



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Héctor Iván Troncoso Maureira

**Estudio del Generador de Inducción
Autoexcitado y su Control para Producir
Corriente Continua Regulada**

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 11 de abril de 2019



Estudio del Generador de Inducción Autoexcitado y su Control para Producir Corriente Continua Regulada

Héctor Iván Troncoso Maureira

Informe Final para optar al título de Ingeniero Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. René Andrés Sanhueza Robles
Profesor Guía

Sr. Carlos Andrés Ávila Muñostes
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Carlos Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 11 de abril de 2019

A mi madre Berta Maureira Quintana, que siempre con su amor y consejos me ayudo a ser quien soy en estos momentos.

A mi padre Héctor Troncoso Soto, el cual siempre me estuvo apoyando en todas mis decisiones.

A mi hermana Andrea Troncoso Maureira, la cual siempre me sacaba sonrisas y me daba ánimo para seguir adelante.

A mi novia Nikole Basulto Pizarro, que siempre está a mi lado y me apoya con su amor infinito.

Agradecimientos

No encuentro palabras para describir mi felicidad por haber llegado a esta instancia. Tantos años de esfuerzo, dedicación y aprendizaje, al fin están dando frutos.

Mis primeros agradecimientos es para mi familia, la cual en toda mi etapa universitaria estuvieron siempre entregándome amor, apoyo y alentándome para seguir adelante cuando más lo necesitaba.

Le agradezco profundamente a mi amor, la cual llego a mi vida en mi última etapa de la carrera, quien me motivó para conseguir mi objetivo principal que es llegar a donde estoy. Espero seguir cumpliendo mis metas junto a la mujer que Dios puso en mi camino.

Agradezco a los docentes de la escuela de ingeniería eléctrica, en especial al profesor René Sanhueza, el cual siempre tuvo disposición de aclarar todas las inquietudes y por la constancia de ser un buen docente no solo para mí, sino que también para todos los alumnos.

A mis compañeros de la generación 2013, los cuales me acompañaron en las largas noches de estudio, pasar momentos de tristezas por las notas de las pruebas pero las alegrías fueron más sobresalientes, por algo llegamos a donde estamos.

Valparaíso, 11 de abril de 2019

Héctor Troncoso

Resumen

Este trabajo se basa en el estudio de un generador de inducción autoexcitado por un banco de condensadores y su control para producir corriente continua regulada.

Para saber el comportamiento de la máquina de inducción es necesario analizar sus componentes, su funcionamiento y sus parámetros, ya sean, su velocidad de sincronismo, su deslizamiento, su circuito equivalente, su curva de magnetización y finalmente, la curva característica par/velocidad, en la cual se observa si la máquina actúa como motor o generador.

El generador de inducción autoexcitado entrega tensiones y frecuencias variables, esto se debe a que al generador se le inyectan velocidades variables, siendo este el gran problema de este trabajo, ya que no se puede conectar a la red directamente o alimentar cargas. Por lo tanto, como solución al problema mencionado, se convierte la tensión alterna a tensión continua no regulada, mediante un rectificador trifásico de puente completo en base a diodos, esto se hace para trabajar con frecuencia constante.

Finalmente, para obtener una tensión regulada, se necesita de un convertidor CC/CC, donde en este trabajo se ocupará un convertidor buck (reductor), el cual es controlado por un controlador PI, donde este controlador ayuda a obtener la tensión deseada, las cuales son de 48 (Vcc) y 24 (Vcc), donde dichas tensiones son reguladas gracias a la apertura y cierre del interruptor (Mosfet) del convertidor.

Palabras claves: Máquina de inducción, Generador de inducción autoexcitado, Convertidor buck, control.

Abstract

This work is based on the study of a self-excited induction generator by a capacitor bank and its control to produce regulated direct current

To know the behavior of the induction machine, it is necessary to analyze its components, its operation and its parameters, whether they are their synchronism speed, their slip, their equivalent circuit, their magnetization curve and finally, the torque / speed characteristic curve, in which it is observed if the machine acts as a motor or generator.

The self-excited induction generator delivers voltages and variable frequencies, this is because the generator is injected with variable speeds, this being the main problem of this work, since it cannot be connected to the grid directly or feed loads. Therefore, as a solution to the aforementioned problem, the alternating voltage is converted to unregulated direct voltage, by means of a three-phase full bridge rectifier based on diodes, this is done to work with constant frequency.

Finally, to obtain a regulated voltage, a DC / DC converter is needed, where in this work a buck (reducer) converter will be used, which is controlled by a PI controller, where this controller helps to obtain the desired voltage, which are 48 (Vcc) and 24 (Vcc), where these voltages are regulated thanks to the opening and closing of the switch (Mosfet) of the converter.

Key words: Induction machine, self-excited induction generator, buck converter, control.

Índice general

Introducción	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
1 Máquina de Inducción	4
1.1 Componentes Principales que Construyen la Máquina de Inducción	4
1.1.1 Estator	4
1.1.2 Rotor	5
1.1.3 Carcasa	6
1.2 Principio de Funcionamiento de la Máquina de Inducción	7
1.3 Concepto de Deslizamiento de la Máquina de Inducción.....	7
1.4 Circuito Equivalente de la Máquina de Inducción	8
1.5 Curva de Magnetización de la Máquina de Inducción.....	8
1.6 Curva Característica Par-Velocidad de la Máquina de Inducción	10
2 Generador de Inducción Autoexcitado (GIAE)	12
2.1 Principio de Funcionamiento del Generador de Inducción Autoexcitado.....	12
2.2 Autoexcitación	14
2.3 Resonancia Eléctrica	14
2.4 Cálculo del Banco de Condensadores.....	15
2.5 Simulación del generador de inducción autoexcitado.....	16
2.6 Simulación a velocidad variable	18
3 Sistema de Conversión AC/CC	23
3.1 Rectificador Trifásico	23
3.2 Convertidor CC/CC	24
3.3 Tipos de Convertidores CC/CC.....	25
4 Convertidor Buck y su Control	27
4.1 Estado de Operación del Convertidor Buck.....	27
4.1.1 Estado de Operación 1 (Estado ON).....	27
4.1.2 Estado de Operación 2 (Estado OFF)	28
4.2 Cálculo de Parámetros del Convertidor Buck	31

4.3 Control del Convertidor Buck	31
4.3.1 Ganancia del Controlador PI	34
5 Simulaciones del Sistema Completo	40
5.1 Parámetros constantes de las simulaciones	40
5.2 Estudio y simulación a 48 (Vcc) de salida	44
5.2.1 Simulación a 48 (Vcc) de salida con sobre-corriente	46
5.2.2 Simulación a 48 (Vcc) de salida sin sobre-corriente	48
5.3 Estudio y simulación a 24 (Vcc) de salida	53
5.3.1 Simulación a 24 (Vcc) de salida con sobre-corriente	55
5.3.2 Simulación a 24 (Vcc) de salida sin sobre-corriente	57
5.4 Conclusión a las simulaciones	62
Discusión y conclusiones.....	63
Bibliografía.....	66

Introducción

La generación de energía eléctrica se realiza principalmente en centrales termoeléctricas, hidroeléctricas y nucleares. Este tipo de generación degrada continuamente las condiciones ambientales, por lo que hoy en día, la prioridad de las empresas eléctricas es potenciar la generación eléctrica mediante las fuentes de energía renovables, ya sean estas energía eólica, energía solar, entre otras. Es de vital consideración implementar este tipo de energías, ya sea por la eficiencia energética y el impacto sobre el medioambiente. Además, el estilo de vida actual y la globalización hacen necesario disponer de un suministro de energía eléctrica en cualquier lugar del mundo.

El uso de la máquina de inducción como generador está adquiriendo mayor popularidad para las fuentes de energía renovables. En aplicaciones de energía renovables de baja y media potencia, la máquina de inducción operando como generador ofrece ventajas considerables. Por otra parte, este tipo de máquina encuentra cabida en los sistemas de generación de energía eléctrica (aunque generalmente en potencias inferiores a los 100 kW), tanto en el modo de operación aislado de la red, y así como en el modo de generación distribuida.

La máquina de inducción tiene como característica su bajo costo, su robustez y su fácil mantenimiento, pero tiene un gran problema en cuanto a su control de velocidad. Ésta máquina trabaja a una cierta velocidad sincrónica, la cual depende de los pares de polos y la frecuencia en que la máquina trabaja, donde al no superar dicha velocidad, la máquina actúa como motor, y por otro lado, al superar la velocidad sincrónica, la máquina de inducción actúa como generador. En el presente informe se explicará detalladamente lo anteriormente mencionado y a su vez, se describirá lo que es el deslizamiento, que en pocas palabras es el cociente entre la diferencia de la velocidad de sincronismo y la velocidad deseada en que gira el rotor sobre la velocidad de sincronismo, donde se obtiene un deslizamiento positivo cuando la máquina de inducción actúa como motor y un deslizamiento negativo cuando la máquina asincrónica actúa como generador. Los otros parámetros a describir son los componentes que constituyen la máquina de inducción (estator, rotor y carcasa), al igual que se explicará el circuito equivalente y la curva de magnetización de la máquina de inducción.

El presente trabajo aborda la temática entorno al estudio del generador de inducción, el cual es autoexcitado por un banco de condensadores conectados en paralelo a la máquina asincrónica, dicha máquina es alimentada con una tensión de remanencia de bajo valor, el cual cumple la

finalidad de sustituir el magnetismo residual del rotor estableciendo la tensión inicial en los bornes del estator, el cual se irá incrementando debido a la corriente que inyecta el banco de condensadores.

Como se mencionó anteriormente, el generador de inducción es aplicable para fuentes de energías renovables, ya sea esta, la energía eólica, donde el estudio de este trabajo será en base a dicha fuente de energía. Se sabe que para el sistema eólico se debe generar energía mecánica para poder generar energía eléctrica. La energía mecánica es proporcionada por el viento que choca las aspas del sistema eólico, el cual hace girar el rotor de la máquina de inducción a una velocidad apropiada para que actúe como generador y así generar energía eléctrica. Pero también se sabe que el flujo de aire que golpea las aspas del sistema eólico es variable, por lo tanto, las velocidades en que gira el rotor de la máquina de inducción es variable. Esto afecta a las tensiones y frecuencias que entrega el generador. Las tensiones generadas no solo dependen de la velocidad inyectada al generador, sino también del tamaño del banco de condensadores y la carga a la cual está siendo conectada.

El proceso de autoexcitación de la máquina puede o no ocurrir, esto depende de tres factores; la inductancia de magnetización, la velocidad en que gira el rotor de la máquina de inducción y el tamaño del banco de condensadores, donde la inductancia de magnetización es el principal factor, debido a que establece, incrementa y estabiliza la tensión en los bornes del estator en condiciones de vacío y con carga.

El generador de inducción, el cual es autoexcitado por el banco de condensadores presenta una problemática debido a la variación de la velocidad causada por el viento que golpea las aspas del sistema, donde dicha máquina hace girar su rotor a distintas velocidades y a la vez está generando tensiones y frecuencias variables. Por lo tanto, al generar tensiones y frecuencias variables, no es apropiado inyectar la energía a la red o a las cargas que se desea alimentar.

El sistema eólico tiene una etapa en corriente continua, debido a la inestabilidad de las tensiones y frecuencias que entrega la máquina de inducción la cual actúa como generador. Dicha etapa consta con un regulador de tensión, donde en el mercado eléctrico se utilizan tres tipos de tensiones deseadas en un banco de baterías, los cuales almacenan la energía generada por la máquina de inducción. Las tres tensiones en que trabaja el banco de baterías son de 12 (Vcc), 24 (Vcc) y 48 (Vcc) [7], donde en el transcurso de éste trabajo se estudiará el generador de inducción autoexcitado por un banco de condensadores y su control para producir tensiones de 24 (Vcc) y 48 (Vcc).

La etapa en corriente continua se basa en un rectificador trifásico de puente completa, el cual convierte la tensión alterna generada por la máquina de inducción a una tensión continua no regulada, donde al generar 6 pulsos hace más continua su tensión. Por otro lado, la etapa en corriente continua se basa en un convertidor buck, el cual en este sistema tiene como finalidad convertir las tensiones variables rectificadas a las tensiones de 24 (Vcc) y 48 (vcc) mencionadas anteriormente. Dicha conversión no se hace de una forma trivial, ya que se necesita de un control para producir las tensiones deseadas. El control a utilizar en este sistema es un

controlador PI, el cual tiene dos parámetros estableciendo dos condiciones importantes en el sistema: rapidez y estabilidad.

El estudio del generador de inducción autoexcitado y su control para producir corriente continua se basará en el software matemático llamado MATLAB, el cual consta con una herramienta llamada "Simulink", donde se podrán encontrar los bloques para la construcción del sistema. La herramienta mencionada entrega simulaciones del sistema, donde se podrán observar las tensiones, frecuencias y corrientes generadas de la máquina de inducción, donde al igual se podrán visualizar las tensiones, corrientes y potencias que entregará el convertidor buck. El proceso de control del sistema es desarrollado por otra herramienta de MATLAB, llamada "Sisotool", el cual ayuda a diseñar un controlador PI mediante el lugar geométrico de las raíces (LGR), entregando los valores de las ganancias K_p y K_i del mencionado controlador.

Objetivo general

- Estudiar en ambiente de simulación, la máquina de inducción autoexcitada con condensadores, con etapa rectificadora para producir corriente continua regulada.

Objetivos específicos

- Estudiar el funcionamiento la máquina de inducción con el fin de entender su comportamiento.
- Estudiar el generador de inducción autoexcitado, calculando su parámetro, ya sea éste el tamaño del banco de condensadores, para así saber cuando se produce la autoexcitación independiente de las velocidades y cargas.
- Simular el generador de inducción autoexcitado por banco de condensadores.
- Estudiar los parámetros de la etapa rectificadora del sistema para producir corriente continua.
- Encontrar un control para regular y obtener una tensión deseada.
- Realizar simulaciones del proceso con rectificador trifásico controlado, de manera de tener el valor de corriente continua generado constante para cualquier carga, independiente de la velocidad de giro del eje.

1 Máquina de Inducción

Las máquinas de inducción trifásicas giran a velocidad asíncrona, operando como motor cuando giran con una velocidad menor a la velocidad sincrónica, y operando como generador cuando giran a una velocidad mayor a la velocidad sincrónica. La máquina de inducción es menos costosa que sus equivalentes en tamaño (potencia) de máquinas sincrónicas o máquinas de corriente continua. La máquina de inducción es robusta y requiere de muy poco mantenimiento. Sin embargo, su velocidad no es tan fácil de controlar como en un motor de corriente continua, además de que requieren de una corriente de arranque grande, típicamente de 6 a 8 veces la corriente de plena carga [8].

1.1 Componentes Principales que Construyen la Máquina de Inducción

Las máquinas de inducción están basados en el accionamiento de una masa metálica por la acción de un campo giratorio. Están formados por dos armaduras con campos giratorios coaxiales: una es fija, y la otra móvil. También se les llama, respectivamente, estator y rotor.

1.1.1 Estator

El estator mostrado en la Figura 1-1, se hace apilando láminas de acero de ranuras finas altamente permeables dentro de un marco de acero de hierro fundido, haciendo devanados a través de sus ranuras, por lo que cuando una corriente trifásica pasa a través de él se produce un campo magnético giratorio, este fenómeno es que un bucle cargado de corriente está situado en el campo magnético, esto produce una fuerza magnética en el circuito cerrado de acuerdo con la ley de Lorentz y el circuito empezará a rotar.



Figura 1-1: Estator (Fuente: <http://www.ticgalicia.com>).

Un estator es la parte que se encuentra fija en una máquina rotativa y es fundamental para la transmisión de potencia. Éste es la parte fija de un motor, por lo que opera como base permitiendo que se lleve a cabo la rotación. El estator no cuenta con un movimiento mecánico sino con uno magnético.

El estator tiene un conjunto de láminas de acero al silicio llamadas “paquete” que tiene la habilidad de que pase el flujo magnético con facilidad, los devanados proveen los polos magnéticos que siempre están en pares, ya que el mínimo de polos que debe de tener un motor para funcionar son los antagonistas norte y sur.

1.1.2 Rotor

El devanado del rotor, que conduce la corriente alterna que se produce por inducción desde el devanado del estator conectado directamente, consiste de conductores de cobre o aluminio vaciados en un rotor de laminaciones de acero. Se instalan anillos terminales de cortocircuito en ambos extremos del "rotor jaula de ardilla" o bien en uno de los extremos en el caso del "rotor devanado" [8].

El rotor de la mayoría de las máquinas de inducción no se encuentra equipado con arrollamientos; en su lugar, la corriente fluye en barras de cobre o aluminio, las cuales están uniformemente distribuidas e incrustadas en un material ferromagnético, con todas las barras conectadas a un anillo común en cada extremo del rotor. Este tipo de configuración es llamada **rotor de jaula de ardilla** (Figura 1-2).

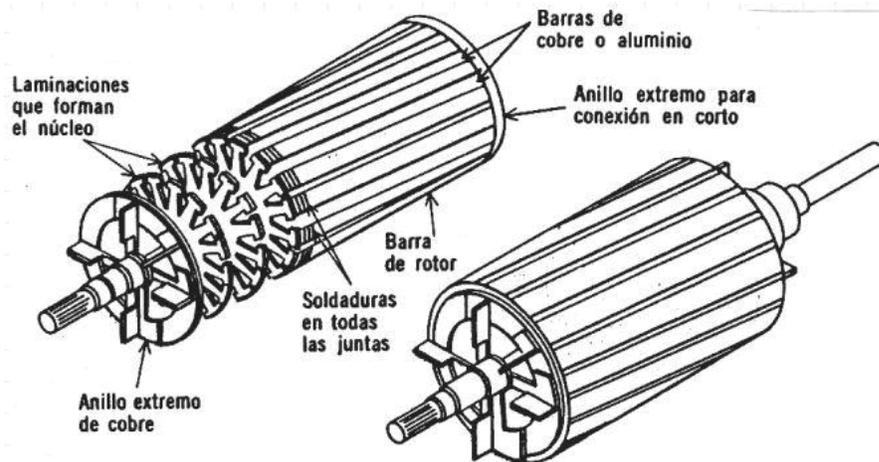


Figura 1-2: Rotor jaula de ardilla (Fuente: <http://www.ticgalicia.com>).

El otro tipo de rotor es el **rotor devanado** (Figura 1-3). Un rotor devanado tiene un grupo completo de devanados trifásicos que son las imágenes especulares de los devanados del estator. Las fases del rotor están conectadas usualmente en Y (estrella), y los extremos de las tres terminales del rotor están unidos a anillos rozantes dispuestos sobre el eje del rotor; los devanados del rotor están cortocircuitados a través de escobillas montadas en los anillos rozantes. Puede conectarse una resistencia adicional externa a los devanados del rotor a través

de los anillos rozantes para obtener un par de arranque mayor, y así modificar la característica par-velocidad de la máquina.

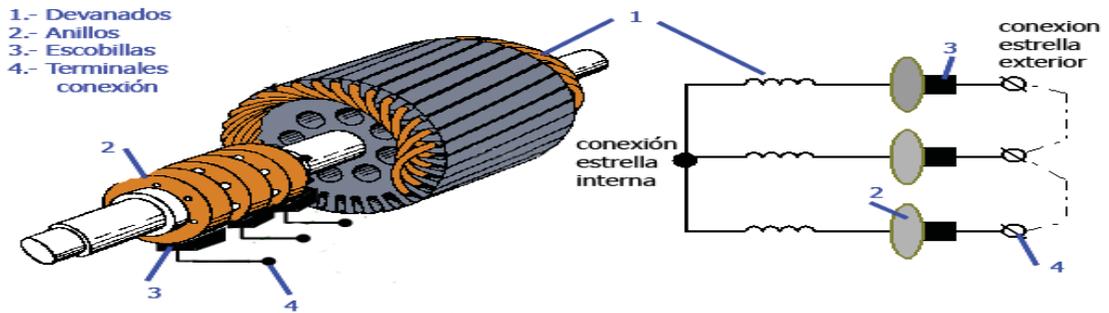


Figura 1-3: Rotor devanado (Fuente: <https://www.areatecnologia.com>).

Las máquinas de inducción de rotor devanado son más costosas que las de rotor de jaula de ardilla y requieren mucho más mantenimiento, debido al desgaste asociado a sus escobillas y anillos rozantes. Como resultado de ello, las máquinas de inducción de rotor devanado son poco utilizadas.

La característica distintiva de la máquina de inducción es que las corrientes del rotor son inducidas electromagnéticamente desde el estator, esta es la razón de la denominación “máquina de inducción”.

1.1.3 Carcasa

La carcasa (Figura 1-4) es la envoltura de la máquina y tiene dos tapas laterales, donde se colocan los cojinetes en los que se apoya el eje. Esta carcasa suele disponer de aletas para mejorar la refrigeración de la máquina. Junto a la carcasa está la placa de características donde figuran las magnitudes más importantes de la máquina. En la carcasa se encuentra también la caja de bornes, donde van a parar los extremos de los bobinados. En una máquina asíncrona trifásica de jaula de ardilla la caja de bornes tiene seis terminales, correspondientes a los extremos de las tres fases del estator, formando dos hileras de tres. De esta forma resulta fácil el conectar el devanado del estator en estrella o en triángulo.

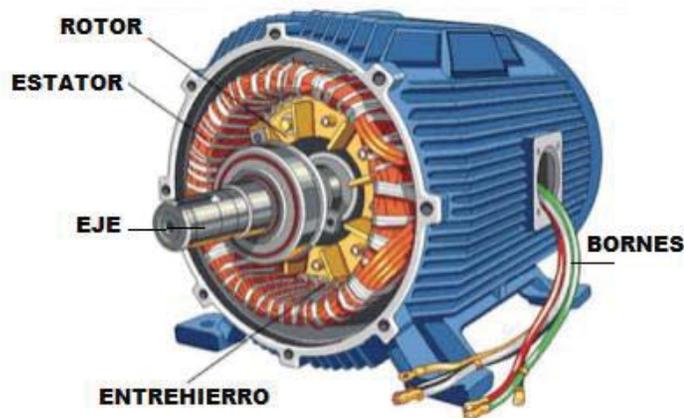


Figura 1-4: Carcasa (Fuente: <http://www.ticgalicia.com>).

1.2 Principio de Funcionamiento de la Máquina de Inducción

Cuando el estator de una máquina de inducción trifásica se conecta a una fuente de potencia trifásica de frecuencia eléctrica "Fe", un conjunto trifásico de corrientes fluye por los devanados del estator y se establece un campo magnético giratorio. Estas corrientes trifásicas suministran la potencia reactiva necesaria para establecer el campo magnético giratorio así como la potencia activa consumida por el motor [8].

La velocidad del campo magnético giratorio está determinada totalmente por la frecuencia de la fuente de potencia trifásica y es conocida como la velocidad sincrónica (Ns).

La velocidad de rotación del campo magnético está dada por la ecuación (1-1):

$$N_s = \frac{60 * F_e}{P} \quad (1-1)$$

donde "Fe" es la frecuencia eléctrica de la red de suministro medida en hertz (Hz), "P" es el número de pares de polos de la máquina de inducción y "Ns" es la velocidad sincrónica como se menciono anteriormente, la cual esta medida en rpm (revoluciones por minuto). Cuando existe un movimiento relativo entre el campo magnético del estator y el rotor, se inducen voltajes en los devanados (o barras conductoras) del rotor. La frecuencia "Fr" de los voltajes inducidos en el rotor depende de la velocidad relativa entre el campo magnético del estator y el rotor.

1.3 Concepto de Deslizamiento de la Máquina de Inducción

La magnitud de las corrientes que fluyen en los circuitos del rotor está determinada por la magnitud de los voltajes inducidos en el rotor y la impedancia del rotor a la frecuencia de deslizamiento. Puesto que el comportamiento de una máquina de inducción depende del voltaje y la corriente del rotor, con frecuencia es más lógico hablar de su velocidad relativa. En general se utilizan dos términos para definir el movimiento relativo entre el rotor y el campo magnético en el entrehierro [8].

Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento (Ndes), definida como la diferencia entre la velocidad sincrónica (Ns) y la velocidad del rotor (Nr):

$$N_{des} = N_s - N_r \quad (1-1-1)$$

El otro término utilizado para describir el movimiento relativo es el deslizamiento, el cual es la velocidad relativa expresada sobre una base en por unidad o en porcentaje. El deslizamiento (s) está definido como:

$$s = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \quad (1-1-2)$$

El valor del deslizamiento en la máquina de inducción aumenta con la demanda de la carga acoplada al eje del motor. Normalmente para este tipo de máquina, funcionando a plena carga, el deslizamiento no supera el 6%.

1.4 Circuito Equivalente de la Máquina de Inducción

El circuito equivalente de una máquina de inducción es muy similar al de un transformador, debido a la acción de transformación que ocurre al inducirse corrientes en el rotor, desde el estator.

Para la determinación de los valores de las diversas magnitudes consideradas en el funcionamiento en régimen permanente de la máquina de inducción se suele utilizar el circuito equivalente por fase mostrado en la Figura 1-5. En este modelo por fase de la máquina asincrónica se contempla la resistencia y reactancia de dispersión correspondientes a los devanados del estator (R_s , X_s) y del rotor (R_r , X_r), donde estos últimos están referidos al estator, la resistencia debida a las pérdidas del núcleo magnético (R_{fe}) y la reactancia magnética (X_m). Finalmente, en efecto de las pérdidas mecánicas y el accionamiento de la carga acoplada al eje de la máquina quedan incluidos en la resistencia dependiente del deslizamiento del rotor (R_{r2}). Donde $R_{r2} = R_r * (1 - s)/s$ [1].

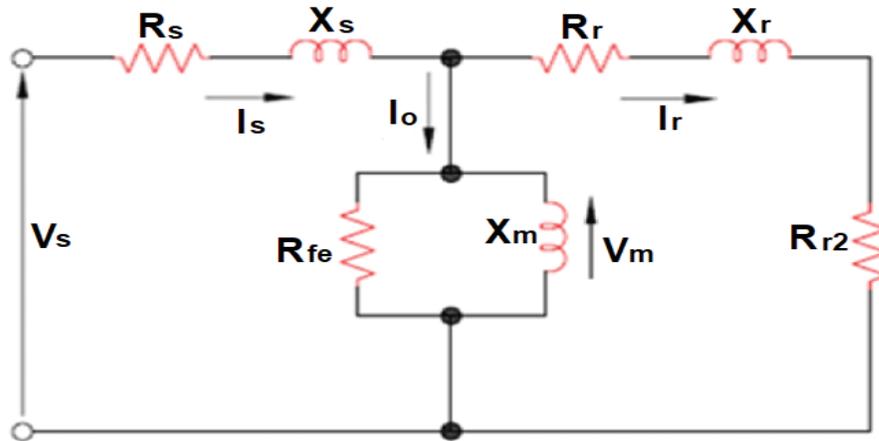


Figura 1-5: Circuito equivalente por fase de la máquina de inducción.

1.5 Curva de Magnetización de la Máquina de Inducción

Para modelar la máquina de inducción cuando funciona como motor, es importante determinar la inductancia de magnetización al voltaje nominal. Cuando la máquina funciona en otros modos de operación, más específico como generador, la variación de la inductancia de magnetización es el factor principal en la dinámica del incremento del voltaje en los terminales y en su estabilización. La variación de la inductancia de magnetización (M), se puede calcular haciendo girar el rotor de la máquina de inducción a la velocidad sincrónica, por medio de otra máquina motriz, y tomar mediciones de las corrientes (I_s) que circulan por los devanados y del voltaje (V_s) aplicado a los terminales del estator, donde el valor deseado de la frecuencia se mantiene. De esta manera se tiene que el deslizamiento es cero y, por tanto, la corriente en el rotor es nula. Con lo que, si se desprecian las pérdidas en el núcleo, la corriente en la inductancia de magnetización es igual a la medida en la línea de alimentación del motor. $I_s = I_m$. Por otra parte, cabe mencionar que el valor de la reactancia X_m se puede determinar a partir de la curva de magnetización de la máquina de inducción (Figura 1-6).

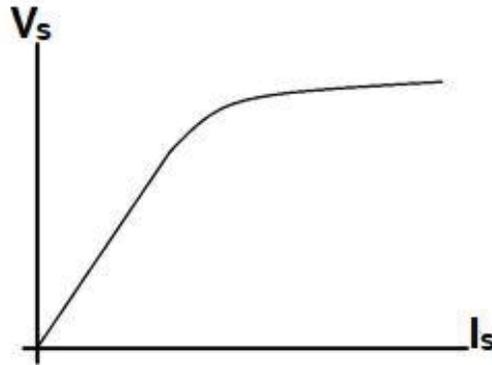


Figura 1-6: Curva de magnetización de la máquina de inducción.

Una vez ya obtenidos los valores para la característica magnética y de los parámetros del estator correspondientes del modelo equivalente de la máquina de inducción, se determina la tensión (V_m) en la reactancia de magnetización [1].

$$V_m = V_s - (R_s + X_s) * I_s \quad (1-1-3)$$

La inductancia de magnetización para cada uno de los puntos considerados, se calcula según la siguiente expresión:

$$M = \frac{V_m}{2 * \pi * f * I_m} \quad (1-1-4)$$

Los resultados obtenidos de la inductancia de magnetización indican que su valor no es constante. Concretamente, tras su representación como una serie de puntos respecto a la corriente en la reactancia de magnetización, se observa que presenta una evolución no lineal, donde se puede apreciar en la curva representada en la Figura 1-7.

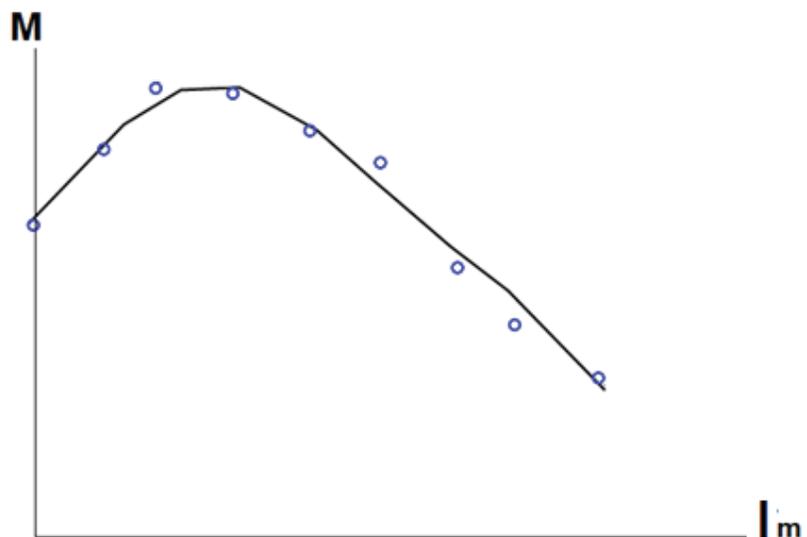


Figura 1-7: Variación de la inductancia de magnetización con la corriente.

1.6 Curva Característica Par-Velocidad de la Máquina de Inducción

La curva Par-Velocidad de la máquina de inducción visualizada en la Figura 1-8 indica que, cuando la máquina funciona a tensión y frecuencia en el estator constantes, el par sólo varía en función del deslizamiento "s", es decir, el par varía solamente con la velocidad de giro del rotor [2].

En el eje de abscisas se ha colocado una doble escala: por un lado se indica la velocidad y por el otro el deslizamiento correspondiente.

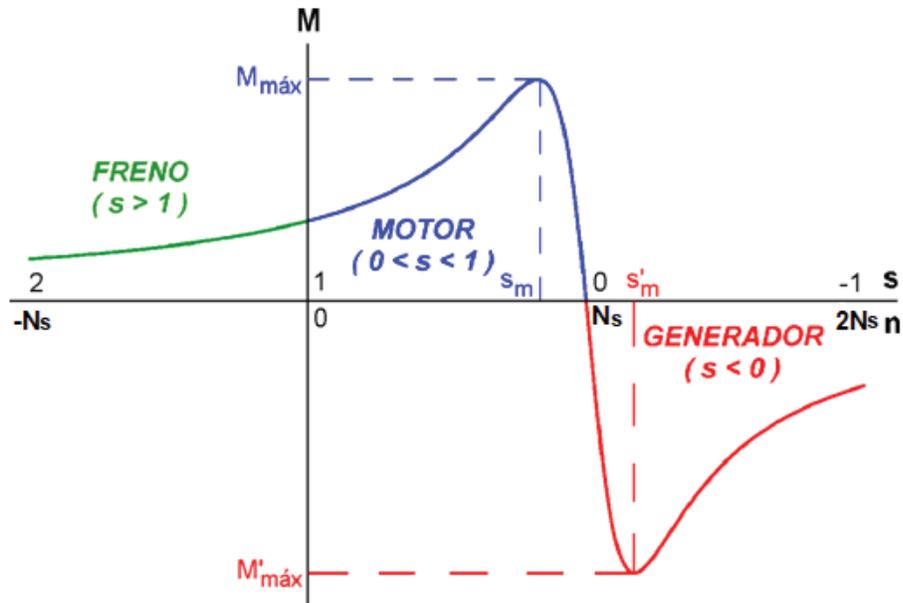


Figura 1-8: Curva característica Par-Velocidad de la máquina de inducción. (Fuente: <https://ocw.unican.es>).

En esta curva se pueden distinguir tres modos de funcionamiento [2]:

- **Motor**

En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor varía entre 0 y la de sincronismo N_s , lo que quiere decir que el deslizamiento "s" varía entre 1 y 0. Por lo tanto, funcionando como motor, la velocidad de la máquina es del mismo sentido que la de sincronismo y de menor valor que ésta.

Por lo tanto, en un motor asíncrono la máquina absorbe potencia eléctrica por el estator para convertirla en potencia mecánica en su eje.

En este caso tanto el par como la velocidad tienen signo positivo. Por ende, el par está a favor de la velocidad y se trata de un par motor. Es este par el que provoca el giro de la máquina.

- **Generador**

En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor es superior a la de sincronismo N_s , lo que quiere decir que el deslizamiento " s " es negativo. Por lo tanto, funcionando como generador la velocidad de la máquina es del mismo sentido que la de sincronismo y de mayor valor que ésta.

En consecuencia, en un generador de inducción, la máquina absorbe potencia mecánica en su eje para convertirla en potencia eléctrica (potencia activa) que se suministra a la red conectada al estator.

En este caso el par es negativo y la velocidad es positiva. Por lo tanto, el par de la máquina de inducción se opone a la velocidad y se trata de un par de frenado. Deberá existir otro par, por ejemplo el producido por una máquina motriz acoplada al mismo eje que la máquina asíncrona, que mueva al grupo y sea la que esté obligando a girar a una velocidad superior a la de sincronismo.

- **Freno a contracorriente**

En este régimen de funcionamiento la velocidad n del motor es negativa, de sentido contrario a la de sincronismo N_s , lo que quiere decir que el deslizamiento " s " es mayor que 1.

Por ende, funcionando como freno a contracorriente una máquina asíncrona absorbe potencia eléctrica por el estator y potencia mecánica por su eje. La totalidad de la suma de estas dos potencias absorbidas se disipa en forma de calor entre todas las pérdidas de la máquina, la cual se puede llegar a calentar excesivamente.

En este caso el par es positivo y la velocidad negativa. Por lo tanto, el par de la máquina de inducción se opone a la velocidad y se trata de un par de frenado que se opone a su movimiento.

2 Generador de Inducción Autoexcitado (GIAE)

El encarecimiento de las fuentes de energía convencionales, ha dado pie a un incremento en el interés hacia las energías no convencionales como la eólica, solar, etc. La generación de energía eléctrica se realiza principalmente en centrales termoeléctricas, hidroeléctricas y nucleares. Este tipo de generación degrada continuamente las condiciones ambientales. La disminución de las fuentes de energía convencionales y el deterioro del ambiente han despertado un interés en las fuentes de energía renovables. El uso de la máquina de inducción como generador está adquiriendo mayor popularidad para las fuentes de energía renovables. En aplicaciones de energía renovables de baja y media potencia, la máquina de inducción operando como generador ofrece ventajas considerables.

2.1 Principio de Funcionamiento del Generador de Inducción Autoexcitado

Una máquina de inducción trifásica puede funcionar como un generador auto-excitado, cuando una máquina motriz hace girar su rotor a una velocidad apropiada, y la excitación necesaria para establecer el campo magnético giratorio en el entrehierro es suministrada conectando a los terminales del estator un banco trifásico de capacitores (Figura 2-1) [8].

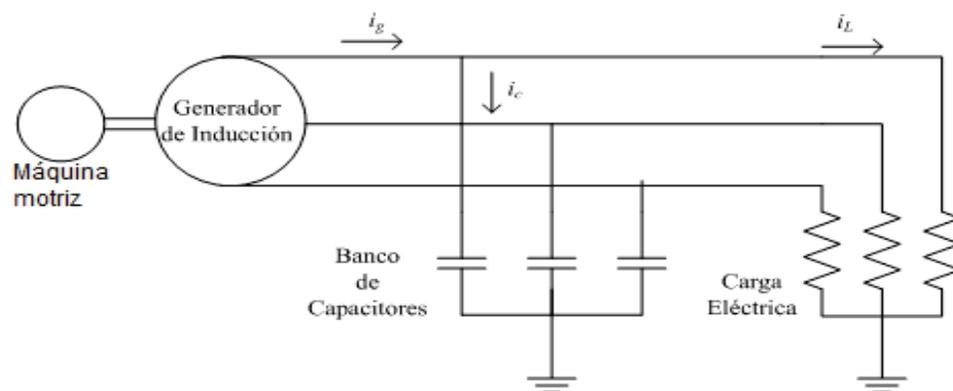


Figura 2-1: Generador de inducción auto-excitado.

La fuerza electromotriz y las corrientes inducidas en los devanados se incrementarán hasta alcanzar un punto de equilibrio debido a la saturación magnética en la máquina. El magnetismo residual en el rotor establece el voltaje inicial, el cual se incrementa con la corriente del capacitor lo que provoca un incremento continuo del voltaje. Como resultado de esta acción y de la saturación magnética, se establece un voltaje de estado estacionario en los terminales del generador, como se visualiza en la figura 2-2.

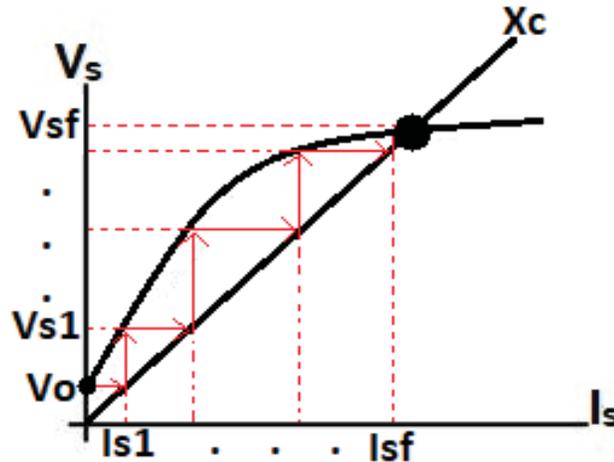


Figura 2-2: Incremento de la tensión y corriente en el generador de inducción autoexcitado.

Algunas de las ventajas del GIAE son: bajo costo, mejor estabilidad, construcción sencilla, mantenimiento mínimo, robustez y autoprotección (el voltaje se colapsa cuando se produce un cortocircuito en sus terminales). Por otro lado, una pobre regulación de voltaje incluso con velocidad constante ha sido un punto en contra para su aplicación.

El voltaje en los terminales del generador depende de tres factores.

- 1) La velocidad de la máquina motriz.
- 2) El tamaño de los capacitores.
- 3) La carga conectada.

Si la velocidad del generador se mantiene constante, entonces el voltaje generado depende solamente del tamaño de los capacitores y de la carga conectada. El voltaje de la máquina decrece con un incremento de la carga para un valor fijo de capacitancia. Por lo tanto, para regular el voltaje en los terminales, la capacitancia debe variar continuamente con la carga. Pero la variación continua de la capacitancia no es una propuesta simple, ni económica.

Sería deseable que el generador proporcione un voltaje constante en los terminales bajo cualquier variación de la carga. En la práctica con un incremento de la carga se produce una caída en el voltaje y la frecuencia. Un voltaje en los terminales constante implica un incremento en el valor del flujo magnético en el entrehierro, lo que resultaría en una reactancia de magnetización que varía continuamente.

2.2 Autoexcitación

El fenómeno de auto-excitación de la máquina de inducción puede o no ocurrir. Es decir, que incluso conectando capacitores a los terminales del estator de la máquina y haciendo girar el rotor, puede o no aparecer voltaje en los terminales del generador. Tres son los factores que determinan el proceso de autoexcitación [8].

- 1) La Inductancia de Magnetización.
- 2) Velocidad de la máquina motriz.
- 3) Banco de capacitores.

1.- Inductancia de magnetización: Es el factor principal en el establecimiento, incremento y la estabilización del voltaje en terminales en condiciones de vacío y con carga, y está determinada por el grado de saturación del material magnético.

2.- Velocidad de la máquina motriz: Cuando el generador de inducción trabaja en vacío, existe una velocidad mínima para que el proceso de autoexcitación sea exitoso. Mientras que en condiciones con carga existe una velocidad mínima y una velocidad máxima. Por lo tanto, es necesario determinar en el caso general, la velocidad mínima necesaria para que el fenómeno de autoexcitación ocurra.

3.- Banco de capacitores: Junto con la velocidad de la máquina motriz, el tamaño del banco de capacitores, es uno de los factores que pueden ser manejados para obtener el voltaje requerido en condiciones de vacío y con carga. Sin embargo, con una velocidad seleccionada, existe también un valor mínimo de los capacitores para que se establezca un voltaje en los terminales del generador.

Es importante mencionar que para que se pueda establecer este proceso de autoexcitación y alcanzar un determinado valor de tensión en el GIAE, la capacidad de los condensadores conectados al estator deben superar un determinado valor mínimo, el cual corresponde a la recta de reactancia capacitiva (X_c) tangente a la pendiente de la zona lineal de la curva de magnetización de la máquina, la cual se observa en la figura 2-2.

2.3 Resonancia Eléctrica

La resonancia eléctrica [4] se da cuando en un circuito en el que existen elementos reactivos (bobinas y condensadores) es recorrido por una corriente alterna de una frecuencia tal que hace que la reactancia se anule, dicho fenómeno se denomina resonancia eléctrica.

Para que exista la resonancia eléctrica, se debe cumplir que la reactancia capacitiva sea igual a la reactancia inductiva (ecuación (2-1)), para que la maquina trabaje con una resistencia pura y a la vez con corriente máxima.

$$wL = \frac{1}{wC} \quad (2-1)$$

Por lo tanto, la resonancia eléctrica se da cuando la reactancia inductiva cancela la reactancia capacitiva.

Como anteriormente se menciona, se desea que las reactancias se anulen, por lo que se obtiene a una determinada frecuencia, esta frecuencia es la misma que la red (50 Hz). Dicha frecuencia se le denomina frecuencia de resonancia (f_0), la cual se observa en la siguiente ecuación (2-2):

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} \quad (2-2)$$

2.4 Cálculo del Banco de Condensadores

El funcionamiento satisfactorio de un generador de inducción autoexcitado está condicionado por unos valores límites de capacidad y velocidad. Por tanto, la determinación de la capacidad mínima que asegure el inicio y posterior mantenimiento del proceso de autoexcitación del generador es un aspecto fundamental. Su valor se puede calcular a partir de diversos procedimientos [1].

El primer procedimiento para calcular el valor de la capacidad mínima es mediante la **curva de magnetización de la máquina de inducción**, donde sobre la curva de magnetización de la máquina, se traza un recta "r" que parte desde el origen de los ejes y pasa de forma tangencial por la zona lineal de dicha curva, finalmente se intercepta la recta con la curva, obteniendo el punto "P", tal como se indica en la figura (2-3).

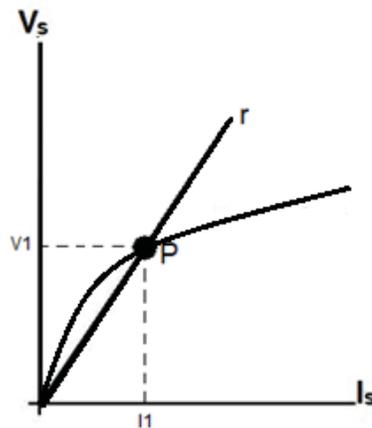


Figura 2-3: Punto de intersección "P" entre la recta "r" y la curva de magnetización.

El cociente entre el valor de tensión y corriente, da como resultado la reactancia máxima que puede alcanzar el condensador asociado al generador de inducción.

$$X_{c \max} = \frac{V_1}{I_1} \quad (2-3)$$

Mediante el valor de la reactancia máxima obtenida anteriormente, se procede al cálculo de la capacidad mínima que deben tener los condensadores para que el generador pueda realizar el proceso de autoexcitación y alcanzar el valor considerado de tensión y frecuencia nominal.

$$C_{min} > \frac{1}{2 * \pi * f * X_{c \max}} \quad (2-4)$$

Por otra parte, como segundo procedimiento para el cálculo del valor de la capacidad mínima, es mediante los **datos de la placa característica del motor de inducción**. Este método es el que más se ocupa, ya que frecuentemente se dispone únicamente de los datos de la placa característica de la máquina, donde además resulta muy complicado o no es posible realizar ensayos necesarios para el cálculo de parámetros del modelo de la máquina de inducción como en el caso anterior.

En este procedimiento se requieren los siguientes valores nominales facilitados por el fabricante de la máquina de inducción considerada: tensión, corriente, factor de potencia y frecuencia.

Se considera que la componente reactiva que aportan los condensadores asociados al generador es de un valor muy similar al requerido en condiciones nominales y que se selecciona una disposición en estrella de los mismos, la capacidad necesaria se determina mediante la siguiente expresión.

$$C = \frac{I * \sin(\varphi)}{\sqrt{3} * V * 2 * \pi * f} \quad (2-5)$$

Finalmente, el tamaño del banco de condensadores es un factor importante para la autoexcitación del generador de inducción, por lo tanto de la ecuación (2-2) se puede obtener su valor mediante la resonancia eléctrica.

$$C = \frac{1}{4 * \pi^2 * f_0^2 * L} \quad (2-6)$$

2.5 Simulación del generador de inducción autoexcitado

Cuando la máquina de inducción funciona como generador autoexcitado, la variación de la inductancia de magnetización es el factor principal en la dinámica del voltaje y su estabilización. Por lo tanto, la saturación magnética es la responsable de que el voltaje generado en terminales alcance un valor de estado estacionario.

Si en el modelo del generador no se incluye la saturación magnética, el voltaje generado crecerá sin límite idealmente, pero llega a un valor muy elevado llegando a un estado estacionario. Éste fenómeno se ilustra en la figura (2-4), en la cual se puede observar que el voltaje crece sin límites, donde a medida que el tiempo transcurre llegará a un punto de operación estable.

