



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Matías Iván Ibacache Olmos

Análisis de los torques pulsantes que se producen en un motor de inducción trifásico.

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 04 de enero de 2019



Análisis de los torques pulsantes que se producen en un motor de inducción triásico.

Matías Iván Ibacache Olmos

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 Sanhueza Robles

Profesor Guía

Sr. Carlos Ávila Muñostes

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 04 de enero de 2019

Dedicada a mis padres, familiares, profesores, funcionarios y amigos.

Agradecimientos

Agradezco el apoyo incondicional de mis padres que fueron el pilar fundamental durante todo este proceso, como también palabras de aliento y motivación por parte de amigos. Sin el apoyo de estas personas el largo proceso que se vive en la universidad sería muy difícil de enfrentar. También se agradece el apoyo brindado por parte de los profesores que siempre estuvieron dispuestos a prestar ayuda en cualquier duda que se presentaba a medida que se avanzaba. Se agradece en especial al profesor guía que siempre estuvo al momento de necesitar su ayuda, por su paciencia al explicar de muy buena forma cualquier duda que se presentaba.

Se agradece también a los funcionarios que siempre mantenían un ambiente más ameno en la universidad, en especial al encargado del pañol de electricidad que siempre recibía de muy buena forma cada vez que se le preguntaba por la disponibilidad del laboratorio de máquinas, además de su apoyo brindado en el laboratorio ante cualquier inconveniente que se presentaba.

Valparaíso, 4 de enero de 2019

M.I.

Resumen

En el siguiente informe de proyecto se estudiará el comportamiento de un motor de inducción trifásico sometido a diferentes condiciones, una de ellas a destacar corresponde a una falla en las líneas de alimentación del motor. Se realizan ensayos de laboratorio (ensayos realizados en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso), los cuales son replicados en el software Matlab-Simulink, el cual permite modelar la máquina de inducción, con el fin de comparar los resultados obtenidos en ambos. Donde se analizarán los espectros armónicos presentes en las corrientes del estator en el motor de inducción. Se dará énfasis en el torque pulsante que desarrolla la máquina por la presencia de armónicos en el sistema, el torque será mostrado de forma gráfica gracias al software Matlab-Simulink.

Se entregan en el marco teórico los conceptos necesarios para entender el funcionamiento de la máquina de inducción, también se hablará sobre las características que presentan los materiales ferromagnéticos necesarios en la construcción de esta máquina. Se dan a conocer también las características de funcionamiento de Matlab, programa que fue utilizado para realizar las simulaciones, y también la manera de como modela la máquina para efecto de la simulación.

Se analizará de forma teórica el comportamiento de un motor de inducción trifásico accionado mediante un variador de frecuencia (VDF), donde se mostrará el contenido armónico presente asociado al estar utilizando un variador de frecuencia.

Palabras claves: Torque Pulsante, Motor de inducción, Armónico, Matlab-Simulink, Ensayos, Simulación, Espectro armónico, Variador de Frecuencia.

Abstract

In the following project report we'll be studying the behavior of a three-phase induction motor submitted to different conditions, one we should highlight corresponds to a fail on the feeding lines of the motor. We performed laboratory tests (realized on the electric machines laboratory of Pontificia Universidad Católica de Valparaíso), which are replicate with the MATLAB-Simulink software, this software allows us to model an induction machine with the final purpose of comparing both results. Where we are going to analyze the harmonic specters present on the currents of the ESTATOR on the induction motor. We are going to make emphasis on the pulsating torque that the machine develops because of the presence of harmonics on the system, this torque is going to be shown as a graphic using the MATLAB-Simulink.

On the theoretical framework you can find the necessary concepts to understand the functioning of the induction machine, also the characteristics of the ferromagnetic materials used in the construction of this machine. Also, you can find the characteristics of the functioning of MATLAB, software used to realize the simulations, and also how does it to model the machine for simulation effects.

We are going to analyze theoretically the behavior of a three-phase induction motor actuated through a Variable Frequency Drive (AFD), where We'll show the harmonic content conjoint to using an AFD.

Keywords: Pulsating torque, Induction Motor, Armónico, MATLAB-Simulink, test, Simulation, Armónico spectrum, Variable Frequency Drive.

Índice general

Introducción	1
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
1 Antecedentes generales.....	4
1.1 Descripción del estudio.	4
1.2 Modelo simplificado del estudio.....	5
2 Marco teórico.....	6
2.1 Conceptos teóricos.....	6
2.1.1 Ley de Faraday.....	6
2.1.2 Voltaje inducido en un conductor.	7
2.1.3 Fuerza de Lorentz en un conductor.....	7
2.2 Motor de inducción trifásico.....	9
2.2.1 Componentes principales del motor de inducción trifásico.	9
2.2.2 Principio de operación.....	11
2.2.3 Campo rotatorio.....	12
2.2.4 Número de polos-velocidad síncrona.	16
2.2.5 Deslizamiento y velocidad de deslizamiento.	18
2.2.6 Voltaje y frecuencia inducidos en el rotor.....	19
2.2.7 Par o momento de torsión contra velocidad.....	20
2.2.8 Motor de rotor devanado.....	21
2.2.9 Circuito equivalente del motor de inducción.....	22
2.3 Matlab-Simulink.....	27
2.3.1 Matlab-Simulink.....	27
2.3.2 Descripción del bloque de máquina asíncrona de Matlab-Simulink.....	28
2.4 Materiales magnéticos.....	28
2.4.1 Ferromagnetismo.....	28
2.4.2 Ciclo de histéresis.....	30
3 Ensayo de laboratorio.....	32
3.1 Ensayo de motor de inducción trifásico con carga.....	32

3.2 Resultados del ensayo motor de inducción trifásico con carga.	34
3.3 Resultados de ensayo de desconexión de una fase de alimentación en el motor de inducción trifásico aplicando una baja carga.	36
4 Simulaciones.	40
4.1 Torque pulsante.	40
4.1.1 Torque pulsante.	40
4.1.2 Armónicos.	40
4.2 Desconexión de una fase de alimentación.	41
4.3 Simulación motor de inducción trifásico con carga.	42
4.4 Resultados Simulación motor de inducción con carga.	45
4.5 Simulación desconexión de una fase de alimentación en el estator del motor de inducción trifásico aplicando una baja carga.	49
4.6 Resultados simulación desconexión de una fase de alimentación en el estator del motor de inducción trifásico aplicando una baja carga.	50
4.7 Comparación ensayos de laboratorio-simulación.	57
4.7.1 Comparación motor de inducción con carga.	58
4.7.2 Comparación desconexión de una fase de alimentación en el motor de inducción trifásico aplicando una baja carga.	60
5 Motor de inducción accionado a través de un variador de Frecuencia.	62
5.1 Circuito de simulación.	62
5.2 Comparación de forma de onda y valores de tensión.	63
5.3 Comparación de corriente.	64
5.4 Ensayo a motor de inducción con carga a velocidad nominal.	65
Discusión y conclusiones.	69
Bibliografía.	71

Introducción

El descubrimiento original de las máquinas asíncronas fue publicado en 1888 por el profesor Galileo Ferraris en Italia y por Nikola Tesla en Estados Unidos, ambos diseños de motores asíncronos se basaban en la producción de campos magnéticos giratorios con sistemas bifásicos. El motor de Ferraris un circuito magnético abierto y un rotor en forma de disco de cobre de tal forma que desarrollaba una potencia muy baja y este poseía interés comercial. Por su parte el motor de Tesla se dio a conocer dos meses más tarde que el de Ferraris, el cual poseía devanados concentrados tanto en el estator como en el rotor, logrando con esto un motor más práctico, es por esto que se considera a Tesla como el inventor de las máquinas de inducción. Las Máquinas de inducción trifásicas se descomponen en dos grandes familias, tanto como motores y generadores. [1]

Los motores de inducción o motores asíncronos trifásicos son los motores de mayor utilización en la industria. Esto es debido a que presentan características muy provechosas, ya que son resistentes, simples y de bajo valor en comparación con los demás motores. Su velocidad es relativamente constante desde cero a plena carga. La velocidad de este tipo de motor depende de la frecuencia, por lo que estos no se adaptan con facilidad al control de velocidad, sin embargo, con el avance en la rama de la electrónica de potencia se ha podido solucionar este inconveniente, ya que se han creado e implementado diversos controladores de frecuencia, como lo es el ya conocido variador de frecuencia, dentro del ámbito industrial también se le conoce como driver de corriente alterna, micro drivers o inversores. [2]

La principal diferencia de máquina asíncrona con las demás máquinas es que no existe una corriente conducida a uno de los arrollamientos. La que circula a través de los devanados generalmente situados en el rotor, se produce debido a la f.e.m (fuerza electromotriz) inducida por la acción del flujo del otro y es por lo descrito anteriormente que a este tipo de máquina se les llama de inducción. Por otra parte, es llamada máquina asíncrona debido a que la velocidad de giro que se genera en el rotor no es la de sincronismo impuesta por la frecuencia de la red.

Como es conocido en los sistemas eléctricos que son alimentados en corriente alterna las formas de onda que presentan el voltaje como la corriente se alejan de ser una señal sinusoidal

perfecta, lo que conlleva a la presencia de señales de menor amplitud y diferente frecuencia, estas señales son denominadas armónicas.

El estudio en este proyecto está centrado principalmente en analizar el comportamiento del motor de inducción trifásico bajo la presencia de armónicos en el sistema, una de las consecuencias producidas por la presencia de armónicos en el sistema es que estas producen torques pulsantes en el motor de inducción, que en consecuencia desarrollan vibraciones mecánicas en el sistema, las cuales pueden ser apreciadas claramente por el usuario que está desarrollando actividades con la máquina.

En el presente proyecto se realizan ensayos de laboratorio, en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, en los cuales se busca tomar registro de las variables eléctricas de interés, tales como corriente y voltaje, entre otras, dejando registro de los espectros armónicos y la distorsión armónica presente en estas señales. Las variables eléctricas de interés son registradas gracias al Sistema de Adquisición y Medición de Transientes Eléctricas (SAMTE). Los ensayos de laboratorio se conforman principalmente de un motor de inducción trifásico rotor devanado acoplado a través de su eje al eje de un generador de corriente continua, esto con el fin de medir el torque mecánico ejercido por una carga variable conectada al generador de corriente continua, para medir el torque mecánico generado se utiliza un método conocido como dínamo basculante. El método de dínamo basculante permite estimar de forma práctica el torque mecánico.

Más adelante en el estudio, se busca replicar los ensayos de laboratorio realizados en el software Matlab-Simulink. Donde el software permite modelar lo realizado en los ensayos de laboratorio, con el fin de que los resultados obtenidos sean concordantes con los que arrojan las simulaciones. Para esto es necesario analizar las formas de onda de voltaje y corriente, además de dejar en evidencia los espectros armónicos y distorsión armónica asociados a estos. También se analiza el comportamiento del torque que desarrolla la máquina asíncrona más gráficamente, esto gracias a que el software Matlab-Simulink permite guardar registro del torque eléctrico desarrollado por la máquina. Se comparan también los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio con los tomados de las simulaciones, comparando principalmente voltajes y corrientes, dejando en evidencia los valores de distorsión armónica total presente en estas dos variables eléctricas.

El proyecto también considera el análisis de forma más teórica el comportamiento de un motor de inducción trifásico accionado a través de un variador de frecuencia, el cual presenta alto contenido armónico de voltaje y corriente afectando el funcionamiento de la máquina. Para el análisis también se deja en evidencia las formas de onda de voltaje y corriente de ensayos de laboratorio como también de simulaciones realizadas en Matlab-Simulink. Para el análisis se toma de referencia ensayos realizados a un variador de frecuencia accionando un sistema similar al descrito en párrafos anteriores, el variador de frecuencia se encuentra también en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, correspondiendo al modelo VDF SD700.

Objetivo general.

- Estudiar bajo la teoría electromagnética, los diferentes tipos de torques que se producen en un motor de inducción.

Objetivos específicos.

- Estudiar el torque pulsante que se produce en un motor de inducción trifásico.
- Simular y analizar el comportamiento de un motor de inducción trifásico ante la presencia del torque pulsante.
- Contrastar en forma práctica con las simulaciones, los resultados obtenidos en las simulaciones.
- Analizar el contenido armónico de voltajes y corrientes asociados para diferentes tipos de funcionamiento del motor de inducción trifásico.

1 Antecedentes generales.

Este capítulo tendrá como objetivo dar a conocer el propósito del estudio que se realizó con el fin de obtener un modelo computacional que se asemeje lo más posible a lo ensayado en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

1.1 Descripción del estudio.

En su mayor parte el estudio está enfocado en simulaciones realizadas en el software Matlab-Simulink y ensayos de laboratorio que se llevan a cabo en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. En el estudio se modela un sistema que sea concordante con los ensayos de laboratorio, para esto se simula un sistema que consta de un motor asíncrono trifásico rotor devanado, un generador de corriente continua, una carga resistiva que se compone solo de ampolletas de distinta potencia en Watts, una fuente trifásica, entre otros. El propósito de esto es visualizar en las simulaciones los torques pulsantes que se producen en el motor de inducción, para esto el motor se somete a distintas condiciones, tanto como en las simulaciones como en los ensayos de laboratorio.

En los ensayos de laboratorio para tomar registro de las distintas variables eléctricas de interés se utilizan diversos instrumentos de medición, tales como SAMTE (Sistema de Adquisición y Medición de Transientes Eléctricas), amperímetros, tacómetros, voltímetros, entre otros.

En el desarrollo del proyecto se realizan distintos ensayos de laboratorio en el motor de inducción, uno de ellos corresponde a una falla en las líneas de alimentación de este, el cual permite evidenciar el importante torque pulsante que desarrolla el motor de inducción.

Además de lo que se realiza en los ensayos de laboratorio y simulaciones, se estudia bajo un enfoque teórico el comportamiento del motor de inducción alimentado a través de un variador de frecuencia (VDF).

Cabe señalar que los parámetros del motor de inducción trifásico y generador de corriente continua y curva de saturación del motor de inducción trifásico utilizados en las distintas simulaciones fueron entregados por el profesor guía René Sanhueza Robles.

1.2 Modelo simplificado del estudio.

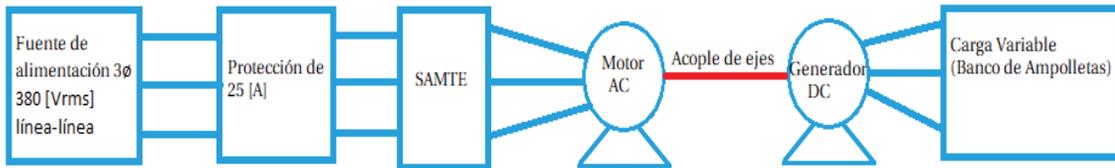


Figura 1-1.1 Esquema simplificado del sistema a estudiar.

En la Figura 1-1.1 se muestra el esquema simplificado del sistema a estudiar, donde se observa un motor de inducción trifásico alimentado por una fuente trifásica de 380 [Vrms] línea a línea, el cual posee una protección para sus devanados de estator de 25 [A], posterior a esta protección se encuentra el instrumento que permitirá tomar registro de las variables eléctricas de interés, tales como voltajes, corrientes, espectros armónicos de ambos, entre otros. El eje del motor asíncrono está acoplado al eje del generador de corriente continua, al cual se aplica una carga puramente resistiva que consta de solo ampolletas de distinta potencia en Watts. Este esquema es el que se lleva a cabo al momento de realizar los ensayos de laboratorio, en las simulaciones se busca replicar lo realizado en el laboratorio de máquinas con el fin de comparar los resultados.

2 Marco teórico.

Este capítulo pretende entregar conceptos fundamentales de la máquina de inducción necesarios para comprender el funcionamiento de ésta. Dentro de estos conceptos se encontrarán algunos de carácter general y otros de carácter más específico. Además, se hablará sobre los materiales ferromagnéticos.

Se dan a conocer también las características de funcionamiento de Matlab, programa que fue utilizado para realizar las simulaciones, y también la manera de como modela la máquina para efecto de la simulación.

2.1 Conceptos teóricos.

Esta sección muestra las leyes necesarias a conocer para comprender el funcionamiento de la máquina de inducción.

2.1.1 Ley de Faraday.

En 1831 mientras realizaba experimentos, Michael Faraday hizo uno de los descubrimientos más importantes en el campo del electromagnetismo. La ley conocida como Ley de Faraday de inducción electromagnética, reveló una relación fundamental entre el voltaje y el flujo en un circuito. La ley de Faraday establece que:

- Si el flujo que vincula un lazo varía como una función de tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales.
- El valor del voltaje inducido es proporcional a la velocidad de cambio de flujo.

De acuerdo con el sistema internacional de unidades (SI), se establece que cuando el flujo de un lazo presenta una variación de un weber por segundo, se induce un voltaje de 1 Volt [V] entre sus terminales. Debido a lo descrito anteriormente, si el flujo varía dentro de una bobina de N vueltas, el voltaje inducido estará dado por la siguiente ecuación:

$$E = N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2-1)$$

Donde:

- E: voltaje inducido, su unidad de medida es el Volt [V].
- N: número de vueltas en la bobina.
- $\Delta\phi$: cambio de flujo dentro de la bobina, su unidad de medida es el Weber [Wb].
- Δt : intervalo de tiempo durante el cual el flujo cambia, su unidad de medida son los segundos [s].

Gracias a ley de Faraday de inducción electromagnética se desarrollaron posteriormente un sinnúmero de aplicaciones prácticas y se estableció la base de operación de transformadores, generadores y motores de corriente alterna.

