cuales se presentan en las ecuaciones (3-10),(3-11) y(3-12).

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (v_{C1} \cdot d - v_{C2}) \quad (3-10)$$

$$\frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{1}{C_1} \cdot \left(\frac{v_{op} - v_{C2}}{R_{th}} - i_L \cdot d \right) \quad (3-11)$$

$$\frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot \left(i_L - \frac{v_{C2}}{R} \right) \quad (3-12)$$

Al tomar las derivadas iguales a cero se encuentran los valores de estado estacionario de las variables de estado del convertidor, los cuales se presentan en las ecuaciones (3-13),(3-14) y (3-15). En la ecuación (3-13) se puede ver la relación de conversión del convertidor Buck, la notación de las variables cambia a mayúsculas para denotar que son valores de estado estacionario.

$$V_{C1} \cdot D = V_{C2} \quad (3-13)$$

$$I_L = \frac{V_{op} - V_{C1}}{R_{th} \cdot D} \quad (3-14)$$

$$I_L = \frac{V_{C2}}{R} \quad (3-15)$$

Con las ecuaciones de los valores de estado estacionario de las variables de estado del convertidor Buck, se puede calcular el ciclo de trabajo para entregar un voltaje de carga V_{carga} y una corriente de carga I_{carga} .

3.2 Requerimientos para el diseño del convertidor Buck.

Para realizar el diseño del convertidor se debe definir el voltaje en la carga. Para definir el voltaje se debe saber el tipo de carga que se va a conectar y los requerimientos propios de la misma. En el caso de un banco de baterías, se tiene que los voltajes típicos son 12 y 24 V, los niveles permisibles de rizado en el voltaje en C_1 y C_2 y el rizado en la corriente L es de 5% [17], condición que se debe cumplir en todo el rango de operación del sistema de generación. El rango de operación del sistema está dado por el rango de velocidad del viento y el rango en la corriente de carga. El rango de operación en la velocidad del viento está entre una velocidad de arranque del generador y la velocidad a la cual se produce la potencia máxima del generador [34]. Para determinar el rango de corriente se debe calcular el margen de carga del sistema para cada velocidad del viento dentro del rango de velocidad.

3.2.1 Cálculo del rango de la corriente de carga.

Para realizar el cálculo de la corriente de carga, se debe tener en cuenta que en condiciones de estado estacionario la corriente que pasa por el inductor es la misma corriente que se entrega a la carga, para obtener la corriente de la carga se reemplaza la ecuación (3-13) en la ecuación (3-15), para obtener la ecuación (3-16).

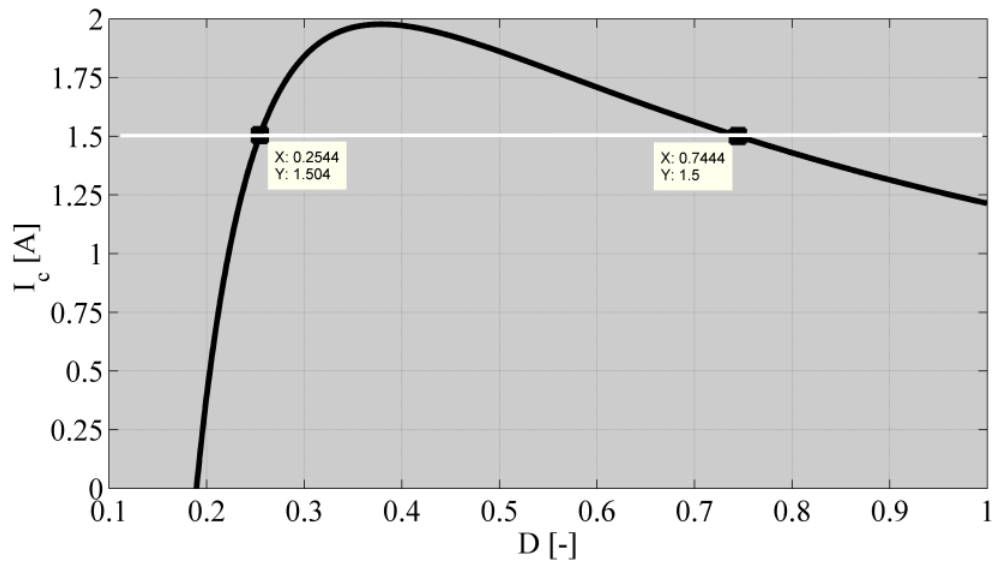
$$I_{carga} = \frac{V_{op} \cdot D - V_{carga}}{R_{th} \cdot D^2} \quad (3-16)$$

Si se deriva la ecuación (3-16) con respecto a el ciclo de trabajo D , y se iguala a cero se obtiene el ciclo de trabajo para el cual se obtiene la máxima corriente que se le puede entregar a la carga para una velocidad de viento determinada. En la ecuación (3-17) se presenta el valor máximo de corriente que se puede entregar a la carga, y en la Figura 3-2 se puede ver el comportamiento de la corriente en

función del ciclo de trabajo; de esta forma el rango de la corriente está dada por la ecuación (3-18).

$$I_{carga\ máxima} = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{op}^2}{R_{th} \cdot V_{carga}} \quad (3-17)$$

Figura 3-2. Corriente de carga versus el ciclo de trabajo.



$$0 \leq I_{carga} \leq \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{op}^2}{R_{th} \cdot V_{carga}} \quad (3-18)$$

3.3 Diseño del convertidor Buck

El diseño del convertidor se refiere al cálculo de los elementos del circuito como son: C_1 , C_2 y L . El criterio de cálculo utilizado consiste en que los rizados en el voltaje en C_1 y C_2 y el rizado en la corriente en L , no supere el 5% en todo el rango de operación del sistema de micro generación eólica. Para esto se siguieron tres pasos. En el primer paso se calcula y se selecciona el ciclo de trabajo del convertidor, el cual es necesario para calcular los rizados del convertidor. Este ciclo de trabajo se obtiene para la corriente nominal de la carga. El segundo paso es encontrar las ecuaciones de rizado en el voltaje en C_1 y C_2 y el rizado en la corriente en L en función del V_{carga} e I_{carga} . En el tercer y último

paso se realiza un análisis de las ecuaciones obtenidas de las magnitudes del rizado, para que los porcentajes de rizados definidos se cumplan para todo el rango de operación del sistema, redefiniendo los criterios de diseño y obteniendo los valores de C_1 , C_2 y L .

3.3.1 Cálculo del ciclo de trabajo del convertidor

Para realizar el cálculo del D es necesario definir el valor de la I_{carga} y de V_{carga} . Para calcular D se toma la ecuación (3-16), y transforma en la ecuación cuadrática que se presenta en (3-19),

$$I_{carga} \cdot R_{th} \cdot D^2 - V_{op} \cdot D + V_{carga} = 0 \quad (3-19)$$

De la ecuación (3-19) se pueden obtener dos soluciones para el ciclo de trabajo, las cuales están dadas por las ecuaciones (3-20) y (3-21). Cada una de estas soluciones parte del signo que se toma el radicando, para denotar las dos soluciones se tomó la (3-20) como la solución negativa y la (3-21) como la solución positiva de ecuación cuadrática de D .

$$D^- = \frac{V_{op} - \sqrt{V_{op}^2 - 4 \cdot I_{carga} \cdot R_{th} \cdot V_{carga}}}{2 \cdot I_{carga} \cdot R_{th}} \quad (3-20)$$

$$D^+ = \frac{V_{op} + \sqrt{V_{op}^2 - 4 \cdot I_{carga} \cdot R_{th} \cdot V_{carga}}}{2 \cdot I_{carga} \cdot R_{th}} \quad (3-21)$$

De las ecuaciones (3-20) y (3-21) se pueden deducir dos restricciones para el ciclo de trabajo. La primera restricción está dada por la expresión que se encuentra dentro de la raíz, la cual debe ser mayor que cero, ya que de no serlo el ciclo de trabajo sería complejo, por esta razón la se denominara restricción D real. Esta restricción está dada por la ecuación (3-22); esta ecuación es similar a la (3-17), la cual describe la corriente máxima del sistema.

$$I_{carga} \leq \frac{V_{op}^2}{4 \cdot R_{th} \cdot V_{carga}} \quad (3-22)$$

La segunda restricción está dada por la naturaleza del convertidor, ya que el ciclo de trabajo debe ser menor a la unidad y por lo tanto se denominara restricción del convertidor. Esta se debe calcular para cada una de las soluciones, para la solución positiva la restricción está dada por (3-23) y para la solución negativa por la (3-24).

$$I_{carga} \geq \frac{V_{op} - V_{carga}}{R_{th}} \quad (3-23)$$

$$I_{carga} \leq \frac{V_{op} - V_{carga}}{R_{th}} \quad (3-24)$$

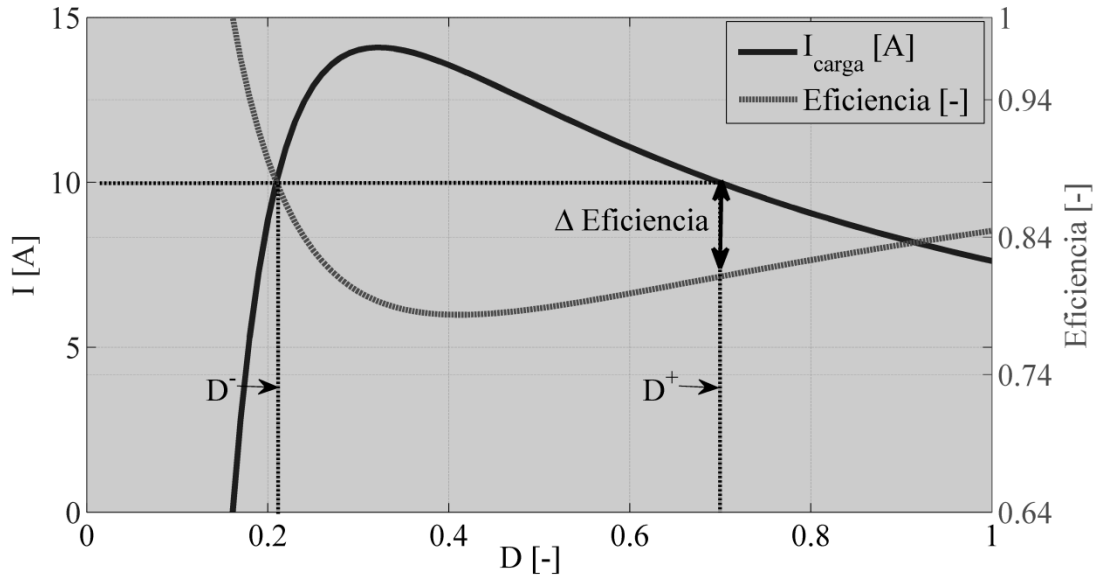
De esta forma se obtiene un rango en el cual las dos soluciones de la ecuación del ciclo de trabajo son válidas, representado por la ecuación (3-25), para valores de corriente de carga entre la restricción de la ecuación (3-25) y cero solo es válida la solución negativa de la ecuación del ciclo de trabajo.

$$\frac{V_{op}^2}{4 \cdot R_{th} \cdot V_{carga}} \geq I_{carga} \geq \frac{V_{op} - V_{carga}}{R_{th}} \quad (3-25)$$

Si la corriente de carga se encuentra en el rango en el cual las dos soluciones son válidas se debe analizar la eficiencia del sistema para las dos soluciones. Para un sistema con pérdidas en el inductor, si se supone una tensión de salida constante se obtiene una eficiencia del sistema dada por la ecuación (3-26), en donde R_L son las pérdidas en el inductor. Se evalúa la solución obtenida para el ciclo de trabajo y se selecciona la que tenga una mayor eficiencia. En la Figura 3-3 se presentan las curvas de eficiencia y de corriente versus D , en la cual se muestra que para una corriente seleccionada de 10 A se tienen dos D que son válidos, pero al ver la eficiencia correspondiente cada uno estos ciclos de trabajo se puede observar que uno tiene mejor eficiencia que el otro por tal motivo este tiene que ser el escogido. En el caso de la figura D^- tiene una mejor eficiencia que D^+ , y es por esta razón que se selecciona el D^- .