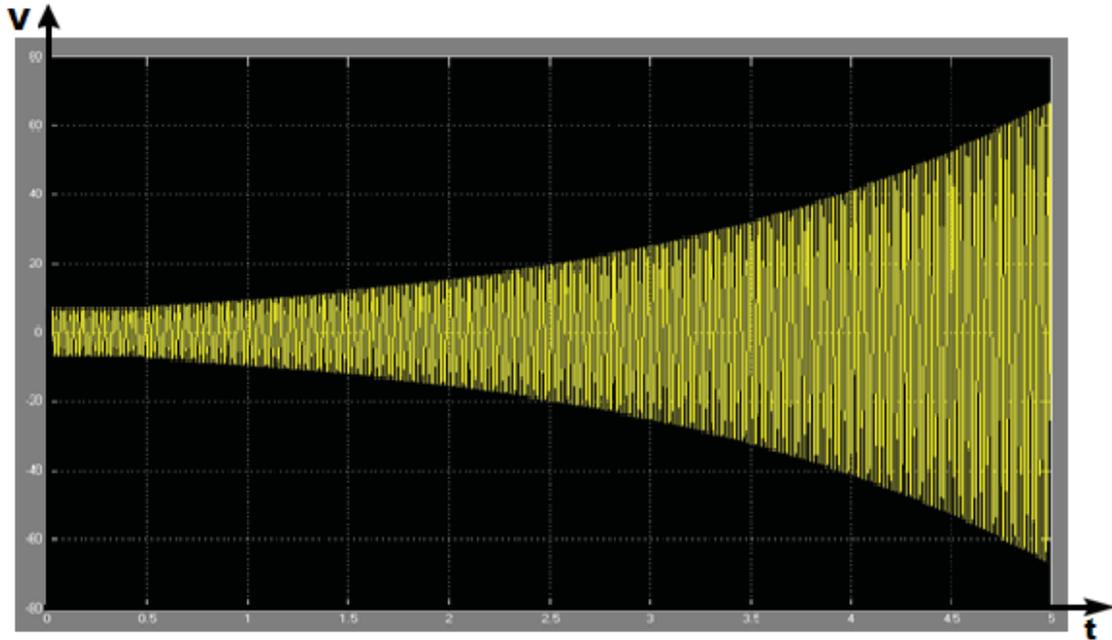


Figura 2-4: Tensión simulada sin saturación magnética.

El sistema a simular es el que se muestra en la figura (2-5), donde se observa la máquina de inducción, la cual tiene un funcionamiento como generador.

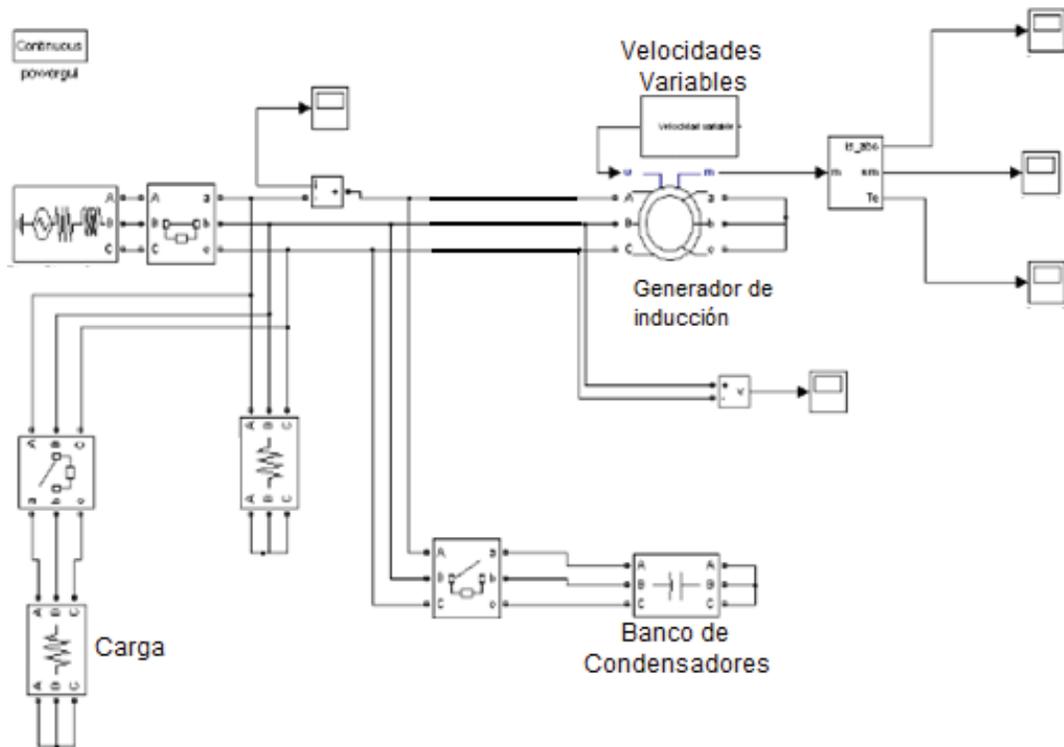


Figura 2-5: Sistema a simular.

Dicha máquina es autoexcitada por un banco de condensadores conectada en paralelo a los bornes de la máquina, donde la ecuación (2-6) se calcula el valor del banco de condensadores. Y finalmente, se conecta la carga trifásica en paralelo a los elementos mencionados.

$$C = \frac{1}{4 * \pi^2 * 50^2 * 0.105} \quad (2-7)$$

Por lo tanto, por datos de la máquina se sabe el valor de la inductancia mutua, donde dicho valor es de 0.105 (Hy) . Sin embargo, el valor del banco de condensadores que autoexcitan el generador de inducción tienen un valor de 96.5 (µF), esto quiere decir que se necesita dicho valor de los condensadores para que se anule la parte reactiva de la maquina y a la vez trabaje a una frecuencia de 50 Hz en vacío y a una velocidad de sincronismo.

La máquina de inducción en la cual se está trabajando gira a una velocidad sincrónica de 1500 rpm, debido a que trabaja con 2 pares de polos y a una frecuencia de 50 (Hz).

De la ecuación (1-1) se obtiene el valor de la velocidad sincrónica anteriormente mencionada, siendo dicha velocidad de 1500 revoluciones por minutos.

$$N_s = \frac{60 * 50}{2} \quad (2-8)$$

Una vez teniendo los datos de velocidad sincrónica y el valor del banco de condensadores que autoexcitarán la máquina, se procede a la simulación del generador de inducción autoexcitado.

2.6 Simulación a velocidad variable

El generador de inducción autoexcitado, será simulado en vacío a cuatro velocidades distintas, donde se podrá visualizar las tensiones y frecuencias variables que entrega el generador debido a las variaciones de las velocidades, donde estas simulan ser las ráfagas del viento de un generador eólico.

Las velocidades variables en las cuales trabajará la máquina de inducción, se observan en la Tabla (2-1) junto a los tiempos en que actúan.

Tabla 2-1: Velocidades variables.

Tiempo en que actúa (s)	RPM	Rad/seg
0 - 3.5	2100	219.9
3.5 - 4.5	1500	157.08
4.5 - 5.5	1800	188.5
5.5 - 6.5	1950	204.2

La figura (2-6) muestra las distintas tensiones peak en vacío generadas por el generador de inducción autoexcitado, donde en el instante de 0.29 segundos aproximadamente la reactancia capacitiva se intercepta con la curva de magnetización para una velocidad de 2100 rpm.

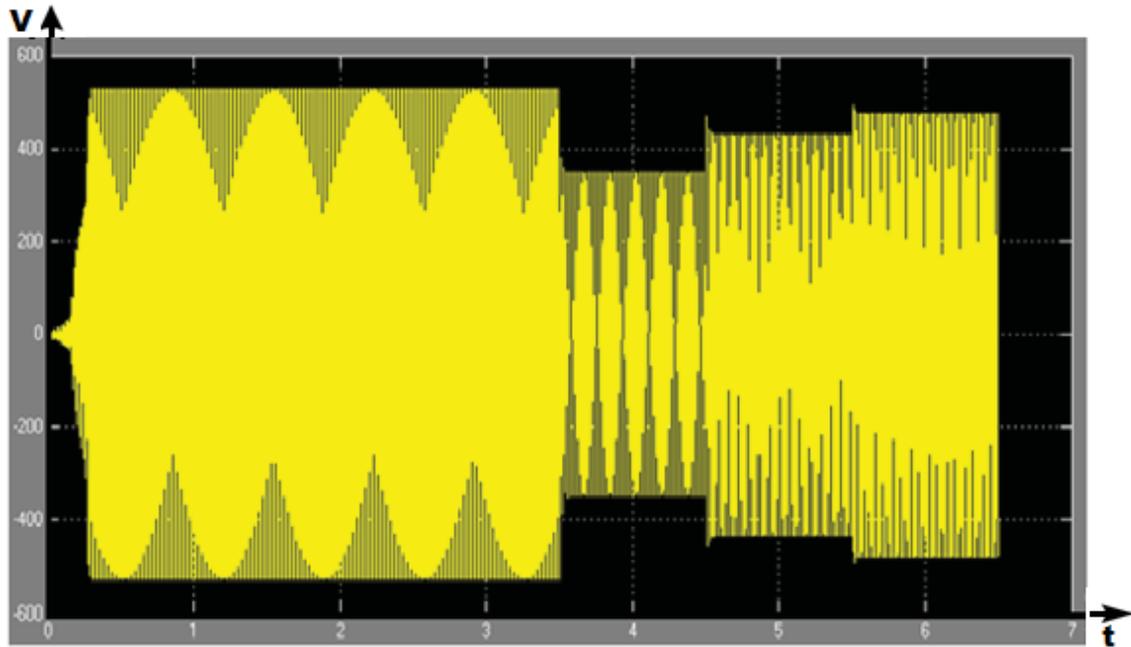


Figura 2-6: Tensiones en vacío generadas por la máquina de inducción.

Una vez ya simulada la máquina con las distintas velocidades, se procede a introducir los datos de tensión, frecuencia y corriente en la Tabla (2-2), donde dicha tabla entrega datos de frecuencia, tensión peak y la corriente peak generada.

Tabla 2-2: Datos de tensión, frecuencia y corriente generada.

Tiempo en que actúa (s)	Tensión generada (Vpeak)	Frecuencia generada (Hz)	Corriente generada (Apeak)
0 - 3.5	524	69.93	12.825
3.5 - 4.5	347	50	6.07
4.5 - 5.5	431	59.88	9.05
5.5 - 6.5	476	64.935	10.824

Se puede apreciar que a medida que la velocidad varía, la frecuencia, la tensión y la corriente varían de acuerdo a la velocidad en vacío, esto quiere decir que la velocidad en vacío es directamente proporcional a los parámetros mostrados en la Tabla (2-2).

Se realizará un estudio del generador de inducción autoexcitado en vacío, donde se analizará dos procedimientos teóricos del cálculo de cómo llegar a los datos de frecuencia entregados por la Tabla (2-2).

Como primer análisis, para velocidades (N_r) en vacío, la frecuencia es directamente proporcional a la velocidad que gira el rotor. Por lo que en la ecuación (1-1) muestra una de las maneras de llegar a los datos entregados por las simulaciones, donde los valores de las frecuencias calculadas se observan en la Tabla (2-3). En dicha tabla, se observarán los deslizamientos correspondientes a cada velocidad, los cuales se obtienen mediante la ecuación (1-3).

Tabla 2-3: Datos de velocidad, deslizamiento y frecuencia.

Tiempo en que actúa (s)	Velocidad (RPM)	Deslizamiento (-)	Frecuencia generada (Hz)
0 - 3.5	2100	-0.4	70
3.5 - 4.5	1500	0	50
4.5 - 5.5	1800	-0.2	60
5.5 - 6.5	1950	-0.3	65

Otro análisis para el cálculo es mediante la reactancia capacitiva, la cual se necesitan los siguientes parámetros:

1. Tensión peak generada.
2. Corriente peak generada.
3. Condensador que genera la autoexcitación.

La ecuación (2-9) sacada de la ecuación (2-3) y de la ecuación (2-4) muestra la forma para obtener el cálculo de la frecuencia generada.

$$f_{vacio} = \frac{I_{vacio} * \sqrt{3}}{2 * \pi * V_{vacio} * C} \quad (2-9)$$

Donde "C" corresponde al condensador calculado en la ecuación (2-7), el cual genera la autoexcitación para la velocidad sincrónica, éste valor del condensador es 96.5 (μ F).

Por lo tanto, se procede al cálculo de estas frecuencias generadas.

Para una velocidad de 2100 (rpm):

$$f_{vacio} = \frac{12.825 * \sqrt{3}}{2 * \pi * 524 * 96.5 * 10^{-6}} \quad (2-10)$$

$$f_{vacio} = 69.9165 \text{ (Hz)} \quad (2-11)$$

El cálculo se hace idénticamente para cada velocidad, donde en la tabla (2-4) se observa los valores de las frecuencias obtenidas por la ecuación (2-9).

Tabla 2-4: Datos velocidad y frecuencia.

Tiempo en que actúa (s)	Velocidad (RPM)	Frecuencia generada (Hz)
0 - 3.5	2100	69.9165
3.5 - 4.5	1500	49.9704
4.5 - 5.5	1800	59.9825
5.5 - 6.5	1950	64.9582

Por otra parte, cuando varía la velocidad, existen dos factores con respecto a la tensión generada en la autoexcitación:

1. Para cada velocidad, existe una característica de magnetización diferente, donde al aumentar la velocidad, las tensiones y corrientes generadas aumentan.
2. La reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la frecuencia.

Por lo tanto, a distinta velocidad, se obtiene otro punto de intersección en la característica de magnetización para una determinada velocidad, donde a medida que la velocidad aumenta, la curva de magnetización toma valores de tensión y corrientes mayores.

Se procede al cálculo de la reactancia capacitiva para observar el comportamiento de ésta. El cálculo se realizará mediante la ecuación (2-3) para cada velocidad y se mostrará el resultado en la tabla (2-5).

Para una velocidad de 2100 (rpm), la reactancia capacitivas máxima que se necesita para obtener el condensador mínimo de autoexcitación es la siguiente.

$$X_{c \max} = \frac{524}{12.825 * \sqrt{3}} \quad (2-12)$$

$$X_{c \max} = 23.5892 \text{ } (\Omega) \quad (2-13)$$

El cálculo se hace idénticamente para cada velocidad, obteniendo los valores de las reactancias capacitivas máximas mediante la ecuación (2-3).

Tabla 2-5: Datos de velocidad y reactancia capacitiva.

Tiempo en que actúa (s)	Velocidad (RPM)	Reactancia máxima (Ω)
0 - 3.5	2100	23.5892
3.5 - 4.5	1500	33.005
4.5 - 5.5	1800	27.4959
5.5 - 6.5	1950	25.3898

Una vez obtenidos los datos de las reactancias capacitivas, en la figura (2-7) se dan a conocer el comportamiento de las velocidades y las reactancias capacitivas.

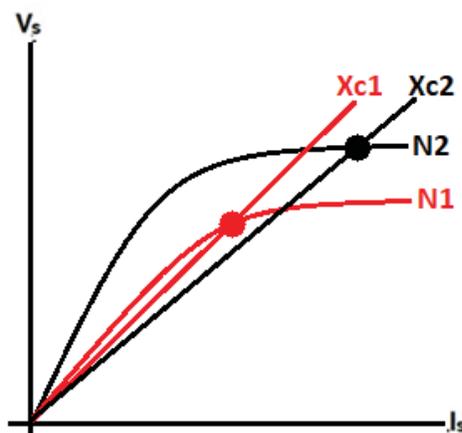


Figura 2-7: Comportamiento de las velocidades y las reactancias capacitivas en la curva de magnetización.

Se puede apreciar en la figura (2-7) el comportamiento de las reactancias capacitivas mediante las variaciones de las velocidades, donde se observa que la velocidad es inversamente proporcional a la reactancia capacitiva, esto se debe a que la frecuencia es inversamente proporcional a la reactancia capacitiva como se observa en la ecuación (2-4).

3 Sistema de Conversión AC/CC

El generador de inducción autoexcitado, genera corriente y tensión alterna, por lo tanto para obtener corriente continua se necesita de un dispositivo electrónico llamado rectificador, por otra parte, para regular la tensión continua obtenida por el rectificador, se necesita de un dispositivo electrónico llamado convertidor CC/CC, el cual regula la tensión de salida.

3.1 Rectificador Trifásico

Un rectificador trifásico es un dispositivo electrónico capaz de convertir una corriente alterna de entrada en una corriente continua de salida, mediante dispositivos semiconductores (figura 3-1) capaces de manejar grandes potencias como diodos, tiristores, entre otros. Estos rectificadores son alimentados por fuentes trifásicas, por lo que son más eficientes y pueden manejar grandes potencias, ya que en su salida presentan menor rizado de la señal. Son utilizados principalmente en la industria para producir voltajes y corrientes continuas que generalmente impulsan cargas de gran potencia.

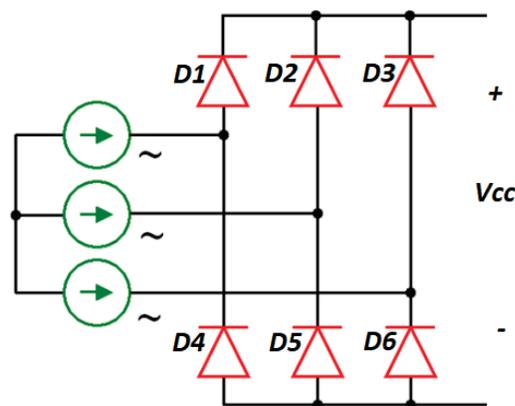


Figura 3-1: Rectificador trifásico a diodos.

La función de este tipo de rectificador es rectificar la tensión trifásica [6], la cual está desfasada en 120° , el modo de rectificación es mediante diodos, los cuales conducen de la forma en que se muestra en la figura 3-2. Los diodos D1-D5 conducen en un tiempo de $1/6$ del periodo total, donde se puede observar que los diodos D1-D6, D2-D6, D2-D4, D3-D4 y D3-D5 conducen $1/6$ del periodo total.

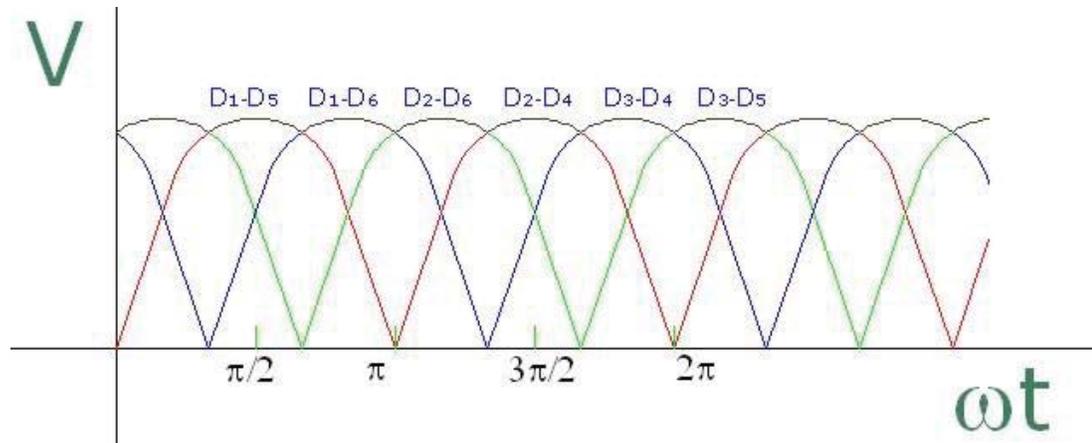


Figura 3-2: Conducción de los diodos del rectificador. (Fuente: <http://e-educativa.catedu.es>).

Si se depura las partes de la onda que no afectan a la alimentación de la carga, resultará una señal como la que muestra en la figura 3-3, donde se observa que una vez que las ondas de tensión se ha depurado, queda una onda cuasi continua [6].

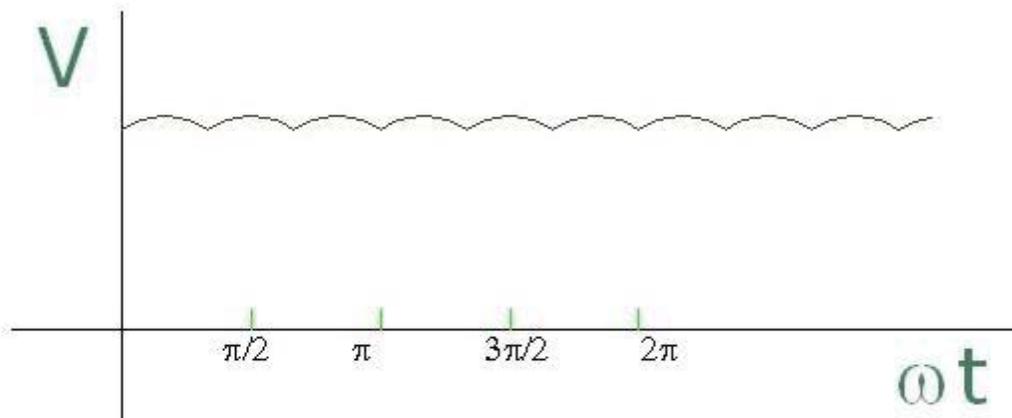


Figura 3-3: Onda rectificadora. (Fuente: <http://e-educativa.catedu.es>).

3.2 Convertidor CC/CC

El objetivo de los convertidores CC/CC [3] es el de llevar ciertos valores de tensión continua a otros valores de tensión continua deseados, bien sea mayor o menor, con pequeños porcentajes de rizado, para cumplir una función específica como la de alimentar una carga.

Una de las características más importantes en estos tipos de convertidores, es que los niveles de tensión de salida sólo dependen de los niveles de tensión de entrada y del ciclo de trabajo con el que se esté ejecutando la conmutación en el dispositivo Mosfet, dicha conmutación se realiza mediante ciclos de frecuencias altas. El comportamiento de la conmutación se muestra en la figura 3-4. Se debe tener en cuenta que D es el ciclo de trabajo, también llamada razón cíclica.

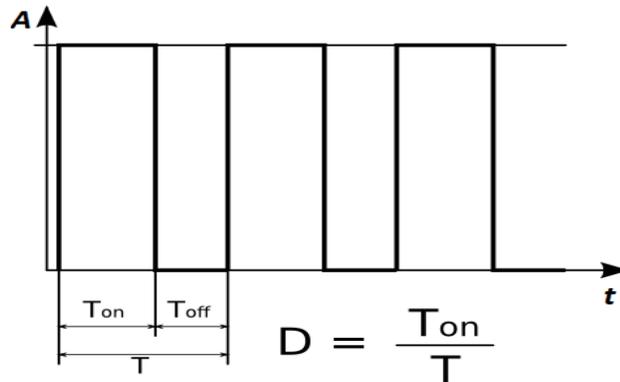


Figura 3-4: Conmutación del dispositivo Mosfet.

En la figura 3-5 se muestra el proceso de tensión alterna a tensión continua, donde en la entrada V1 se tiene una tensión alterna trifásica, la cual es entregada por el GIAE. Luego, en este caso, dicha tensión es rectificadora por un rectificador de puente completo, el cual contiene 6 diodos, los cuales rectifican la onda de tensión entregando tensiones positivas como muestra V2. Posteriormente, la tensión rectificadora por el rectificador de puente completo es filtrada por un condensador de gran tamaño, el cual es el encargado de entregar una tensión V3 constante y no regulada. Finalmente la tensión filtrada entra en la etapa de regulación por un convertidor CC/CC, el cual entrega una tensión constante y regulada, donde se puede observar que la tensión (Vs1, Vs2 y Vs3) se puede regular a distintos valores dependiendo el tipo de convertidor.