2.1.2 Voltaje inducido en un conductor.

En muchos motores y generadores, las bobinas se mueven con respecto al flujo que está fijo en el espacio. El movimiento relativo produce un cambio en el flujo que vincula las bobinas, por lo que se induce un voltaje de acuerdo con la ley de Faraday. En algunos casos es más conveniente obtener el valor del voltaje inducido con respecto a los conductores que con respecto a la bobina. Siempre que un conductor corta un campo magnético, se induce un voltaje entre sus terminales. [2] Para obtener el valor del voltaje inducido descrito anteriormente se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$E = B \cdot l \cdot v \quad (2-2)$$

Donde:

- E: voltaje inducido, su unidad de medida es el Volts [V].
- B: densidad de flujo, su unidad de medida es el Tesla [T].
- l: longitud activa del conductor en el campo magnético, su unidad de medida son los metros [m].
- v: velocidad relativa del conductor, su unidad de medida son los metros por segundos [m/s].

2.1.3 Fuerza de Lorentz en un conductor.

Cuando un conductor que transporta corriente se coloca en un campo magnético, este se somete a una fuerza llamada electromagnética o fuerza de Lorentz. La fuerza electromagnética es sumamente importante ya que constituye la base de operación de motores, generadores y una amplia variedad de instrumentos eléctricos. La magnitud de dicha fuerza depende de la orientación en la cual se encuentra el conductor con respecto a la dirección del campo. El mayor valor de la fuerza electromagnética se desarrolla cuando el conductor es perpendicular al campo y cuando el conductor se encuentra en paralelo al campo su valor es cero. [2]

El valor de la fuerza máxima que actúa sobre un conductor recto esta dado por la siguiente ecuación:

$$F = B \cdot l \cdot I \quad (2-3)$$

Donde:

- F: fuerza que actúa en el conductor, su unidad de medida son los Newton [N].
- B: densidad de flujo del campo, su unidad de medida son los Tesla [T].
- l: longitud activa del conductor, su unidad de medida son los metros [m].
- I: corriente en el conductor, su unidad de medida son los Amperes [A].

En la figura 2-1.1 se puede observar el máximo valor de la fuerza electromagnética, por el contrario, en la figura 2-1.2 se muestra el mínimo valor alcanzado de la fuerza electromagnética en un conductor.

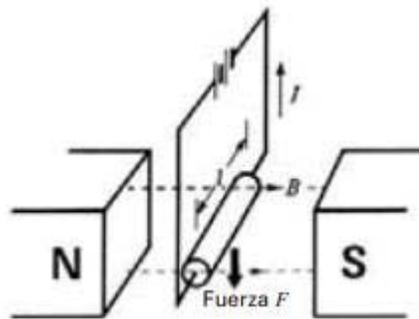


Figura 2-1.1: Fuerza electromagnética en un conductor.

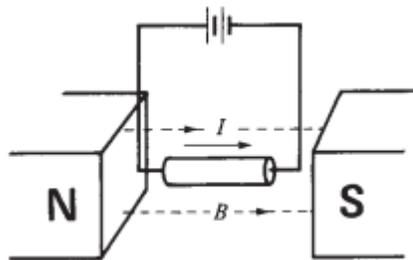


Figura 2-1.2: Fuerza electromagnética en un conductor igual a cero.

2.2 Motor de inducción trifásico.

Esta sección está enfocada en mostrar todos los conceptos necesarios para entender de manera correcta el funcionamiento del motor de inducción trifásico. También se muestran algunas características constructivas de la máquina.

2.2.1 Componentes principales del motor de inducción trifásico.

Los motores de inducción trifásicos (Figura 2-2.1) se componen de dos partes principales: un estator estacionario y un rotor el cual es giratorio. El rotor está separado del estator por un pequeño entrehierro que va desde 0,4 [mm] a 4 [mm] generalmente, esto varía según la potencia que desarrolle el motor. [2]

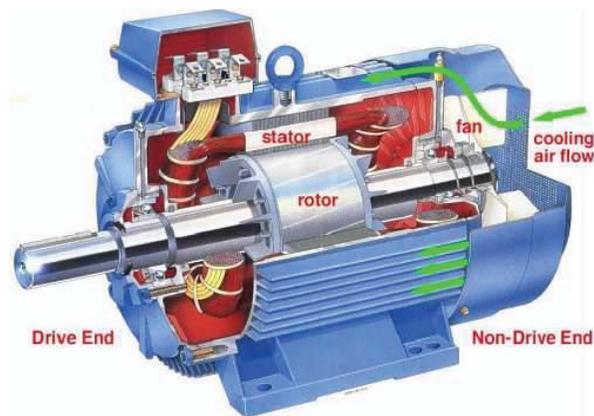


Figura 2-2.1: Componentes principales del Motor Asíncrono.

El estator (Figura 2-2.2) se compone de un armazón de acero que soporta un núcleo cilíndrico hueco compuesto de laminaciones apiladas. Varias ranuras equidistantes entre sí, hechas en la circunferencia interna de las laminaciones, proporcionan el espacio para el devanado del estator.

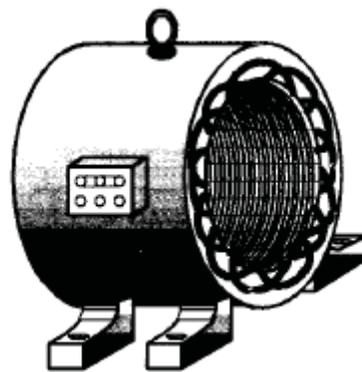


Figura 2-2.2: Estator de un Motor Asíncrono.

El rotor por su parte también se compone de laminaciones ranuradas, estas están apiladas cuidadosamente para crear una serie de ranuras para el devanado del rotor. Se utilizan dos tipos de devanados de rotor: devanados de rotor trifásico convencionales hechos de alambre aislado y devanados de jaula ardilla. El tipo de devanado da lugar a dos clases de motores: motores de jaula de ardilla y motores de inducción de rotor devanado.

Un rotor de jaula de ardilla (Figura 2-2.3) se compone de barras de cobre desnudo, un poco más largas que el rotor, las cuales están insertas en las ranuras por uno de sus extremos. Los extremos opuestos se sueldan a dos anillos de cobre con el fin de que todas las barras estén en corto entre sí. Toda la construcción descrita anteriormente toma la forma de una jaula de ardilla y es de donde proviene el nombre de dicho rotor. [2]

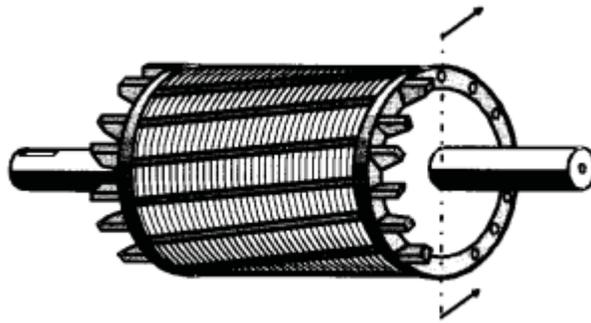


Figura 2-2.3: Rotor de jaula de ardilla.

El rotor de tipo devanado tiene un devanado trifásico semejante al del estator. El devanado está distribuido uniformemente en las ranuras y generalmente está conectado en estrella con tres conductores. Las terminales están conectadas a tres anillos colectores, los cuales giran junto al rotor. Los anillos colectores rotatorios y las escobillas estacionarias asociadas permiten conectar resistores externos en serie al devanado del rotor. Los resistores externos se utilizan principalmente durante el periodo de arranque; en condiciones de funcionamiento normal. [2]

En la figura 2-2.4 se muestra una vista de los diferentes componentes de un motor de jaula de ardilla, donde se puede observar: el estator, rotor, tapas laterales, ventilador de enfriamiento, cojinetes de bolas y la caja de terminales. La función del ventilador es enviar aire al armazón del estator, el cual dispone de nervaduras para mejorar la transferencia de calor.



Figura 2-2.4: Vista de los diferentes componentes de un motor de inducción jaula de ardilla.

2.2.2 Principio de operación.

El principio de operación de un motor de inducción trifásico está basado en la aplicación de la ley de Faraday y la fuerza de Lorentz en un conductor (Leyes descritas en las secciones 2.1.1 y 2.1.2). El comportamiento de un motor de inducción trifásico es sencillo de entender mediante el siguiente ejemplo: si se considera un grupo de conductores de longitud l , cuyos extremos se ponen en cortocircuito mediante dos barras A y B, a lo que se le llamará escalera (Figura 2-2.5) y un imán permanente es colocado sobre la escalera de conductores el cual se mueve con una cierta rapidez hacia la derecha a una velocidad v , para que su campo magnético B pase a través de los conductores. Entonces ocurre la siguiente secuencia de eventos:

- Se induce un voltaje $E=B \cdot l \cdot v$ en cada uno de los conductores mientras el flujo pasa por ellos (ley de Faraday).
- El voltaje inducido produce de inmediato una corriente I , la cual fluye por el conductor debajo de la cara del polo, a través de las barras extremas y regresa a través de los demás conductores.
- Como el conductor que transporta corriente queda en el campo magnético del imán permanente, experimenta una fuerza mecánica (fuerza de Lorentz).
- La fuerza siempre actúa en una dirección para arrastrar el conductor junto con el campo magnético.

Si la escalera conductora está libre para moverse, se acelerará hacia la derecha. Sin embargo, a medida que la escalera adquiere velocidad, el imán móvil sobre esta pasará con menos rapidez sobre los conductores, por lo que el voltaje inducido E y la corriente I disminuirán. En consecuencia, la fuerza que actúa en los conductores también disminuirá. Si la escalera tuviera que moverse a la misma velocidad que el campo magnético, el voltaje inducido E , la corriente I y la fuerza que arrastra la escalera tomarían un valor igual a cero.

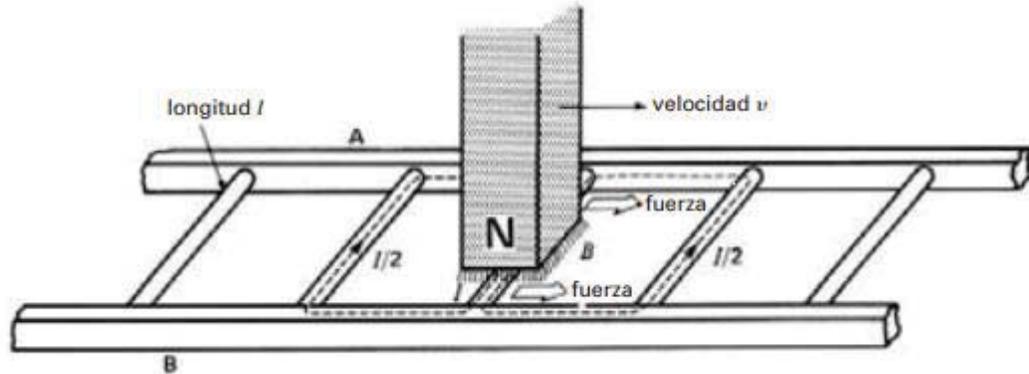


Figura 2-2.5: Imán en movimiento que pasa sobre la escalera de conductores.

Para formar la conocida jaula de ardilla la escalera de conductores deberá cerrarse a sí misma (Figura 2-2.6) y el imán móvil es reemplazado por un campo rotatorio. El campo rotatorio es producido por las corrientes trifásicas que fluyen en los devanados del estator, el cual será descrito en la sección siguiente.

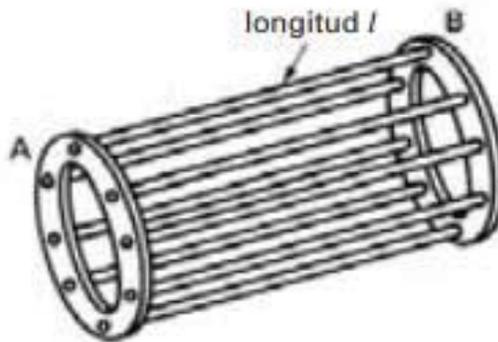


Figura 2-2.6: Escalera de conductores enrollada para formar una jaula de ardilla.

2.2.3 Campo rotatorio.

Si se considera un estator simple que tiene 6 polos salientes, cada uno de los cuales porta una bobina de 5 vueltas (Figura 2-2.7). Las bobinas que se encuentran diametralmente opuestas están conectadas en serie por medio de tres puentes de cierre que conectan respectivamente las terminales a-a, b-b y c-c. Esto crea tres juegos idénticos de devanados AN, BN y CN que están separados mecánicamente 120° entre sí.

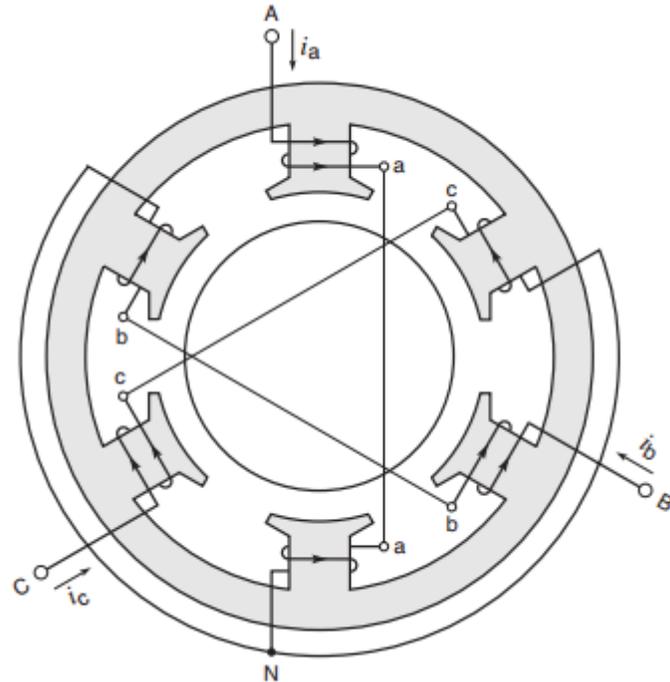


Figura 2-2.7: Estator de 6 polos salientes de terminales A, B y C, conectadas a una fuente trifásica. Las corrientes que fluyen de la línea al neutro se consideran positivas.

Las dos bobinas de cada devanado producen fuerzas magnetomotrices que actúan en la misma dirección.

Los tres juegos de devanados están conectados en estrella (Y), por lo que forman un neutro común (N). A causa de la disposición perfectamente simétrica, las impedancias de línea a neutro son idénticas, en consecuencia, en lo referente a las terminales A, B y C, los devanados conforman un sistema trifásico balanceado.

Si se conecta una fuente trifásica alterna a las terminales A, B y C, las corrientes alternas I_a , I_b e I_c fluirán en los devanados. Las corrientes tendrán el mismo valor, pero con el tiempo estarán desfasadas en un ángulo de 120° . Estas corrientes producen fuerzas magnetomotrices que, a su vez, crean un flujo magnético.

Suponiendo que las corrientes positivas (indicadas por las flechas) siempre fluyen en los devanados de la línea al neutro y, por el contrario, las que fluyen del neutro hacia la línea serán consideradas negativas. Además, para poder trabajar con números, se considerará que la corriente pico por fase es de 10 Amperes [A]. Por lo tanto, cuando $I_a=7$ Amperes [A], las bobinas de la fase A en conjunto producirán una fmm de $7 \text{ [A]} \cdot 10 \text{ vueltas} = 70 \text{ [Amperes} \cdot \text{vueltas]}$ y un valor de flujo correspondiente. Como la corriente es positiva, el flujo es dirigido verticalmente hacia arriba, de acuerdo con la regla de la mano derecha.

A medida que pasa el tiempo, se podrá determinar el valor instantáneo y la dirección de la corriente en cada devanado y establecer de esa manera los patrones de flujo sucesivos. Por lo

tanto, de acuerdo con la Figura 2-2.8, en el instante 1 la corriente I_a tiene un valor de 10 Amperes [A], mientras que I_b e I_c tienen un valor de -5 amperes. La fmm de la fase A es de 10 Amperes [A] · 10 vueltas resultando 100 [Amperes · vueltas], mientras que las fmm de las fases B y C son de 50 amperes-vueltas. La dirección de las fmm depende de los flujos de corriente instantáneos y utilizando la regla de la mano derecha se encontrará la dirección del campo magnético resultante (Figura 1-11).

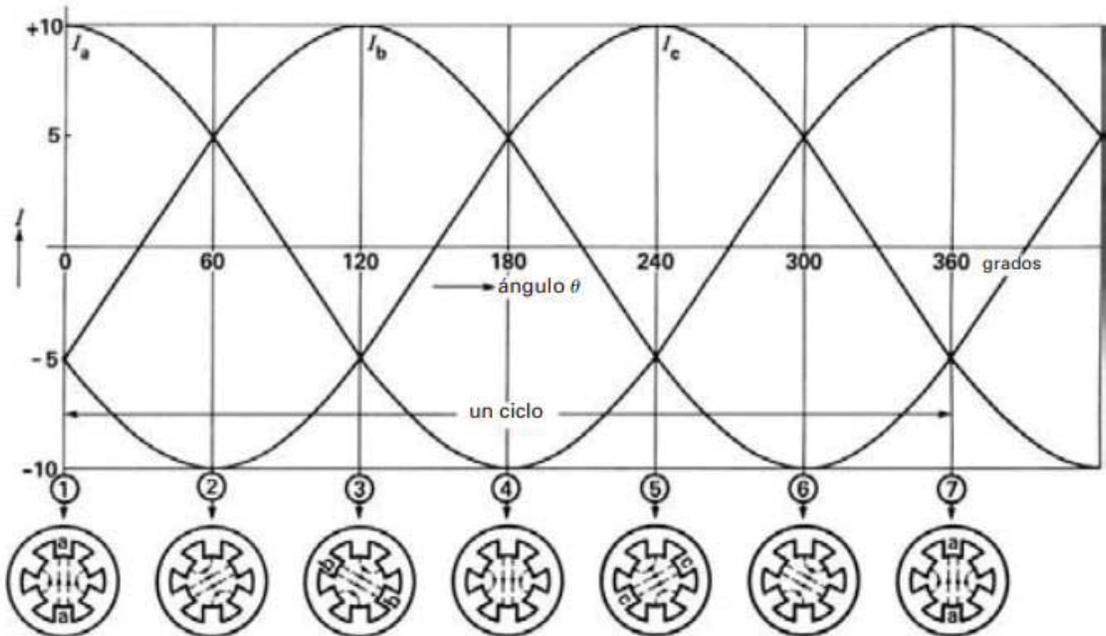


Figura 2-2.8: Valores instantáneos de corrientes y posición del flujo de la figura 2-2.7.