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{carga} \cdot (R_{th} \cdot D^2 + R_L)}{D \cdot (V_{carga} \cdot R_{th} \cdot D + R_L \cdot V_{op})} \quad (3-26)$$

Figura 3-3. Selección del ciclo de trabajo del convertidor



3.3.2 Cálculo de la magnitud de rizado en el convertidor.

El siguiente paso es el cálculo de los componentes del convertidor como son C_1 , L y C_2 . Para el cálculo de estos componentes es necesario primero tener los rizados en el convertidor. Los rizados en el convertidor están determinados por el ciclo de trabajo, la frecuencia de conmutación, el valor del inductor y los condensadores. En (3-27), (3-28) y (3-29) se presentan las ecuaciones para el cálculo de los rizados del convertidor Buck.

$$\Delta i_L / i_L = (V_{carga} \cdot D') / (I_{carga} \cdot L \cdot F) \quad (3-27)$$

$$\Delta v_{C1} / v_{C1} = (I_{carga} \cdot D' \cdot D^2) / (V_{carga} \cdot C_1 \cdot F) \quad (3-28)$$

$$\Delta v_{C2} / v_{C2} = D' / (8 \cdot L \cdot C_2 \cdot F^2) \quad (3-29)$$

En donde D es el ciclo de trabajo, D' es el ciclo de trabajo complementario y F es la frecuencia de conmutación del convertidor. En el caso del capacitor de entrada,

este también se ve sometido al rizado debido al rectificador lo cual incluye una ecuación de más para su cálculo, la cual se presenta en la ecuación (3-30), en donde f es la frecuencia del voltaje CA, la cual depende de la velocidad de giro del rotor del generador. Para realizar el diseño se debe seleccionar la menor frecuencia la cual se presenta en la velocidad mínima con la máxima corriente de carga y de esta forma garantizar el desempeño para las demás frecuencias del voltaje AC.

$$\Delta v_{C1}/v_{C1} = (I_{carga} \cdot D^2)/(12 \cdot f \cdot V_{carga} \cdot C_1) \quad (3-30)$$

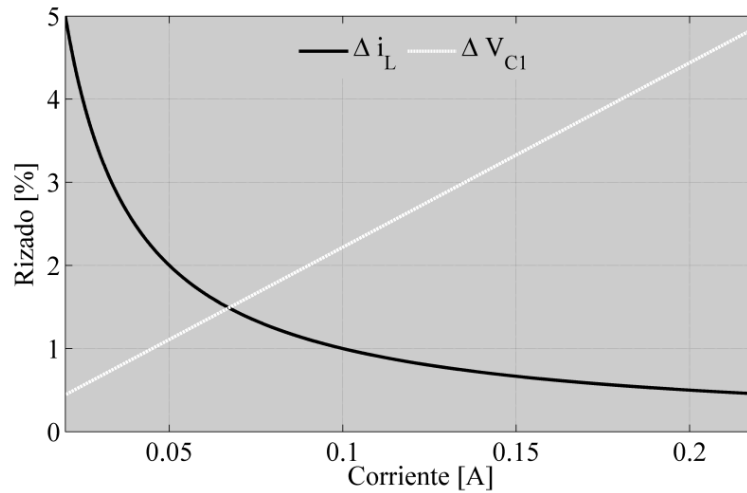
3.3.3 Cálculo de los elementos del convertidor.

Para el cálculo de los elementos del circuito se debe cumplir que la magnitud de los rizados no sea superior al 5% [17] para cualquier punto de operación del sistema de generación eólico. El rango de operación para el cual se realizará el diseño del convertidor está dado por: el rango de funcionamiento de la velocidad del viento y el rango de la corriente de carga, do de la corriente de carga se fijó una corriente mínima para la cual se debe cumplir que la corriente no debe superar 5% en los rizados del v_{C1} e i_L , el valor de corriente de carga mínima se tomó como un 10% de la corriente nominal de la carga.

Para garantizar que se cumplan los valores de rizado para todo el rango de operación del sistema de generación se realizó un análisis de las ecuaciones (3-27), (3-28), (3-29) y (3-30). Observando las ecuaciones se puede ver que el rizado en el voltaje de entrada y el rizado en la corriente del inductor se pueden expresar en función de la corriente de carga. En el caso del rizado de la corriente, este aumenta cuanto menor sea la corriente de carga; por esto el 5% del rizado se tomará con la corriente mínima, mientras que el rizado en el voltaje de entrada aumenta al aumentar la corriente, por esta razón se tomara la I_{carga} máxima. La Figura 3-4 muestra el rizado en la corriente para una velocidad de viento 5 m/s, el D se tomó constante y se calculó como se presenta en la sección anterior para una corriente nominal de la carga de 0.2 A, los valores de L y C_1 seleccionados

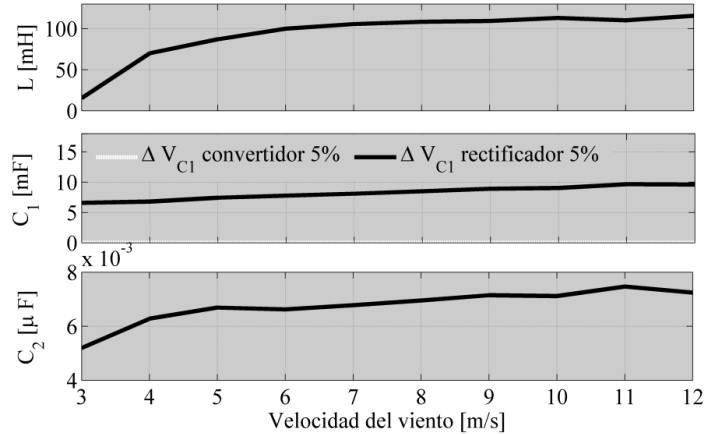
fueron 87 mH y 7.445 mF; con estos dos criterios se puede ver que el rizado se cumple para todo el rango de la variación en la corriente de la carga.

Figura 3-4. Rizados de corriente en inductor y voltaje en capacitor de entrada versus la corriente de carga



Con estos criterios definidos para cumplir los rizados de 5% para todo el rango de corriente, se procede a calcular los valores de C_1 , C_2 y L para las velocidades de viento dentro del rango de funcionamiento del sistema de generación, para esto se realizó el cálculo cada 1m/s. Con los datos obtenidos se traza la gráfica como se muestra en la Figura 3-5. Los valores máximos que se presentan en la Figura 3-5 se toman como los valores de diseño para el convertidor Buck.

Figura 3-5. Valor de: el capacitor de entrada, el capacitor de salida y el inductor en función de la velocidad del viento.



3.4 Diseño del control del convertidor Buck y el modelo reducido equivalente

Para diseñar el control del convertidor se realizaron tres pasos, en el primer paso se obtiene el punto de operación para el cual se va a diseñar el control. En el segundo paso se obtiene la función de transferencia del V_{carga} con respecto al ciclo de trabajo para el punto de operación seleccionado. En el tercer y último paso, utilizando la función de transferencia se procede a calcular los parámetros del controlador por el método de ubicación geométrica de las raíces.

3.4.1 Cálculo del punto de operación del convertidor Buck y el modelo reducido equivalente

Para calcular el punto de trabajo del convertidor y el modelo equivalente se recomienda que se seleccione la velocidad de viento promedio en el lugar de instalación del sistema de generación eólico, debido a que es la velocidad de viento que mayor tiempo estará presente. De no contar con esta información se puede optar por la velocidad nominal de la turbina. Con la velocidad de viento seleccionada se toman los valores de V_{op} y R_{th} correspondientes, además de esto

se deben definir los valores V_{carga} y una corriente nominal a la cual se espera que esté en funcionamiento la carga. Con esta información se procede a calcular el D de estado estacionario como se presenta en el primer paso del diseño del convertidor, con esto se define el punto de operación para el cual se va realizar el control del convertidor.

3.4.2 Cálculo de la función de transferencia del convertidor Buck y el modelo reducido equivalente

Para calcular la función de transferencia del voltaje de salida de convertidor con respecto a D se parte de las ecuaciones de estado del convertidor que se presentan en (3-10), (3-11) y (3-12), de las cuales se pueden definir las entradas del sistema y los estados de sistema. Para el convertidor Buck y el modelo equivalente, las entradas son D , V_{op} e i_o , mientras que los estados del sistema son el voltaje en el capacitor V_{C1} , el voltaje en el capacitor de salida V_{C2} y la corriente en el inductor I_L . A partir de esto se debe expresar el sistema de la forma que se presenta en las ecuaciones (3-31) y (3-32).