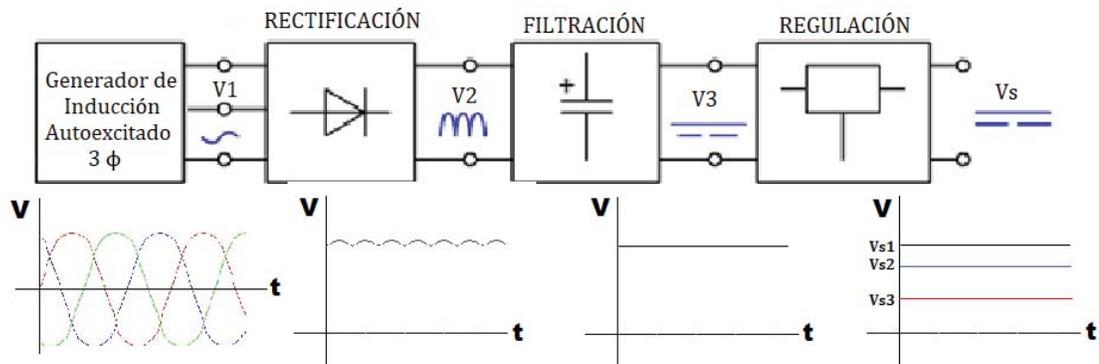


Figura 3-5: Etapa rectificadora.

3.3 Tipos de Convertidores CC/CC

Existen diversos tipos de convertidores [3], que dependen de la estructura, del análisis del comportamiento de los diodos y del elemento en que se está realizando la conmutación, lo que lleva a que las tensiones de salida disminuyan y aumenten dependiendo de la forma constructiva del dispositivo, por eso se pueden encontrar convertidores reductores (Buck), elevadores (Boost) y que cumplan ambas características (Buck-Boost).

Principalmente son 3 tipos de convertidores, los cuales se mostrarán en las figura 3-6, figura 3-7 y figura 3-8.

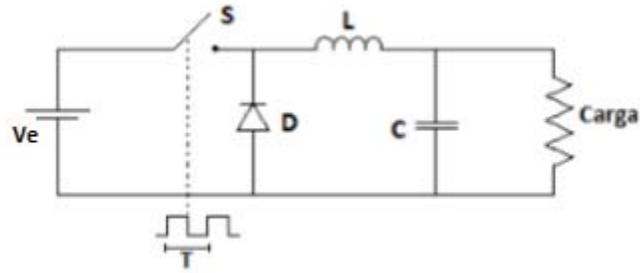


Figura 3-6: Convertidor Buck.

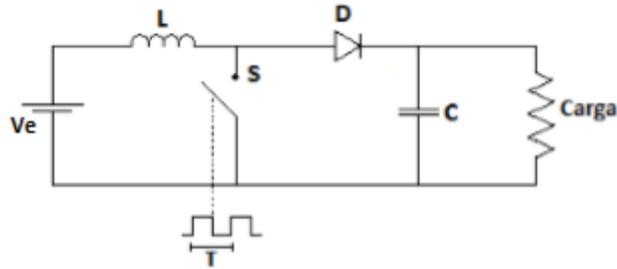


Figura 3-7: Convertidor Boost.

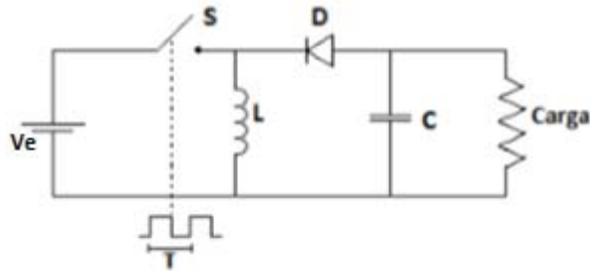


Figura 3-8: Convertidor Buck-Boost.

En las tres figuras mostradas anteriormente, se pueden observar los principales convertidores, donde:

Ve: Tensión de entrada.

S: Representación del dispositivo de conmutación.

C: Condensador.

L: Inductor.

D: Diodo.

T: Periodo donde se realiza la conmutación.

En este caso en particular el convertidor CC/CC a tratar es el convertidor de la topología Buck, es decir, tipo reductor que lleva el nivel de tensión CC de alimentación a uno de menor magnitud.

4 Convertidor Buck y su Control

El convertidor buck, también conocido como convertidor reductor de tensión (figura 4-1), es un regulador de tensión, tal como dice su nombre, se tiene una tensión de salida reducida con respecto a la tensión de entrada del convertidor. La polaridad de la tensión de salida es igual a la polaridad de tensión de entrada. Éste convertidor se caracteriza por tener una corriente pulsada en la entrada debido a la apertura y cierre del interruptor S, y continua en la salida. Por lo tanto, genera ruido en la frecuencia de conmutación sobre la fuente de entrada, no pasando esto en la salida.

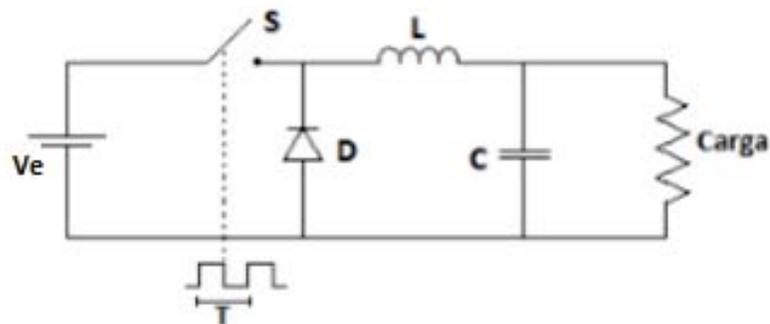


Figura 4-1: Convertidor Buck.

4.1 Estado de Operación del Convertidor Buck

Existen dos estados de operación del convertidor buck, esto depende del estado de apertura o cierre del interruptor "S", donde en este caso se ocupará un Mosfet [3].

4.1.1 Estado de Operación 1 (Estado ON)

Empieza en el instante cuando el interruptor "S" es conectado en $t=0$, la tensión de entrada es aplicada directamente al diodo D en polarización inversa no influyendo en el circuito, la corriente de entrada se eleva linealmente fluyendo por el inductor L, por el condensador C y la resistencia de la carga R. En la figura 4-2 se muestra el circuito equivalente para este modo de operación.

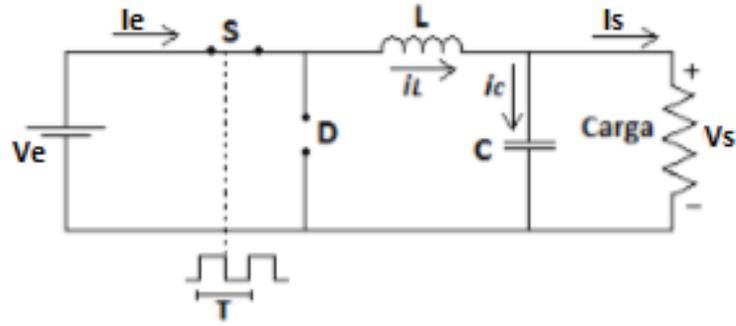


Figura 4-2: Modo de operación ON.

Analizando el circuito de la figura 4-2, se obtiene la tensión en el inductor:

$$VL = Ve - Vs = L * \frac{diL}{dt} \quad (4-1)$$

La variación de la corriente en el inductor, durante el intervalo de tiempo en que el interruptor está cerrado es:

$$\frac{diL}{dt} = \frac{Ve - Vs}{L} \quad (4-2)$$

La variación de la corriente en el inductor se representa de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta iL}{\Delta t} = \frac{\Delta iL}{D * T} = \frac{Ve - Vs}{L} \quad (4-3)$$

La variación de tiempo Δt es el tiempo de cierre del interruptor, es decir, $D * T$, por esta razón se realiza el cambio en la ecuación anterior.

Finalmente la variación lineal de la corriente por el inductor, cuando el convertidor está en estado ON, es:

$$\Delta iL = \frac{(Ve - Vs)}{L} * D * T \quad (4-4)$$

4.1.2 Estado de Operación 2 (Estado OFF)

Empieza cuando se desconecta "S" en $t = t1$, la tensión de entrada es desconectada, la carga R es alimentada desde la inductancia L, la cual tiene energía almacenada que permite que el diodo D quede polarizado directamente permitiendo que la corriente que pasa por el inductor fluya por el capacitor C y la carga R. en la figura 4-3 se muestra el circuito equivalente para este modo de operación.

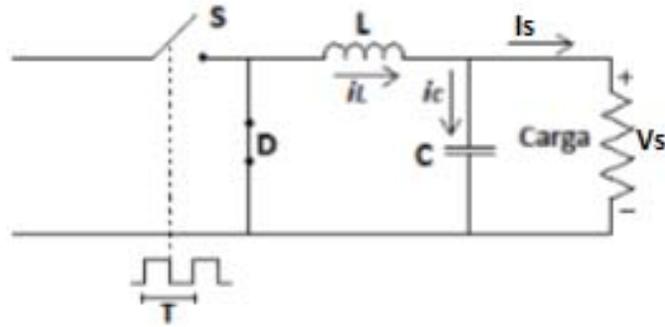


Figura 4-3: Modo de operación OFF.

Analizando el circuito de la figura 4-3, se obtiene la tensión en el inductor:

$$V_L = -V_s = L * \frac{di_L}{dt} \quad (4-5)$$

La variación de la corriente en el inductor, durante el intervalo de tiempo en que el interruptor está abierto es:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_s}{L} \quad (4-6)$$

La variación de la corriente en el inductor se representa de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D) * T} = \frac{-V_s}{L} \quad (4-7)$$

La variación de tiempo Δt es el tiempo de apertura del interruptor, es decir, $(1-D)*T$, por esta razón se realiza el cambio en la ecuación anterior.

Finalmente la variación lineal de la corriente por el inductor, cuando el convertidor está en estado OFF, es:

$$\Delta i_L = \frac{(-V_s)}{L} * (1-D) * T \quad (4-8)$$

En todos los casos el interruptor "S" conmuta a una frecuencia de conmutación $f = 1/T$, donde f es la frecuencia de conmutación medida en Hertz.

Las formas de onda del convertidor CC/CC tipo Buck se muestran en la figura 4-4, donde se puede apreciar el comportamiento de las corrientes por los elementos almacenadores (inductor y capacitor) además de la tensión en el inductor, en los dos modos de operación mencionados.

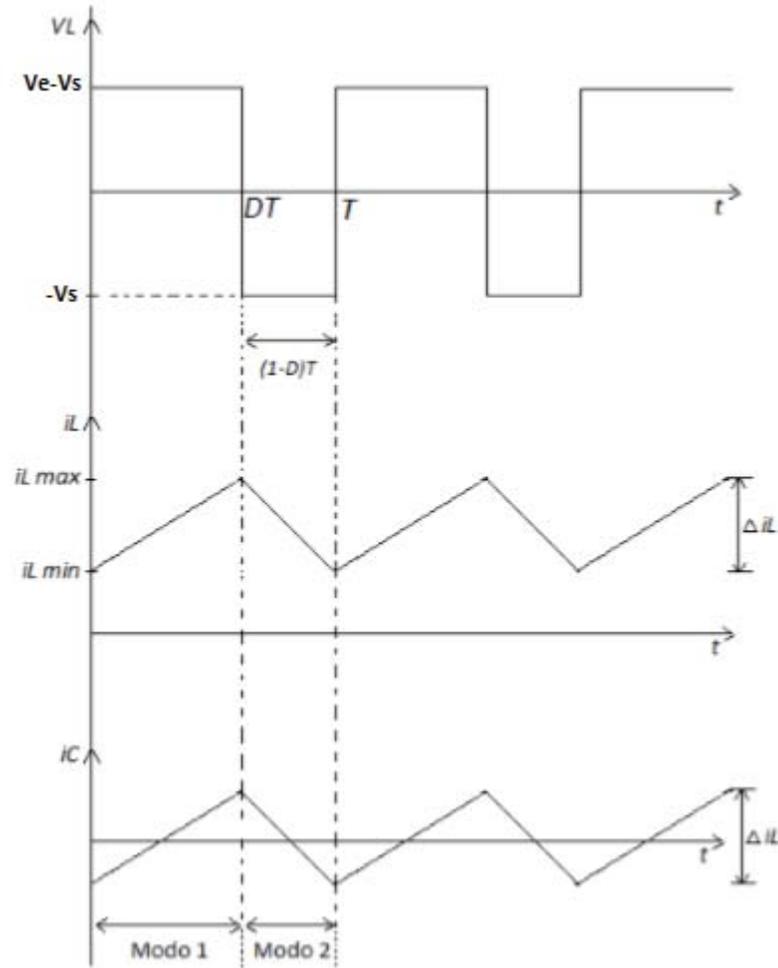


Figura 4-4: Formas de onda del convertidor buck.

Del comportamiento de la tensión en el inductor de la figura 4-4, se puede afirmar que la tensión media en el inductor es cero, por lo tanto:

$$\int_0^T V_L dt = 0 \quad (4-9)$$

Teniendo en cuenta los comportamientos de las tensiones de la figura 4-4, se tiene que:

$$\int_0^{D \cdot T} (V_e - V_s) dt + \int_{D \cdot T}^T (-V_s) dt = 0 \quad (4-10)$$

Despejando la ecuación (4-10), se comprueba que el convertidor buck reduce la tensión.

$$D = \frac{V_s}{V_e} [-] \quad (4-11)$$

4.2 Cálculo de Parámetros del Convertidor Buck

Los parámetros a calcular del convertidor buck son el inductor (L) y el condensador (C), los cuales son elementos almacenadores de energía.

Debido a que la tensión de entrada es variable y la tensión de salida es constante, la razón cíclica (D) será variable. Por lo tanto se procederá al cálculo de ésta con la tensión de entrada menor, ya que este es el peor de los casos.

Se sabe que la corriente en el inductor es:

$$I_L = I_C + I_s \quad (4-12)$$

Pero en estado permanente, la corriente media en el condensador es nula, por lo que la corriente del inductor es igual a la corriente en la carga.

$$I_L = I_s \quad (4-13)$$

También se sabe que la corriente máxima en la carga, se da cuando la carga es grande, donde las simulaciones que se mostrarán más adelante se hicieron con cargas variables, donde se hará el cálculo con la carga mayor.

La ondulación de corriente en el inductor, la que será la misma ondulación de la carga será de un 20%, ya que es un rango permitido.

Luego se procede al cálculo del inductor, donde de la expresión (4-4), en el estado de operación ON se puede despejar el inductor.

$$L = \frac{(V_e - V_s)}{\Delta i_L} * D * T \quad (4-14)$$

Por otra parte, se procede al cálculo del condensador:

$$C = \frac{D * (1 - D) * V_e}{8 * L * F_s^2 * \Delta V_c} \quad (4-15)$$

Dónde ΔV_c es la ondulación de tensión.

Una vez obtenidos los valores de los parámetros del convertidor buck, se puede decir como conclusión que mientras mayor es el valor de los elementos almacenadores de energía (L y C), menor es la ondulación de corriente y de tensión en la carga, ya que son inversamente proporcionales respectivamente.

4.3 Control del Convertidor Buck

El problema de este convertidor es el siguiente; la tensión de entrada es variable no regulada, esto se debe a la variación de velocidad del generador de inducción autoexcitado, por ende, al

tener una entrada de tensión variable no regulada, se tendrá una tensión de salida variable no regulada.

La finalidad de este proyecto es tener una tensión de salida constante, por lo que se necesita un control para obtener una tensión de salida constante y regulada.

El control constituye la parte más importante del convertidor, donde su exactitud depende que el convertidor tenga un funcionamiento correcto [5].

Desempeña dos funciones importantes:

- Realizar un lazo cerrado de control para actuar sobre los valores de tensión del convertidor que permitan alcanzar las referencias establecidas.
- Realizar la lógica del encendido y apagado del convertidor cumpliendo unos requisitos establecidos.

El lazo de control del convertidor será un lazo cerrado con realimentación negativa. El objetivo es variar la tensión de salida del convertidor según una tensión de referencia.

Esta configuración se caracteriza por:

- La presencia de sensores de medida que permiten tener información en todo momento de los valores de tensión para el lazo de tensión.
- La presencia de un control que elimina en todo momento el error entre las referencias a seguir y las medidas obtenidas con los sensores. El controlador más utilizado es el controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo).

El controlador PID consta de tres constantes que realizan tres acciones [5]:

ACCION PROPORCIONAL: La constante K_p elimina el error instantáneo. El aumento de su valor aumenta la rapidez del sistema alcanzando la referencia en un tiempo más corto cuanto mayor sea K_p . Pero un valor demasiado elevado conlleva a que el sistema se haga oscilante o incluso inestable.

ACCION INTEGRAL: Con el fin de aportar mayor estabilidad al sistema, la constante K_i permite eliminar el error en régimen permanente. Dado que su valor es proporcional a la integral del error, esta constante dejara de integrar, es decir su valor se estabilizará, cuando el error sea nulo.

ACCION DERIVATIVA: Suaviza la respuesta del sistema durante los transitorios y mejora su comportamiento frente a perturbaciones. La constante K_d , al ser proporcional a la derivada del error, evita cualquier cambio brusco en su valor. Presenta el defecto de ser muy sensible a los ruidos de alta frecuencia, ya que en estas situaciones el valor de la derivada es muy alto e indeseable.

El controlador del lazo de este convertidor sólo realizará las dos primeras acciones ya que en los convertidores de potencia, las altas frecuencias de conmutación provocan la existencia de un ruido al que es sensible la acción derivativa.

Por lo tanto, el controlador que se ocupará para el convertidor buck será un controlador PI, el cual tiene dos parámetros estableciendo dos condiciones importantes en el sistema: rapidez y estabilidad.

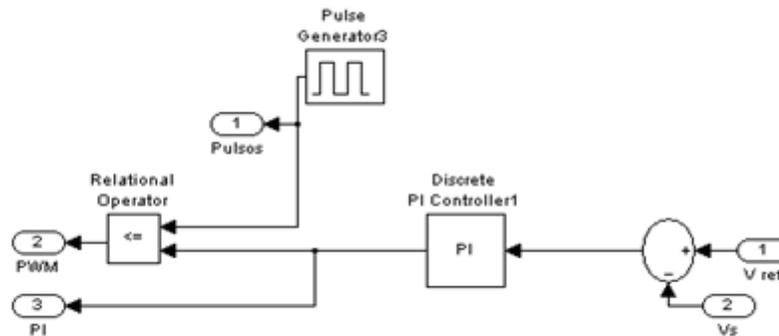


Figura 4-5: Control del convertidor buck.

En la figura 4-5, se puede observar el control del convertidor buck, el cual se explicará a continuación:

La tensión de referencia es comparada con la realimentación negativa, la cual es la tensión de salida del convertidor buck, dicha comparación genera un error, el cual es regulado por el controlador PI. La señal que sale del controlador PI es relacionada con el generador de pulsos, el cual tiene los parámetros que se verán en la figura 4-6

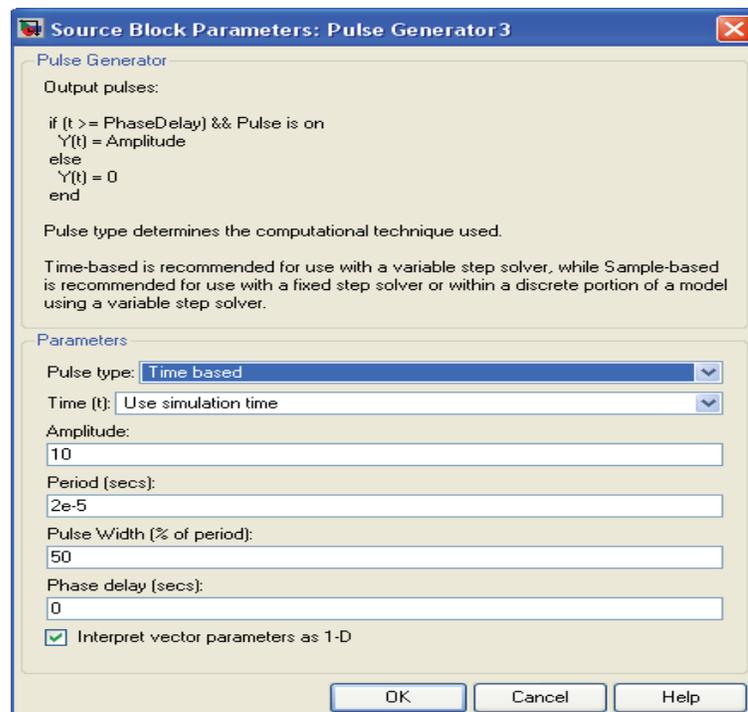


Figura 4-6: Parámetros del generador de pulsos.

La figura 4-6 muestra los parámetros del generador de pulsos, el cual genera pulsos con una amplitud de 10, con frecuencia de conmutación igual a 20 (KHz) y una razón cíclica $D=0.5$, ya que al estar a la mitad del periodo, tiene una mayor rapidez para encontrar el punto de operación (en el estudio del convertidor se ocuparán estos datos). Posteriormente a la señal relacionada del controlador PI y el generador de pulsos, sale una señal PWM, donde le da el encendido (nivel alto 1) y apagado (nivel bajo 0) al Mosfet, el cual controla la tensión de salida deseada.

4.3.1 Ganancia del Controlador PI

Las ganancias del controlador PI, las cuales son K_p y K_i , son muy importantes en el control del convertidor buck, ya que gracias a estas ganancias el sistema se estabiliza al instante idealmente. Las ganancias se obtienen mediante una herramienta de MATLAB llamada "Sisotool" [9], la cual ayuda a crear un controlador sabiendo la función de transferencia de la planta del convertidor.

El procedimiento para obtener las ganancias del controlador PI es de una forma muy sencilla. Se comienza por saber la función de transferencia del convertidor buck [10], la cual se observa en la siguiente ecuación (4-16).

$$F.T = \frac{\frac{1}{L * C}}{s^2 + \frac{1}{R * C} * s + \frac{1}{L * C}} \quad (4-16)$$

Para que se entienda el procedimiento, se hará con los datos para obtener las ganancias en la simulación con 48 (V) de salida en el convertidor buck, los cuales en la tabla (4-1) se visualizarán, siendo el inductor, el capacitor y la carga .

Tabla 4-1: Datos del convertidor buck con tensión de salida 48 (V).

Tensión de Salida (V)	L (mH)	C (μ F)	R (Ω)
48	2.04876	25	2.304

Reemplazando los datos en la ecuación (4-16), la función de transferencia que se obtiene es la siguiente:

$$F.T = \frac{19524004.764}{s^2 + 17361.1 * s + 19524004.764} \quad (4-17)$$

Una vez obtenida la función de transferencia de la planta del sistema, se define en MATLAB, la cual se observa en la figura 4-7, donde la definición de la función de transferencia del convertidor buck es "Gs".

```
>> num=[19524004.764];
>> den=[1 17361.1 19524004.764];
>> Gs=tf(num,den);
>> Gs

Transfer function:
          1.952e007
-----
s^2 + 1.736e004 s + 1.952e007

>> step(Gs)
>> sisotool
>> C

Zero/pole/gain from input "Input" to output "Output":
    38.15
-----
(s+0.0545)
```

Figura 4-7: Definición de la función de transferencia en MATLAB.

Posteriormente se observa en la figura 4-8 la gráfica de la función de transferencia en lazo abierto.