Aplicando el mismo procedimiento descrito anteriormente para cada uno de los instantes sucesivos (2,3,4,5,6 y 7), separados por intervalos de $1/6$ de ciclo, se encuentra que el campo magnético realiza una vuelta completa durante un ciclo (Figura 2-2.9a a Figura 2-2.9f).

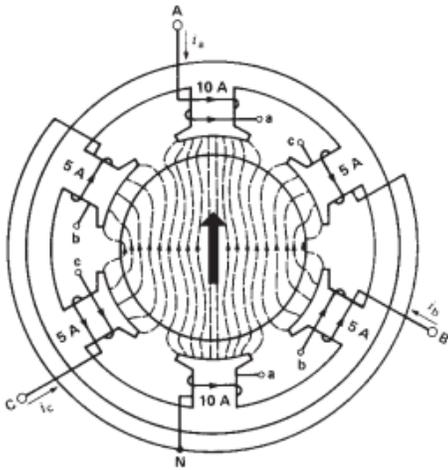


Figura 2-2.9a: Patrón del flujo en el instante 1.

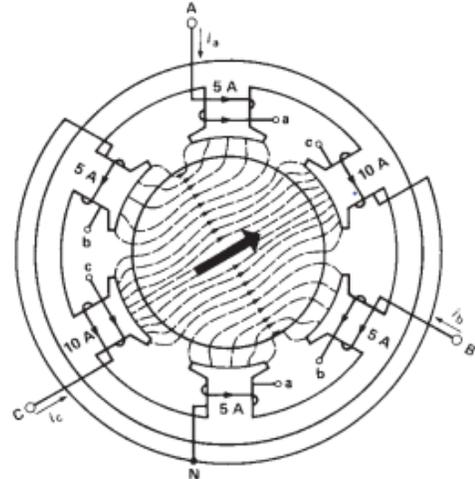


Figura 2-2.9b: Patrón del flujo en el instante 2

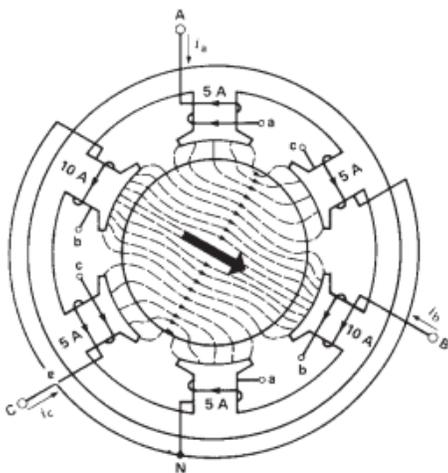


Figura 2-2.9c: Patrón del flujo en el instante 3.

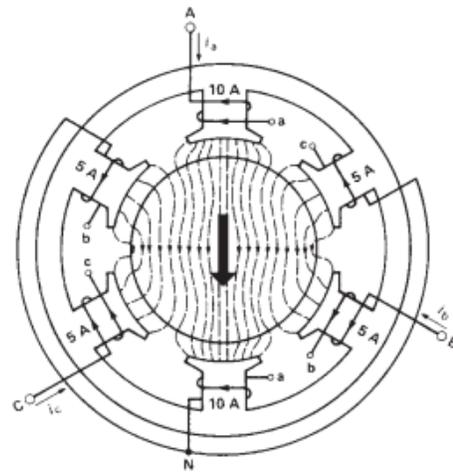


Figura 2-2.9d: Patrón del flujo en el instante 4.

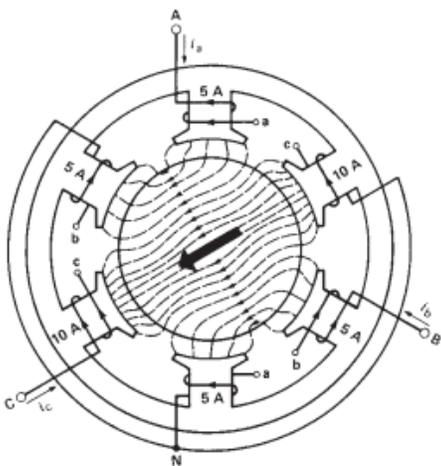


Figura 2-2.9e: Patrón del flujo en el instante 5.

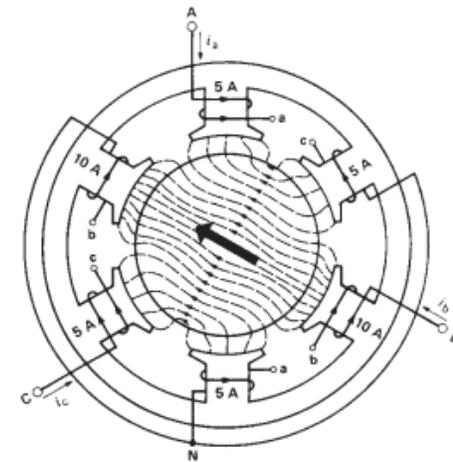


Figura 2-2.9f: Patrón del flujo en el instante 6.

Las corrientes mostradas en la Figura 2-2.8, tienen sus crestas positivas en el orden A-B-C. Esta secuencia de fase produce un campo que gira en el sentido de las manecillas del reloj. Si se quisiera cambiar el sentido de giro del rotor solo bastaría intercambiar dos líneas conectadas al estator, un ejemplo sería una nueva secuencia como A-C-B, en consecuencia, ahora el rotor girará en el sentido opuesto a las manecillas del reloj.

En un principio la mayoría de las máquinas se construyeron con polos salientes, los estatores de los motores modernos tienen diámetros internos lisos.

2.2.4 Número de polos-velocidad síncrona.

Poco tiempo después de la invención del motor de inducción, se descubrió que la velocidad del flujo rotatorio se podría reducir aumentando el número de polos.

Para construir un estator de 4 polos, las bobinas se distribuyen como se muestra en la figura 2-2.10. Los cuatros grupos de fases A idénticos ahora abarcan solo 90° de la circunferencia del estator. Los grupos se conectan en serie de modo que los grupos adyacentes produzcan fuerzas magnetomotrices que actúen en direcciones opuestas. En otras palabras, cuando una corriente I_a fluye en el devanado del estator de la fase A crea cuatro polos N-S alternos.

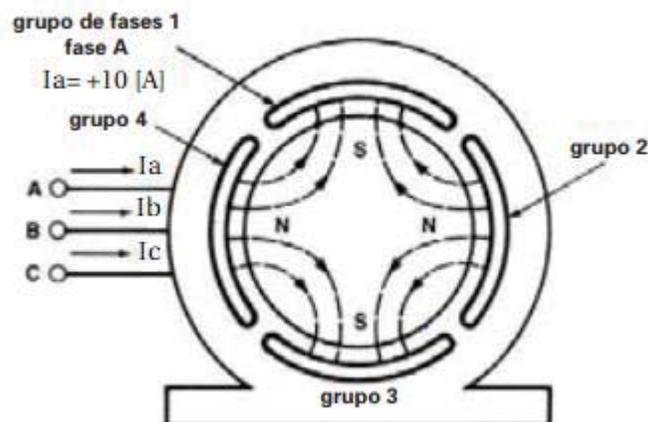


Figura 2-2.10: Estator de 4 polos.

Cuando los devanados se conectan en estrella (Y) a una fuente trifásica, se crea un campo rotatorio de cuatro polos (Figura 2-2.10). Este campo solo girará a la mitad de la velocidad del campo de dos polos, luego se explicará porque sucede esto.

Se podrá incrementar el número de polos tanto como se desee, siempre que existan suficientes ranuras. La figura 2-2-11 muestra un estator trifásico de 8 polos. Cada fase consta de 8 grupos y los grupos de todas las fases producen un campo rotatorio de 8 polos. Cuando se conectan a una fuente de 60 Hertz [Hz], los polos girarán a una velocidad síncrona de 900 [rad/min], la obtención de la velocidad síncrona será explicada a continuación.

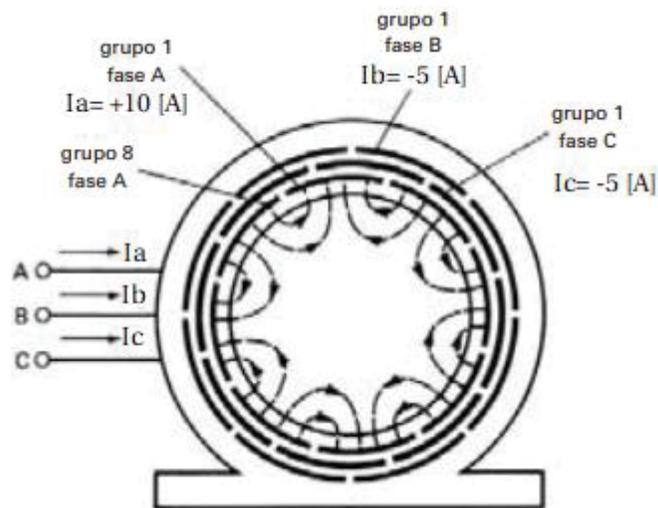


Figura 2-2.11: Estator trifásico de 8 polos.

En la figura 2-2.11 cada grupo de fases abarca un ángulo mecánico de 45° ($360/8$). Se supondrá que la corriente en la fase A se encuentra a su valor positivo máximo. En el flujo magnético se centra entonces en la fase A y los polos N-S están colocados como se muestra en la Figura 2-2.12, medio ciclo después la corriente en la fase A alcanzará su valor negativo máximo. El patrón de flujo será igual que antes, excepto que todos los polos N se habrán convertido en polos S y viceversa (Figura 2-2.13)

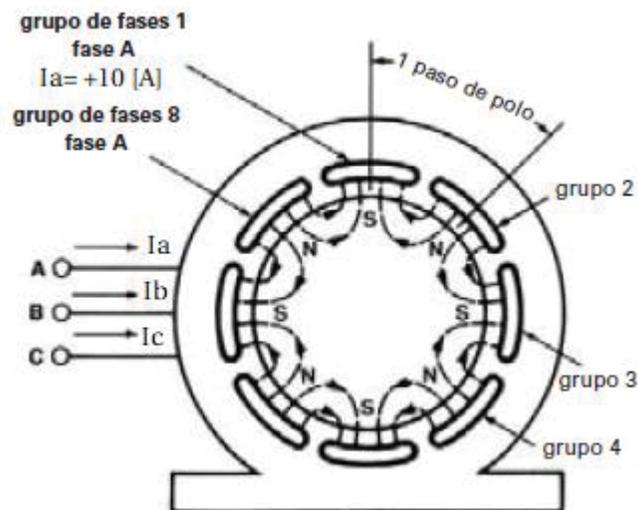


Figura 2-2.12: Patrón de flujo cuando la corriente en la fase A está en su valor positivo máximo.

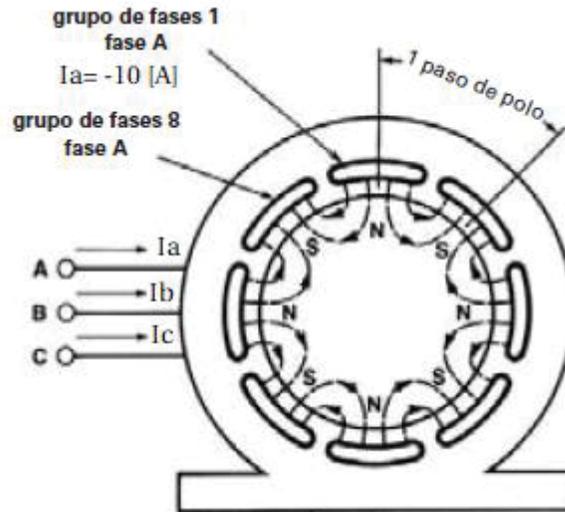


Figura 2-2.13: Patrón del flujo cuando la corriente en la fase A está en su valor negativo máximo.

Al comparar las Figuras 2-2.12 y Figura 2-2.13, se puede apreciar que el campo magnético se desplazó en un ángulo de 45° . El flujo se mueve 45° , por lo que requiere 8 medios ciclos para realizar una vuelta completa. Por tanto, en un sistema de 60 [Hz], el tiempo requerido para realizar una vuelta es de $4 \cdot 60^{-1} = 1/15$ [s]. Como resultado el flujo gira a razón de 15 [rad/s] o 900 [rad/min].

Así, la velocidad del campo rotatorio depende la frecuencia de la fuente de alimentación y del número de polos que tenga el estator. Por lo tanto, la ecuación que rige la velocidad síncrona es la siguiente:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2-4)$$

Donde:

- N_s : velocidad síncrona, su unidad de medida son los radianes por min [rad/min].
- F : frecuencia de la fuente de alimentación, su unidad son los Hertz [Hz].
- P : número de polos.

De la ecuación mostrada anteriormente, se puede comprobar que la velocidad síncrona aumenta con la frecuencia y disminuye con el número de polos.

2.2.5 Deslizamiento y velocidad de deslizamiento.

El deslizamiento s de un motor de inducción, corresponde a la diferencia entra la velocidad síncrona y la velocidad del rotor, expresada como un porcentaje de la velocidad síncrona. El deslizamiento por unidad está dado por la ecuación:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2-5)$$

Donde:

- S: deslizamiento.
- n_s : velocidad síncrona, su unidad de medida son los radianes por minuto [rad/min].
- n: velocidad del rotor, su unidad de medida son los radianes por minuto [rad/min].

El deslizamiento es prácticamente cero sin carga y es igual a 1 cuando el rotor está bloqueado.

2.2.6 Voltaje y frecuencia inducidos en el rotor.

El voltaje y la frecuencia inducidos en el rotor dependen del deslizamiento. Están dados por las siguientes ecuaciones:

$$f_2 = sf \quad (2-6)$$

$$E_2 = sE_{oc} \quad (2-7)$$

Donde:

- F_2 : frecuencia de voltaje y corriente en el rotor, su unidad de medida son los Hertz [Hz].
- F: frecuencia de la fuente de alimentación conectada al estator, su unidad de medida son los Hertz [Hz].
- S: deslizamiento.
- E_2 : voltaje inducido en el rotor con deslizamiento s, su unidad de medida son los Volts [V].
- E_{oc} : voltaje de circuito abierto en el rotor cuando está en reposo, su unidad de medida son los Volts [V].

En un motor de jaula de ardilla, el voltaje de circuito abierto es el voltaje que sería inducido en las barras del rotor si éstas estuvieran desconectadas de los anillos extremos. En el caso de un motor de rotor devanado, el voltaje de circuito abierto es $1/\sqrt{3}$ veces el voltaje entre los anillos colectores con el circuito abierto.

La ecuación 2-6 es siempre válida, pero la ecuación 2-7 es válida solo si el flujo rotatorio permanece constante. Sin embargo, entre cero y plena carga, el valor real de E_2 es sólo un poco menor que el valor dado por la ecuación.

2.2.7 Par o momento de torsión contra velocidad.

El par o momento de torsión desarrollado por un motor depende de su velocidad, pero la relación entre los dos no se puede expresar mediante una simple ecuación. Por consiguiente, es preferible mostrar la relación en forma de una curva. La figura 2-2.14 muestra la curva de momento de torsión-velocidad de un motor de inducción trifásico convencional cuyo momento de torsión nominal a plena carga es T . El momento de torsión de arranque es $1.5T$ y el momento de torsión máximo es de $2.5T$. El momento de torsión de aceleración es el momento de torsión mínimo desarrollado por el motor mientras está acelerando desde el reposo hasta el momento de torsión máximo.

A plena carga el motor funciona a una velocidad n . Si la carga mecánica se incrementa un poco, la velocidad se reducirá hasta que el momento de torsión del motor sea igual al momento de torsión de la carga. En cuanto los dos momentos de torsión estén en equilibrio, el motor girará a una velocidad constante pero un poco más baja. Sin embargo, si el momento de torsión de la carga excede los $2.5T$ el motor se detendrá de inmediato.