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \quad (3-31)$$

$$y = C \cdot x + E \cdot u \quad (3-32)$$

De las ecuaciones (3-31) y (3-32) se puede obtener la función de transferencia de la salida del sistema con respecto a cualquiera de las entradas del mismo. Para esto, basta con solucionar el sistema de ecuaciones que se presenta en (3-33), en donde I es una matriz identidad, s es la variable asociada a la transformada de Laplace y $G(s)$ es el vector de las funciones de transferencia.

$$G(s) = C \cdot (I \cdot s - A)^{-1} \cdot B; E = 0 \quad (3-33)$$

Dado que la variable a controlar es el voltaje de la carga, esta debe ser la salida del sistema. Las matrices A , B y C para el sistema se presentan en las ecuaciones (3-34), (3-35) y (3-36) respectivamente.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{D}{L} & -\frac{1}{L} \\ -\frac{D}{C_1} & \frac{1}{R_{th} \cdot C_1} & 0 \\ \frac{1}{C_2} & 0 & \frac{1}{R_c \cdot C_2} \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{V_{C1}}{L} & 0 & 0 \\ -\frac{D}{C_1} & -\frac{1}{R_{th} \cdot C_1} & 0 \\ \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{R_c \cdot C_2} \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

$$C = [0 \ 0 \ 1] \quad (3-36)$$

Los vectores x y u están dados por (3-37) y (3-38).

$$x = [I_L \ V_{C1} \ V_{C2}]^T \quad (3-37)$$

$$u = [D \ V_{op} \ i_o]^T \quad (3-38)$$

Al remplazar las ecuaciones (3-34), (3-35), (3-36), (3-37) y (3-38) en la ecuación (3-33) y resolver el sistema de ecuaciones, se obtienen las funciones de transferencia de la salida del sistema con respecto a las entradas. La función de transferencia de interés se presenta en la ecuación (3-39)

$$GV_c/D = \frac{(s^2 \cdot L \cdot R_{th} \cdot C_1 + (V_{C1} \cdot R_{th} \cdot C_1 + L) \cdot s + V_{C1})}{L \cdot C_2 \cdot R_{th} \cdot C_1} \quad (3-39)$$

$$s^3 + \frac{(R_c \cdot C_2 + C_1 \cdot R_{th})}{R_c \cdot C_2 \cdot R_{th} \cdot C_1} \cdot s^2 + \frac{(C_1 \cdot R_c \cdot R_{th} + R_c \cdot C_2 \cdot D^2 \cdot R_{th} + L)}{L \cdot R_c \cdot C_2 \cdot R_{th} \cdot C_1} \cdot s + \frac{R_c + D^2 \cdot R_{th}}{L \cdot R_c \cdot C_2 \cdot R_{th} \cdot C_1}$$

3.4.3 Cálculo de los parámetros del controlador del convertidor Buck y del modelo reducido.

Para realizar el cálculo de los parámetros del control del convertidor, se utilizó el método de diseño "ubicación geométrica de las raíces del sistema". Este método es seleccionado cuando las especificaciones de diseño son expresadas en el

dominio del tiempo, tales como son: el factor de amortiguamiento, la frecuencia natural no amortiguada de los polos dominantes en lazo cerrado, el sobrepaso máximo, el tiempo de levantamiento y el tiempo de asentamiento [35]. De las anteriores especificaciones se utilizaron el factor de amortiguamiento y la frecuencia natural no amortiguada de los polos dominantes en lazo cerrado. Para realizar la ubicación geométrica de las raíces se empleó la herramienta *Sisotool* de Matlab®, y como criterios de diseño se tomó un factor de amortiguamiento de 0.707, esto con el fin de garantizar un sobre impulso porcentual menor al 5 % en la respuesta del sistema; y una frecuencia de corte del sistema en lazo cerrado de 1/5 de la frecuencia de conmutación del convertidor, para mantener la validez del modelo del convertidor.

Para el cálculo de los parámetros del controlador se parte de los criterios de diseño, con los cuales se determina la ubicación deseada de los polos dominantes en lazo cerrado. Primero se comprueba si el ajuste de la ganancia puede producir los polos deseados, de no ser así se procede a incluir un integrador y un derivador, y nuevamente se intentan llevar los polos al lugar geométrico deseado. con la variación de la ganancia y las constante de tiempo integral y derivativa se busca llevar a los polos al lugar geométrico deseado [35]. Además, se debe verificar que los polos de la función de transferencia de lazo cerrado estén el lado izquierdo de plano s para garantizar la estabilidad del sistema [35].

3.5 Evaluación del diseño del convertidor.

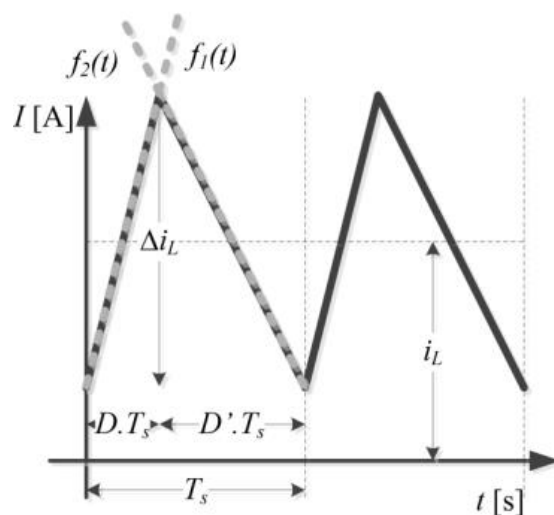
Para evaluar la metodología se realizará una evaluación del diseño del convertidor, se realizará un análisis del contenido armónico hacia la carga y hacia el generador sincrónico de imanes permanentes. Para evaluar el diseño del controlador se realizaron tres escenarios, en el primer escenario se presenta la respuesta del SMGE, ante perturbaciones en la velocidad del viento y perturbaciones en la corriente de carga. En el segundo escenario se realizó un

cambio en el voltaje de referencia en el tercer y último escenario se somete al SMGE a un perfil de viento.

3.5.1 Evaluación del contenido armónico hacia la carga

Antes de evaluar el contenido armónico hacia la carga se presentarán algunos de los efectos nocivos que tienen los mismos sobre la carga. El rizado de la corriente puede causar efectos nocivos a la carga y en el caso de la conexión de bancos de baterías se recomienda un rizado de corriente inferior al 5% de la corriente de plena carga, esto con el fin de disminuir el calentamiento [36]. En el caso de los conductores el rizado de la corriente produce un aumento de las pérdidas, debido al calentamiento superficial que se produce por el efecto piel. Este efecto está relacionado con la componente de CA de rizado de corriente que se concentra en la superficie del conductor, con la frecuencia y la magnitud de las componentes armónicas que componen el rizado de corriente [37]. Por esta razón, no sólo es suficiente contar con la magnitud del rizado sino también con el contenido armónico de la corriente.

Para obtener la relación que existe entre la magnitud del rizado y el contenido armónico de la corriente de la carga con los elementos del convertidor de potencia (el capacitor de entrada, el inductor y la frecuencia de conmutación del convertidor), es necesario hacer el análisis en el convertidor. Para calcular el contenido armónico se necesita la forma de onda del rizado, la cual depende de los elementos del convertidor. En la Figura 3-6 se presenta la forma de onda del rizado de la corriente en el inductor. Para expresar el rizado como una función en el tiempo, es necesario considerarlo como una función a tramos compuesta por dos funciones lineales. Las funciones de la corriente en el inductor están dadas por las funciones $f_1(t)$ y $f_2(t)$ que se presentan en las ecuaciones (3-40) y (3-41).

Figura 3-6. Forma del rizado de la corriente en el inductor

$$f_1(t) = \frac{\Delta i_L \cdot t}{D \cdot T_s} + i_L \quad 0 \leq t \leq D \cdot T_s \quad (3-40)$$

$$f_2(t) = \frac{\Delta i_L \cdot t}{D' \cdot T_s} - \frac{\Delta i_L \cdot D}{D'} + i_L \quad D \cdot T_s \leq t \leq T_s \quad (3-41)$$

Las series de Fourier permiten expresar cualquier función periódica en función de la suma de funciones sinusoidales, como se muestra en (3-42). En donde los a_0 , a_n y b_n son los coeficientes de la serie de Fourier, los cuales se puede calcular con (3-43), (3-44) y (3-45).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \sin((2 \cdot \pi \cdot n)/T_s) + b_n \cdot \cos((2 \cdot \pi \cdot n)/T_s)) \quad (3-42)$$

$$a_0 = \frac{2}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} f(t) dt \quad (3-43)$$

$$a_n = \frac{2}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} f(t) \cdot \cos((2 \cdot \pi \cdot n)/T_s) dt \quad (3-44)$$

$$b_n = \frac{2}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} f(t) \cdot \sin((2 \cdot \pi \cdot n)/T_s) dt \quad (3-45)$$

Al sustituir las ecuaciones (3-40) y (3-41) en las ecuaciones (3-43), (3-44) y (3-45), y realizar el cálculo de las integrales se obtienen las ecuaciones (3-46), (3-47) y (3-48) en donde se presentan los coeficientes en función de los elementos del convertidor DC-DC.

$$a_o = 2 \cdot i_L \quad (3-46)$$

$$a_n = -\frac{V_{C1} \cdot \sin(D \cdot \pi \cdot n)^2}{L \cdot F \cdot \pi^2 \cdot n^2} \quad (3-47)$$

$$b_n = \frac{V_{C1} \cdot \sin(D \cdot \pi \cdot n) \cdot \cos(D \cdot \pi \cdot n)}{L \cdot F \cdot \pi^2 \cdot n^2} \quad (3-48)$$

La serie de Fourier también se puede expresar en forma compleja como se presenta en la ecuación (3-49), en donde el coeficiente C_n se puede calcular con las ecuaciones (3-50).