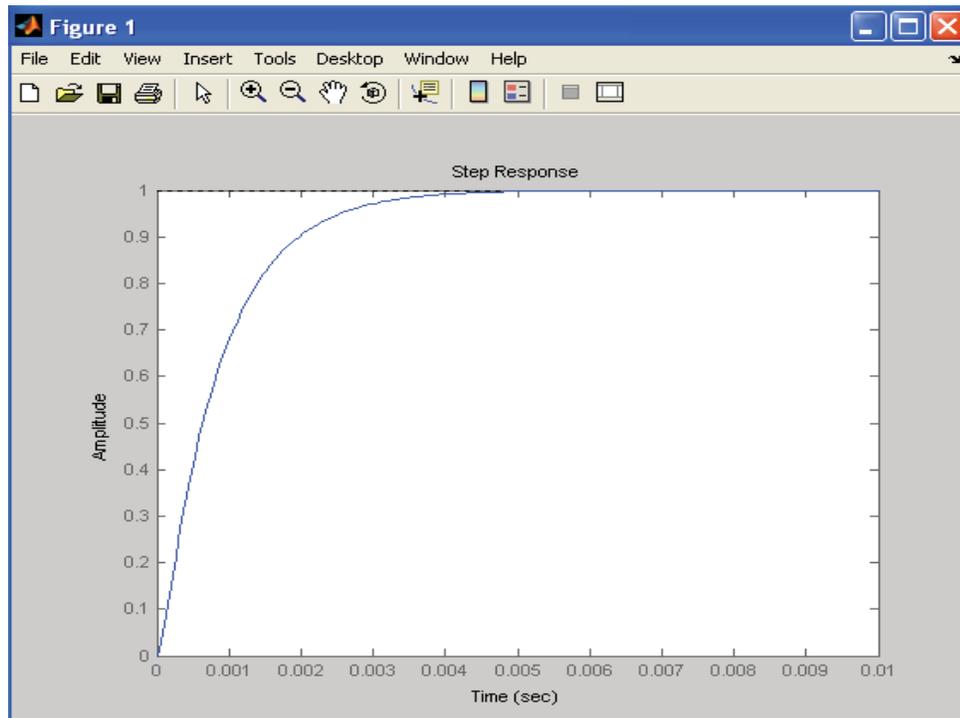


Figura 4-8: Función de transferencia en lazo abierto.

Ahora se procede a ejecutar "Sisotool" en la línea de comandos de MATLAB y se abren dos ventanas [9]. Una se llama "Control and Estimation Tool Manager" (figura 4-9) y la otra " SISO design for SISO Design Task" (figura 4-10).

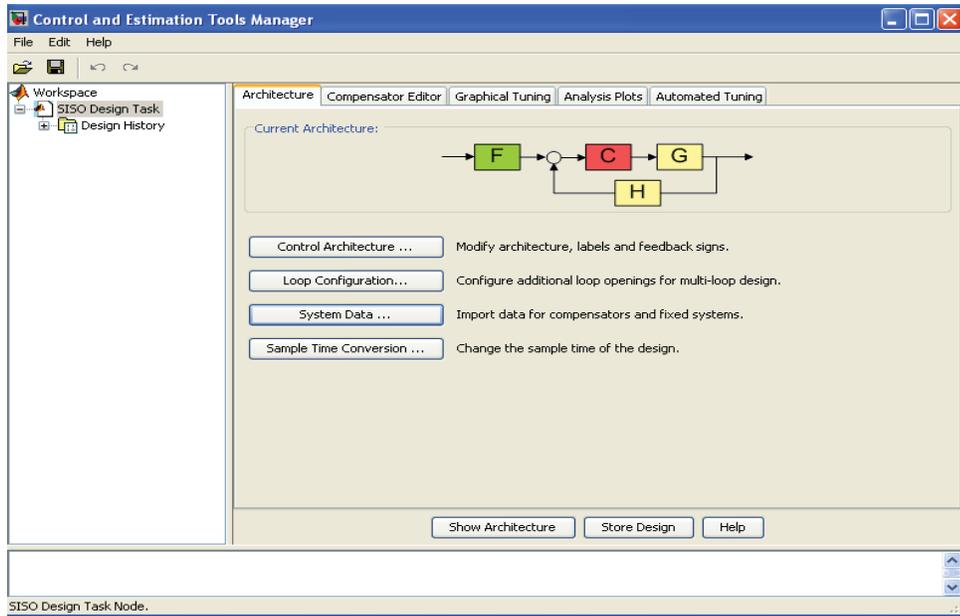


Figura 4-9: Control and Estimation Tool Manager.

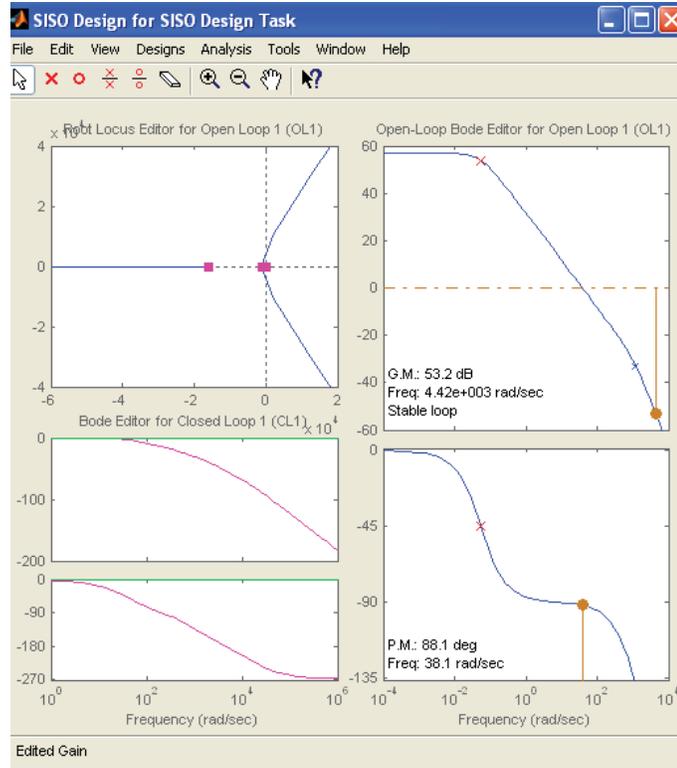


Figura 4-10: SISO design for SISO Design Task.

Posteriormente, se importa la función de transferencia de Gs desde la ventana “SISO Desing for SISO Desing Task”, con la opción “importar” del menú “File”. Al dar clic en “importar” Se despliega una ventana en donde se muestra una lista de los sistemas G, H, C y F que por defecto tienen el valor de “1”. La figura (4-11) de esta ventana se muestra a continuación.

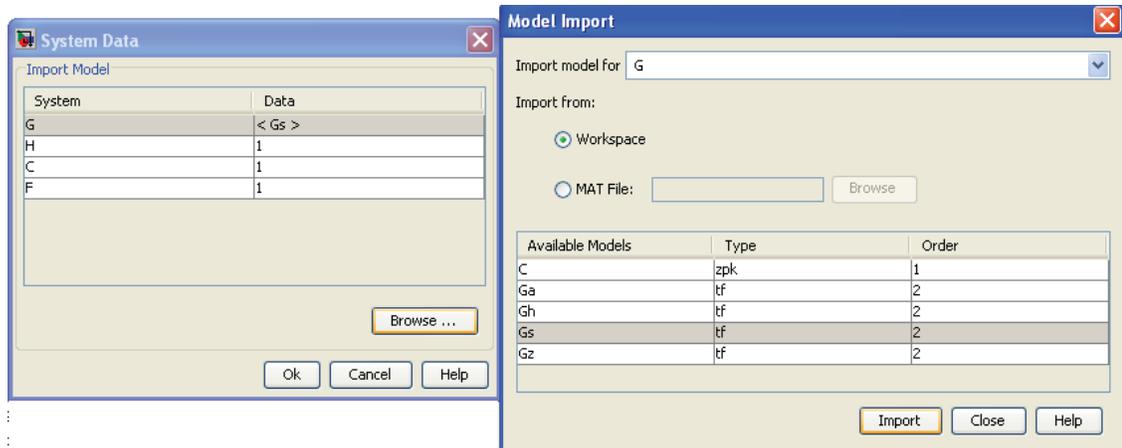


Figura 4-11: Selección de la función de transferencia de la planta.

En dicha ventana que se selecciona “G” que corresponde a la planta y se presiona “Browser”. Entonces aparece otra ventana (figura 4-11) que muestra una lista de las funciones de transferencia que se encuentran en el WorkSpace y en donde debe estar la función “Gs” definida anteriormente y que corresponde a la planta.

Ya importada la planta, se selecciona la opción de "Analisys Plots" (figura 4-12), la cual se encuentra en "Control and Estimation Tool Manager" (figura 4-9).

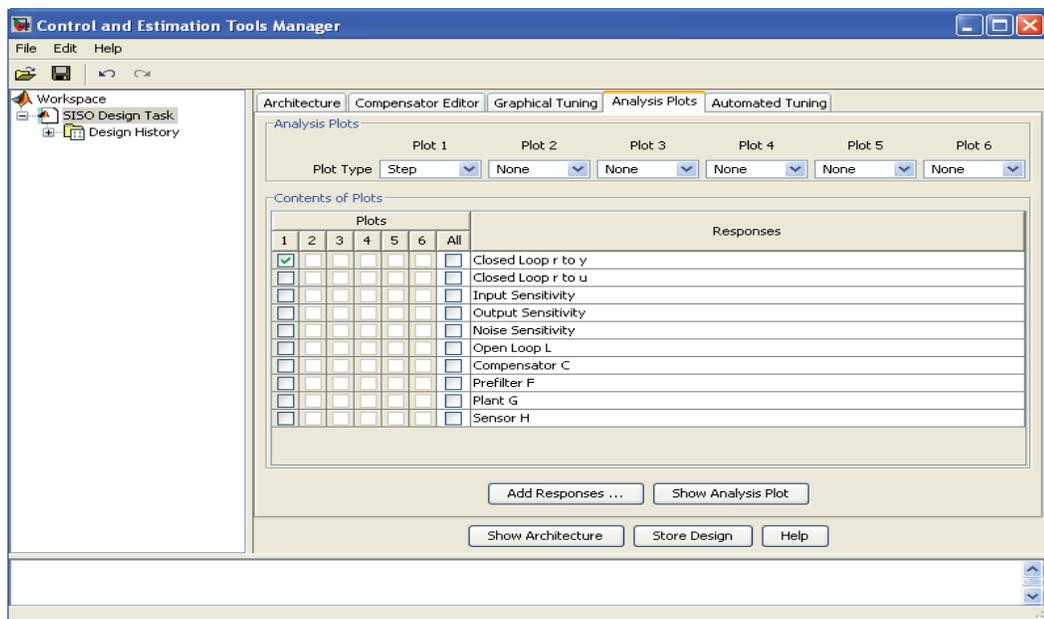


Figura 4-12: Analisis Plots.

En "Plot 1" se selecciona "Step", ya que el sistema se estudiará con una entrada escalón. Luego se pincha en la opción 1 para obtener la grafica de la función de transferencia en lazo cerrado ante una entrada escalón unitario, la cual se muestra en la figura (4-13).

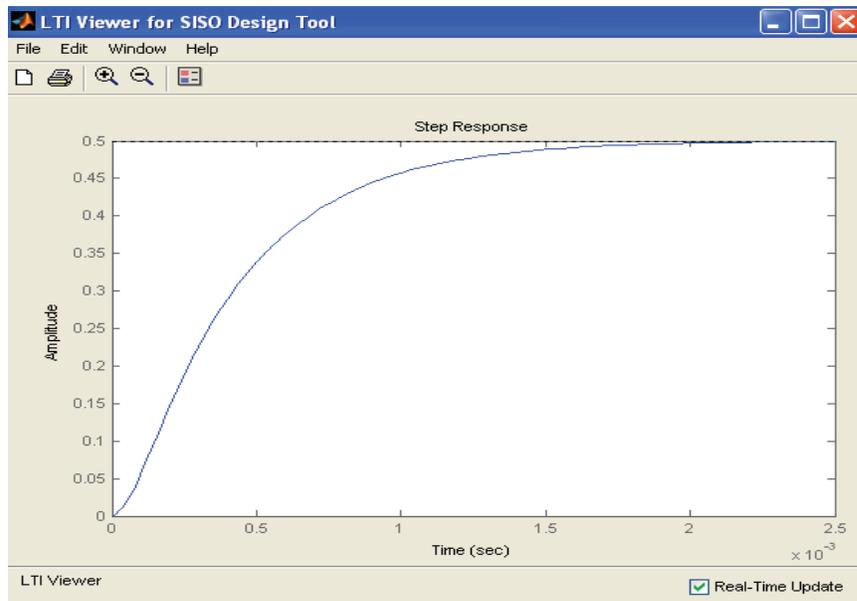


Figura 4-13: Función de transferencia en lazo cerrado.

Luego, en la figura (4-13) se añade un integrador para estabilizar el sistema, dicho procedimiento se observa en la figura (4-14).

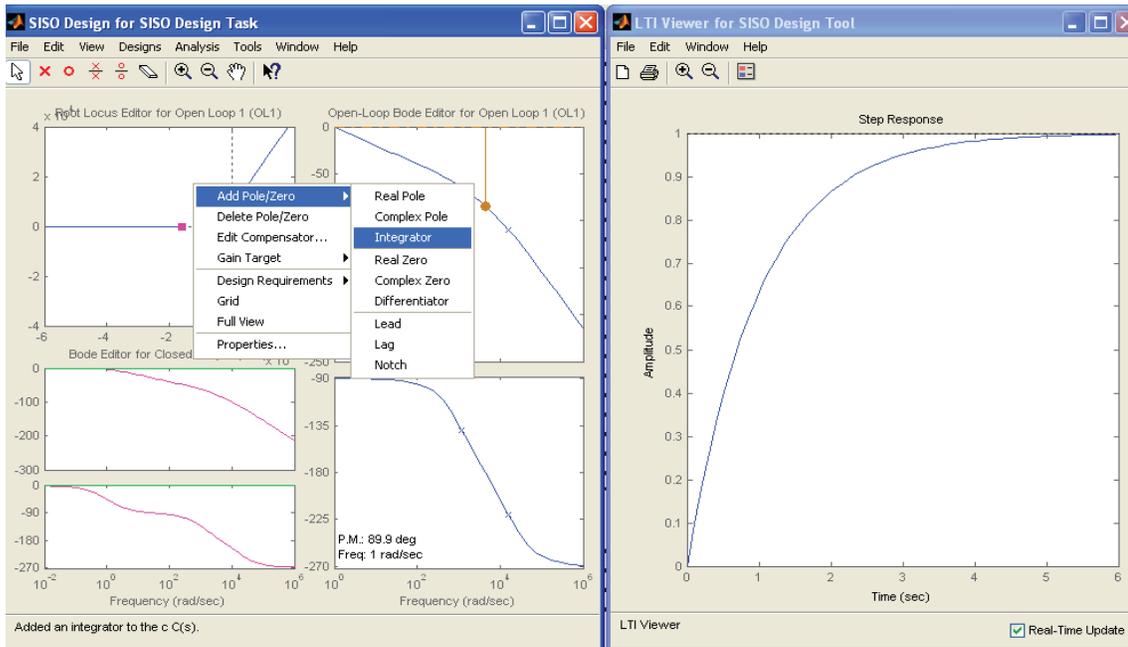


Figura 4-14: Incorporación de un integrador para estabilizar el sistema.

Una vez estabilizado el sistema, se selecciona "Compensator Editor", el cual se encuentra en "Control and Estimation Tool Manager" (figura 4-9), para editar el controlador PI y donde se procede a obtener el valor de las ganancias K_p y K_i , donde dichas ganancias tienen un valor de 700 y 0.0545 respectivamente, como se visualiza en la figura (4-15), donde se estabiliza en un tiempo de 0.1 (s).

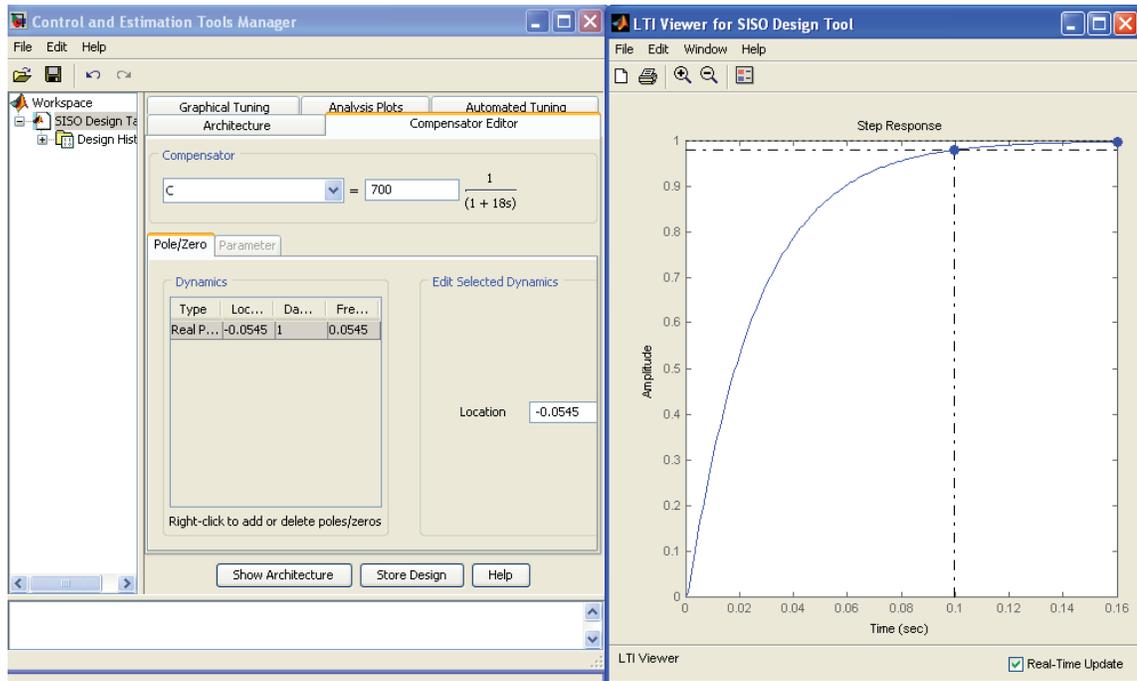


Figura 4-15: Valores de las ganancias K_p y K_i .

Finalmente, para obtener la función de transferencia del controlador, se selecciona la opción "File", donde se exportará dicho controlador "C" visualizado en la figura (4-7).

5 Simulaciones del Sistema Completo

El generador de inducción es muy utilizado en sistemas eólicos, ya que es una máquina robusta, de poco mantenimiento y poco costo. Así también, el sistema eólico consta con una etapa de corriente continua para regular la tensión y frecuencia, ya que la máquina de inducción genera tensiones y frecuencias variables, debido a la velocidad variable del viento. Por otra parte, el estudio y simulación de este proyecto se enfocarán en las tensiones de 24 (Vcc) y 48(Vcc), esto se debe a que en el mercado eléctrico, el sistema eólico consta con bancos de baterías, los cuales cumplen la función de acumular la energía proporcionada por el generador de inducción, donde las tensiones en que trabaja el banco de batería son de 12 (Vcc), 24 (Vcc) y 48(Vcc) [7].

Para el estudio y simulación del GIAE y su etapa de control para producir corriente continua regulada, se utilizó la herramienta "Simulink" de MATLAB, la cual ayuda a componer la máquina mediante bloques, para que así sea simulada y estudiada.

5.1 Parámetros constantes de las simulaciones

La máquina de inducción, la cual actúa como generador y es autoexcitado por un banco de condensadores, se observa en la figura (5-1), donde ésta sería la etapa de corriente alterna del sistema a estudiar. Cabe mencionar que la fuente incorporada genera el magnetismo residual en el rotor, donde establece el voltaje inicial, el cual se incrementa con la corriente del capacitor, el valor de dicha fuente es de 5 (Vrms) y actúa en un tiempo de 0.02 (s) de simulación.

Por otra parte, la etapa de corriente continua del sistema a estudiar se visualiza en la figura (5-2), la cual incluye el control (figura 5-3) para producir corriente continua regulada. Esta etapa consta con un rectificador, un convertidor buck y el control (en verde).

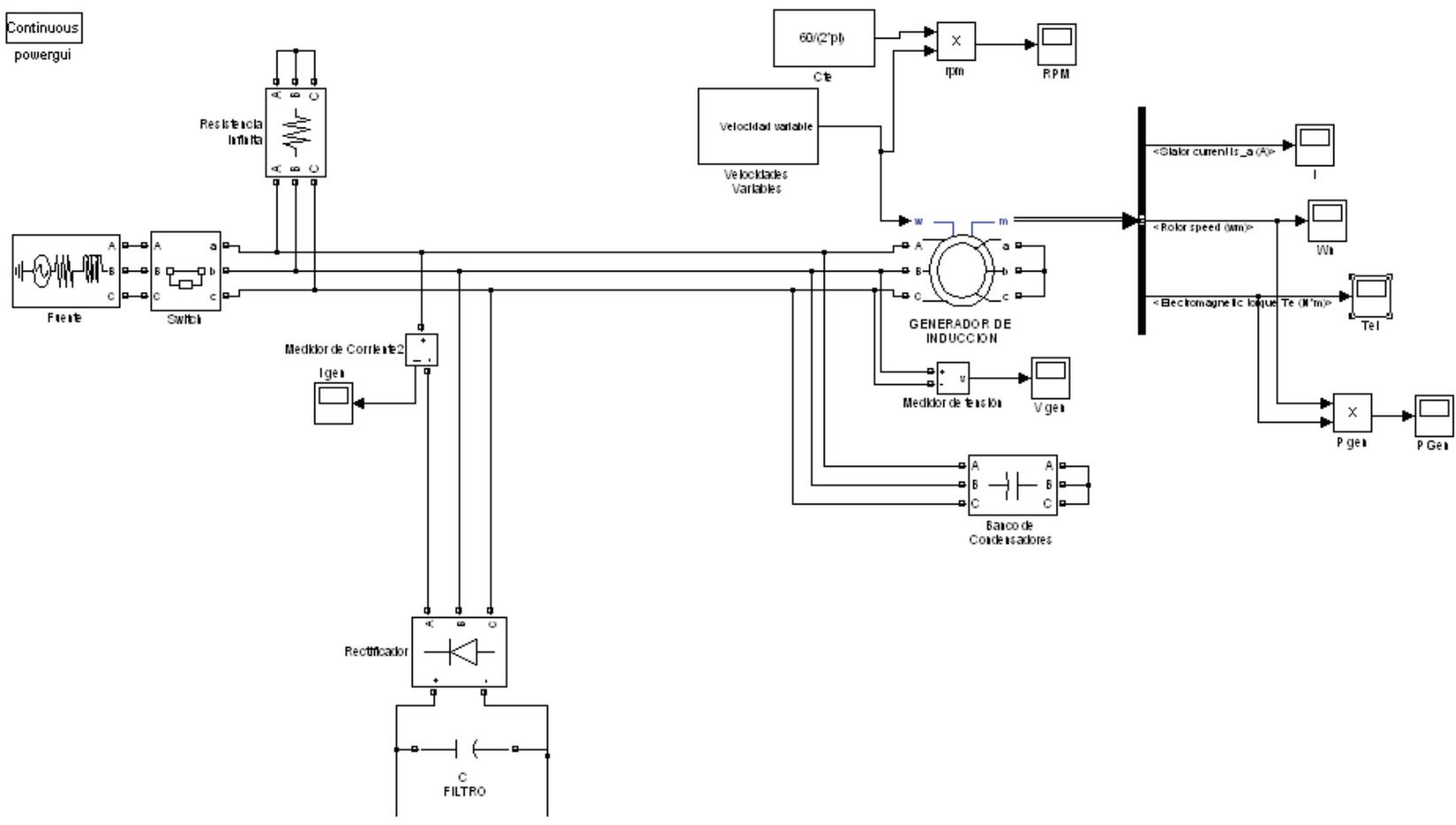


Figura 5-1: Generador de inducción autoexcitado en Simulink.