Los motores pequeños (15 hp o menos) desarrollan su par o momento de torsión máximo a una velocidad n_d de aproximadamente 80% de la velocidad síncrona. Los motores grandes (1500 hp y más) alcanzan su momento de torsión máximo a aproximadamente 98% de su velocidad síncrona. [2]

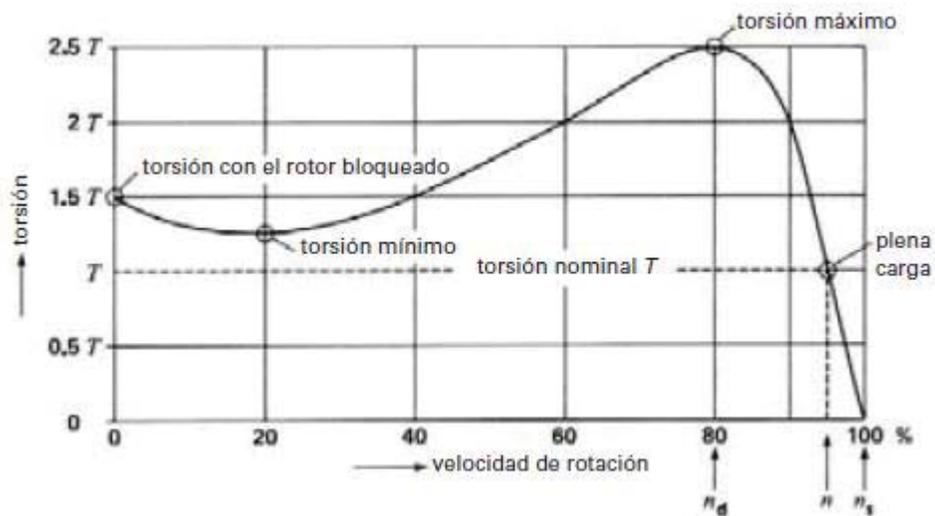


Figura 2-2.14: Curva de par o momento de torsión-Velocidad típica de un motor de inducción trifásico de jaula de ardilla.

2.2.8 Motor de rotor devanado.

En términos de costos un motor de rotor devanado tiene un valor más elevado que un motor de jaula de ardilla, aunque el motor de rotor devanado ofrece las siguientes ventajas:

- La corriente con el rotor bloqueado se puede reducir drásticamente insertando tres resistores externos en serie con el rotor. No obstante, el par o momento de torsión con el rotor bloqueado seguirá siendo alto, e incluso más alto que el de un motor de jaula de ardilla de potencia equivalente.
- Se puede variar la velocidad variando los resistores externos del rotor.
- El motor es ideal para acelerar cargas de alta inercia, las cuales requieren mucho tiempo para adquirir velocidad.

La Figura 2-2.16 muestra un diagrama del circuito utilizado para arrancar un motor de rotor devanado. Los devanados del rotor están conectados a tres resistores externos conectados en estrella (Y) por medio de un juego de anillos colectores y escobillas. En condiciones de rotor bloqueado, los resistores variables se ajustan a su valor más alto. Conforme el motor se acelera, la resistencia se reduce gradualmente hasta que se alcanza la velocidad de plena carga, momento en el cual se ponen en cortocircuito las escobillas. Seleccionando apropiadamente los valores de resistencia, se podrá producir un momento de torsión de alta aceleración con una corriente en el estator que nunca excede el doble de la corriente a plena carga.

Para arrancar motores grandes a menudo se utiliza reóstatos líquidos porque son fáciles de controlar y tienen una gran capacidad térmica. Un reóstato líquido se compone de tres electrodos sumergidos en un electrolito apropiado. Para variar su resistencia, simplemente se hace variar el nivel del electrolito que rodea los electrodos. La gran capacidad térmica del electrolito limita la elevación de la temperatura. Por ejemplo, en una aplicación se utiliza un reóstato líquido junto con un motor de rotor devanado de 1260 [KW] para acelerar una gran máquina síncrona. [2]

También se puede regular la velocidad de un motor de rotor devanado variando la resistencia del reóstato. A medida que se incrementa la resistencia, la velocidad se reducirá. Este método de control de velocidad tiene la desventaja de que se disipa una gran cantidad de calor en los resistores, por lo tanto, la eficiencia es baja. Además, con un ajuste dado del reóstato, la velocidad varía considerablemente si la carga mecánica varía.

La capacidad de potencia de un motor de rotor devanado auto enfriado depende de la velocidad a la cual opera. Por lo tanto, con la misma elevación de temperatura, un motor que puede desarrollar 100 [KW] a 1800 [r/min] suministrará unos 40 [Kw] a 900 [r/min]. Sin embargo, si el motor es enfriado con un ventilador externo, puede suministrar 50 [kw] a 900 [r/min]. [2]

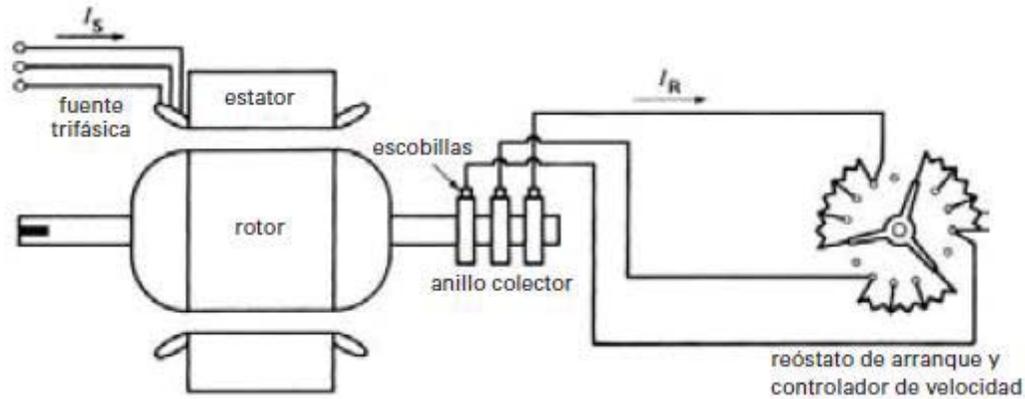


Figura 2-2.16: Motor de rotor devanado, con resistores externos conectados a sus tres anillos colectores.

2.2.9 Circuito equivalente del motor de inducción.

La construcción de un motor de inducción trifásico de rotor devanado es muy similar a la de un transformador trifásico. Por lo tanto, el motor tiene 3 devanados primarios idénticos y 3 devanados secundarios idénticos. Por su perfecta simetría, se podrá considerar un solo devanado primario y un solo devanado secundario para analizar el comportamiento del motor.

Cuando el motor se encuentra en reposo, actúa exactamente como un transformador, por lo que su circuito equivalente es igual que el de un transformador (Figura 2-2.17).

Se supondrá una conexión en estrella (Y) para el estator y el rotor y una relación de vueltas 1:1. Los parámetros del circuito, por fase, serán descritos a continuación:

- E_g : voltaje de fuente de alimentación línea a neutro, su unidad de medida son los Volts [V].
- r_1 : resistencia del devanado del estator, su unidad de medida son los Ohm [Ω].
- x_1 : reactancia de dispersión del estator, su unidad de medida son los Ohm [Ω].
- x_2 : reactancia de dispersión del rotor, su unidad de medida son los Ohm [Ω].
- r_2 : resistencia del devanado del rotor, su unidad de medida son los Ohm [Ω].
- R_x : resistencia externa, conectada efectivamente entre un anillo colector y el neutro del rotor, su unidad de medida son los Ohm [Ω].
- X_m : reactancia magnetizante, su unidad de medida son los Ohm [Ω].
- R_m : resistencia cuyas pérdidas corresponden a las pérdidas en el hierro y pérdidas por fricción de rodamiento y por fricción del aire (pérdidas mecánicas), su unidad de medida son los Ohm [Ω].
- T: transformador ideal con una relación de vueltas de 1:1.

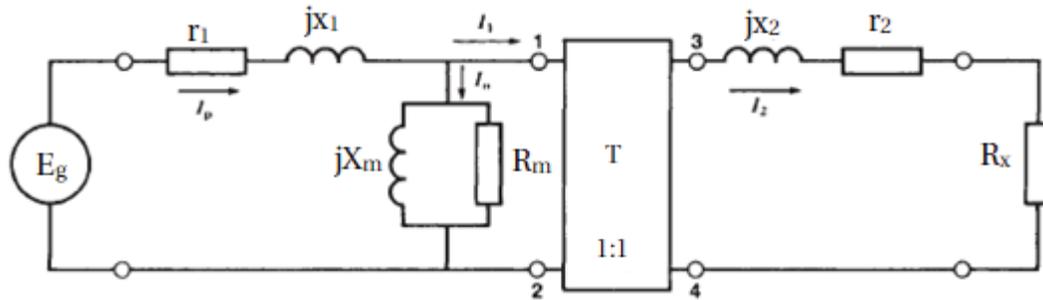


Figura 2-2.17: Circuito equivalente por fase de un motor de inducción de rotor devanado en reposo.

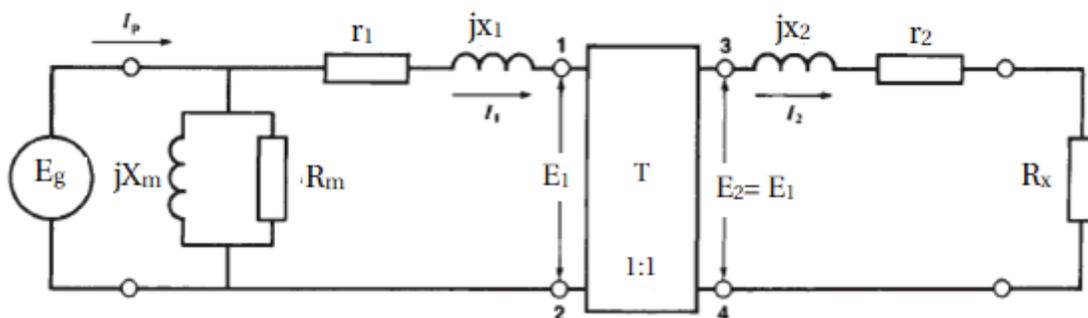


Figura 2-2.18: Circuito equivalente por fase aproximado, válido para motores de más de 2 [HP].

En el caso de un transformador trifásico convencional, se justificará eliminar la rama magnetizante compuesta de jX_m y R_m porque la corriente de excitación I_0 es insignificante comparada con la corriente de carga I_p . Sin embargo, en un motor no sucede lo mismo, I_0 puede ser hasta de 40% de I_p a causa del entrehierro. Por consiguiente, no podemos eliminar la rama magnetizante. Sin embargo, en el caso de motores de más de 2 [HP], se podrá cambiar a las terminales de entrada, como se muestra en la Figura 2-2.18. Esto simplifica en gran medida la ecuación que describe el comportamiento del motor, sin afectar la precisión.

Se supondrá que el motor funciona con un deslizamiento s , lo que significa que la velocidad del rotor es $ns(1-s)$, donde ns es la velocidad síncrona. Esto modificará los valores de E_1 , I_1 , E_2 e I_2 , en los lados primario y secundario del transformador ideal T. Además, la frecuencia en el devanado secundario será sf , donde f es la frecuencia de la fuente de alimentación E_g . La figura 2-2.19 muestra estas nuevas condiciones de operación.

En el lado secundario, la amplitud del voltaje inducido E_2 sería igual a E_1 (la relación de vueltas es 1:1) si el motor estuviera estacionario. Pero como el deslizamiento es s , el voltaje real inducido es $E_2 = s \cdot E_1$.

La frecuencia es sf y está cambia la impedancia de la reactancia de dispersión del secundario de jX_2 a jsX_2 . Como los resistores no son sensibles a la frecuencia los valores de r_2 y R_x

no cambian. Si se juntan ambas resistencias para formar una sola resistencia secundaria tendría el siguiente valor:

$$R_2 = r_2 + R_x \quad (2-8)$$

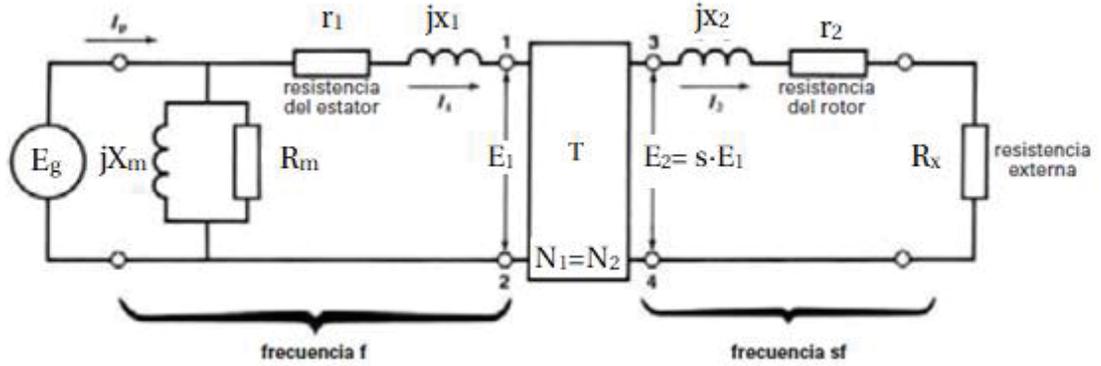


Figura 2-2.19: Circuito equivalente de un motor rotor devanado funcionando con un deslizamiento s . La frecuencia de los voltaje y corrientes en el estator es f . Pero los voltajes y corrientes en el rotor son sf .

Los detalles del circuito secundario se muestran en la figura 2-2.20a y la corriente I_2 resultante es:

$$I_2 = \frac{sE_1}{R_2 + jsx_2} = \frac{sE_1 \angle -\beta}{\sqrt{R_2^2 + (sx_2)^2}} \quad (2-9)$$

Donde:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{sx_2}{R_2} \quad (2-10)$$

El diagrama fasorial correspondiente se muestra en la figura 2-2.20b. Es importante entender que este diagrama fasorial se relaciona con la frecuencia sf . Por lo tanto, no se puede incorporar al diagrama fasorial del lado primario, donde la frecuencia es f . No obstante, existe una relación directa entre la corriente I_2 (frecuencia sf) del rotor y la corriente I_1 (frecuencia f) del estator. De hecho, el valor absoluto de I_1 es exactamente igual que el de I_2 . Además, el ángulo de fase β entre E_1 e I_1 es exactamente igual que entre E_2 e I_2 . Esto permite trazar el diagrama fasorial para E_1 e I_1 como se muestra en la figura 2-2.21.

Resumiendo:

- El valor efectivo de I_1 es igual al valor efectivo de I_2 , aun cuando sus frecuencias son diferentes.
- El valor efectivo de E_1 es igual al valor efectivo de E_2 dividido entre el deslizamiento s .
- El ángulo de fase E_1 e I_1 es igual que entre E_2 e I_2 .

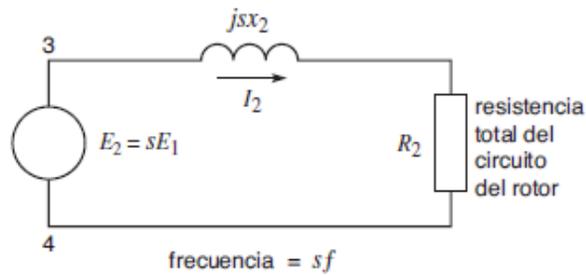


Figura 2-2.20a: Circuito equivalente del rotor; E_2 e I_2 tienen una frecuencia igual a sf .

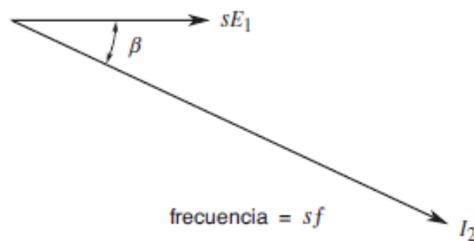


Figura 2-2.20b: Diagrama fasorial que muestra la corriente retrasada en un ángulo β con respecto al voltaje.

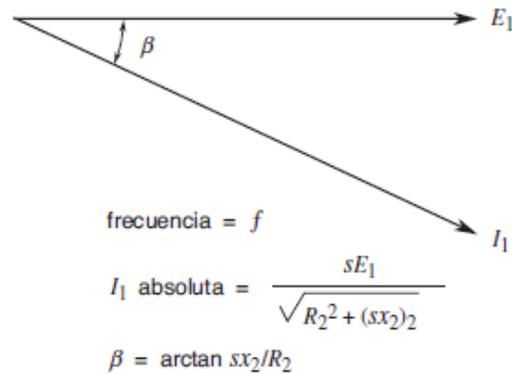


Figura 2-2.21: Voltaje y corriente del estator separadas por el mismo ángulo de fase β , aun cuando la frecuencia es diferente.

Con respecto al lado primario la corriente tendrá la siguiente ecuación:

$$I_1 = I_2 = \frac{sE_1}{R_2 + jsX_2} \quad (2-11)$$

$$I_1 = \frac{E_1}{\frac{R_2}{s} + jX_2} = \frac{E_1}{Z_2} \quad (2-12)$$

Por consiguiente, la impedancia Z_2 vista entre las terminales primarias 1,2 del transformador igual es:

$$Z_2 = \frac{E_1}{I_1} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (2-13)$$

Como resultado, se podrá simplificar el circuito de la figura 2-2.19 de manera que quede como el mostrado en la figura 2-2.22. Ahora se podrá juntar las reactancias de dispersión jX_1 y jX_2 para crear una sola reactancia de dispersión total jX , que es igual a la reactancia de dispersión del motor desplazada al lado del estator.

El circuito equivalente final del motor de inducción de rotor devanado se muestra en la figura 2-2.23. En este diagrama, los elementos del circuito son fijos, excepto la resistencia R_2/s . Su valor depende del deslizamiento y por consiguiente de la velocidad del motor. Así, el valor de R_2/s variará de R_2 a infinito conforme el motor pase del arranque ($s=1$) a la velocidad síncrona ($s=0$).

Este circuito equivalente de un motor de inducción de rotor devanado es tan similar al de un transformador que no es extraño que el motor de inducción de rotor devanado también se conozca como transformador rotante.

El circuito de un motor de inducción de jaula de ardilla es igual, excepto que R_2 es igual a la resistencia equivalente r_2 del rotor, solo desplazada al estator, donde no hay ningún resistor externo.