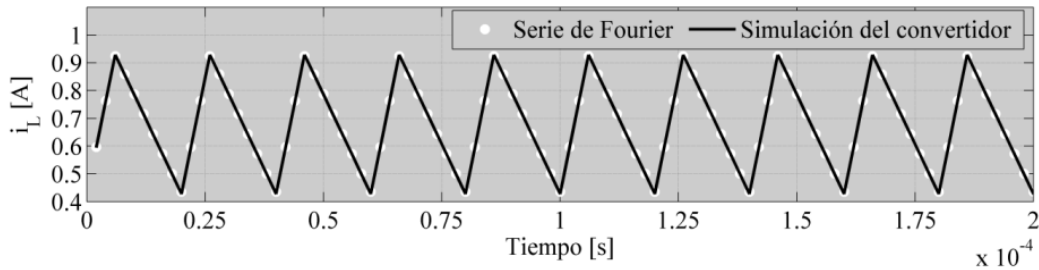
$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \cdot e^{-\frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot t}{T_s}} \quad (3-49)$$

$$C_n = \sqrt{\frac{V_{C1}^2 \cdot \sin(D \cdot \pi \cdot n)^2 \cdot (\sin(D \cdot \pi \cdot n)^2 + \cos(D \cdot \pi \cdot n)^2)}{L^2 \cdot F^2 \cdot \pi^2 \cdot n^2}} \quad (3-50)$$

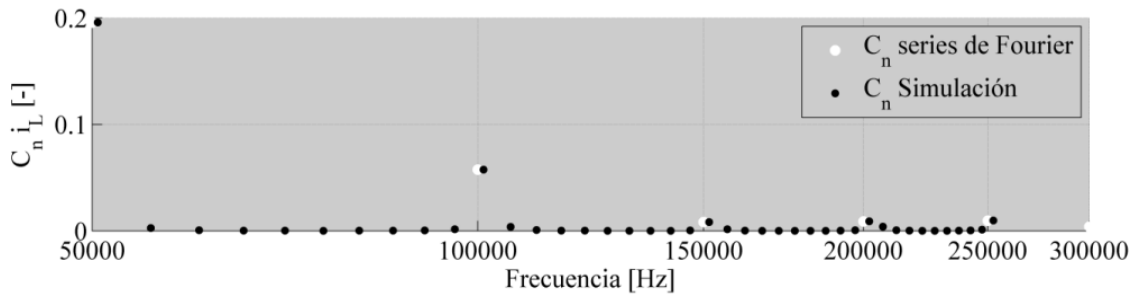
Después de tener los coeficientes de la serie de Fourier el paso a seguir es definir un índice para medir el contenido armónico en el DC. Para esto el índice usado es distorsiones sinusoidales de baja frecuencia DLSF que es la translación directa a la distorsión total de armónicos del AC, el cual mide la distorsión armónica con respecto a la señal AC. El DLSF se calcula con la ecuación (3-51).

$$DLSF = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{(C_n/C_o)^2} \quad (3-51)$$

Para comprobar las ecuaciones que se plantearon para el cálculo de contenido armónico, en la Figura 3-7 se puede ver la comparación del rizado obtenido al graficar la serie de Fourier comparada con el rizado obtenido por la simulación del convertidor en el software PSIM, en donde la línea continua es la señal obtenida por el software PSIM al simular el circuito y los puntos blancos son los datos obtenidos por la serie de Fourier.

Figura 3-7. Comparación de la simulación con las series de Fourier.

El siguiente paso es verificar los componentes armónicos que están dados por los C_n , para esto se calculó la transformada de Fourier de la señal del rizado en PSIM y se comparó con los coeficientes C_n calculados con la serie de Fourier, los resultados de esta comparación se presentan en la Figura 3-8. En la figura se puede ver que los puntos negros presentan los C_n obtenidos por la simulación en PSIM y los puntos blancos C_n son los obtenidos por la serie de Fourier.

Figura 3-8. Comparación de los coeficientes C_n serie de Fourier y la simulación.

Por último se debe calcular el índice DLSF que nos indica la distorsión armónica existente entre las señales y sus valores promedio. En las ecuaciones (3-52) y (3-53) se pueden ver el DLSF y $\Delta i_L/i_L$ en función de F , L y R respectivamente.

$$DLSF = \frac{V_{C1}}{L \cdot F \cdot i_L} \cdot \frac{1}{\pi^2} \cdot \left(a_0 + \sum_{n=1}^{10} a_n \cdot \cos(n \cdot D \cdot \pi)^2 \right) \quad (3-52)$$

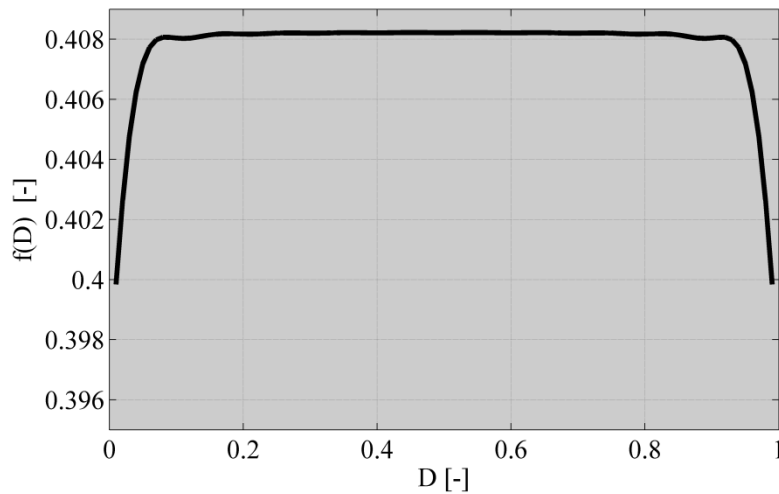
$$\frac{\Delta i_L}{i_L} = \frac{V_{C1}}{L \cdot F \cdot i_L} \cdot D \cdot (1 - D) \quad (3-53)$$

De las ecuaciones (3-52) y (3-53) se despeja el DLSF y se obtiene (3-54), en la cual se puede ver la relación que existe entre DLSF y el rizado para el convertidor Buck. Como se puede ver entre estos existe una función que depende el ciclo de trabajo del convertidor la cual se presenta en (3-55), en la Figura 3-9 se puede ver la gráfica la función.

$$DLSF = \frac{1}{\pi^2 \cdot D \cdot (1 - D)} \cdot \left(k_0 + \sum_{n=1}^{10} k_n \cdot \cos(n \cdot D \cdot \pi)^2 \right) \cdot \frac{\Delta i_L}{i_L} \quad (3-54)$$

$$f(D) = \frac{1}{\pi^2 \cdot D \cdot (1 - D)} \cdot \left(k_0 + \sum_{n=1}^{10} k_n \cdot \cos(n \cdot D \cdot \pi)^2 \right) \quad (3-55)$$

Figura 3-9. Función del ciclo de trabajo.



De la Figura 3-9 se puede ver que la función de D tiene un máximo 0.40822 y de esta forma tiene que un rizado de 5% está asociado DLSF máximo de 2.04%. De esta forma para este tipo de convertidor se garantiza que los niveles de armónico en la carga van a estar en un porcentaje menor al porcentaje del nivel de rizado.

3.5.2 Evaluación del contenido armónico hacia el generador

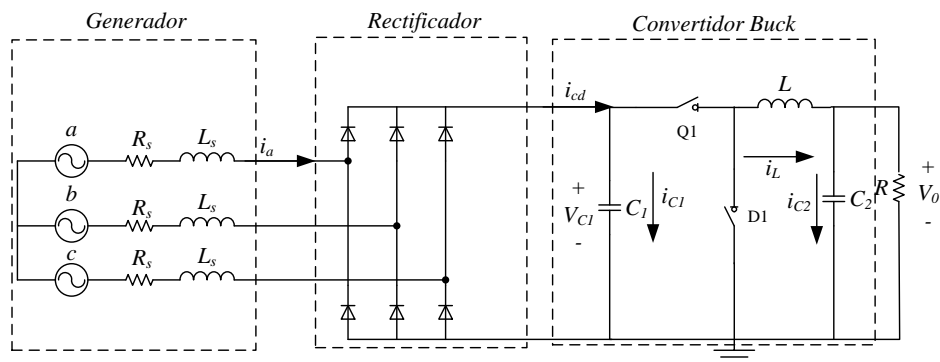
Para evaluar el efecto del contenido armónico se parte por presentar los efectos que produce estos en el generador sincrónico de imanes permanentes. El

contenido armónico en los generadores sincrónicos de imanes permanentes produce efectos en el torque desarrollado por el generador. El contenido armónico en el generador se ve reflejado en el rizado del torque.

El rizado en el torque produce ondulaciones en el par mecánico, el cual tiene efectos perjudiciales sobre elementos mecánicos como son: ejes y engranajes, produciendo fatiga y reduciendo su vida útil, además de propagarse a lo largo del sistema de generación, causado fluctuaciones en la energía entregada a la carga[38].

Una de las causas del rizado de torque lo altos contenidos armónicos en la corriente del estator del generador [27], por esta razón una de las formas de mitigar el efecto del rizado de torque es la reducción del THD en la corriente del estator [27]. En la Figura 3-10 se puede ver el sistema del sistema de generación eólico esto con el fin facilitar el análisis del contenido armónico, este sistema se presenta para poder observar el flujo de la corriente desde el generador hasta el convertidor.

Figura 3-10. Sistema reducido del SMGE



La corriente DC se puede expresar con la ecuación (3-56), en donde I_{DC} es el valor promedio e Δi_{DC} es la componente del rizado.

$$i_{CD} = I_{CD} + \Delta i_{CD} \quad (3-56)$$

De la misma forma la corriente CA i_a también se puede escribir en dos partes como se muestra en la ecuación (3-57). En donde I_a es la corriente producida por la I_{DC} , Δi_a es la corriente producida por el Δi_{DC} y el rizado producido por la rectificación del voltaje producido por el generador.

$$i_a = I_a + \Delta i_a \quad (3-57)$$

Teniendo en cuenta que el torque desarrollado por el generador sincrónico de imanes permanentes se puede expresar con la ecuación (3-58) y (3-59), en donde T es el torque electromagnético, i_q es la corriente de eje de cuadratura, i_a , i_b e i_c son las corrientes de fase del generador, p es el número de polos y λ_{pm} es el flujo.

$$T = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \lambda_{pm} \cdot i_q \quad (3-58)$$

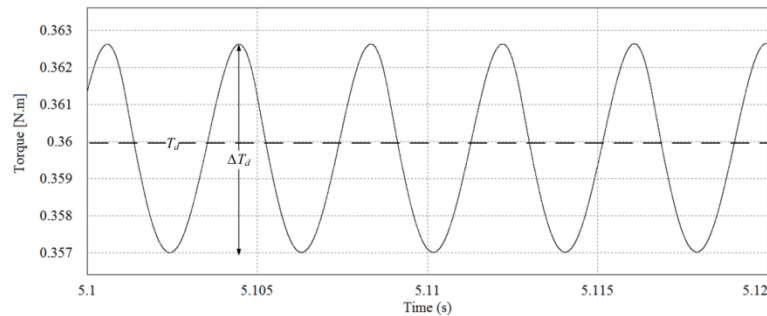
$$i_q = -\frac{3}{2} \left(i_a \cdot \sin\theta + i_b \cdot \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_c \cdot \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \right) \quad (3-59)$$

Se remplazan las ecuaciones (3-57) en la ecuación (3-59) y se lleva la ecuación (3-58), se obtiene la ecuación (3-60), la cual se puede expresar de la forma que se presenta en (3-61) donde T_d es el torque inducido por las corriente i_a , i_b e i_c y ΔT_d es el torque inducido por Δi_a , Δi_b e Δi_c . En la Figura 3-11 se puede ver el rizado en el torque.

$$i_q = -\frac{3}{2} \left((I_a + \Delta i_a) \cdot \sin\theta + (I_b + \Delta i_b) \cdot \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + (I_c + \Delta i_c) \cdot \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \right) \quad (3-60)$$

$$T = T_d + \Delta T_d \quad (3-61)$$

Figura 3-11. Rizado en el torque mecánico del generador



De la ecuación (3-61) se puede deducir el camino a seguir para poder reducir el rizado en el torque, el cual es producido por el Δi_a , el cual está constituido por el rizado producido por el rectificador y el rizado producido por el convertidor. Para reducir el efecto del rizado producido por la rectificación se han usado diferentes estrategias entre las cuales se destacan el control de la corriente DC con el fin de reducir el Δi_{dc} [27], el control directo sobre el toque con el fin de reducir el ΔT_d [27] y por último el método de la corrección del factor de potencia, este método consiste en usar un filtro pasivo conectado entre el generador y el rectificador con el fin de reducir Δi_a y de esta forma reducir el ΔT_d . Para reducir el nivel de rizado producido por el convertidor se debe hacer mediante la selección adecuada de C_1 .