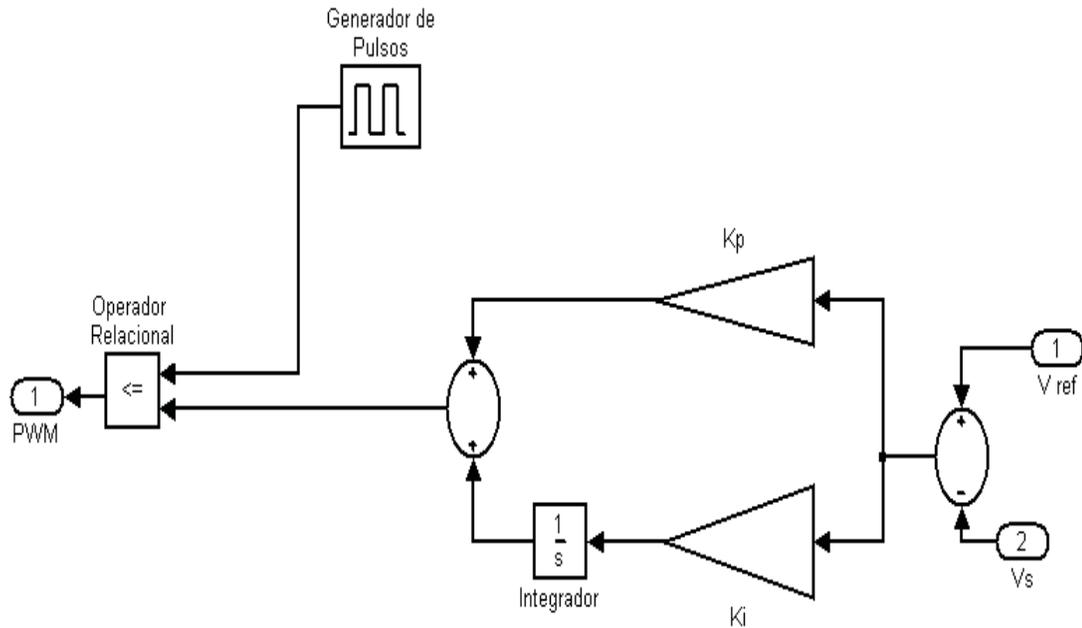


Figura 5-3: Control del sistema en Simulink.

La máquina de inducción debe contar con parámetros constantes, los cuales se observan en la tabla (5-1).

Tabla 5-1: Parámetros de la máquina de inducción.

Pn (VA)	Vn (Vrms)	In (Arms)	Fn (Hz)	Rs (Ω)	Xls (Hy)	Rr (Ω)	Xlr (Hy)	Lm (Hy)	P.p
6.5 HP	380	11.8	50	0.63	0.00496	1.094	0.00496	0.105	2

Al saber los datos obtenidos de la máquina de inducción, se puede calcular la velocidad sincrónica de dicha máquina, donde al incorporar los datos en la ecuación (1-1) se obtiene el valor, siendo este 1500 (rmp), o bien, 157.08 (rad/s).

Otro dato a calcular es el banco de condensadores que autoexcita el generador de inducción, donde el valor se obtiene de la ecuación (2-3), sabiendo que la frecuencia de resonancia es 50 (Hz), el valor del banco de condensadores es 96.5 (μF).

Como se mencionó anteriormente, el estudio de este proyecto se enfocará en tensiones de 48 (V) y 24 (V), debido a que esas tensiones de corriente continua almacena un sistema eólico, donde este estudio se hará en base al funcionamiento de éste.

5.2 Estudio y simulación a 48 (Vcc) de salida

Las velocidades variables en que la maquina trabajará, se muestran en la tabla (5-2), donde al igual se dará a conocer los tiempos en que cada velocidad actúa, para tener una mejor idea de las velocidades, en la figura (5-4) se observa la simulación de las velocidades.

Tabla 5-2: Velocidades variables en "RPM" y "RAD/SEG".

Tiempo en que actúa (s)	RPM	RAD/SEG
0	2150	225.1474735
3.5	1550	162.3156
4.5	1850	193.73
5.5	2000	209.44

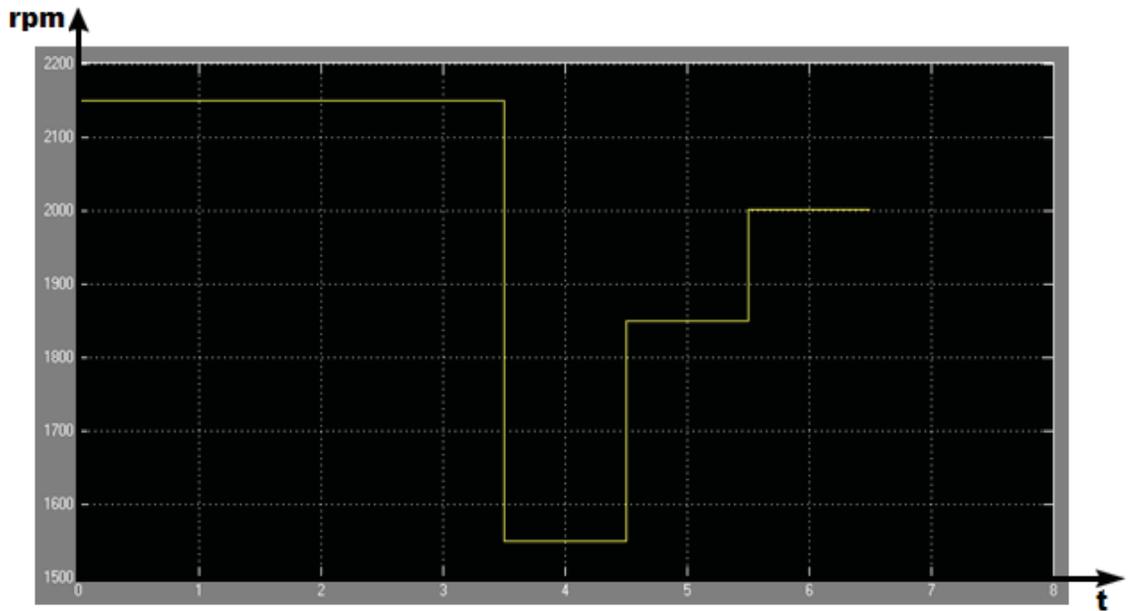


Figura 5-4: Velocidades variables en Simulink.

Datos importantes son los parámetros del convertidor buck, dicho convertidor se conforma con un dispositivo Mostef, el cual trabaja a una frecuencia de 20.000 (Hz). Por otro lados se tiene un diodo en dirección inversa. Y finalmente, los elementos pasivos y la carga (L, C y R), donde los elementos pasivos se calculan mediante la ecuación (4-14) y ecuación (4-15).

Debido a las velocidades variables del generador de inducción autoexcitado, las tensiones de entrada del convertidor son variables, y por ende, la razón cíclica (D) será variable. Por lo tanto,

el peor de los casos es cuando se obtiene una razón cíclica menor, ya que se obtendrían elementos reactivos de gran envergadura. Entonces, en las simulaciones que se verán más adelante, se obtienen las tensiones de entrada del convertidor, donde en la tabla (5-3) se observa junto al tiempo en que actúan, a la velocidad y carga variable en que pertenece.

Tabla 5-3: Tensión de entrada al convertidor buck.

Tiempo en que actúa (s)	Velocidad (RPM)	Carga (Ω)	Tensión de entrada (Vpeak)
0 - 3.5	2150	22	528
3.5 - 4	1550	22	360
4 - 4.5	1550	2.304	330
4.5 - 5	1850	2.304	415
5 - 5.5	1850	0.9216	395
5.5 - 6	2000	0.9216	442
6 - 6.5	2000	0.512	415.5

Cabe mencionar, que la tensión máxima que puede soportar la máquina es de $380\sqrt{2}$ (Vpeak), siendo dicho valor 537.4 (Vpeak). La tensión máxima mencionada, es obtenida gracias a la velocidad de 2150 (rpm) y a la carga conectada de 22 (Ω), donde dicha carga es la máxima para que el generador se autoexcite.

Sabiendo las tensiones de entrada del convertidor, se procede al cálculo de la razón cíclica sustituyendo los datos en la ecuación (4-11), teniendo un resultado igual a 0.14634 (-).

Posteriormente, se desea una ondulación de corriente de 1 (A) y una ondulación de tensión en el condensador de 0.3 (V). Por lo tanto, de la ecuación (4-14) y ecuación (4-15) se obtienen los valores de los elementos pasivos (L y C), donde dichos valores se observan en la tabla (5-4), junto a la frecuencia del dispositivo Mosfet.

Tabla 5-4: Valores de los elementos del convertidor buck.

Fs (Hz)	L (mH)	C (μ F)
20000	2.048760	25

Finalmente, se procede a la obtención de las ganancias K_p y K_i del controlador PI, siendo estas 700 y 0.0545 respectivamente. El procedimiento se observa en el capítulo anterior, donde se explica las ganancias del controlador PI.

En el estudio de la tensión de 48 (Vcc) de salida del convertidor, se hará un análisis sobre la potencia máxima que entregará el convertidor buck, "con " y "sin" que la máquina sufra una sobre-corriente.

5.2.1 Simulación a 48 (Vcc) de salida con sobre-corriente

Debido al obtener el mayor rendimiento del generador de inducción autoexcitado, se puede producir una sobre-corriente, esto pasa al superar los valores nominales de la máquina, donde en la tabla (5-1) se observan.

En la tabla (5-5) se observan las cargas variables conectadas a la salida del convertidor buck, donde también se muestra los tiempos en que cada carga actuará y la potencia que genera el convertidor buck con cada carga correspondiente.

Tabla 5-5: Cargas y Potencias

Tiempo en que actúa (s)	Carga (Ω)	Potencia (W)
0	22	104.7272
4	2.304	1000
5	0.9216	2500
6	0.512	4500

El método para obtener las potencias, es por ley de ohm, donde se observa en la ecuación (5-1).

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (5-1)$$

Luego de obtener los datos deseados, ya sean estos la tensión y la potencia máxima, se procede a observar los datos entregados por la simulación del sistema.

En la figura (5-5), se muestra la tensión generada por el generador de inducción autoexcitado, donde sus valores se encuentran en la tabla (5-3). Se puede visualizar que en el instante 3.3 (s) se logra la autoexcitación del generador. Se puede deducir que las tensiones sufren una fuerte variación, esto se debe a las velocidades variables del rotor de la máquina de inducción y a la vez se observa una leve variación de tensión, las cuales son provocadas por la carga variable.

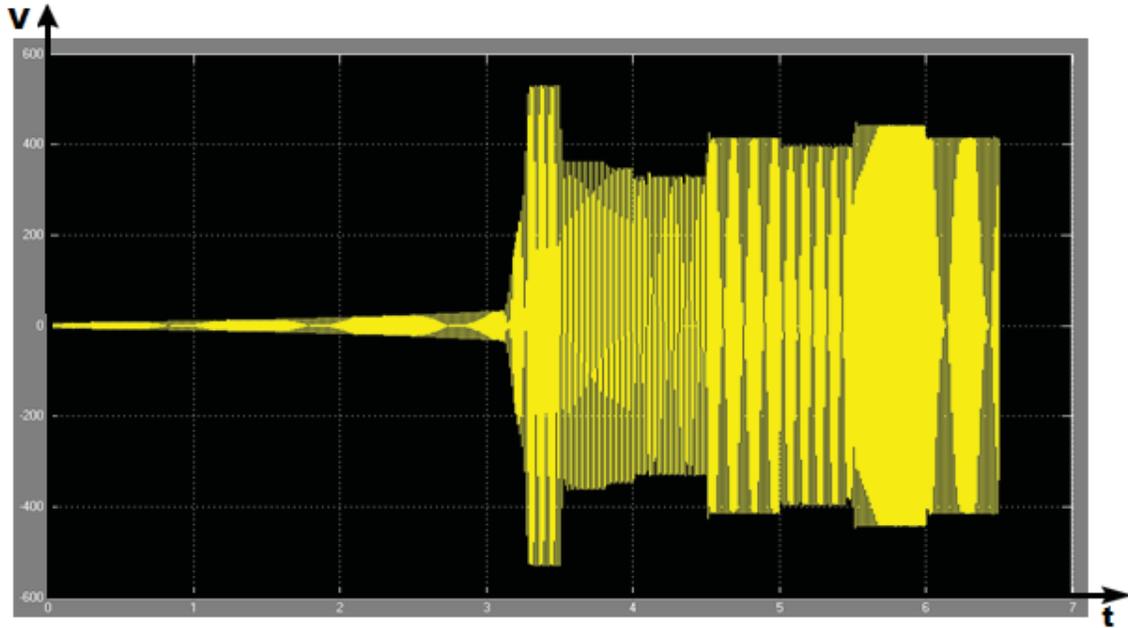


Figura 5-5: Tensiones generadas del GIAE en Simulink.

Luego, en la figura (5-6) se observa la corriente generada en los bornes del estator del generador de inducción, donde dicha corriente alimenta el banco de condensadores y el sistema en la etapa en corriente continua.

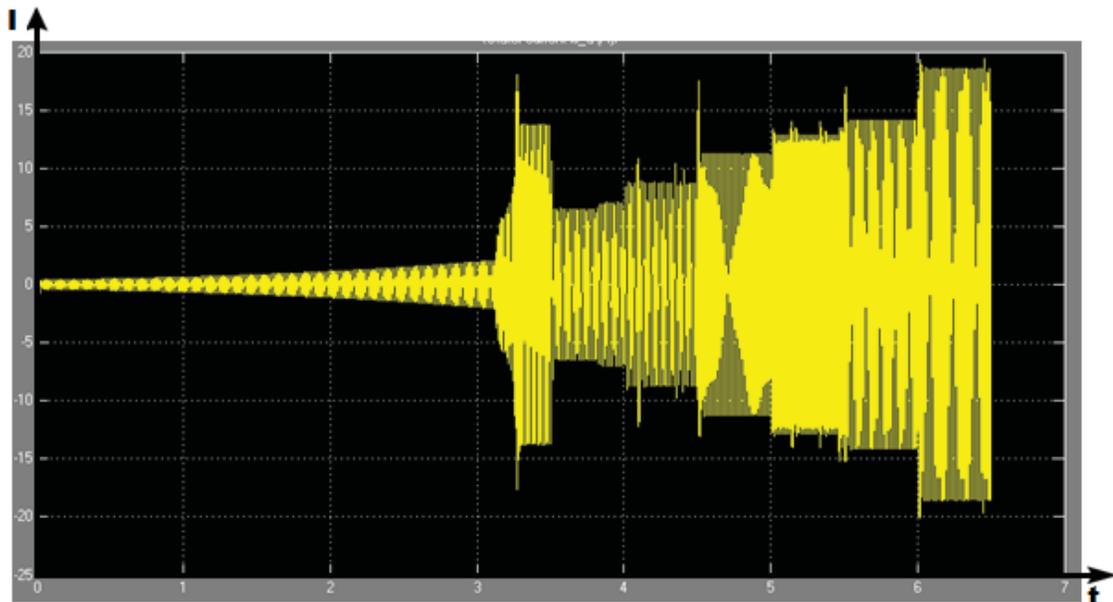


Figura 5-6: Corrientes generadas del GIAE en Simulink.

Cabe mencionar que en el instante de 6 (s), la máquina supera la corriente nominal, donde se puede observar que alcanza una corriente de 18.6 (Apeak) y por ende, la máquina está trabajando con sobre-corriente. Esto se debe a que en el instante de 6 (s) actúa la carga máxima

de 0.512 (Ω). Entonces, se sabe que al aumentar la carga, la corriente aumenta y así se puede observar en la figura (5-6).

Por lo tanto, ya que la máquina de inducción está trabajando con sobre-corriente, el sistema debe reducir la carga para disminuir la corriente generada y trabajar sin sobre-corriente.

5.2.2 Simulación a 48 (Vcc) de salida sin sobre-corriente

Como se mencionó anteriormente, como solución a la sobre-corriente generada, se debe disminuir la carga para disminuir dicha corriente.

Por lo tanto, en la tabla (5-6) se especificarán las nuevas cargas para trabajar sin sobre-corriente, donde al igual se incorporará la potencias generadas por el convertidor buck.

Tabla 5-6: Cargas y Potencias

Tiempo en que actúa (s)	Carga (Ω)	Potencia (W)
0	22	104.7272
4	2.304	1000
5	0.9216	2500
6	0.658285714	3500

Se observa en la tabla (5-6) que la carga aumenta, donde se podrá generar una potencia máxima de 3500 (W) a la salida del convertidor buck.

En la figura (5-7) se muestra la tensión generada en los bornes del estator de la máquina de inducción, siendo esta tensión idéntica a la simulación con sobre-corriente pero cambiado en la parte final, donde se observa que la tensión generada sin sobre-corriente es mayor a la tensión generada con sobre-corriente, esto se debe por la carga que están alimentando.

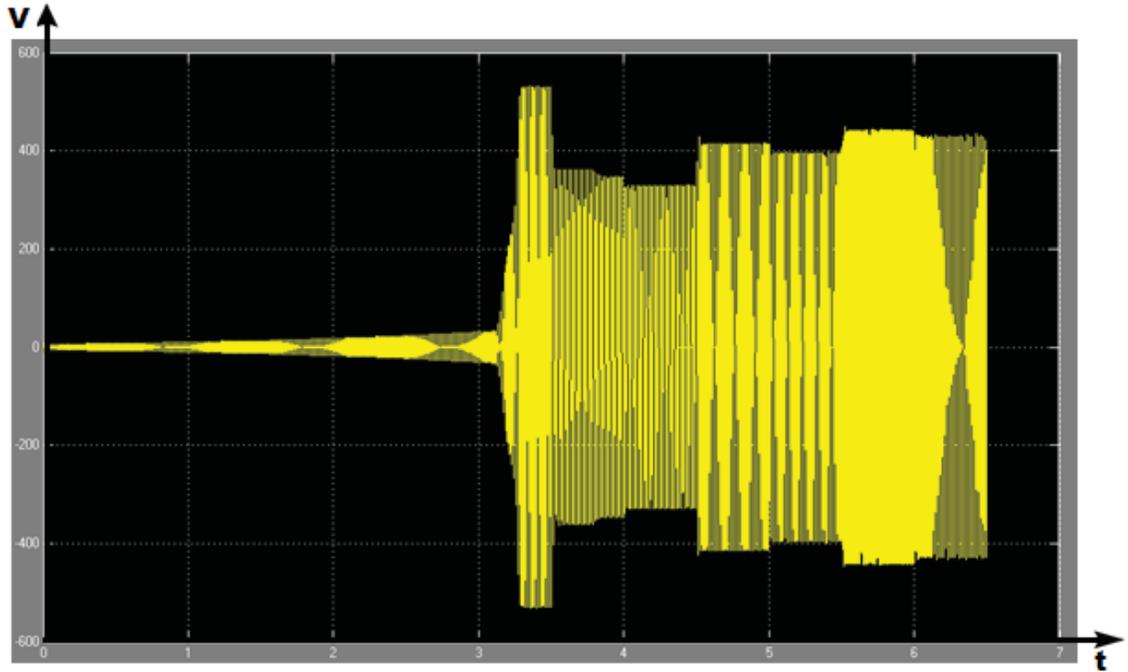


Figura 5-7: Tensiones generadas del GIAE en Simulink.

Posteriormente, se muestra la figura (5-8), la cual contiene la onda de la corriente generada del generador de inducción.

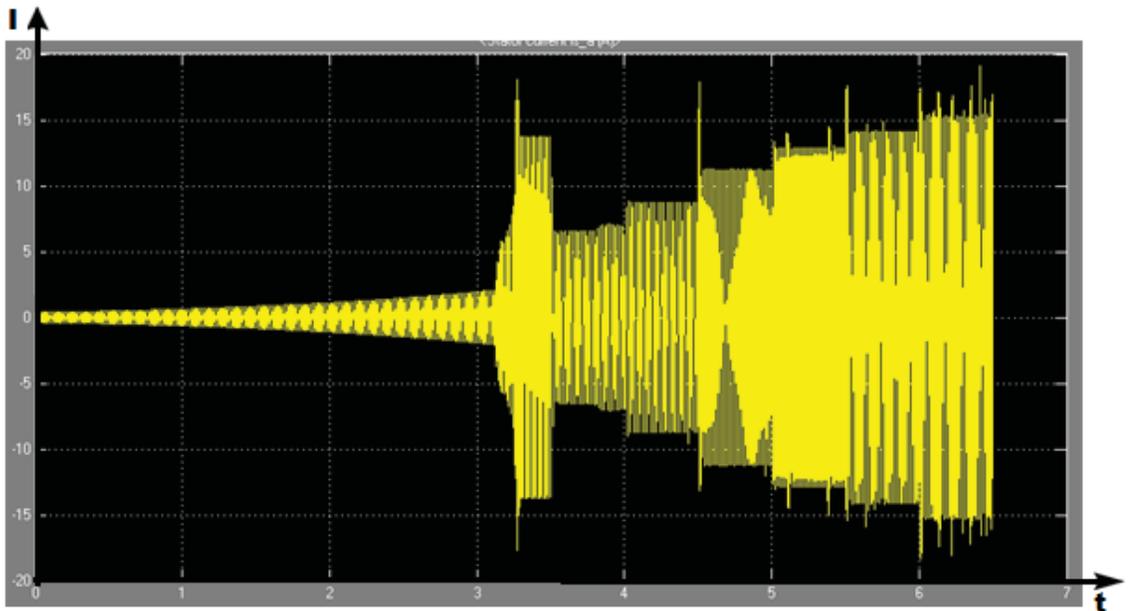


Figura 5-8: Corrientes generadas del GIAE en Simulink.

Se puede observar que en el instante de 6 (s) la corriente llega a un máximo de 15.6 (Apeak), no superando la corriente nominal de la máquina de inducción, donde dicha máquina está trabajando a una corriente aceptable y sin riesgo a que se funda debido a sobre-corrientes.

El siguiente paso a estudiar es el generador de inducción autoexcitado con etapa en corriente continua, generando una tensión de 48 (Vcc).

Los dispositivos que se utilizarán en este proceso es un rectificador de puente completo, el cual convierte la tensión alterna a tensión continua no regulada. El otro dispositivo es el convertidor buck, el cual en este proyecto convierte tensión continua no regulada a tensión continua regulada.

Para el estudio de esta etapa en corriente continua se debe obtener los valores de los elementos que componen el convertidor buck, ya sean estos, el inductor y el condensador. Dichos elementos fueron calculados anteriormente reemplazando los datos en la expresión (4-14) y la expresión (4-15).

Una vez obtenidos los valores de los elementos del convertidor, se procede al análisis del control, donde en el capítulo anterior se hace el desarrollo para obtener las ganancias del controlador PI (K_p y K_i), siendo dichos valores 700 y 0.0545 respectivamente.

Ya obtenidos todos los datos, se inicia la simulación del sistema en etapa continua, donde se puede apreciar en la figura (5-9) la tensión de salida del convertidor buck, siendo 48 (Vcc).

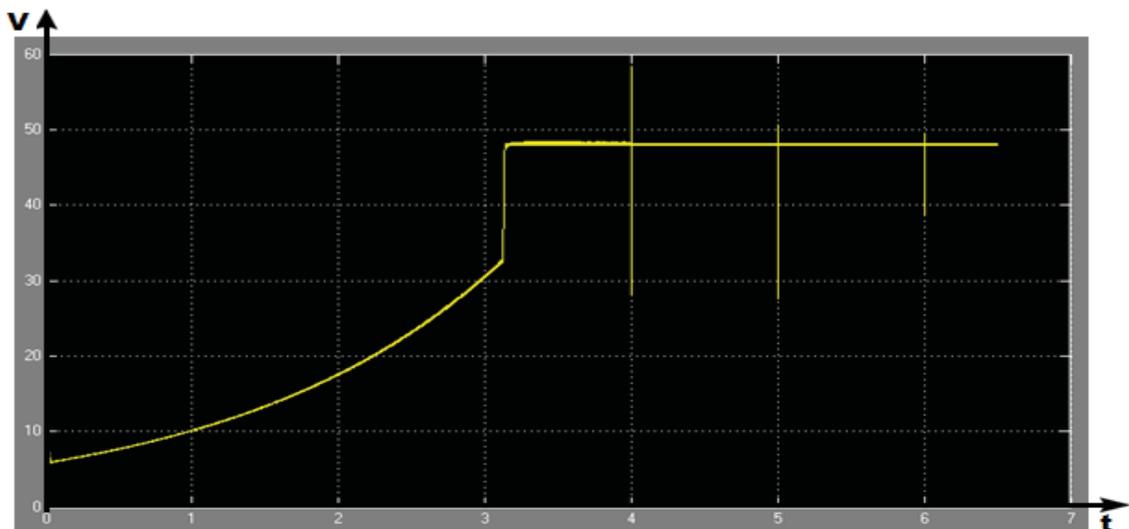


Figura 5-9: Tensión de salida del convertidor buck en Simulink.