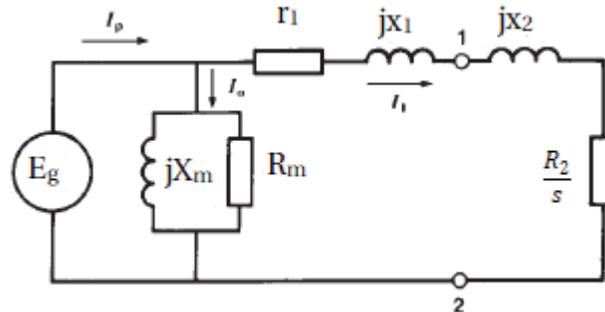


Figura 2-2.22: Circuito equivalente de un motor de rotor devanado desplazado al lado primario (estator).

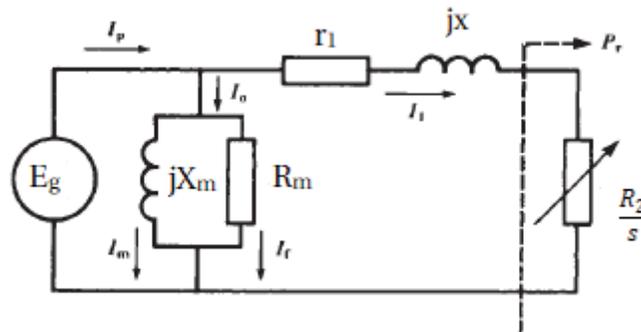


Figura 2-2.23: Circuito equivalente final de un motor de inducción de rotor devanado. Las reactancias de dispersión primera y secundaria x_1 y x_2 se combinan para formar una reactancia de dispersión total x .

2.3 Matlab-Simulink.

Para las simulaciones que se mostrarán en capítulos posteriores se utilizará el software Matlab, el cual dentro su amplia variedad de funciones que ofrece se encuentra para utilizar Matlab-Simulink.

2.3.1 Matlab-Simulink.

Matlab es un software matemático, la plataforma de Matlab está optimizada para resolver problemas científicos y de ingeniería. El lenguaje de MATLAB, basado en matrices, es la forma más natural del mundo para expresar las matemáticas computacionales. Las gráficas integradas facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. Una vasta biblioteca de herramientas (Toolboxes) integradas permite empezar a trabajar inmediatamente con algoritmos esenciales para su dominio. El entorno de escritorio invita a experimentar, explorar y descubrir. Todas estas herramientas y funciones de MATLAB están probadas rigurosamente y diseñadas para trabajar juntas.

Simulink es un entorno de simulación y diseño basado en modelos para sistemas dinámicos e integrados, integrados con MATLAB. Simulink, también desarrollado por MathWorks, es una herramienta de lenguaje de programación gráfica de flujo de datos para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos de multidominio. Básicamente es una herramienta gráfica de diagramación de bloques con un conjunto de bibliotecas de bloques personalizables.

2.3.2 Descripción del bloque de máquina asíncrona de Matlab-Simulink.

El bloque de máquina asíncrona (Figura 2-3.1) implementa una máquina asíncrona trifásica (rotor bobinado, jaula de ardilla simple o jaula de ardilla doble). Funciona en modo generador y motor. El modo de operación está determinado por el signo del par mecánico:

- Si el par mecánico es positivo, la máquina actúa como motor.
- Si el par mecánico es negativo, la máquina actúa como generador.

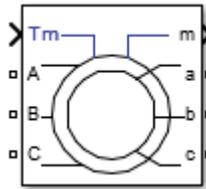


Figura 2-3.1: Bloque de máquina asíncrona.

2.4 Materiales magnéticos.

En esta sección se hablará de las propiedades que poseen los materiales ferromagnéticos y su comportamiento cuando están en presencia de un campo magnético. Luego se hablará del concepto de histéresis presente en estos materiales.

2.4.1 Ferromagnetismo.

En cuanto a aplicaciones tecnológicas el tipo más importante de magnetismo lo presentan los materiales ferromagnéticos. Esta denominación la reciben las sustancias que presentan imanaciones grandes aún en presencia de campos magnéticos muy débiles. A temperatura ambiente y por encima de ella tres elementos son ferromagnéticos: hierro, cobalto y níquel. La mayoría de las aleaciones y compuestos ferromagnéticos contienen uno o más de los elementos mencionados anteriormente o también manganeso, el cual pertenece al mismo grupo de elementos de transición en la tabla periódica. [1]

La facilidad de imanación de estas sustancias procede de las fuerzas mecánico-cuánticas, que tienden a alinear paralelamente entre sí a los espines atómicos próximos, aún en ausencia de un campo magnético aplicado. La alineación no se produce en todo el volumen del material, sino

que se encuentra por zonas, denominadas dominios magnéticos, los cuales pueden tener volúmenes comprendidos entre 10^{-6} y 10^{-2} [cm³], conteniendo entre 10^9 y 10^{15} átomos.

Cuando una muestra de material ferromagnético se coloca dentro de un campo magnético, los dominios tienden a alinearse, de tal forma que sus campos magnéticos se suman al campo externo, resultando un campo total más fuerte. Este efecto se puede observar en la Figura 2-4.1, la cual relaciona la inducción B resultante en función de la intensidad de campo magnético H.

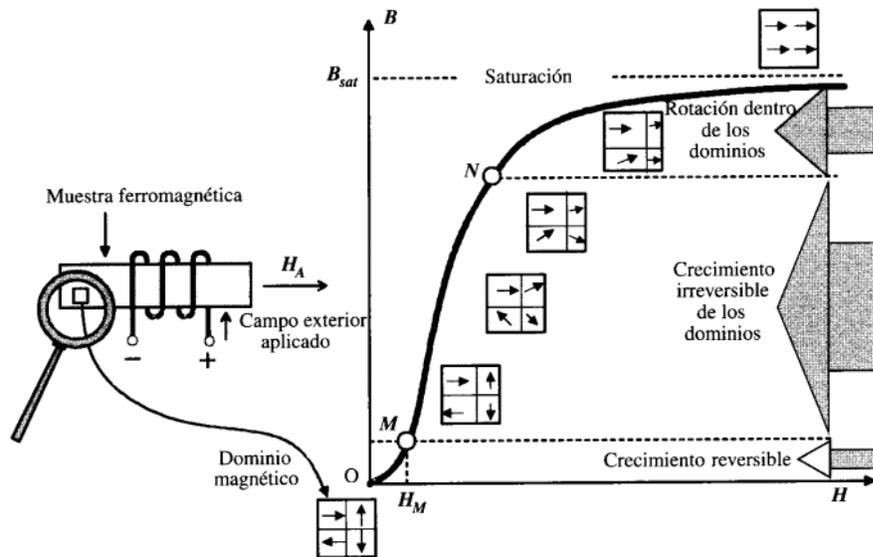


Figura 2-4.1: Curva de magnetización del hierro.

En un comienzo la muestra se encuentra en un estado magnéticamente neutro, debido a que los dominios tienen alineaciones orientadas al azar, resultando un momento magnético total nulo. Al aplicar una intensidad de campo magnético H_M de pequeño valor, se produce un desplazamiento de las paredes que separan los dominios, ensanchando estos, a costa de los que están orientados menos favorablemente, los cuales se contraen. Este crecimiento es reversible, y si se elimina el campo H_A exterior, la densidad de flujo también desaparece. Si se va elevando el valor de la intensidad de campo H, los dominios continúan aumentando su volumen, a la par que van produciéndose rotaciones bruscas para que sus momentos magnéticos sigan la dirección más próxima a H. Este movimiento es irreversible, y si deja de aplicarse la excitación magnética, permanece la alineación de los dominios que han rotado. Si se sigue incrementando el valor de H, el proceso de alineación continua gradualmente, extendiéndose simultáneamente a los dominios y a los momentos magnéticos dentro de los mismos, de tal forma que cuando los dominios están alineados totalmente se dice que el material se ha saturado, resultando una permeabilidad relativa unitaria. [1]

La Figura 2-4.2 muestra algunas formas de curvas de magnetización (imanación) para diversos materiales empleados en la construcción de máquinas eléctricas. Se puede observar que

la chapa magnética posee mejores cualidades magnéticas que el hierro fundido o que el acero fundido, ya que para la misma excitación magnética H se consiguen inducciones más elevadas.

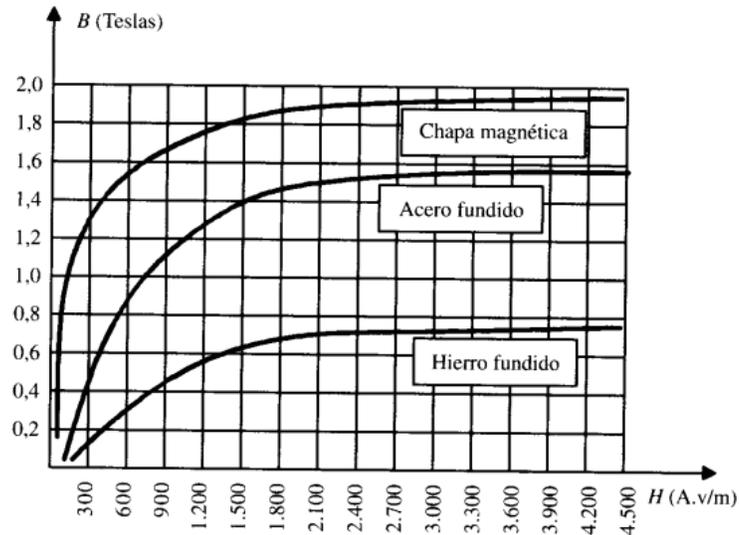


Figura 2-4.2: Curvas de imanación de diversos materiales.

2.4.2 Ciclo de histéresis.

En la realidad, el valor de la densidad de flujo B que se produce en un material ferromagnético debido a una determinada excitación magnética H no es una función uniforme como se muestra en la figura 2-4.2, sino que depende además de la historia del material, esto hace alusión a la histéresis. Para observar este fenómeno, se considera una muestra ferromagnética que se introduce dentro de una bobina como se muestra en la Figura 2-4.3a. En la figura 2-4.3b se muestra la curva $B=f(h)$ que se obtiene al aplicar excitaciones magnéticas H de diferente magnitud y signo. El material comienza desmagnetizado indicado por el punto a de la figura 2-4.3b y se aplica un campo H creciente introduciendo en la bobina una corriente por ejemplo en la dirección indicada en la figura 2-4.3a, hasta que se alcanza el punto b. Cuando se disminuye la intensidad de campo H , disminuye también el valor de la densidad de flujo B , pero toma un valor diferente al experimentado inicialmente. Al disminuir la intensidad de campo H a cero persiste una cierta magnetización (punto c). Al valor de B en este punto se le conoce con el nombre de magnetismo o inducción remanente y constituye el estado de magnetización permanente de la muestra. El punto d determina el campo coercitivo, que es el campo opuesto que resulta necesario aplicar para desmagnetizar la muestra. Si se continua hasta el punto e y después se invierte el sentido de cambio de H , se formará una curva cerrada la cual corresponde al ciclo de histéresis.

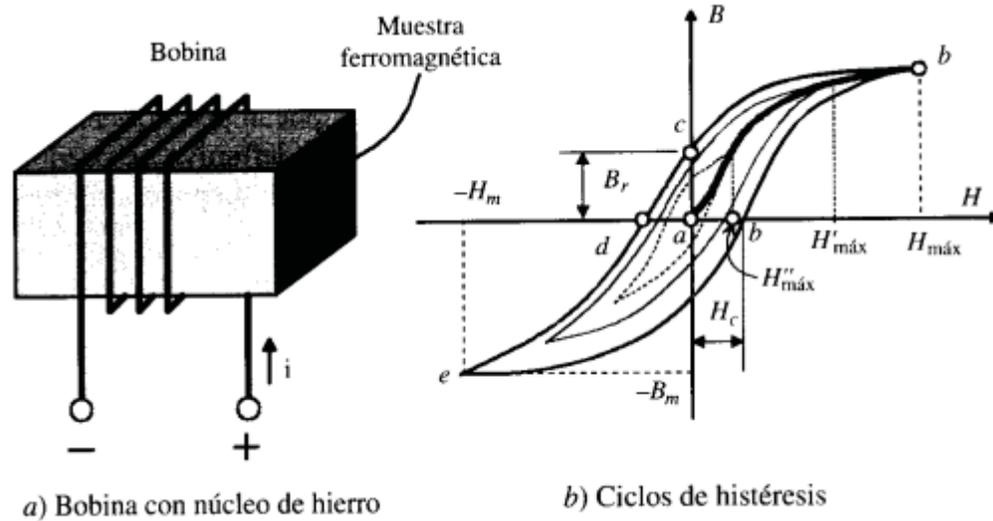


Figura 2-4.3: Ciclo de histéresis.

La histéresis en algunos materiales resulta muy grande, la cual permite la existencia de imanes permanentes muy potentes. La condición esencial de todo imán permanente es tener una estabilidad perfecta, es decir, guarda mucho tiempo sin variación sus propiedades magnéticas. Debe tener un magnetismo remanente intenso y una fuerza coercitiva importante. Las sustancias con mucha histéresis se denominan duras, mientras que las que presentan poca se denominan blandas.

En la mayoría de las máquinas eléctricas como transformadores, motores, generadores, interesa que el núcleo posea un ciclo de histéresis lo más estrecho posible. Esto se debe a que se reducen las pérdidas por histéresis.

3 Ensayo de laboratorio.

En este capítulo se describirá el proceso realizado en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, detallando los instrumentos y máquinas utilizadas en el ensayo, además de entregar los resultados obtenidos en estos ensayos. Los ensayos estarán enfocados principalmente en un motor de inducción trifásico de 6,5 [Hp].

3.1 Ensayo de motor de inducción trifásico con carga.

En este ensayo de laboratorio se utilizó un motor de inducción rotor devanado trifásico de 6,5 [Hp], el cual fue alimentado por una fuente trifásica, la cual fue ajustada de tal forma de entregar 220 [Vrms] por fase al estator de la máquina, en el rotor se conectó un banco de resistencias de 4,2 [Ω] por fase con el fin de controlar el valor pico de las corrientes en la partida del motor, una vez que el motor llegase a su estado estacionario el banco de resistencia fue llevado a cero. El eje del motor de inducción trifásico (máquina de color gris) se acopla al eje de un generador de corriente continua (máquina de color celeste) como se muestra en la Figura 3-1.1, el campo del generador de corriente continua se conecta a una fuente de voltaje continua para excitar el campo y a la armadura se conecta un banco de ampollas (Figura 3-1.2), las cuales a medida que son encendidas provocan que el eje se vuelva más pesado y se pueda medir el torque que la carga está ejerciendo, el método para medir el torque utilizando un generador de corriente continua recibe el nombre de dínamo basculante. El torque ejercido por la carga es estimado a través de una barra de metal que se sitúa en el armazón del generador de corriente continua, esta barra posee pequeñas hendiduras con el fin de situar pesos sobre ella (pesos brindados por el laboratorio con un peso específico en N), dichas hendiduras poseen marcas de distancia útiles para el cálculo del torque. Mientras se desarrollaba el ensayo de laboratorio se debía prestar atención al valor de la corriente en el estator, la cual no debía sobrepasar los 11,8[Arms] y la corriente del rotor no debía sobrepasar los 18 [Arms]. En cuanto al generador de corriente continua, la corriente de campo no debía sobrepasar los 0,7 [A] y la corriente de armadura no debía sobrepasar los 13 [A].



Figura 3-1.1: Motor de inducción trifásico acoplado con un generador de corriente continua.



Figura 3-1.2: Banco de ampolletas.

3.2 Resultados del ensayo motor de inducción trifásico con carga.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en el ensayo del motor de inducción trifásico con carga, medidos a través de un Samte conectado al motor de inducción trifásico, instrumento que permite registrar las variables eléctricas de interés.

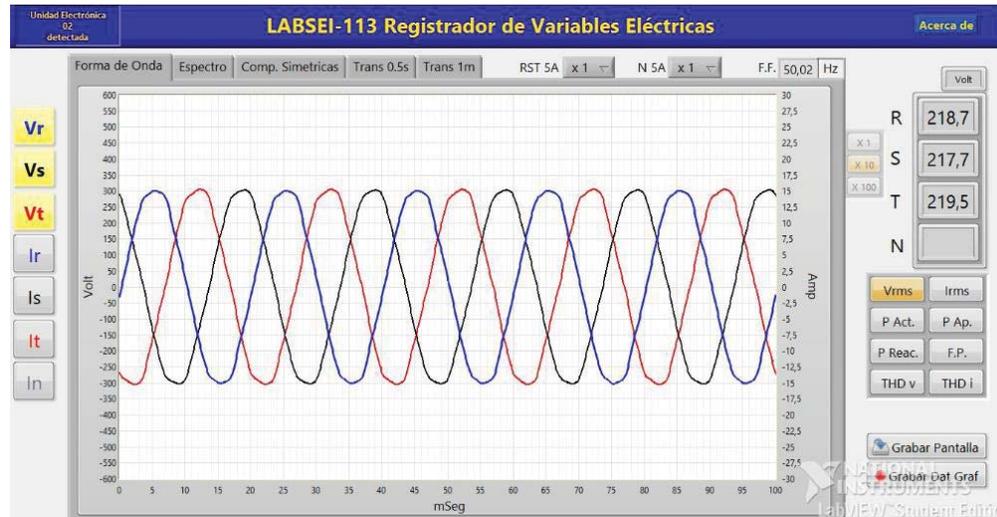


Figura 3-2.1: Forma de onda de voltaje y valores RMS de fuente de alimentación.