Para esto se realizará un análisis de sensibilidad en el cual se utilizará un sistema de generación base, al cual se le variaran los parámetros del convertidor, esto con el fin de observar la variación en las variables de interés como es el caso del THD en la corriente del generador y rizado del torque, esto con el fin de evaluar el desempeño del diseño del convertidor. Para el análisis de sensibilidad se tomó un sistema base de generación eólico y se cambiará el valor C_1 , para calcular el THD de la corriente y el rizado en el torque. La ecuación con la que se calculó el THD se presenta en la ecuación (3-62). En donde I_{RMS} es el valor RMS de la señal de corriente I_1 es el valor de la componente fundamental. Los parámetros usados en la simulación están en la Tabla 3-1.

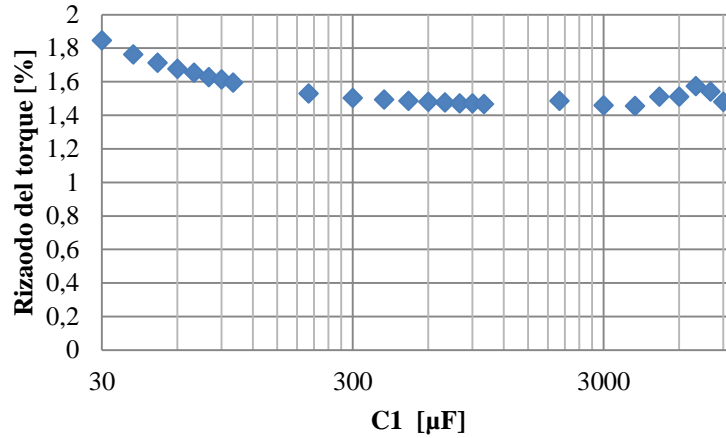
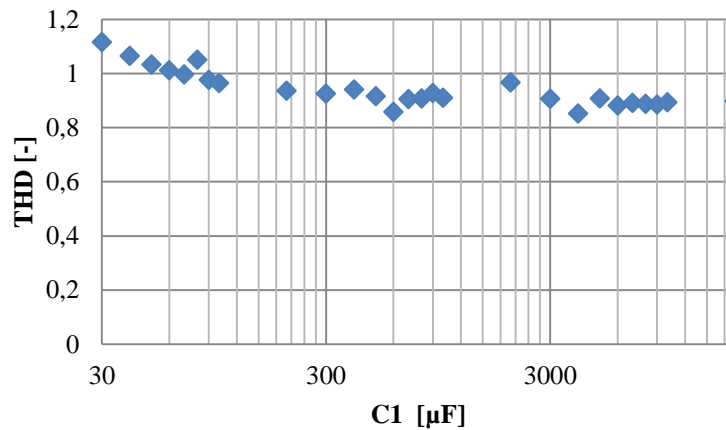
$$THD = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_1} \quad (3-62)$$

En la Figura 3-12 se presenta el rizado en el torque del generador en función del valor del condensador de entrada del convertidor, para construir la curva se tomó un circuito base al cual se le varió el valor del condensador de entrada. Los datos del sistema se presentan en la

Tabla 3-1. En la Figura 3-13 se puede observar que el rizado en el torque tiene un mayor valor para menores valores de capacitancia. En la Figura 3-12 se observa que en el rango de capacitancia de 30 a 300 μF hay un cambio del rizado 1,85% a 1,5%, mientras que en el rango de capacitancia de 300 a 10000 μF hay un cambio en rizado del torque de 1,5% a 1,49%. En el caso del THD el cual se presenta en la Figura 3-13. Se puede ver un comportamiento similar. De esta forma se puede ver que a partir de 300 μF la reducción del rizado no es significativa con respecto al incremento del capacitor.

Tabla 3-1. Parámetros de simulación del sistema de generación

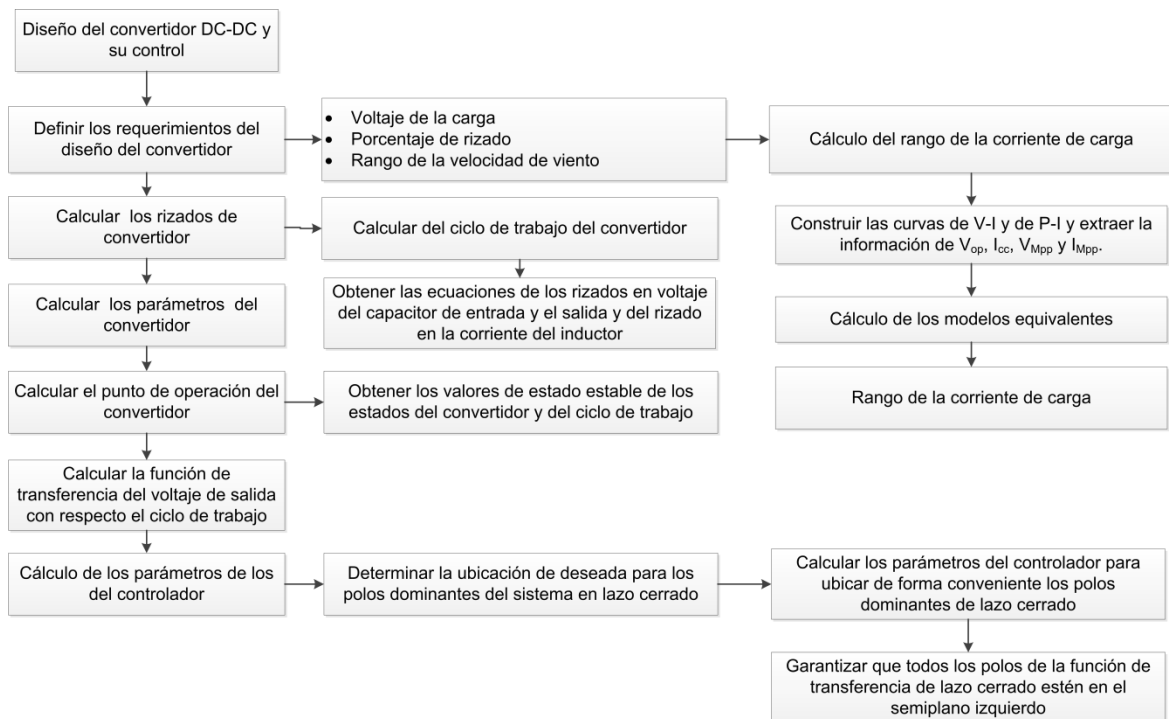
Turbina		
Velocidad del viento	4.5	m/s
Potencia nominal	160	W
Velocidad nominal viento	12.5	m/s
Velocidad nominal rotor	1000	Rpm
Inercia	0.026	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Velocidad de arranque	2.7	m/s
Generador		
Rs		
Ld = Lq	2	mH
Vpk /krpm	98.67	V
Numero de polos	12	[-]
Inercia	0.0011	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Tiempo mecánico	1.3	S
Convertidor		
Condensador de salida	50.339	μF
Inductancia	0.1908	mH
Frecuencia de conmutación	50	kHz
Ciclo de trabajo	0.3	[-]

Figura 3-12. Rizado del torque versus el capacitor de entrada.**Figura 3-13.** Distorsión total de armónicos versus el capacitor de entrada

3.6 Diagrama del diseño del convertidor y su control.

En esta sección se presenta a modo de resumen del diseño del convertidor y de su control un diagrama, en el cual se puede ver la secuencia que se debe llevar para el diseño, este diagrama se muestra en Figura 3-14.

Figura 3-14. Diagrama del diseño del convertidor y su control



3.7 Conclusiones

En este capítulo se presentó una metodología de diseño del convertidor Buck y de su controlador, para esto se parte del análisis matemático del convertidor con el modelo equivalente de la fuente y de este se obtienen las ecuaciones de estado y los valores de estado estacionario de los estados del convertidor. Para comenzar con el diseño se definieron los requerimientos para el diseño del convertidor y el control del sistema de generación, con estos se desarrolla la metodología de diseño del convertidor y del controlador.

4 Resultados y discusión

En el capítulo anterior se presentó la metodología de diseño del convertidor y de su controlador, en este capítulo se presenta el diseño de un convertidor para evaluar la metodología se realizará una evaluación del diseño del convertidor. Para evaluar el diseño del controlador se realizaron tres escenarios, en el primer escenario se presenta la respuesta del SMGE, ante perturbaciones en la velocidad del viento y perturbaciones en la corriente de carga. En el segundo escenario se realizó un cambio en el voltaje de referencia en el tercer y último escenario se somete al SMGE a un perfil de viento.

4.1 Evaluación del diseño del convertidor

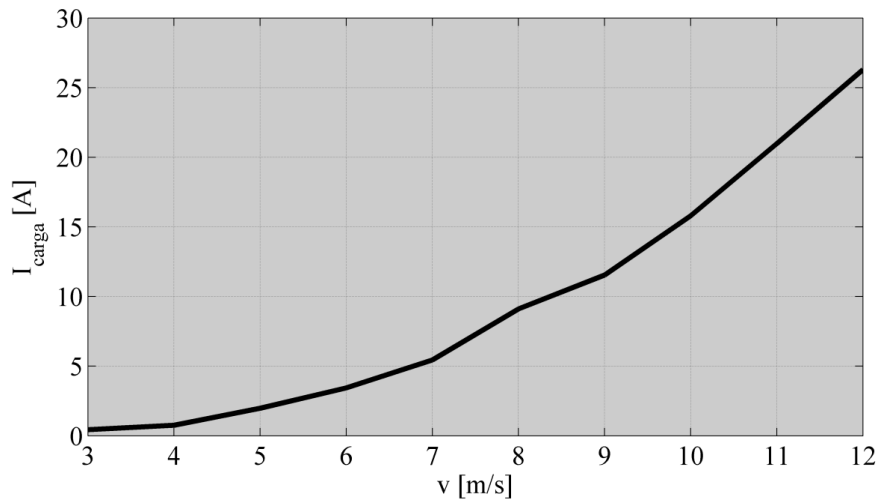
Para realizar el diseño lo primero es definir los requerimientos del sistema, entre los que se encuentran: el voltaje de carga, el porcentaje permisible de rizado y el rango de velocidad de viento. El voltaje de carga seleccionado fue de 12 V. El rango de la velocidad de viento se tomó de los datos de una turbina de eje horizontal de tres palas, la cual tiene una velocidad mínima de 3 m/s y una velocidad nominal de 12 m/s. Para el rizado se siguieron las recomendaciones de un 5% encontradas en la literatura [17], para la frecuencia de conmutación se tomó 50kHz.