En la figura (5-9) se observa que la tensión comienza a ser constante en el instante en que el generador de inducción es autoexcitado, esto ocurre en el instante de 3.3 (s), al igual que en la figura (5-7).

Luego se muestra la figura (5-10), donde se observa las corrientes de salida del convertidor buck.

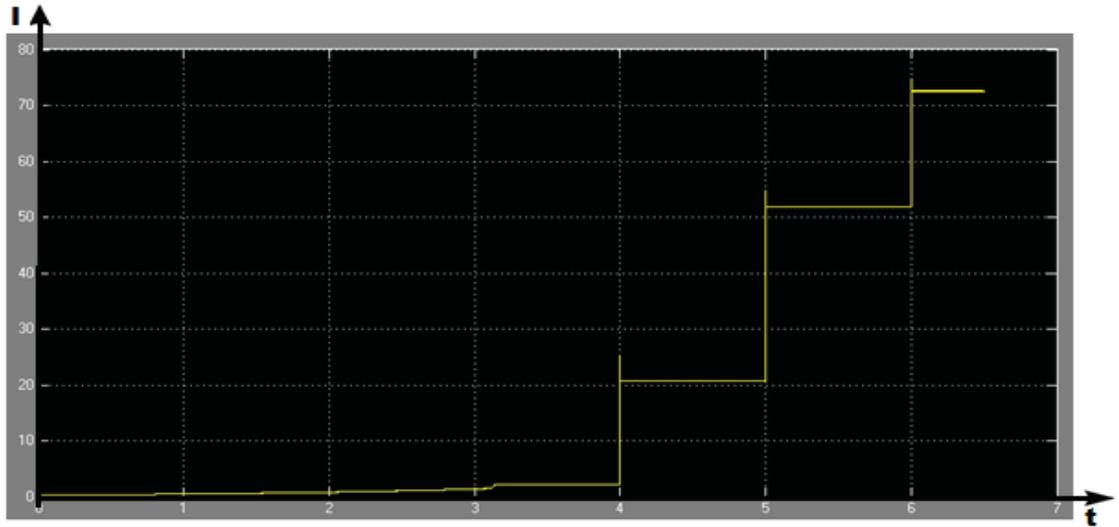


Figura 5-10: Corrientes de salida del convertidor buck en Simulink.

Finalmente en la figura (5-11) se aprecian las potencias obtenidas a la salida del convertidor buck, donde se observa el mismo comportamiento de las corrientes.

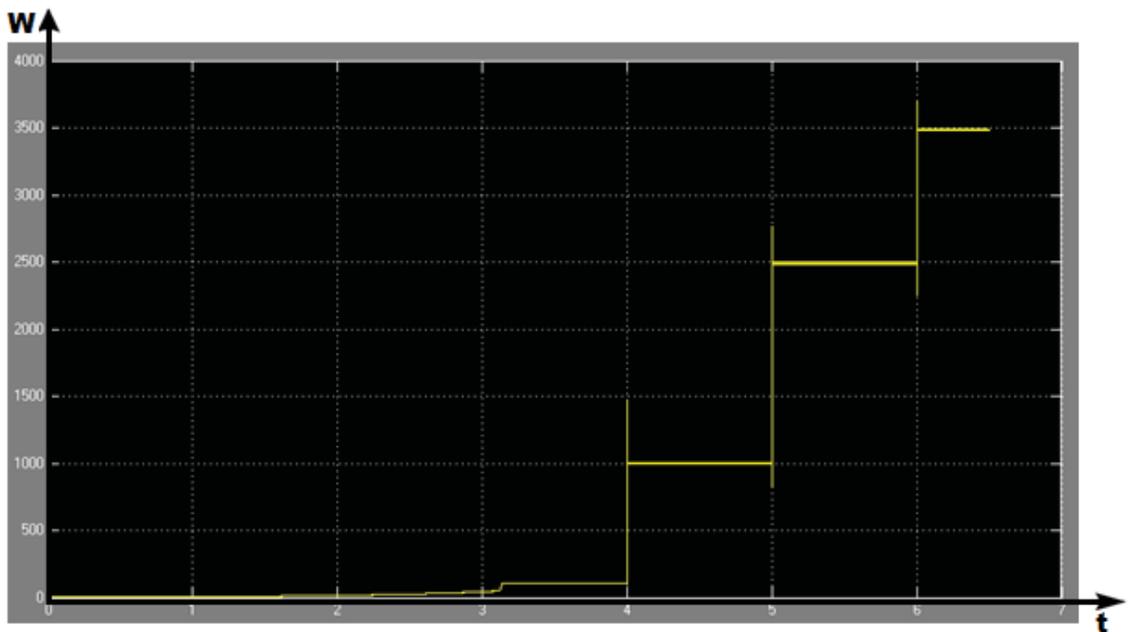


Figura 5-11: Potencia de salida del convertidor buck en Simulink.

Una vez que la máquina trabaja en sus valores nominales, se procede al estudio del sistema completo a una tensión de 48 (Vcc) a la salida del convertidor, donde se analizará el generador de inducción, siendo cuyos parámetros a analizar la corriente en el estator, la tensión generada y la frecuencia generada. Por otro lado, se hará un análisis a la etapa continua del sistema, haciendo el análisis en la corriente y la potencia en la salida del convertidor. Dicho estudio se hará gracias a los datos obtenidos de las simulaciones, los cuales se observan en la tabla (5-7).

Tabla 5-7: Corrientes, tensiones, frecuencias y potencias del sistema.

Tiempo en que actúa (s)	Carga (Ω)	Corriente estator (A_{peak})	Tensión generada (V_{peak})	Frecuencia generada (Hz)	Corriente convertidor (A)	Potencia convertidor (W)
0 - 3.5	22	13.7	528	71.42857	2.2	105.5
3.5 - 4	22	6.5	360	51.5464	2.2	105.5
4 - 4.5	2.304	8.8	330	50.505	20.8	1000
4.5 - 5	2.304	11.2	415	60.606	20.8	1000
5 - 5.5	0.9216	12.8	395	59.1716	51.85	2492
5.5 - 6	0.9216	14.1	442	64.51613	51.85	2492
6 - 6.5	0.658285714	15.6	430	63.7	72.6	3490

En la tabla (5-7) se observan los datos obtenidos de las simulaciones vistas anteriormente, donde posteriormente se analizarán dichos datos.

En la etapa alterna del sistema, se observa las corrientes generadas en los bornes del estator, las cuales como se mencionó anteriormente, son corrientes aceptables para que la máquina no sufra una sobre-corriente. Los valores de las tensiones que entrega la simulación, al igual que las corrientes, son aceptables, ya que no sobrepasa las tensión nominal que es 537.4 (V_{peak}). Finalmente se muestran las frecuencias generadas, las cuales tienen una gran variación.

Se podrá apreciar que las frecuencias y tensiones generadas son variables, esto se debe a la velocidad variable del rotor de la máquina de inducción y a la carga variable en que trabaja.

La frecuencia con mayor valor corresponde a la mayor velocidad en que la máquina se simuló (2150 (rpm)), y la frecuencia con menor valor, la cual se acerca bastante a la nominal, corresponde a la menor velocidad, siendo esta 1550 (rpm).

Por lo tanto, como se observó en la simulación del generador de inducción autoexcitado, las frecuencias y tensiones son directamente proporcional a las velocidades en que gira el rotor de la máquina de inducción.

Cabe mencionar que la problemática de este proyecto es la variación de tensión y frecuencia que entrega el generador de inducción autoexcitado, siendo la solución a esto, convertir la tensión alterna a tensión continua, para así tener frecuencia constante.

Por ende, se procede al análisis de la parte continua del sistema, donde se aprecia el comportamiento de las corrientes del convertidor buck, esto se debe a la conexión de las cargas,

en donde a medida que las cargas incrementan, las corrientes siguen el mismo comportamiento.

Finalmente, al igual que el comportamiento de las corrientes de salida, las potencias tienen ese efecto debido al instante en que las cargas se conectan, donde se aprecia en el instante de 6 (s) la máxima potencia que entrega el convertidor, siendo 3500 (W).

5.3 Estudio y simulación a 24 (Vcc) de salida

El estudio y simulación de la tensión de salida del convertidor buck a 24 (Vcc) se hará a velocidades variables, al igual que el estudio a 48 (Vcc), donde en la tabla (5-8) se darán a conocer los valores de dichas velocidades en "RPM" y "Rad/s". En la figura (5-12) se muestra el comportamiento de dichas velocidades.

Tabla 5-8: Velocidades variables en "RPM" y "RAD/SEG".

Tiempo en que actúa (s)	RPM	RAD/SEG
0	2150	225.1474735
3.5	1550	162.3156
4.5	1850	193.73
5.5	2000	209.44

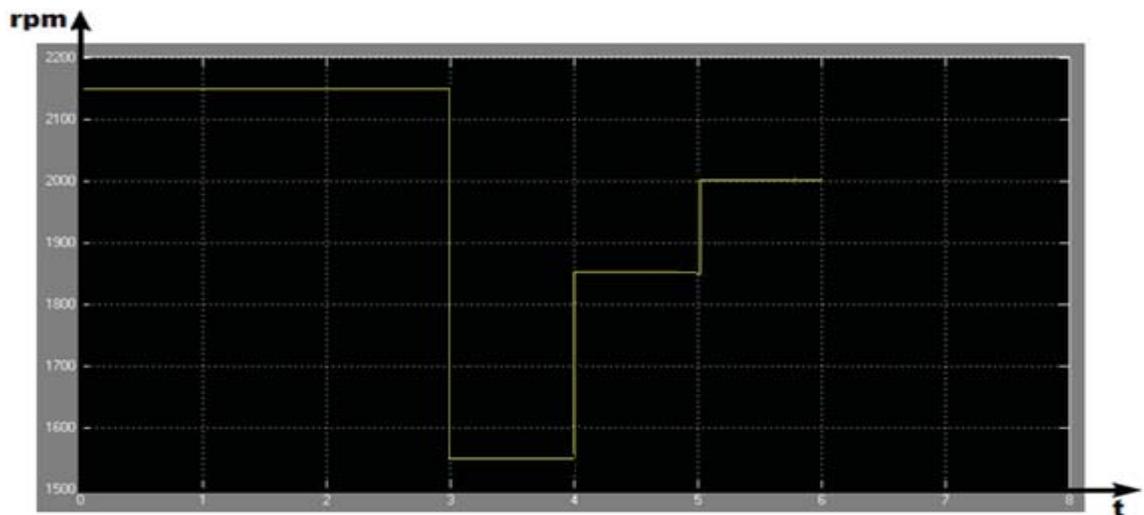


Figura 5-12: Velocidades variables en Simulink.

Datos a considerar, son los parámetros del convertidor buck, ya sean estos la frecuencia en que trabaja el dispositivo Mosfet, los elementos pasivos y la carga, donde los elementos pasivos se calculan mediante la ecuación (4-14) y la ecuación (4-15).

Debido a las velocidades variables del generador de inducción autoexcitado, las tensiones de entrada del convertidor son variables, y por ende, la razón cíclica (D) será variable. Por lo tanto, el peor de los casos es cuando se obtiene una razón cíclica menor, ya que se obtendrían elementos reactivos de gran envergadura. Entonces, en las simulaciones que se verán más adelante, se obtienen las tensiones de entrada del convertidor, donde en la tabla (5-9) se observa junto al tiempo en que actúan, a la velocidad y carga variable en que pertenece.

Tabla 5-9: Tensión de entrada al convertidor buck.

Tiempo en que actúa (s)	Velocidad (RPM)	Carga (Ω)	Tensión de entrada (V)
0 - 3	2150	22	533
3 - 3.5	1550	22	360
3.5 - 4	1550	0.576	328
4 - 4.5	1850	0.576	410
4.5 - 5	1850	0.2304	395
5 - 5.5	2000	0.2304	440
5.5 - 6	2000	0.144	410

Como se mencionó anteriormente, la tensión máxima que puede soportar la máquina es de 537.4 (V_{peak}). La tensión máxima mencionada, es obtenida gracias a la velocidad de 2150 (rpm) y a la carga conectada de 22 (Ω), donde dicha carga es la máxima para que el generador se autoexcite.

Sabiendo las tensiones de entrada del convertidor, se procede al cálculo de la razón cíclica sustituyendo los datos en la ecuación (4-11), teniendo un resultado igual a 0.07317 (-)

Posteriormente, se desea una ondulación de corriente de 1 (A) y una ondulación de tensión en el condensador de 0.3 (V). Por lo tanto, de la ecuación (4-14) y ecuación (4-15) se obtienen los valores de los elementos pasivos (L y C), donde dichos valores se observan en la tabla (5-10), junto a la frecuencia del dispositivo Mosfet.

Tabla 5-10: Valores de los elementos del convertidor buck.

Fs (Hz)	L (mH)	C (μF)
20000	1.112184	25

Finalmente, se procede a la obtención de las ganancias Kp y Ki del controlador PI, siendo estas 700 y 0.0525 respectivamente. El procedimiento se observa en el capítulo anterior, donde se explica las ganancias del controlador PI pero con la función de transferencia que se verá a continuación.

$$F.T = \frac{35965271.9334}{s^2 + 69444.44 * s + 35965271.9334} \quad (5-2)$$

En el estudio de la tensión de 24 (Vcc) de salida del convertidor, se hará un análisis sobre la potencia máxima que entregará el convertidor buck, "con " y "sin" que la máquina sufra una sobre-corriente.

5.3.1 Simulación a 24 (Vcc) de salida con sobre-corriente

En la tabla (5-11) se observan las cargas variables conectadas a la salida del convertidor buck, donde también se muestra los tiempos en que cada carga actuará y la potencia que genera el convertidor buck con cada carga correspondiente, siendo la máxima potencia de 4000 (W) entregada por el convertidor. El método para obtener dichas potencias, se observa en la ecuación (5-1).

Tabla 5-11: Cargas y Potencias

Tiempo en que actúa (s)	Carga (Ω)	Potencia (W)
0	22	26.18
4	0.576	1000
5	0.2304	2500
6	0.144	4000

Luego de obtener los datos deseados, ya sean estos la tensión y la potencia máxima, se procede a observar los datos entregados por la simulación del sistema.

En la figura (5-13), se muestra la tensión generada por el generador de inducción autoexcitado, donde sus valores se encuentran en la tabla (5-9). Se puede visualizar que en el instante 2.8 (s) se

logra la autoexcitación del generador. Se puede deducir que las tensiones sufren una fuerte variación, esto se debe a las velocidades variables del rotor de la máquina de inducción y a la vez se observa una leve variación de tensión, las cuales son provocadas por la carga variable.

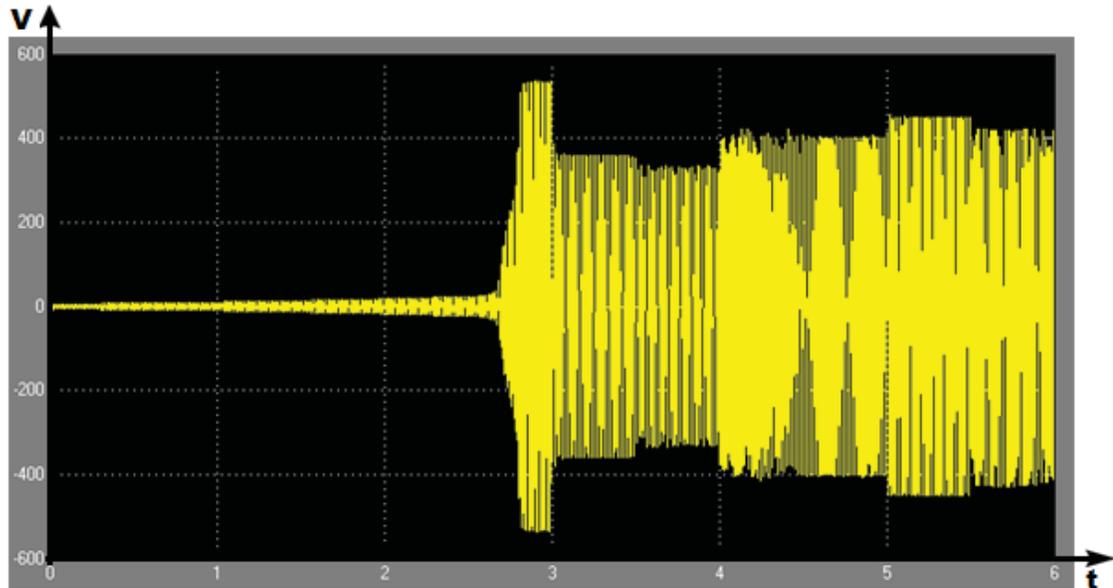


Figura 5-13: Tensiones generadas por el GIAE en Simulink.

Posteriormente, se observa la corriente generada por el generador de inducción autoexcitado, donde dicha corriente alimenta el banco de condensadores y el sistema en la etapa en corriente continua. Dicha corriente se observa en la figura (5-14).

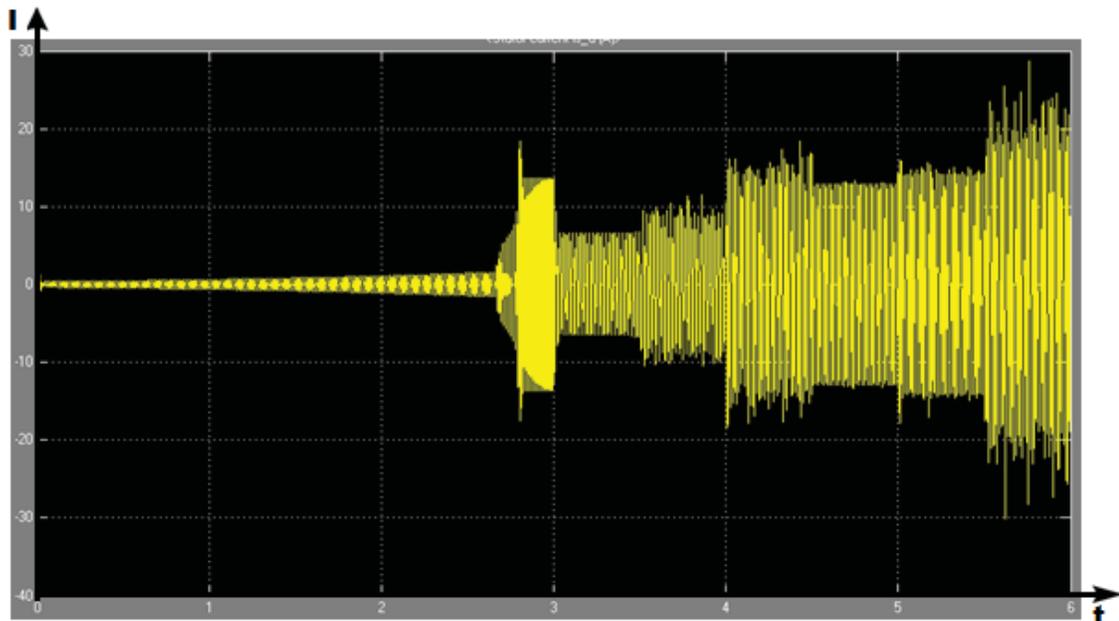


Figura 5-14: Corrientes generadas del GIAE en Simulink.

Cabe mencionar que en el instante de 5.5 (s), la máquina supera la corriente nominal, donde se puede observar que alcanza una corriente de 24 (Apeak), esto quiere decir, que la máquina está trabajando con sobre-corriente. Esto se debe a que en el instante de 5.5 (s) actúa la carga máxima de 0.144 (Ω). Entonces, se sabe que al aumentar la carga, la corriente aumenta y así se puede observar en la figura (5-14).

Por lo tanto, ya que la máquina de inducción está trabajando con sobre-corriente, el sistema debe reducir la carga para disminuir la corriente generada y trabajar sin sobre-corriente. Esto se estudiará en el siguiente ítem.

5.3.2 Simulación a 24 (Vcc) de salida sin sobre-corriente

Como se mencionó anteriormente, como solución a la sobre-corriente generada, se debe disminuir la carga para disminuir dicha corriente.

Por lo tanto, en la tabla (5-12) se especificarán las nuevas cargas para trabajar sin sobre-corriente, donde al igual se incorporará la potencias generadas por el convertidor buck.

Se observa en la tabla (5-12) que la carga disminuye, donde se podrá generar una potencia máxima de 3000 (W) a la salida del convertidor buck.

Tabla 5-12: Cargas y Potencias

Tiempo en que actúa (s)	Carga (Ω)	Potencia (W)
0	22	26.18
3.5	0.576	1000
4.5	0.288	2000
5.5	0.192	3000

Se observa en la figura (5-15) la tensión que entrega el generador de inducción autoexcitado, donde se muestra en la última tensión que es distinta a la tensión de 24 (Vcc) con sobre-corriente. esto se debe a la carga que está alimentado.

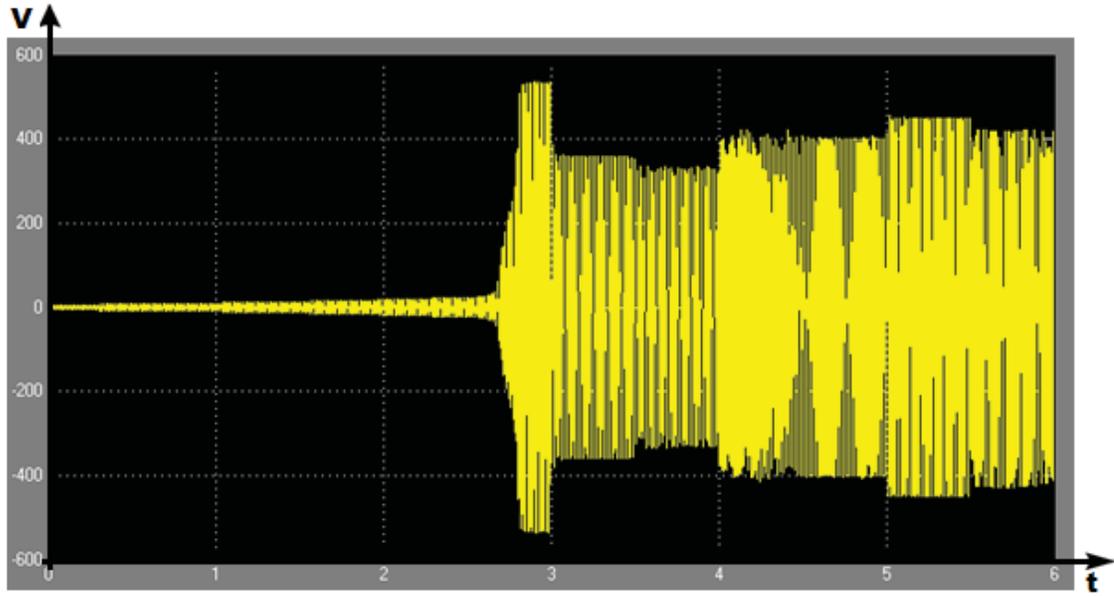


Figura 5-15: Tensiones generadas del GIAE en Simulink.

Posteriormente, la corriente del estator se muestra en la figura (5-16), donde se puede observar que en el instante de 5.5 (s) la corriente llega a un máximo de 16.3 (Apeak), no superando la corriente nominal de la máquina de inducción, donde dicha máquina está trabajando a una corriente aceptable y sin riesgo a que se funda debido a sobre-corrientes.