Se puede observar en la imagen 3-2.1 la forma de onda de voltaje de las tres fases conectadas al estator del motor de inducción trifásico, midiendo voltajes RMS de valores 218,7[V] en la fase R, 217,7[V] en la fase S y 219,5[V] en la fase T.



Figura 3-2.2: Componentes simétricas.

Se puede observar en la imagen 3-2.2 el valor de las tensiones y corrientes RMS, además el valor en grados de estas, finalmente se muestran los valores de las componentes simétricas de las tensiones y corrientes.



Figura 3-2.3: Formas de onda de corriente y valor RMS en el estator.

Se puede observar en la imagen 3-2.3 la forma de onda de las corrientes, donde se puede apreciar que las ondas no poseen una forma sinusoidal perfecta lo cual indica la presencia de armónicos en el sistema. El valor RMS de las corrientes de cada una de las fases del estator del motor de inducción trifásico fue de 8,17 [A] en la fase A, 7,87 [A] en la fase S y 8,4 [A] en la fase T.



Figura 3-2.4: Espectro de onda de corriente fase R y THD(v) en las fases R, S y T.

Se puede observar en la figura 3-2.4 el espectro de onda de corriente de la fase R, además se muestra el valor de la distorsión armónica de voltaje de cada fase, siendo 3,2% en la fase R, 2,6% en la fase S y 3,3% en la fase T.

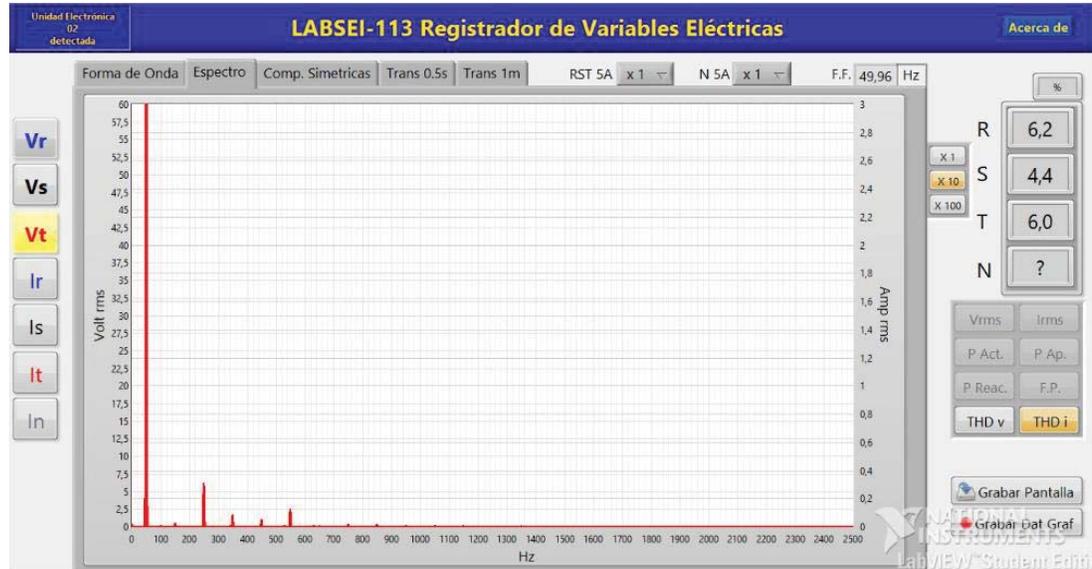


Figura 3-2.5: Espectro de onda de voltaje fase T y THD(i) en las fases R, S y T.

Se puede observar en la imagen 3-2.5 el espectro de onda de la distorsión armónica de voltaje de la fase T, además se muestra el valor de la distorsión armónica de corriente, siendo el de la fase R 6,2%, 4,4% en la fase S y 6% en la fase T.

Con respecto a la velocidad y torque mecánico medido, se llegaron a valores aproximados de 1450 [RPM] y 11 [Nm] respectivamente. El torque mecánico medido no es del todo exacto, ya que el método de medición es bastante variable, no se puede llegar a un valor de total confianza al realizar el ensayo de laboratorio.

3.3 Resultados de ensayo de desconexión de una fase de alimentación en el motor de inducción trifásico aplicando una baja carga.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en el ensayo del motor de inducción trifásico, donde se realiza una falla en el estator desconectando una fase de alimentación mediante un interruptor proporcionado por el laboratorio de máquinas, ensayo que se realiza con una baja carga, resultados medidos a través de un Samte conectado al motor de inducción trifásico, instrumento que permite registrar las variables eléctricas.

En este ensayo se tenía especial cuidado en las corrientes del estator del motor de inducción trifásico, ya que al desconectar una fase de alimentación la corriente aumenta su valor agresivamente, es por esto que al ir añadiendo carga se ponía bastante atención al valor de corriente RMS que el motor estaba experimentando.

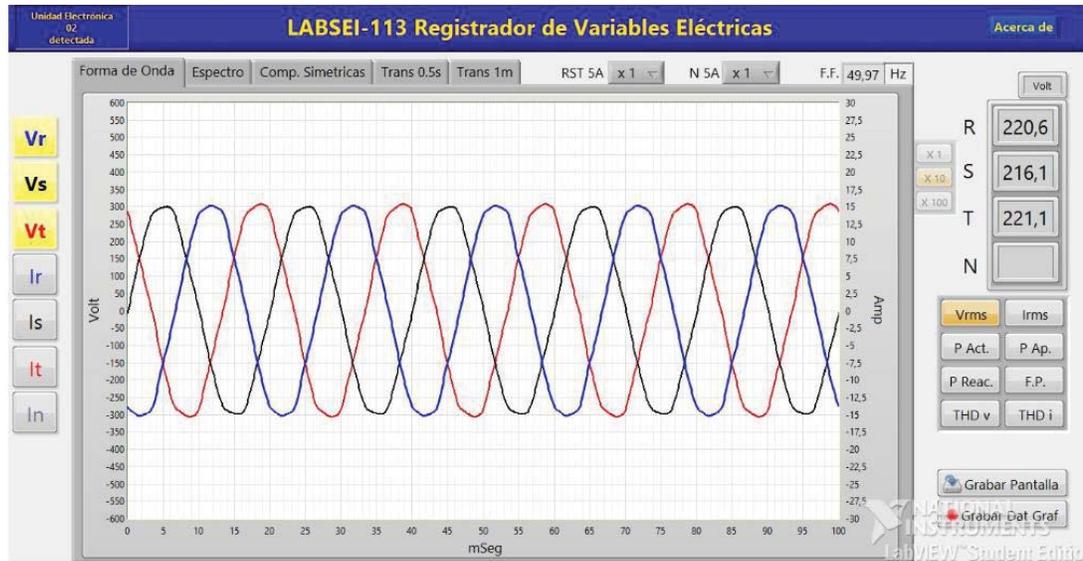


Figura 3-3.1: Forma de onda de voltaje y valores RMS de fuente alimentación.

Se puede observar en la imagen 3-3.1 la forma de onda de voltaje de las tres fases conectadas al estator del motor de inducción trifásico, midiendo voltajes RMS de valores 220,6[V] en la fase R, 216,1[V] en la fase S y 221,1[V] en la fase T.



Figura 3-3.2: Componentes simétricas.

Se puede observar en la imagen 3-3.2 el valor de las tensiones y corrientes RMS, además el valor en grados de estas, finalmente se muestran los valores de las componentes simétricas de las tensiones y corrientes.

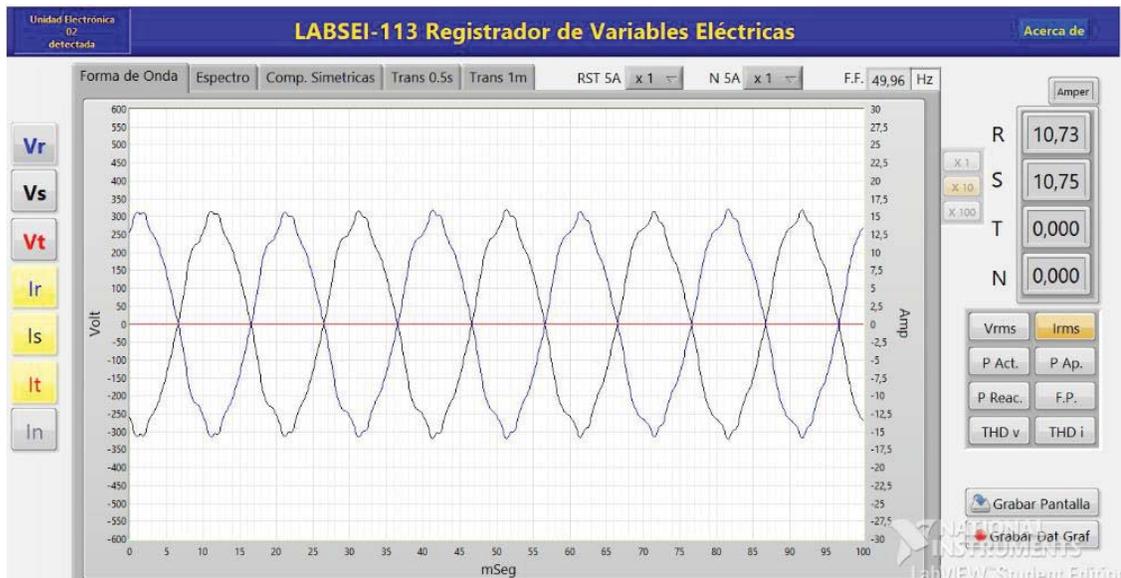


Figura 3-3.3: Forma de onda de corriente y valor RMS en el estator.

Se puede observar en la imagen 3-3.3 la forma de onda de las corrientes y el valor RMS de cada una de las fases del estator del motor de inducción trifásico, midiendo corrientes RMS de valores 0[A] en la fase T ya que fue en la fase donde se realizó la falla, 10,73[A] en la fase R y 10,75[A] en la fase S. Además, se vuelve a recalcar el hecho de que la forma de onda no es perfectamente sinusoidal, reflejando un contenido armónico presente.

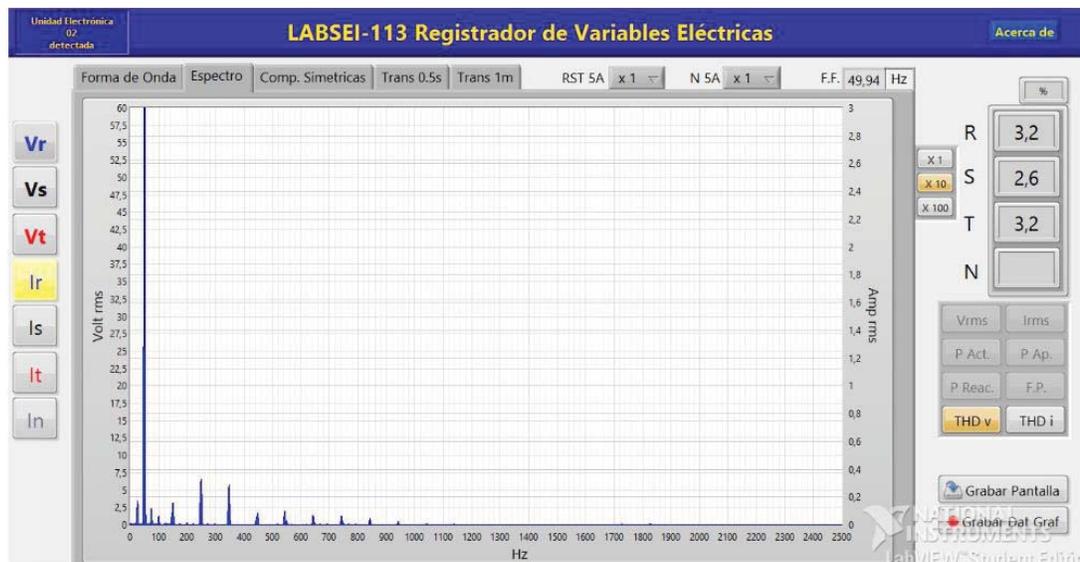


Figura 3-3.4: Espectro de onda de corriente fase R y THD(v) en las fases R, S y T.

Se puede observar en la imagen 3-3.4 el espectro de onda de la distorsión armónica de corriente de la fase R, además se muestra el valor de la distorsión armónica de voltaje, siendo el de la fase R 3,2%, 2,6% en la fase S y 3.2% en la fase T.

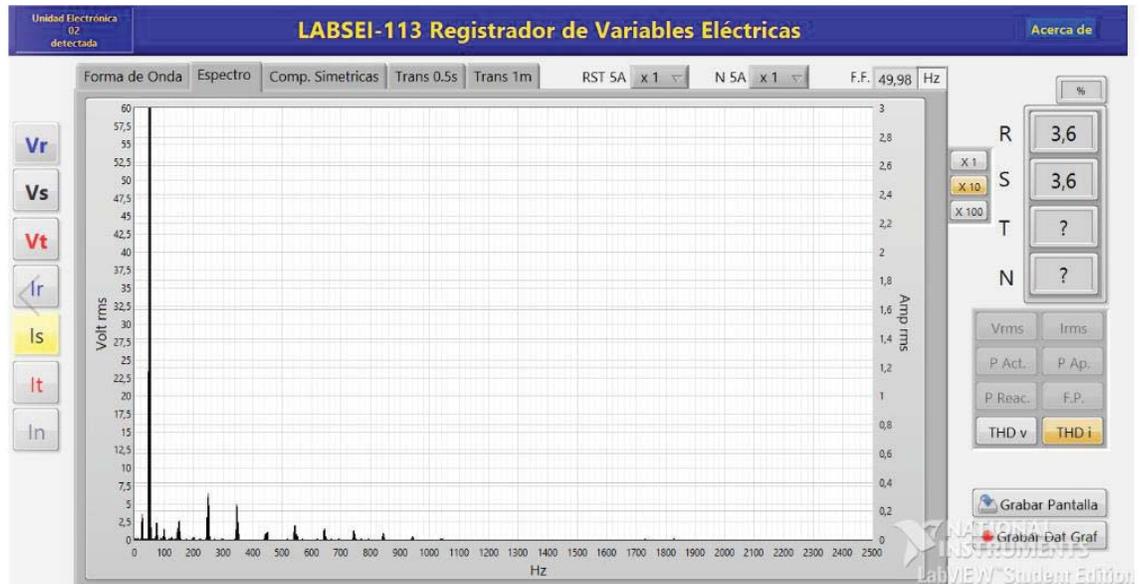


Figura 3-3.5: Espectro de onda de corriente fase S y THD(i) en las fases R y S.

Se puede observar en la imagen 3-3.5 el espectro de onda de la distorsión armónica de corriente de la fase S, además se muestra el valor de la distorsión armónica de corriente, siendo el de la fase R 3,6%, 3,6% en la fase S y 0% en la fase T.

Con respecto a la velocidad y torque mecánico medido, se llegaron a valores aproximados de 1460 [RPM] y 2 [Nm] respectivamente. El torque mecánico medido no es del todo exacto, ya que el método de medición es bastante variable, no se puede llegar a un valor de total confianza al realizar el ensayo de laboratorio.

4 Simulaciones.

En este capítulo se mostrarán distintas simulaciones de un motor de inducción trifásico, realizadas en el software Matlab-Simulink, donde el principal objetivo es evidenciar el comportamiento del motor de inducción bajo los efectos del torque pulsante. Además, se detallará el concepto del torque pulsante indicando sus causantes, también se hablará sobre lo que sucede cuando una de las líneas de alimentación del motor se abre y queda desconectada del estator.

4.1 Torque pulsante.

En esta sección se analizará el concepto del torque pulsante, evidenciando por qué se produce y los correspondientes conceptos involucrados en dicho fenómeno.

4.1.1 Torque pulsante.

Las máquinas de inducción han ido aumentando el interés como un potencial tipo de máquina eléctrica para competir con máquinas de imanes permanentes para aplicaciones de tracción que requieren velocidad y par variables, usando generalmente convertidores de electrónica de potencia. Sin embargo, los efectos parasitarios como el torque pulsante, ruido acústico y vibraciones mecánicas siguen siendo un desafío para los diseñadores de máquinas.

El par pulsante es causado por la interacción entre la distribución de flujo no sinusoidal de ambas corrientes estator-rotor y la fuerza magnetomotriz. La naturaleza no sinusoidal de la distribución de flujo se puede atribuir a dos fuentes: los armónicos de tiempo producidos por un inversor en el caso de estar utilizando algún variador de frecuencia y los armónicos espaciales del propio diseño de la máquina, debido al número finito de ranuras de estator y rotor, al número discreto de devanados del estator y los efectos de saturación del hierro. [3]

4.1.2 Armónicos.

Actualmente los sistemas eléctricos cuentan con una gran variedad de elementos llamados no lineales, los cuales generan a partir de formas de onda sinusoidales con frecuencia de la red, ondas a diferentes frecuencias, dicho fenómeno se denomina armónico.

Este fenómeno llamado armónico genera problemas para la empresa encargada de entregar el suministro eléctrico y también genera problemas a nivel de usuario.

La frecuencia de la onda periódica se denomina frecuencia fundamental y los armónicos presentan una frecuencia múltiplo, de tipo número entero, de la frecuencia fundamental.

La distorsión armónica, es la distorsión de la onda sinusoidal de corriente o tensión eléctrica de frecuencia nominal, ocasionada por la presencia de señales eléctricas sinusoidales de frecuencias diferentes y múltiplos de dicha frecuencia nominal.