El paso siguiente es construir las curvas de voltaje-corriente y potencia-corriente, para el rango de velocidad $3 \leq v \leq 12$ m/s; de tales curvas se deben extraer los valores: I_{cc} , V_{op} , I_{Mpp} y V_{Mpp} , con los cuales se calculan los modelos equivalentes. En la **Tabla 4-1** se pueden ver los valores obtenidos para cada una de las velocidades de viento.

Tabla 4-1. Datos de las curvas de los modelos equivalentes.

V [m/s]	V_{op}	V_{Mpp}	I_{Mpp}	I_{cc}	R_{th}
3,000	36,290	21,282	0,241	0,310	62,283
4,000	50,061	28,638	0,417	0,506	51,388
5,000	63,347	35,657	0,655	0,758	42,284
6,000	76,562	42,805	0,950	1,067	35,530
7,000	89,762	49,423	1,309	1,435	30,807
8,000	102,957	56,024	1,937	1,867	24,231
9,000	116,153	62,174	2,217	2,370	24,350
10,000	129,347	67,800	2,789	2,960	22,068
11,000	142,540	73,404	3,427	3,644	20,174
12,000	155,920	81,264	3,739	4,417	19,969

Con los parámetros del modelo equivalente se calcula el rango de funcionamiento de la corriente carga. En la Figura 4-1 se presenta la corriente máxima para el rango de velocidad de viento; para construir esta curva se usaron los datos de Tabla 4-1 y de la ecuación (3-17). De la curva se puede ver la capacidad del sistema de corriente de carga para un voltaje de carga constante en todo el rango de velocidad de viento. Esto quiere decir que el sistema no puede entregar corrientes de carga por encima de la curva para cada velocidad de viento.

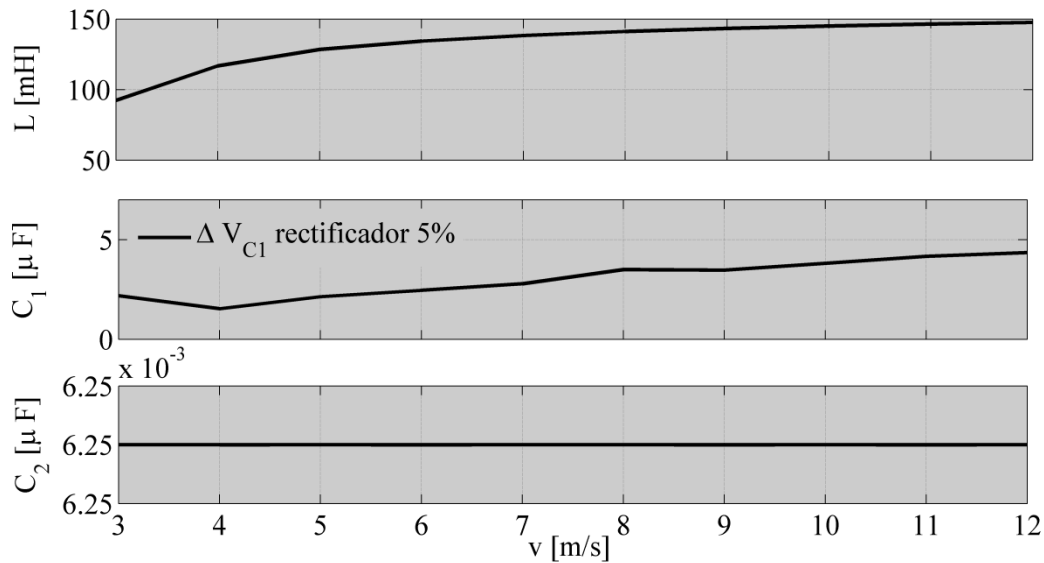
Figura 4-1. Corriente máxima versus la velocidad del viento

Para completar el rango de corriente se calcula la corriente mínima, en este rango de corriente es donde se debe garantizar los porcentajes de rizado. Para esto se debe seleccionar la corriente nominal de carga, la cual se tomó tal que no supere la corriente máxima correspondiente a la mínima velocidad de 3 m/s; de esta forma, la corriente nominal de la carga I_{carga} se seleccionó igual a 0,3 A. Con la corriente nominal de carga y los datos de la Tabla 4-1 se calcularon los ciclos de trabajo con las ecuaciones (3-20) y (3-21). Los datos del ciclo de trabajo se calcularon para todo el rango de la velocidad del viento, estos datos se presentan la Tabla 4-2. Como se puede ver solo son válidos los valores de D^- dado que los valores de D^+ superan la unidad.

Tabla 4-2. Valores del ciclo de trabajo

V [m/s]	D^-	D^+
3,000	0,4226	1,5195
4,000	0,2698	2,1474
5,000	0,1972	4,7966
6,000	0,1603	7,0226
7,000	0,1356	9,5766
8,000	0,1175	14,0456
9,000	0,1040	15,7961
10,000	0,0932	19,4447
11,000	0,0845	23,4674
12,000	0,0772	26,9028

Con el ciclo de trabajo que se obtiene para la corriente nominal, y la información de la Tabla 4-1, se realiza el cálculo de C_1 , C_2 y L . El cálculo se realizó con las ecuaciones (3-27), (3-28) y (3-29), de tal forma que el rizado no superara el 5%. Los valores de C_1 , C_2 y L se muestran en la Figura 4-2.

Figura 4-2. Diseño del convertidor Buck

De la Figura 4-2 se obtiene los parámetros del convertidor y de esta forma queda completo el diseño del convertidor Buck, los datos del convertidor quedan consignados en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Parámetros del convertidor

Parámetro	Valor
C_1	4,4 mF
C_2	6.25e-3 μ F
L	0,1477 H
F	50 kHz

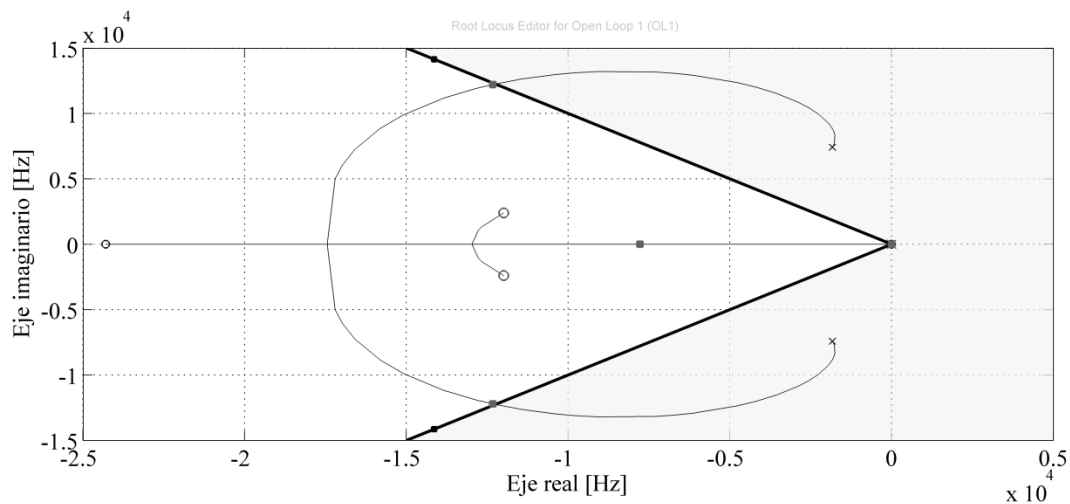
4.2 Evaluación del diseño del controlador

Para realizar el cálculo de los parámetros se tomaron los datos del convertidor que se presentan en la Tabla 4-3. Para el cálculo del punto de operación se tomaron: una corriente de carga de 0,3 A, un voltaje en la carga de 12 V y una velocidad de viento de 5 m/s, que corresponde a un V_{op} de 63,347 V y una R_{th} de 42,284 Ω . Con esta información y la ecuación (3-20), se obtiene un D de 0.1972,

con estos datos se obtiene la función de transferencia que se presenta (3-39). Con esta función de transferencia se realiza el cálculo de los parámetros del controlador por el método del lugar geométrico de las raíces como se muestra en la Figura 4-3. Los criterios de diseño fueron un factor de amortiguamiento de 0,707, una frecuencia de corte del sistema de lazo cerrado de 1/5 de la frecuencia de conmutación del convertidor y la ubicación de todos los polos del sistema en lazo cerrado en el semiplano izquierdo.

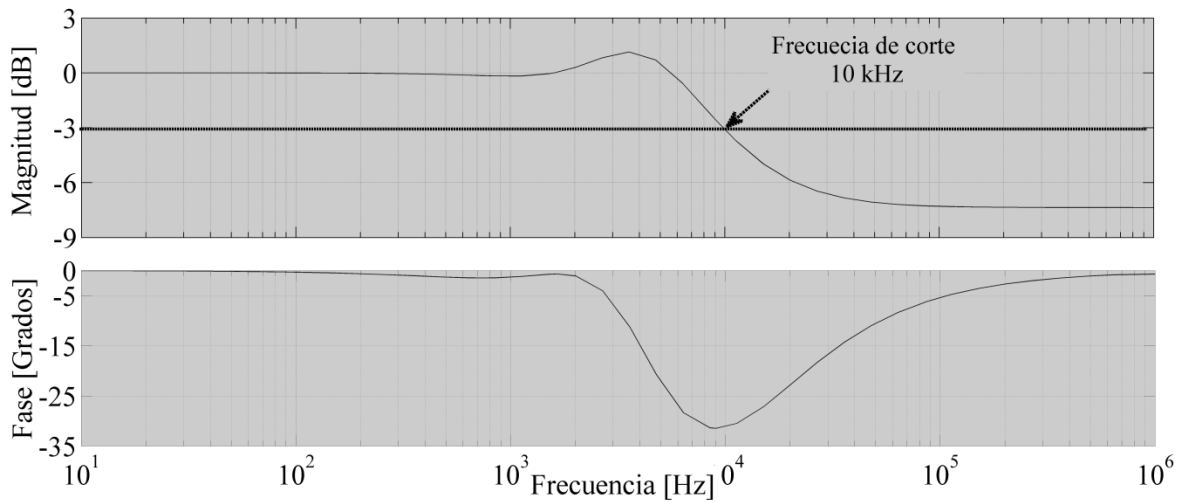
Se selecciona la frecuencia de conmutación lo más alta posible, dado a que una alta frecuencia produce pequeños rizados y controladores con mayor velocidad de respuesta. Sin embargo la frecuencia de conmutación es establecida por dispositivos de mando del convertidor. Usualmente los convertidores se implementan con drivers que trabajan a una frecuencia entre 50kHz y 100kHz. En este trabajo se tomó una frecuencia de conmutación de 50 kHz. Los parámetros del controlador son $K_p = 0,5$ [1/V], $T_i = 6.0129e-4$ [s] y $T_d = 9.3549e-006$ [s].