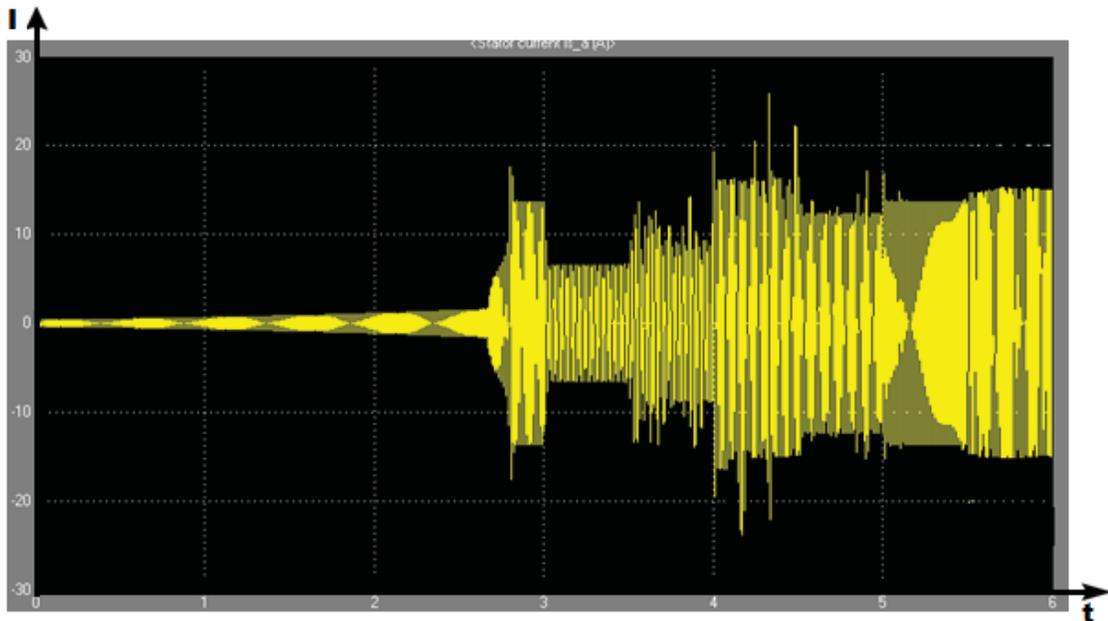


Figura 5-16: Corrientes generadas del GIAE en Simulink.

El siguiente paso a estudiar es el generador de inducción autoexcitado con etapa en corriente continua.

Los dispositivos que se utilizarán en este proceso es un rectificador de puente completo, el cual convierte la tensión alterna a tensión continua no regulada. El otro dispositivo es el convertidor buck, el cual en este proyecto convierte tensión continua no regulada a tensión continua regulada.

Para el estudio de esta etapa en corriente continua se debe obtener los valores de los elementos que componen el convertidor buck, ya sean estos, el inductor y el condensador. Dichos elementos fueron calculados anteriormente reemplazando los datos en la ecuación (4-14) y la ecuación (4-15).

Una vez obtenidos los valores de los elementos del convertidor, se procede al análisis del control, donde en el capítulo anterior se hace el desarrollo para obtener las ganancias del controlador PI (K_p y K_i), siendo dichos valores 700 y 0.0525 respectivamente.

Ya obtenidos todos los datos, se inicia la simulación del sistema completo, donde se puede apreciar en la figura (5-17) la tensión de salida del convertidor buck, siendo 24 (Vcc).

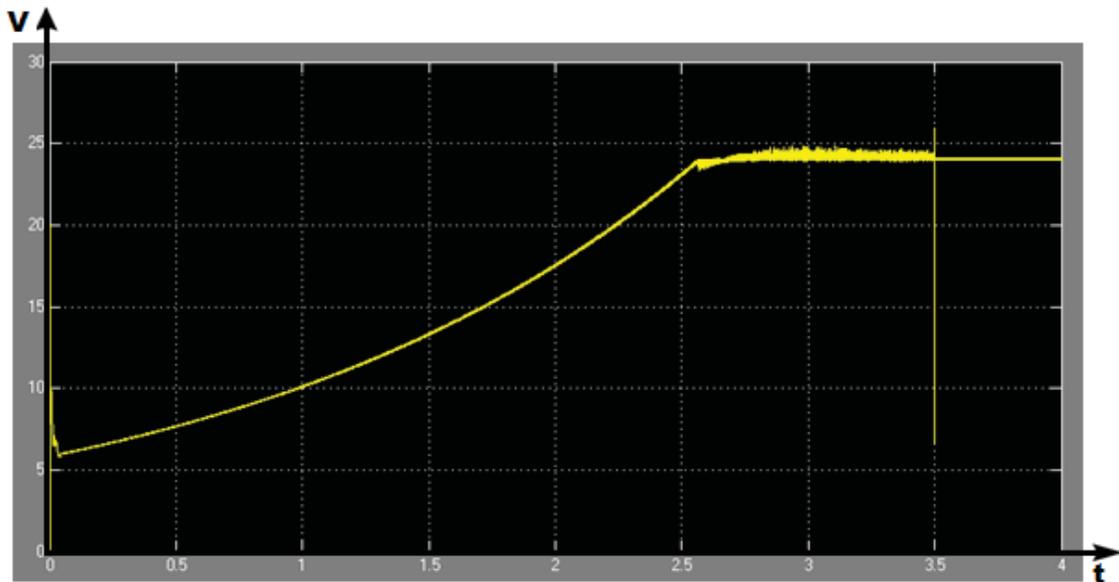


Figura 5-17: Tensión de salida del convertidor buck en Simulink.

En la figura (5-17) se observa que la tensión comienza a ser constante en el instante en que el generador de inducción es autoexcitado, esto ocurre en el instante de 2.8 (s), donde también se observa en la figura (5-15).

Luego se entrega la figura (5-18), donde se observa las corrientes de salida del convertidor buck.

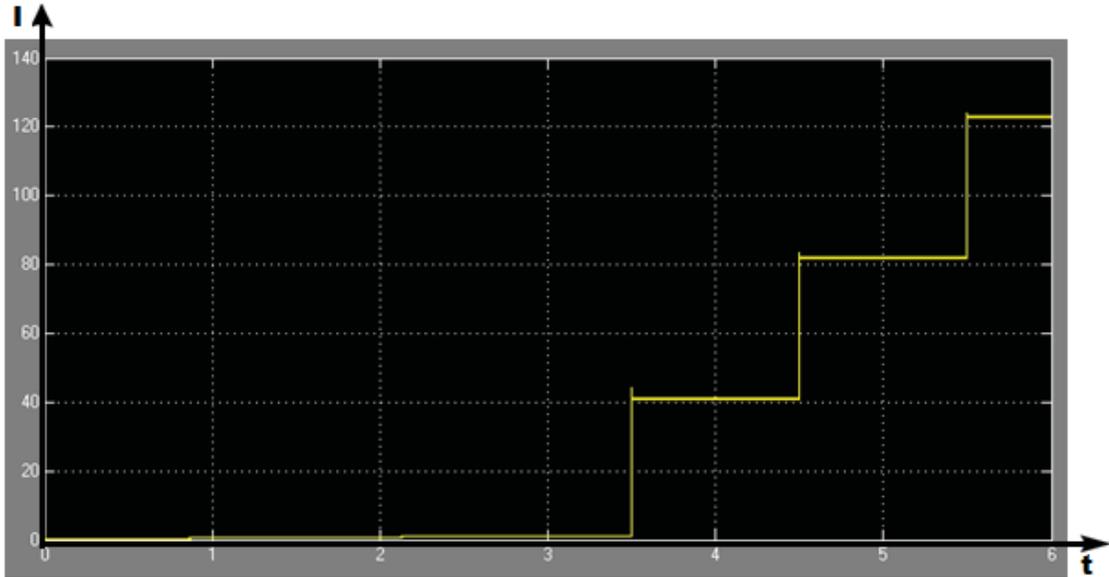


Figura 5-18: Corrientes de salida del convertidor buck en Simulink.

Finalmente en la figura (5-19) se aprecian las potencias obtenidas a la salida del convertidor buck, donde se observa el mismo comportamiento de las corrientes.

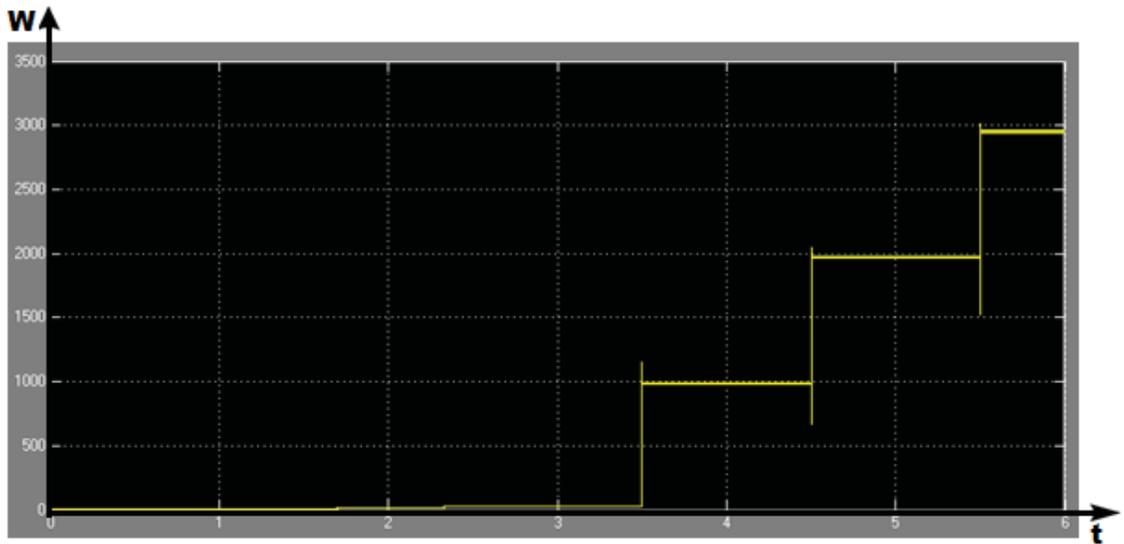


Figura 5-19: Tensión de salida del convertidor buck en Simulink.

Una vez que la máquina trabaja en sus valores nominales, se procede al estudio del sistema completo a una tensión de 48 (Vcc) a la salida del convertidor, donde se analizará el generador de inducción, siendo cuyos parámetros a analizar la corriente en el estator, la tensión generada y la frecuencia generada. Por otro lado, se hará un análisis a la etapa continua del sistema, haciendo el análisis en la corriente y la potencia en la salida del convertidor. Dicho estudio se hará gracias a los datos obtenidos de las simulaciones, los cuales se observan en la tabla (5-13).

Tabla 5-13: Corrientes, tensiones , frecuencias y potencias del sistema.

Tiempo en que actúa (s)	Carga (Ω)	Corriente estator (A_{peak})	Tensión generada (V_{peak})	Frecuencia generada (Hz)	Corriente convertidor (A)	Potencia convertidor (W)
0 - 3	22	13.6	533	71.43	1.1	26.5
3 - 3.5	22	6.5	360	51.54	1.1	26.5
3.5 - 4	0.576	8.5	328	50.505	41	990
4 - 4.5	0.576	16	405	58.48	41	990
4.5 - 5	0.288	12.3	400	58.16	82	1974
5 - 5.5	0.288	13.7	448	64.935	82	1974
5.5 - 6	0.192	16.3	430	64.1025	123	2954

Se observa en la tabla (5-13) las corrientes generadas en los bornes del estator, las cuales como se mencionó anteriormente, son corrientes aceptables para que la máquina no sufra una sobrecorriente. Los valores de las tensiones que entrega la simulación, al igual que las corrientes, son aceptables, ya que no sobrepasa las tensión nominal que es 537.4 (V_{peak}). Finalmente se muestran las frecuencias generadas, las cuales tienen una gran variación.

Se podrá apreciar que las frecuencias y tensiones generadas son variables, esto se debe a la velocidad variable del rotor de la máquina de inducción y a la carga variable en que trabaja.

La frecuencia con mayor valor corresponde a la mayor velocidad en que la máquina se simuló (2150 (rpm)), y la frecuencia con menor valor, la cual se acerca bastante a la nominal, corresponde a la menor velocidad, siendo esta 1550 (rpm).

Por lo tanto, como se observó en la simulación del generador de inducción autoexcitado, las frecuencias y tensiones son directamente proporcional a las velocidades en que gira el rotor de la máquina de inducción.

Cabe mencionar que la problemática de este proyecto es la variación de tensión y frecuencia que entrega el generador de inducción autoexcitado, siendo la solución a esto, convertir la tensión alterna a tensión continua, para así tener frecuencia constante.

Entonces, se procede al análisis de la parte continua del sistema, donde se aprecia el aumento de las corrientes del convertidor buck, esto se debe a la conexión de las cargas, en donde a medida que las cargas incrementan, las corrientes siguen el mismo comportamiento.

Posteriormente, al igual que el comportamiento de las corrientes de salida, las potencias tienen ese efecto debido al instante en que las cargas se conectan, donde se aprecia en el instante de 5.5 (s) la máxima potencia que entrega el convertidor, siendo 3000 (W).

5.4 Conclusión a las simulaciones

Como se ha mencionado anteriormente, el problema de este proyecto se debe a la variación de tensión y frecuencia que entrega el generador de inducción autoexcitado por un banco de condensadores, siendo esta máquina utilizada en sistemas eólicos, donde la variación del viento hace generar velocidades variables en el rotor de la máquina de inducción.

Por lo tanto, al generar tensiones y frecuencias variables, debido a las distintas velocidades inyectadas a la máquina de inducción, no se pueden alimentar cargas debido a la irregularidad en las tensiones y frecuencias.

Como solución a este problema, se convierte dicha tensión alterna a una tensión continua para tener frecuencia constante, pero se sigue obteniendo tensión continua variable, por lo que se incorpora un convertidor buck, el cual convierte tensión continua variable a tensión continua constante, ya sean estas reguladas por un sistema de control. Donde las tensiones continuas en las que trabaja un sistema eólico son de 12 (Vcc), 24 (Vcc) y 48 (Vcc), las cuales son almacenadas en un banco de baterías de dichos valores.

El sistema de control mencionado anteriormente se constituye con un controlador PI, el cual tiene ganancias K_p y K_i , donde en el capítulo 4 se observa el desarrollo para obtener dichas ganancias.

Las tensiones continuas entregadas por el convertidor buck que se simulan en este proyecto son de 24 (Vcc) y 48 (Vcc), a las cuales se les hizo un estudio de corriente, de potencia y de cargas.

La tensión de 48 (Vcc), al igual que la tensión de 24 (Vcc) pueden generar potencias superior a la nominal, obteniendo un gran rendimiento, pero el problema es la corriente que soporta la máquina, donde al generar potencias cercanas a la nominal, las corrientes superan en exceso la corriente nominal. Por lo tanto, se puede generar potencias máximas pero sin sobrepasar la corriente nominal.

Las cargas cumplen una gran función en el sistema para atenuar la corriente generadas por la máquina, donde la tensión de 48 (Vcc) necesita una carga máxima de 0.658285714 (Ω) para obtener una potencia máxima de 3500 (W) y sin sobrepasar la corriente nominal. Por otro lado, para una tensión de 24 (Vcc) se necesita una carga máxima de 0.192 (Ω) para generar una potencia máxima de 3000 (W) y sin sobrepasar la corriente nominal.

Discusión y conclusiones

Este trabajo fue abordado con el objetivo general sobre el "estudio del generador de inducción autoexcitado por un banco de condensadores y su control para producir corriente continua regulada". Para concretar dicho objetivo, se analizó en primer lugar la máquina de inducción, conociendo sus componentes, su funcionamiento y los parámetros que en el desarrollo de este trabajo se necesitarían. Posteriormente, se hizo un estudio del generador de inducción, el cual es autoexcitado por un banco de condensadores, donde en el mencionado estudio, se analizaron los parámetros para producir la autoexcitación y se corroboraron mediante simulaciones, donde se muestran el comportamiento de las tensiones y frecuencias para distintos tipos de velocidades. Luego se hace un estudio a la etapa en corriente continua del sistema, donde se explican sus dispositivos, ya sean estos el rectificador de puente completo y el convertidor reductor de tensión, también llamado convertidor buck, al cual se le hace un control mediante un controlador PI para regular la tensión y obtener la tensión continua deseada en la salida, dicha etapa es la principal para obtener la tensión deseada en la salida del convertidor buck. Finalmente mediante simulaciones, se hace un estudio general del sistema, observando la sobre-corriente que la máquina de inducción puede generar, la cual es atenuada por la carga conectada.

Como se mencionó anteriormente, es necesario conocer en detalle los componentes que constituyen la máquina de inducción, ya sean estos, el estator, el cual es la parte fija de la máquina donde es el componente principal para generar la potencia de la máquina, también se tiene el rotor, el cual en este trabajo se ocupa un rotor devanado conectado en estrella, es el encargado de inducir la tensión al estator y finalmente se tiene la carcasa, en la cual están mencionados los datos nominales de la máquina en la placa. Por otro lado se explica el funcionamiento y los parámetros de la máquina de inducción a estudiar, donde dicha máquina trabaja a una velocidad de sincronismo con un valor de 1500 (rpm), esto se debe a que trabaja a una frecuencia de 50 (Hz) y dos par de polos. Por lo tanto, para que dicha máquina trabaje como generador, debe superar su velocidad de sincronismo, obteniendo un deslizamiento negativo debido a sus velocidades en que trabaja la máquina. Se explica también el circuito equivalente de la máquina de inducción, el cual tiene una semejanza al circuito equivalente de un transformador. Y finalmente, se detalla la curva de magnetización, la cual es de vital importancia en el desarrollo del trabajo.

En el capítulo 2, se entra en detalle estudiando el generador de inducción, el cual es autoexcitado por un banco de condensadores, donde su funcionamiento trata sobre la velocidad que se inyecta a la máquina de inducción mediante una máquina motriz, o en el caso de este estudio, mediante las velocidades variables producidas por el viento, una vez inyectadas dichas velocidades, a todo esto, deben superar las velocidades de sincronismo, la fuerza electromotriz y las corrientes inducidas en los devanados se incrementarán hasta alcanzar un punto de equilibrio debido a la saturación magnética en la máquina. La máquina debe tener un magnetismo residual en el rotor para generar la tensión inicial, la cual se irá incrementando gracias a las corrientes inyectadas del banco de condensadores. La tensión generada depende de tres factores, siendo estos; la velocidad de la máquina, el tamaño del banco de condensadores y la carga conectada. Si la velocidad del generador se mantiene constante, entonces la tensión generada depende solo del banco de condensadores y la carga conectada, pero la carga siempre varía y control sobre la generación de la tensión depende del tamaño del banco de condensadores, el cual debe ir cambiando de valor para obtener una tensión fija generada, este control tiene alto valor económico, por lo que se descarta. Por otro lado, una tensión constante en los terminales del generador de inducción implica un incremento en el valor del flujo magnético en el entrehierro, lo que resultaría en una reactancia de magnetización que varía continuamente.

Como se mencionó durante el desarrollo del trabajo, el proceso de autoexcitación depende de tres factores, siendo estos; la inductancia de magnetización, la velocidad en que gira el rotor de la máquina de inducción y el tamaño del banco de condensadores. Donde la inductancia de magnetización cumple un rol importante, ya que incrementa y estabiliza la tensión en condiciones de vacío y con carga. El banco de condensadores trabaja con un valor fijo, entregando una reactancia capacitiva, la cual decrece a medida que la velocidad aumente e incrementa a medida que la velocidad disminuye, esto se debe a que la frecuencia generada por el generador de inducción es directamente proporcional a la velocidad, y por ecuación (2-4) se observa que la frecuencia es inversamente proporcional a la reactancia capacitiva. La resonancia eléctrica es de vital importancia, ya que genera la anulación de los elementos pasivos de la máquina para una frecuencia nominal de 50 (Hz), y a la vez, de la ecuación (2-2) se obtiene la ecuación (2-6) para obtener el valor del banco de condensadores. Lo mencionando anteriormente se observan en las simulaciones del generador de inducción a velocidades variables, donde también se muestran el comportamiento de las tensiones, corrientes y frecuencias cuando la máquina trabaja en vacío.

Siguiendo el estudio de la máquina, para solucionar el problema de tensión y frecuencia variable que genera la máquina de inducción autoexcitada trabajando como generador, se debe trabajar en la etapa de corriente continua, convirtiendo la tensión alterna a tensión continua para así trabajar con frecuencia nula. El rectificador que se eligió fue un rectificador de puente completo, ya que genera 6 pulsos y deja una tensión cuasi lineal, donde a la salida del rectificador se incorpora un condensador de gran tamaño (1mF) para filtrar la tensión y entregar una tensión continua no regulada. Para la regulación de la tensión se cuanta con tres tipos de convertidores CC/CC, los cuales son; el convertidor buck, el cual reduce tensión, se tiene

también el convertidor boost, el cual eleva tensión, y finalmente se tiene el convertidor buck-boost, el cual reduce y eleva tensión.

El convertidor que se elige en este trabajo es el convertidor buck, debido a que el generador entrega tensiones superiores a las deseadas (48 (Vcc) y 24 (Vcc)), sólo se desea reducir tensiones. Es importante considerar los parámetros del convertidor buck, los cuales se calculan mediante las ecuaciones (4-14) y la ecuación (4-15), donde al tener tensiones de entrada variables, la razón cíclica es variable, donde en el peor de los casos la peor razón cíclica sería la más elevada, ya que al tener una razón cíclica elevada se obtienen elementos pasivos (L y C) de gran tamaño.

El control se le debe incorporar al convertidor buck, ya que en este dispositivo se desea regular la tensión de salida. El controlador elegido es el controlador PI, el cual mediante la herramienta de MATLAB, llamada "Sisotool" se encuentran los valores de las ganancias K_p y K_i .

Finalmente en el capítulo 5, se hace el estudio completo del sistema, donde se comparan las tensiones de salida del convertidor buck, ya sean estas 48 (Vcc) y 24 (Vcc). Para cada tensión de salida se obtiene una potencia máxima, las cuales puedes superar las potencias nominales de la máquina de inducción, pero el gran problema es la corriente generada, ya que sobrepasa en un gran rango la corriente nominal de la máquina. Por lo tanto, para que la máquina no sufra sobre-corrientes, las potencias entregadas por el convertidor buck tendrán un máximo, las cuales se controlan mediante las cargas conectadas

Bibliografía

- [1] Jose Antonio Barrado Rodrigo, «El generador de induccion autoexcitado» Alfaomega. Marzo del 2013.
- [2] Miguel Ángel Rodríguez Pozueta, «Máquinas eléctricas I - G862» Departamento de ingeniería eléctrica y energética, Universidad de cantabria (España) 2015.
- [3] Alba Ochoa Arredondo, Steven Rodríguez Campiño, «Control en lazo cerrado de un convertidor CC/CC tipo buck utilizando lógica difusa mediante la implementación de arduino» Facultad de ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.
- [4] «Los circuitos RLC, la resonancia y los filtros pasivos», Circuitos RLC.pdf
- [5] Roberto Colomo Ibáñez, «Convertidor DC/DC reductor (Buck) con control de corriente y de tensión» Escuela tecnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación, Pamplona, Septiembre de 2013.
- [6] Tema 4: Circuitos electrónicos básicos, «Rectificador trifásico de onda completa», <http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3079/html/index.html>.
- [7] Sustentator, «Energías Renovables», www.sustentator.com/energia/energia_eolica.php
- [8] Emmanuel Torres Montalvo, «Control de Voltaje del Generador de Inducción Auto-Excitado para Aplicaciones de micro/mini Generación de Energía Eléctrica» CINVESTAV, Septiembre del 2006.
- [9] Cyber Electrónica, «Uso del "Sisotool" para diseño de controles» Mayo del 2012.
- [10] Irving Vargas Morales, «Control de un convertidor CC/CC tipo buck por medio del microcontrolador ATMEGA328» Universidad autonoma de Juarez. Enero-Abril del 2015.