4.2 Desconexión de una fase de alimentación.

Si por algún motivo una de las fases de alimentación trifásica se abre accidentalmente o si un fusible falla mientras el motor trifásico se encuentra en funcionamiento, la máquina continuará funcionando como un motor monofásico. La magnitud de las corrientes de las dos fases que continúan en funcionamiento tenderán a duplicar su valor y el motor comenzará a sobrecalentarse. Si el motor se encuentra con relevadores térmicos que protejan su funcionamiento, estos activarán los cortacircuitos y el motor será desconectado de la línea.

La curva de momento de torsión-velocidad se ve seriamente afectada cuando un motor de inducción trifásico opera con una sola fase. El momento máximo de torsión disminuye en apropiadamente 40% de su valor original y el motor no desarrolla momento de torsión de arranque. Por consiguiente, un motor trifásico de inducción totalmente cargado simplemente puede detenerse si una de sus líneas se abre de pronto. [2]

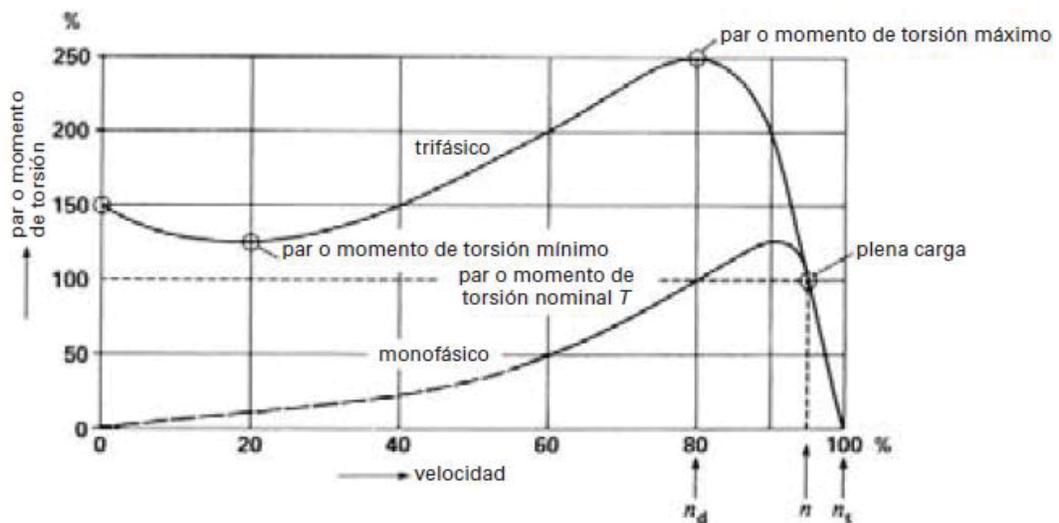


Figura 4-2.1: Curvas de momento de torsión-velocidad típicas cuando un motor trifásico jaula de ardilla opera normalmente y cuando opera con una sola fase.

La figura 4-2.1, muestra las curvas de momento de torsión-velocidad típicas de un motor trifásico cuando funciona normalmente y cuando está cambiando a una sola fase. Se observa que las curvas aparecen muy cerca una de la otra hasta que el momento de torsión se aproxima al momento de torsión máximo de cambio a una sola fase.

4.3 Simulación motor de inducción trifásico con carga.

Esta simulación tiene como objetivo mostrar el comportamiento del motor de inducción trifásico rotor devanado, ante una carga puramente resistiva. Para estas simulaciones se considerará la curva de saturación del motor de inducción trifásico de 6,5 [Hp] mostrada en la Figura 4-3.1, los parámetros de máquinas utilizadas en la simulación se presentan en las tablas 4-3.1 y 4-3.2.

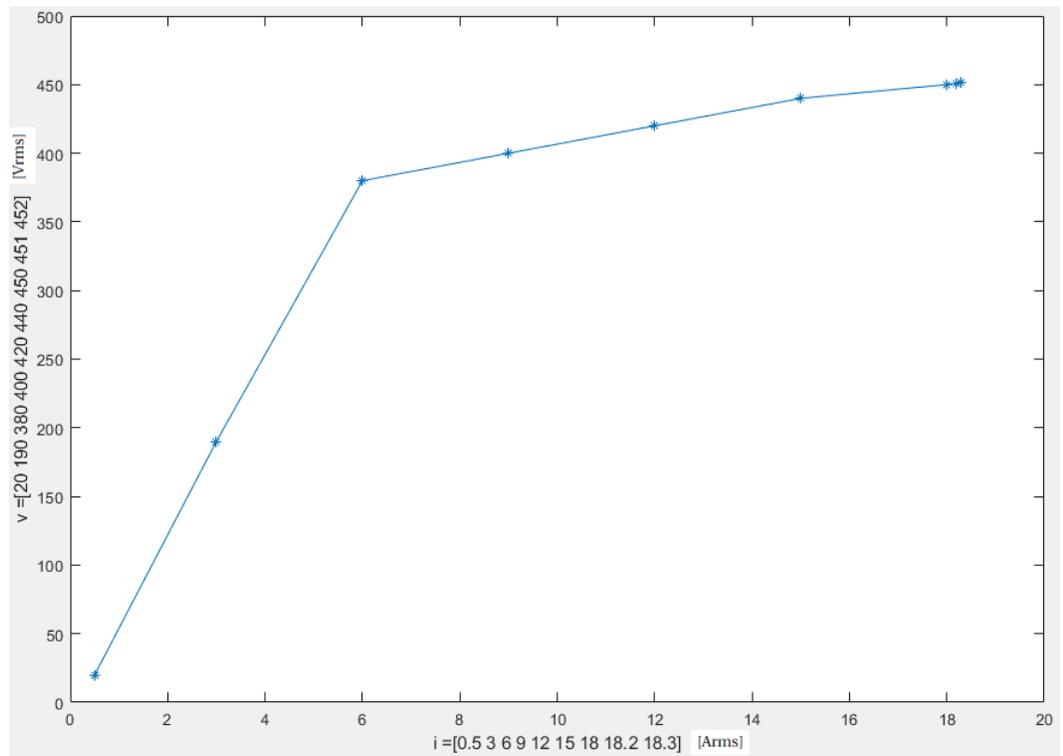


Figura 4-3.1: Curva poligonal de saturación.

Tabla 4-3.2: Parámetros Generador de corriente continua.

Parámetros	Valor [Unidad]
Resistencia de armadura	0,5 [Ω]
Inductancia de armadura	0,01 [Hy]
Resistencia de campo	240 [Ω]
Inductancia de campo	120 [Hy]
Inductancia mutua Campo-Armadura	1,8 [Hy]

Tabla 4-3.2: Parámetros Motor de inducción trifásico.

Parámetro	Valor [Unidad]
Potencia nominal	6,5 [Hp]
Resistencia Estator	0,63 [Ω]
Inductancia Estator	0,00496 [Hy]
Resistencia Rotor	1,094 [Ω]
Inductancia Rotor	0,00496 [Hy]
Inductancia rama magnetizante	0,105 [Hy]
Par de polos	2 [-]
Inercia	0,041 [$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$]

En la figura 4-3.1 el motor de inducción rotor devanado es accionado a través de una partida directa, con tres fuentes monofásicas conectadas en estrella, además en serie a estas fuentes se agrega fuentes de magnitud menor y frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental con el fin de considerar el contenido armónico medido en los ensayos de laboratorio, cada una de las fuentes V_r , V_s y V_t poseen los mismos valores de voltaje y fase mostrados en la Figura 3-2.1 con una frecuencia de 50 [Hz], paralelo a las líneas de alimentación se dispone de un banco de resistencias de 300[Ω] por fase ya que la simulación no considera las pérdidas del fierro. La entrada del motor asíncrono es torque el cual es realimentado por el torque que se genera en el generador de corriente continua dispuesto debajo de él y la entrada del generador de corriente continua es velocidad la cual es realimentada por la velocidad que produce en el motor de inducción trifásico, esto se hace con el objetivo de replicar el mismo ensayo de laboratorio explicado en el capítulo anterior. La carga conectada a la armadura del generador de corriente continua es puramente resistiva, carga que se va agregando hasta alcanzar valores similares a los mostrados en el ensayo de laboratorio del capítulo 3.2.

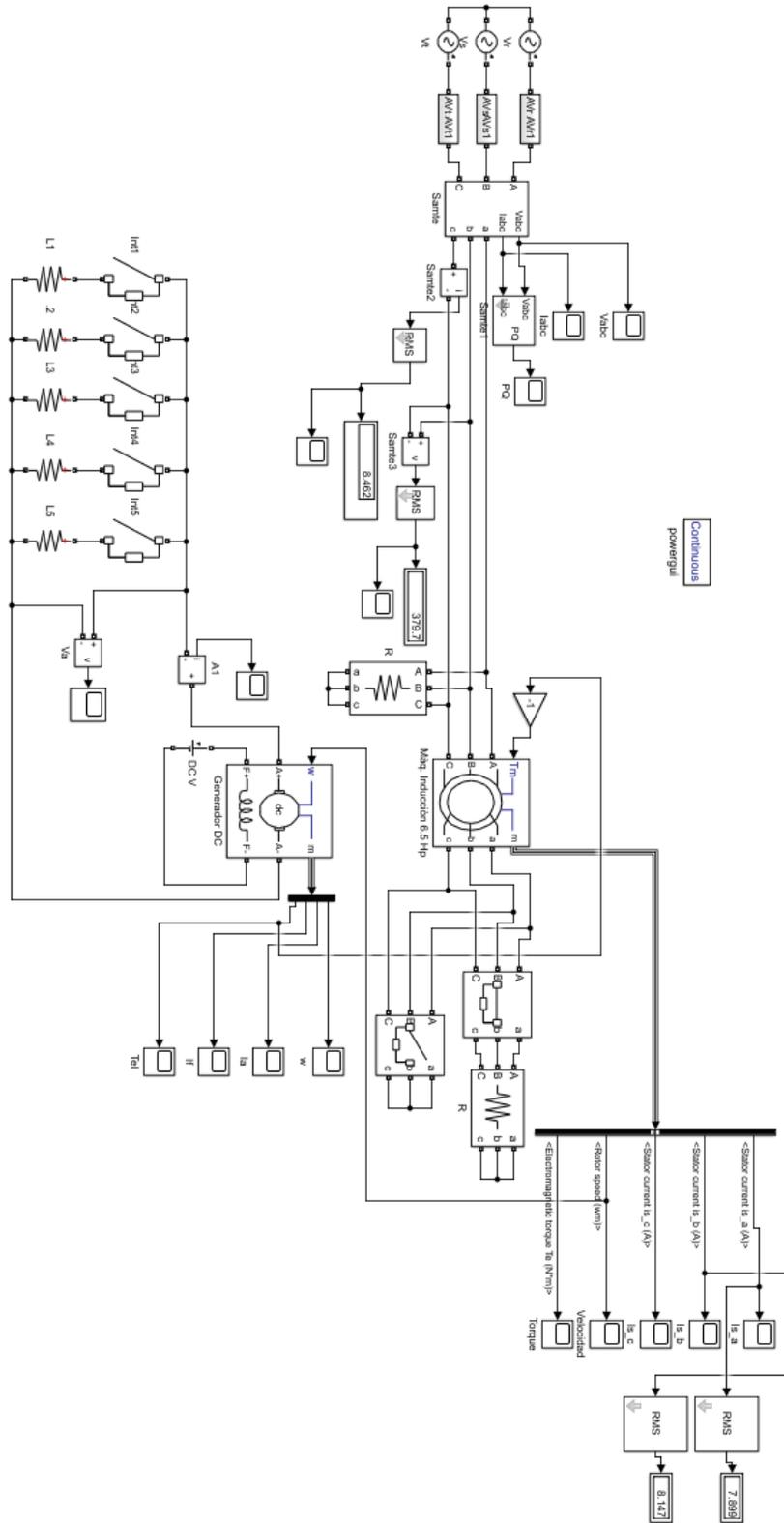


Figura 4-3.1: Simulación realizada en Matlab-Simulink.

4.4 Resultados Simulación motor de inducción con carga.

A continuación, se muestran las imágenes de los diferentes resultados obtenidos de la simulación descrita en la sección anterior.

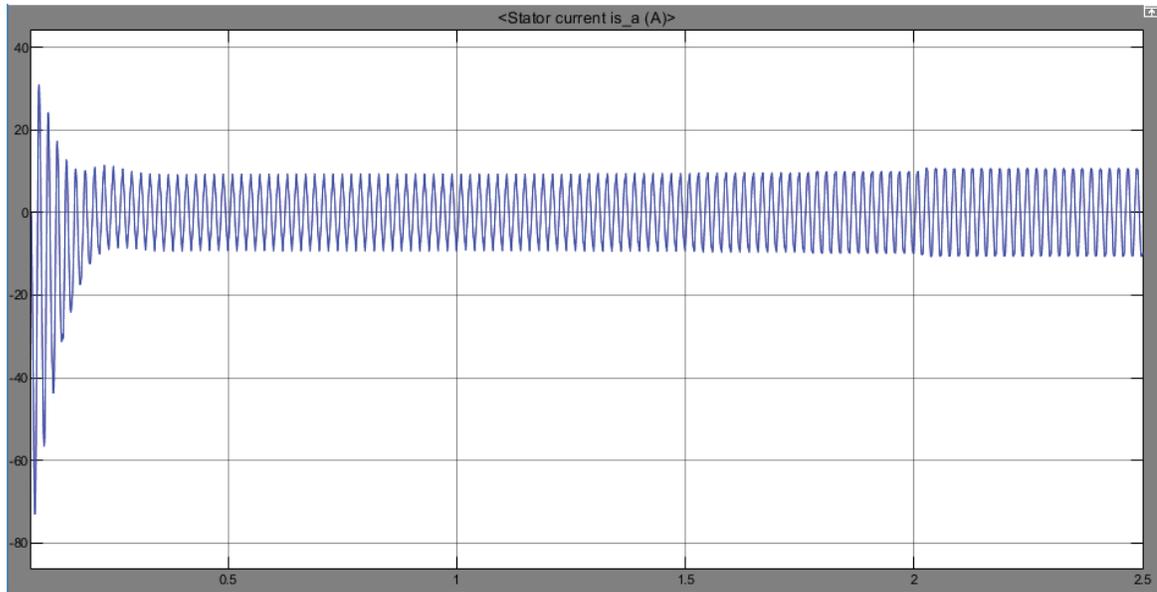


Figura 4-4.1: Forma de onda de corriente fase A.

Se puede observar en la figura 4-4.1 la forma de onda de la corriente en la fase A en el estator del motor de inducción trifásico, una vez que el régimen transitorio haya culminado se comienza a agregar una carga resistiva a partir de 1 segundo con un desfase de tiempo de 0,25 segundos entre cada carga hasta los 2 segundos. Se alcanza una corriente RMS de 7,899 [A], cabe señalar que en las fases B y C se alcanzan corrientes RMS de 8,147 [A] y 8,462 [A] respectivamente.

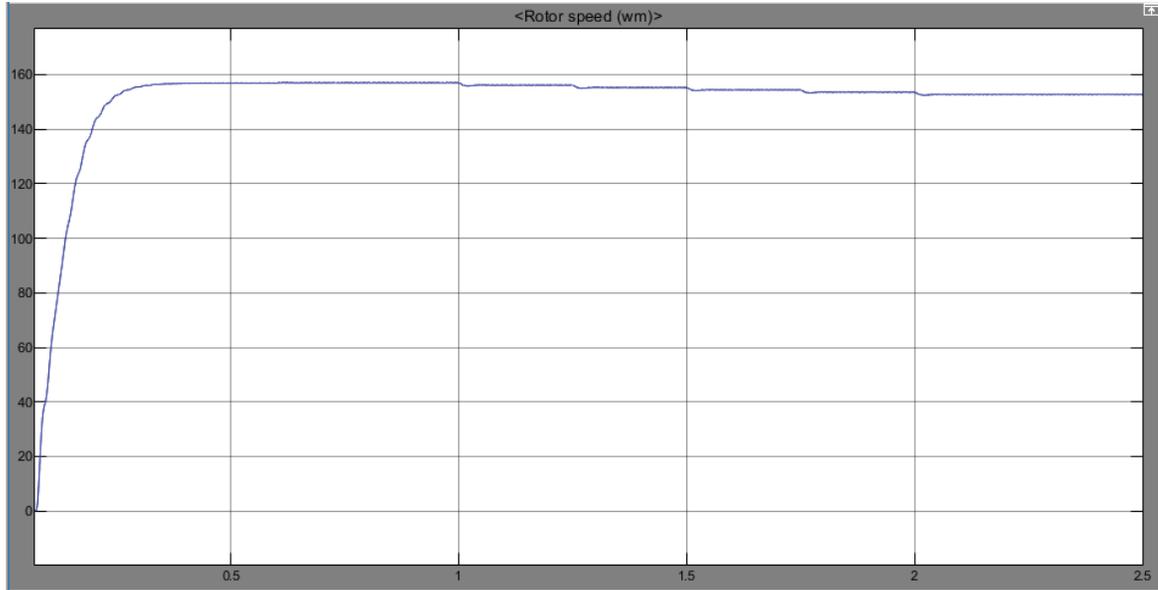


Figura 4-4.2: Velocidad motor de inducción.

Se puede observar en la figura 4-4.2 la velocidad que experimenta el motor de inducción trifásico a medida que se va agregando carga en el generador de corriente continua, llegando a una velocidad aproximada de 152 [rad/s].