Figura 4-3. Método de ubicación geométrica de las raíces



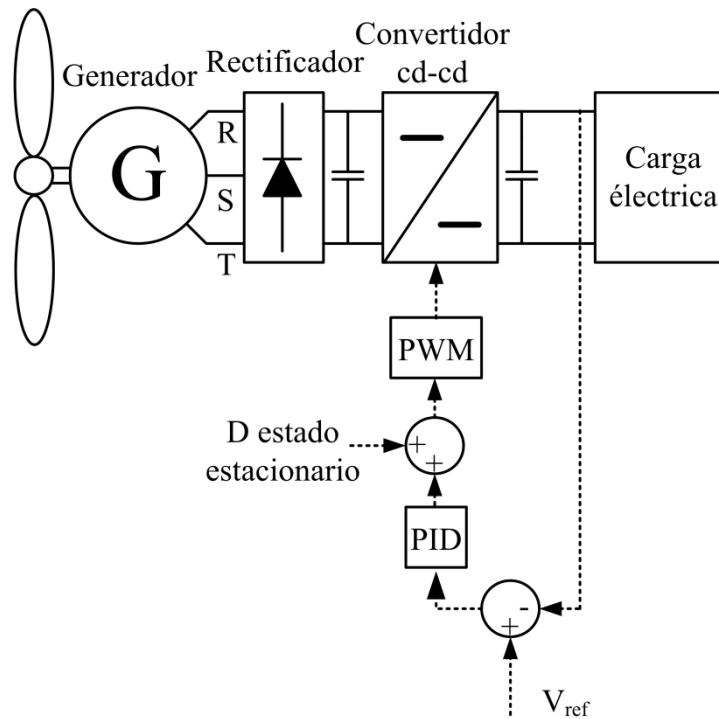
En la figura Figura 4-4 se puede ver la respuesta de lazo cerrado del convertidor con el modelo equivalente y el control PID.

Figura 4-4. Diagrama de bode de lazo cerrado



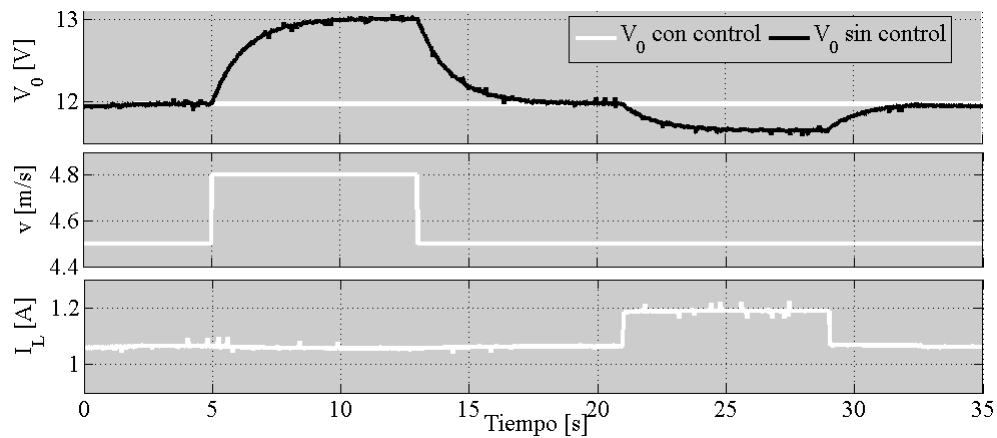
Con el diseño del control se pasa a la implementación del controlador, en la Figura 4-5 se puede ver la conexión del sistema de generación y el controlador actuado sobre el ciclo de trabajo del convertidor Buck.

Figura 4-5. Sistema de micro generación con el control

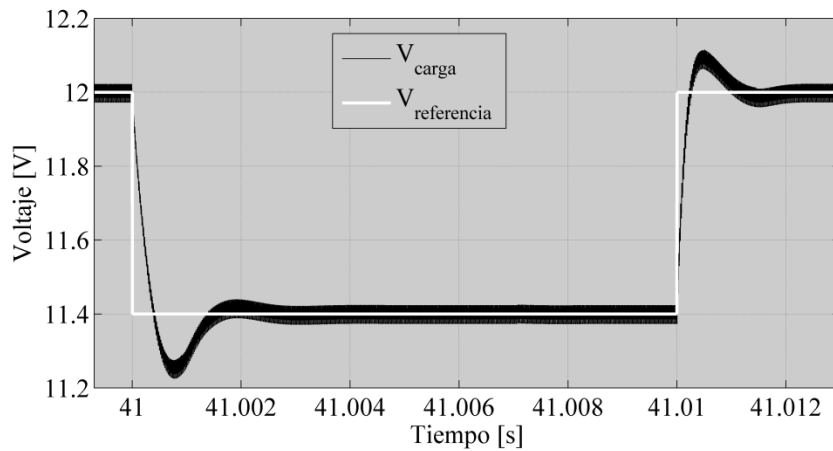


Para evaluar sometió a tres escenarios: rechazo de perturbaciones en la velocidad del viento y la carga, seguimiento de la señal de referencia y comportamiento frente a un perfil de viento real. El primer escenario se presenta en la Figura 4-6, en la cual se compara el voltaje de salida del convertidor sin y con control frente a perturbaciones de la velocidad del viento y la corriente de carga, en la respuesta del sistema con el control se puede ver que el sistema puede seguir la referencia y que además el sistema es más sensible a cambios en la corriente de la carga.

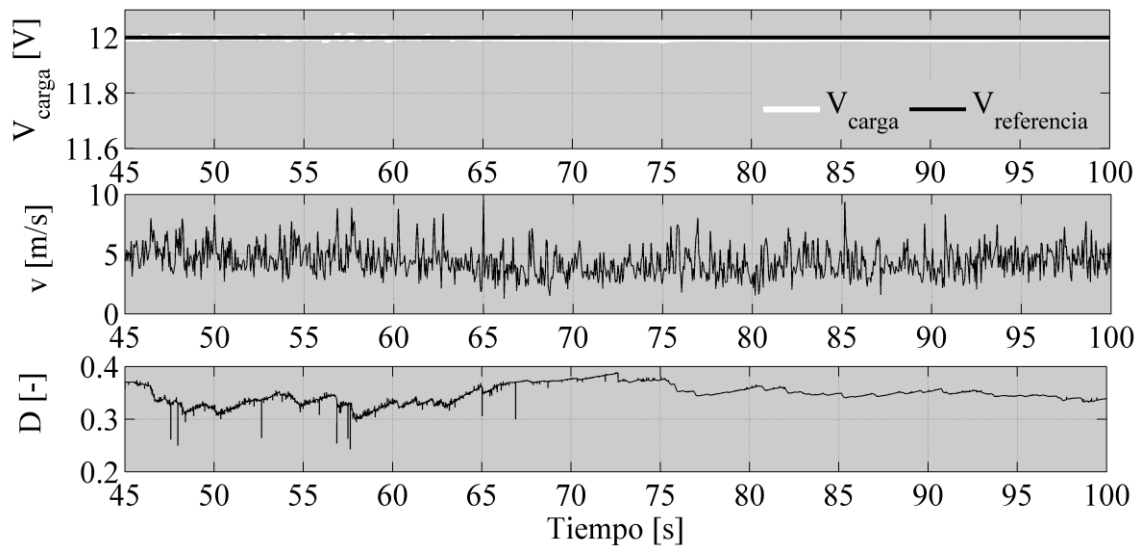
Figura 4-6. Perturbaciones en la velocidad del viento y en la corriente de la carga.



El seguimiento de la referencia se presenta en la Figura 4-7, en este caso la referencia se ajusta para producir un cambio en el voltaje de salida del 5% del valor estacionario. Con lo cual se produce un sobrepaso de 0,12 V y un tiempo de estabilización de 3 ms. La Figura 4-7 también se puede ver el rizado en el voltaje de salida del convertidor el cual se encuentra en un 0,416%, inferior al valor estipulado para el diseño.

Figura 4-7. Cambios en el voltaje de referencia.

En la Figura 4-8 se presenta la respuesta del sistema frente a un perfil de viento real. En la figura se observan los cambios de la velocidad del viento y la acción sobre el ciclo de trabajo para mantener el voltaje de salida en un valor de referencia.

Figura 4-8. Comportamiento de SMGE ante un perfil de viento

4.3 Sumario

En este capítulo se presentó el diseño de un convertidor Buck aplicado a sistemas de micro generación eólica, este sistema sirve para la carga de batería de 12V, para esto se sigue el desarrollo propuesto en el capítulo anterior, este diseño se hace con el fin de verificar el procedimiento propuesto para el diseño.

5 Conclusiones

En este trabajo se presentó la metodología de diseño para un convertidor DC-DC y su control aplicado a sistema de generación eólica, para poder desarrollar la metodología de diseño fue necesario llevar un proceso el cual entrego diferentes resultados, que se obtuvieron en diferentes etapas.

En el modelado del sistema de generación se obtuvieron varios resultados entre los que se destacan: El primer resultado la presentación de un modelo del sistema de micro generación, el cual resalta la conexión de los modelos de cada uno de los elementos del sistema. El segundo aporte se presenta en la estimación de parámetros de la turbina eólica, en donde se presentó una metodología experimental para estimar los parámetros del modelo estático de la turbina, como son: la densidad del aire, el área de barrido y la función $C_p(\lambda)$, además de la forma en que se describen el registro y el procesamiento de la información necesaria para la caracterización de la turbina, en especial para encontrar la función $C_p(\lambda)$. El tercer resultado es el modelado y la estimación de los parámetros de la ecuación mecánica y del modelo del generador sincrónico de imanes permanentes, con el cual se presenta excelente aproximación al detallado del sistema, pero ofreciendo mayor flexibilidad que el modelo utilizado en el software PSIM. El cuarto resultado del modelado es la selección de un modelo equivalente, el cual permite simplificar el proceso de diseño del convertidor DC-DC y de su controlador para sistemas de generación eólica.

En el diseño del convertidor se presentó una metodología sencilla para el diseño del convertidor DC-DC, la cual parte de la definición de los criterios de diseño, que son: el nivel de voltaje de salida, el porcentaje de rizado, el rango de

velocidad de viento, y a partir de esto se hace el cálculo de los parámetros de convertidor. En el diseño del control del convertidor se presenta una función de transferencia de tercer orden con la cual es posible hacer el cálculo de los parámetros del controlador mediante el método de ubicación geométrica de las raíces. Como resultado final se presenta la validación de la metodología lo cual se hace con el diseño de un convertidor. Para hacer la evaluación se presenta el diseño de un convertidor aplicando el sistema micro generación el cual es usado para la carga de baterías de 12 V.

6 Publicaciones

Como resultado del trabajo se lograron diferentes publicaciones, a continuación se presenta la recopilación de estas, y se presenta clasificado según se al tipo de la publicación.

Artículos publicados en revistas indexadas

- Carlos A. Ramírez, A.J. Saavedra-Montes, C.A. Ramos-Paja. “Modelado y estimación de parámetros de un sistema de generación eólico de baja potencia”, *Tecno Lógicas*, (Edición especial),p.p 209-221.
- Carlos A. Ramírez, A.J. Saavedra-Montes, C.A. Ramos-Paja. “Diseño de un convertidor DC-DC y su control para un sistema de generación eólico conectado a una carga aislada”, *Tecno Lógicas*, Edición especial),p.p 95-107.

Artículos sometidos a revistas indexadas.

- Carlos A. Ramírez, A.J. Saavedra-Montes, C.A. Ramos-Paja. “Convertidores DC-DC en sistemas eólicos para micro generación: una revisión sistemática”, *Revista de ingeniería Universidad de los Andes*.

Artículos presentados en eventos

- Carlos A. Ramírez, A.J. Saavedra-Montes, C.A. Ramos-Paja. “Estimation parameter model of a small wind turbine (160 w)”, *IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS 2012)*.

Artículos sometidos a revistas de divulgación.

- Carlos A. Ramírez, A.J. Saavedra-Montes, C.A. Ramos-Paja. “Modelado y estimación de parámetros de un sistema de generación eólico de baja potencia”, *Revista de la Corporación Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Sector Eléctrico CIDET(8)*, p.p 45-52

Bibliografía

- [1] L. A. Barroso, H. Rudrick, F. Sensfuss, and P. Linares, "The Green Effect," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 5, pp. 22–35, 2010.
- [2] R. Moreno, G. Strbac, F. Porrua, S. Mocarquer, and B. Bezerra, "Making Room for the Boom," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 5, pp. 36–46, 2010.
- [3] A. S. Bahaj, L. Myers, and P. A. B. James, "Urban energy generation: Influence of micro-wind turbine output on electricity consumption in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 2, pp. 154–165, Feb. 2007.
- [4] J. A. Baroudi, V. D. Ñ, and A. M. Knight, "A review of power converter topologies for wind generators," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 2369–2385, 2007.
- [5] C. A. Ramos-Paja, E. Arango, R. Giral, A. J. Saavedra-Montes, and C. Carrejo, "DC/DC pre-regulator for input current ripple reduction and efficiency improvement," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 11, pp. 2048–2055, Nov. 2011.
- [6] L. Bisenieks, D. Vinnikov, and I. Galkin, "New Converter for Interfacing PMSG based Small-Scale Wind Turbine with Residential Power Network," *Compatibility and Power Electronics (CPE), 2011 7th International Conference-Workshop*, no. c, pp. 354–359, 2011.
- [7] M. Arifujjaman, "Modeling, simulation and control of grid connected Permanent Magnet Generator (PMG)-based small wind energy conversion system," in *Electric Power and Energy Conference (EPEC), 2010 IEEE*, 2010, pp. 1–6.
- [8] S. Alepuz, A. Calle, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, S. Kouro, and B. Wu, "Control scheme for low voltage ride-through compliance in back-to-back NPC converter based wind power systems," in *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, 2010, pp. 2357–2362.
- [9] M. Meiqin, L. Jidong, M. Ding, C. V Nayar, and L. Chang, "A novel control strategy for small wind generation system based on the converter without

- DC storage components,” in *Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 1–5.
- [10] A. C.-C. Hua and B. C.-H. Cheng, “Design and implementation of power converters for wind energy conversion system,” in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, 2010, pp. 323–328.
- [11] A. Sinha, D. Kumar, P. Samuel, and R. Gupta, “Performance analysis of converter based variable speed wind energy conversion system,” in *Power Systems, 2009. ICPS '09. International Conference on*, 2009, pp. 1–6.
- [12] A. Nagliero, M. Liserre, N. A. Orlando, R. Mastromauro, and A. Dell’Aquila, “Implementation on DSP TMS320F2812 of the control of the grid converter of a small wind turbine system,” in *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on*, 2009, pp. 415–419.
- [13] V. Lazarov, D. Roye, and Z. Zarkov, “Analysis of DC Converters for Wind Generators,” vol. 22, no. 2, pp. 235–244, 2009.
- [14] R. Morales, R. Ordoñez, M. A. Morales, and V. Flores, “Control System Design and Simulation of an AC / DC - DC / DC - DC / AC Power Converter for a Permanent Magnet Wind Power Generator in Rural Power Generation,” *Electrical, Communications, and Computers, 2009. CONIELECOMP 2009. International Conference on*, pp. 79–83, 2009.
- [15] V. J.-C. López Miguel, “Stand-alone wind Energy conversion system with maximum power transfer control,” *Ingeniarse, Revista chilena de ingeniería*, vol. 17, pp. 328–336, 2009.
- [16] H. Goto, H.-J. Guo, and O. Ichinokura, “A micro wind power generation system using permanent magnet reluctance generator,” in *Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on*, 2009, pp. 1–8.
- [17] A. Sinha, D. Kumar, P. Samuel, and R. Gupta, “A two-stage converter based controller for a stand alone wind energy system used for remote applications,” in *Telecommunications Energy Conference, 2008. INTELEC 2008. IEEE 30th International*, 2008, pp. 1–5.
- [18] S. Chiniforoosh, P. Alaeinovin, A. Davoudi, J. Jatskevich, and P. L. Chapman, “Dynamic modeling of stand-alone micro-wind turbine generator systems for telecommunicati on power supply,” in *Telecommunications Energy Conference, 2008. INTELEC 2008. IEEE 30th International*, 2008, pp. 1–6.

- [19] M. Arifujjaman, M. T. Iqbal, and J. E. Quaicoe, "Energy capture by a small wind-energy conversion system," *Applied Energy*, vol. 85, no. 1, pp. 41–51, Jan. 2008.
- [20] S. Eren, J. C. Y. Hui, D. To, and D. Yazdani, "A High Performance Wind-Electric Battery Charging System," in *Electrical and Computer Engineering, 2006. CCECE '06. Canadian Conference on*, 2006, pp. 2275–2277.
- [21] T. Tafticht, K. Agbossou, and A. Cheriti, "DC bus control of variable speed wind turbine using a buck-boost converter," *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, p. 5 pp., 2006.
- [22] D. M. Whaley, G. Ertasgin, W. L. Soong, N. Ertugrul, J. Darbyshire, H. Dehboeni, and C. V Nayar, "Investigation of a Low-Cost Grid-Connected Inverter for Small-Scale Wind Turbines Based on a Constant-Current Source PM Generator," in *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, 2006, pp. 4297–4302.
- [23] A. C.-C. C. Hua and B. C.-H. C. Cheng, "Design and implementation of power converters for wind energy conversion system," in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, 2010, pp. 323–328.
- [24] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*. Singapore: John Wiley & Sons, 1989.
- [25] "IEEE Recommended Practice for Utility Interconnection of Small Wind Energy Conversion Systems," *ANSI/IEEE Std 1021-1988*. p. 0_1, 1987.
- [26] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, SECOND EDI. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publisher, 2001.
- [27] K. H. Ahmed and B. W. Williams, "Different torque ripple reduction methods for wind energy conversion systems using diode rectifier and boost converter," *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 729–734, May 2011.
- [28] C. A. Ramirez and A. J. Saavedra-Montes, "Parameter calculation of a small wind turbine model cálculo de parámetros del modelo de una turbina eólica (160 w)," *Circuits and Systems (CWCAS), 2012 IEEE 4th Colombian Workshop on*. pp. 1–6, 2012.
- [29] A. J. Mahdi, W. H. Tang, and Q. H. Wu, "Derivation of a complete transfer function for a wind turbine generator system by experiments," in *Power*

- Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011 IEEE, 2011, vol. 1, pp. 35–38.*
- [30] I. E. C. Standard, “61400-12, International Electrotechnical Commission (IEC)(2002),” *Wind Turbine Generator Systems Part*, vol. 12.
- [31] Instituto Tecnológico Metropolitano, “Datos estación meteorológica.” [Online]. Available: http://galeon.com/metereologicomede/Medellin_folder/ITM.html. [Accessed: 14-Aug-2012].
- [32] A. Llombart, S. J. Watson, D. Llombart, and J. M. Fandos, “Power Curve Characterization I: improving the bin method,” in *Proceedings of the International Conference of Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*, 2005.
- [33] J. R. C. Penaranda and A. J. Saavedra-Montes, “Dynamic model validation via error indexes,” *Circuits and Systems (CWCAS), 2012 IEEE 4th Colombian Workshop on*. pp. 1–6, 2012.
- [34] M. a. Abdullah, a. H. M. Yatim, C. W. Tan, and R. Saidur, “A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3220–3227, Jun. 2012.
- [35] O. Katsuhiko, “Ingeniería de control moderna,” *Minnesota, PEARSON EDUCACION*, pp. 669–843, 1998.
- [36] T. Note and B. Continuity, “Effects of AC Ripple Current on VRLA Battery Life.”
- [37] M. Mazaheri, V. Scaini, and W. E. Veerkamp, “Cause, effects, and mitigation of ripple from rectifiers,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 4, pp. 1187–1192, Jul. 2003.
- [38] H. Nakra and D. Mukhedkar, “Propagation and elimination of torque ripple in a wind energy conversion system,” no. 2, pp. 104–112, 1986.