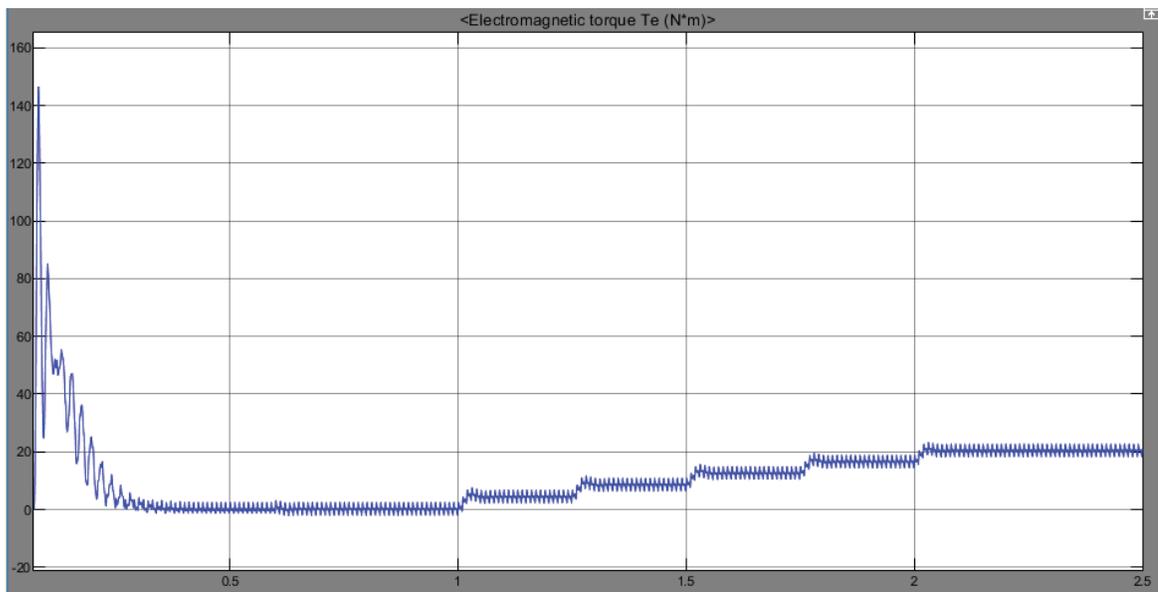


Figura 4-4.3: Torque Eléctrico.

En la figura 4-4.3 se puede observar el torque eléctrico experimentado por el motor de inducción trifásico a medida que se va a agregando carga en el generador de corriente continua, llegando a un torque medio aproximado de 20 [Nm], además se puede notar el ruido que posee la forma de onda del torque, evidenciando la presencia de un torque pulsante, el cual llevado a la realidad se traduce en vibraciones mecánicas en la máquina.

En las siguientes imágenes se muestra el contenido armónico que se presenta en la corriente de fase A.

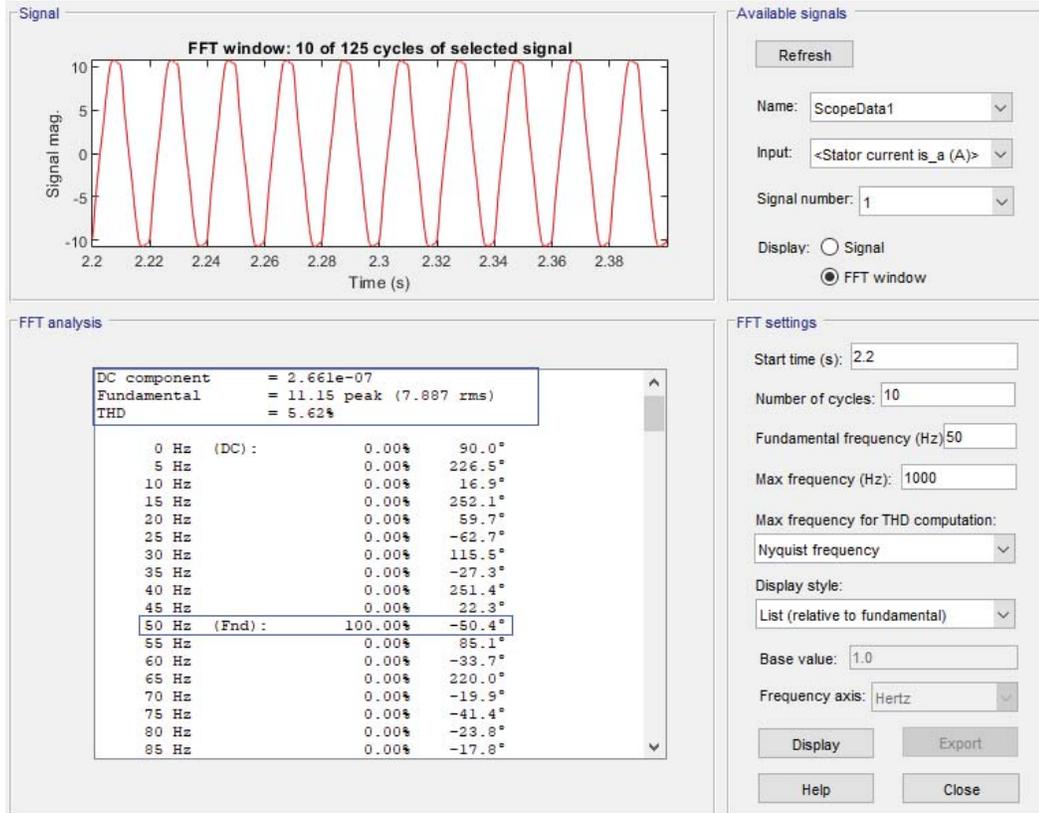


Figura 4-4.4: Listado de armónicos de corriente en la fase A.

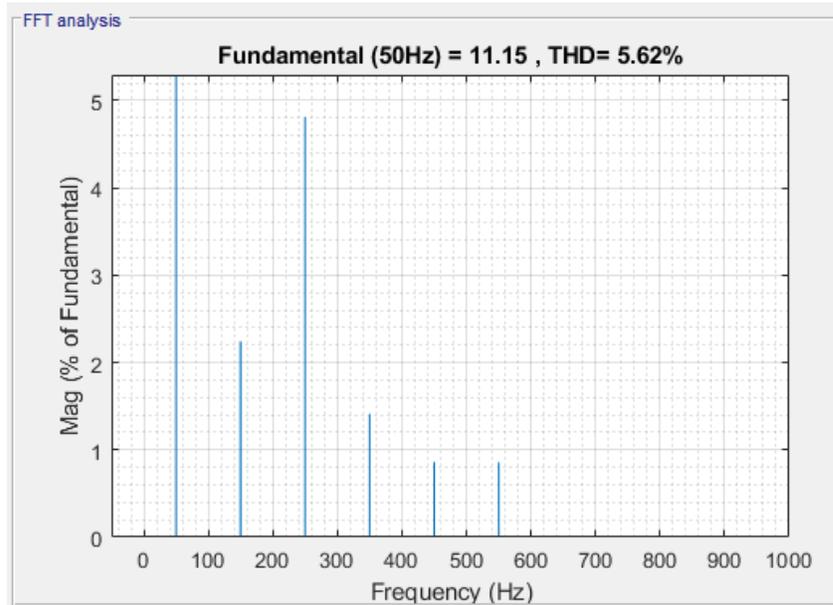


Figura 4-4.5: Contenido armónico de corrientes en la fase A en gráfico de barras.

Se puede observar en la Figura 4-4.4 el listado de armónicos de corriente de la fase A, desde los 2,2 [s] hasta los 2,4 [s], donde se puede apreciar una distorsión armónica total de 5,62%, además se observa que los armónicos pares no poseen valor. En la figura 4-4.5 se muestra el gráfico de barras asociado al contenido armónico de la misma fase, donde se puede apreciar que el armónico de frecuencia 250 [Hz] es el que presenta mayor valor.

Tabla 4-4.1: Contenido armónico en la fase A.

Frecuencia	Porcentaje de armónico con respecto a la fundamental.
100 [Hz]	0%
150 [Hz]	2,24%
200 [Hz]	0%
250 [Hz]	4,81%
300 [Hz]	0%
350 [Hz]	1,41%
400 [Hz]	0%

En la Tabla 4-4.1 se muestra más detalladamente los resultados obtenidos de la simulación con respecto al contenido armónico en la fase A. Con respecto a las fases B y C se obtienen distorsiones armónicas de valor 4,82% y 5,31% respectivamente. Cabe señalar la distorsión armónica en la fuente de alimentación, las cuales se presentan en la Tabla 4-4.2.

Figura 4-4.2: Distorsión armónica en la fuente de alimentación.

Fase	Porcentaje de armónico con respecto a la fundamental.
A	3,05%
B	2,92%
C	3,31%

En la figura 4-5.1 el motor de inducción rotor devanado es accionado a través de una partida directa, con tres fuentes monofásicas conectadas en estrella, además en serie a estas fuentes se agrega fuentes de magnitud menor y frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental con el fin de considerar el contenido armónico medido en los ensayos de laboratorio, cada una de las fuentes V_r , V_s y V_t poseen los mismos valores de voltaje y fase mostrados en la Figura 3-3.1 con una frecuencia de 50 [Hz], paralelo a las líneas de alimentación se dispone de un banco de resistencias de $300[\Omega]$ por fase ya que la simulación no considera las pérdidas del fierro, además se agrega un breaker en la fase C con el fin de abrir la línea a los 1 segundos . La entrada del motor asíncrono es torque el cual es realimentado por el torque que se genera en el generador de corriente continua dispuesto debajo de él y la entrada del generador de corriente continua es velocidad la cual es realimentada por la velocidad que produce en el motor de inducción trifásico, esto se hace con el objetivo de replicar el mismo ensayo de laboratorio explicado en el capítulo anterior. La carga conectada a la armadura del generador de corriente continua es puramente resistiva, carga que se va agregando hasta alcanzar valores similares a los mostrados en el ensayo de laboratorio del capítulo 3.3.

4.6 Resultados simulación desconexión de una fase de alimentación en el estator del motor de inducción trifásico aplicando una baja carga.

A continuación, se muestran las imágenes de los diferentes resultados de la simulación descrita en la sección anterior.

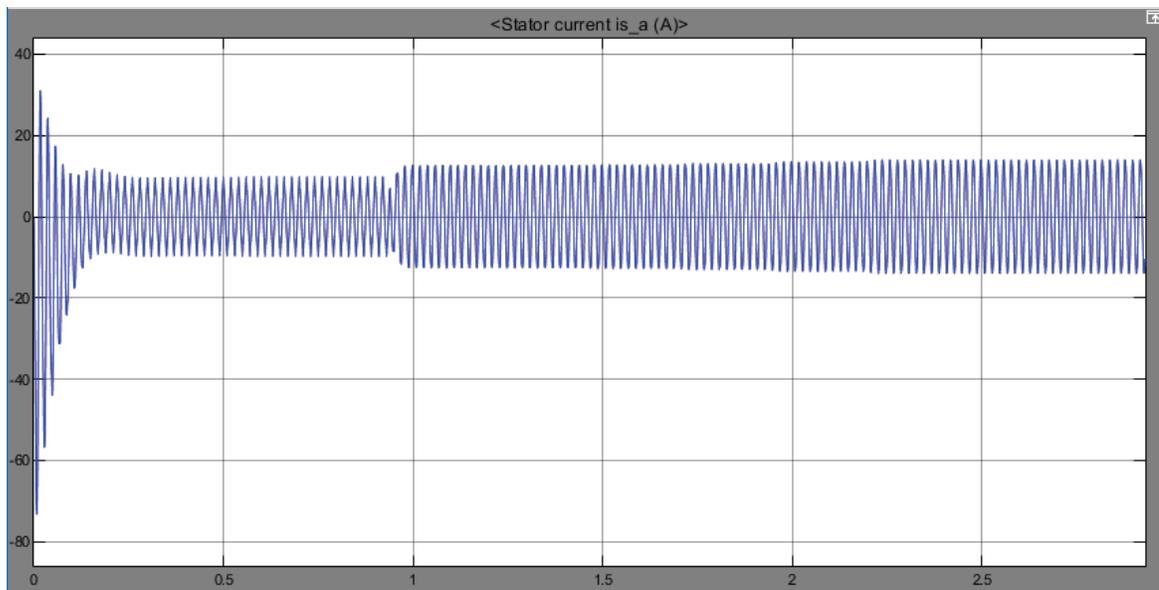


Figura 4-6.1: Forma de onda de corriente fase A.

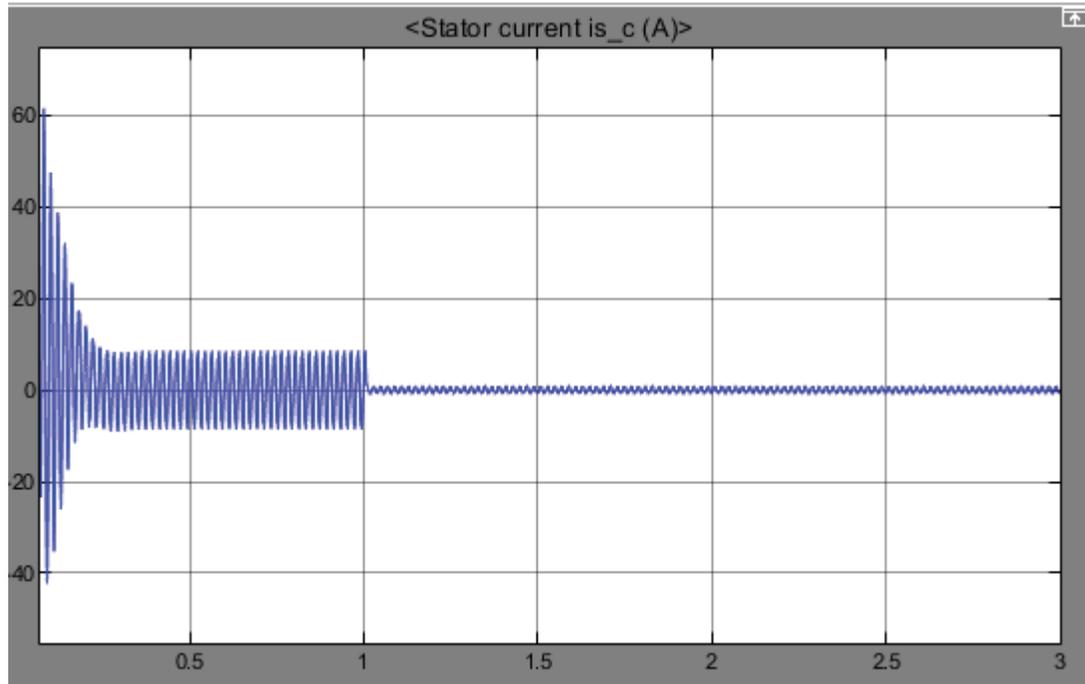


Figura 4-6.2: Forma de onda de corriente fase C.

Se puede observar en la Figura 4-6.1 y 4-6.2 la forma de onda de las corrientes en el estator del motor de inducción trifásico en las fases A y C, a los 1 segundos se abre la fase C, se aprecia que la corriente de la fases a aumentan su valor abruptamente como era de esperarse, se comienza a agregar carga desde los 1,25 segundos con una diferencia de 0,25 segundos hasta los 2,25 segundos, hasta alcanzar una corriente RMS de 10,65 [A] en la fase A. Cabe señalar que la corriente de fase B alcanza un valor RMS de 10,65 [A].

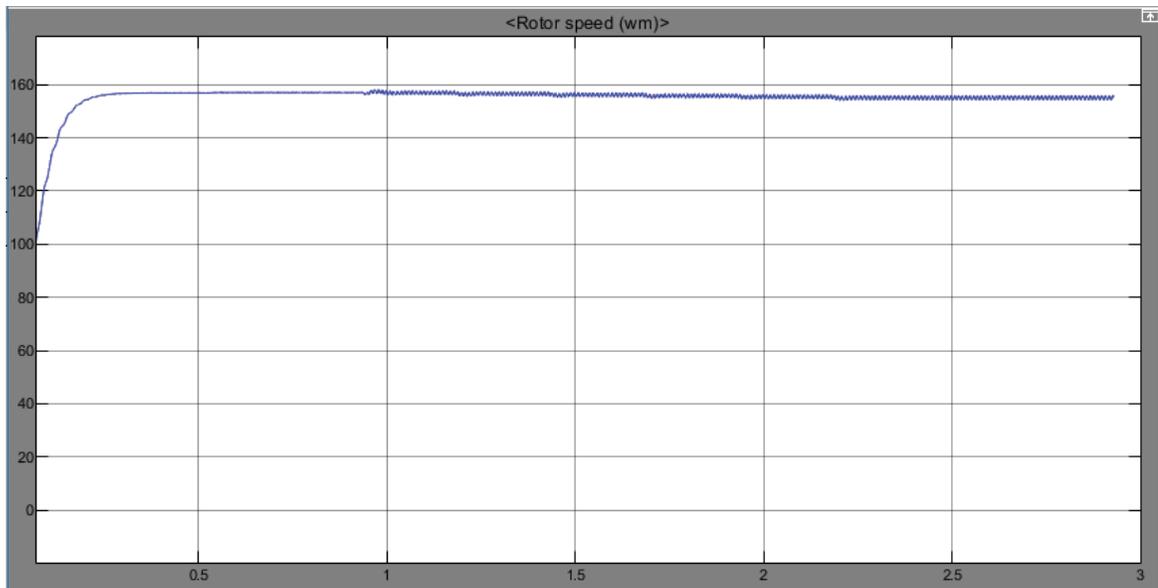


Figura 4-6.3: Velocidad motor de inducción.

Se puede observar en la figura 4-6.3 la velocidad que experimenta el motor de inducción trifásico a medida que se va agregando carga en el generador de corriente continua, llegando a una velocidad aproximada de 154 [rad/s].

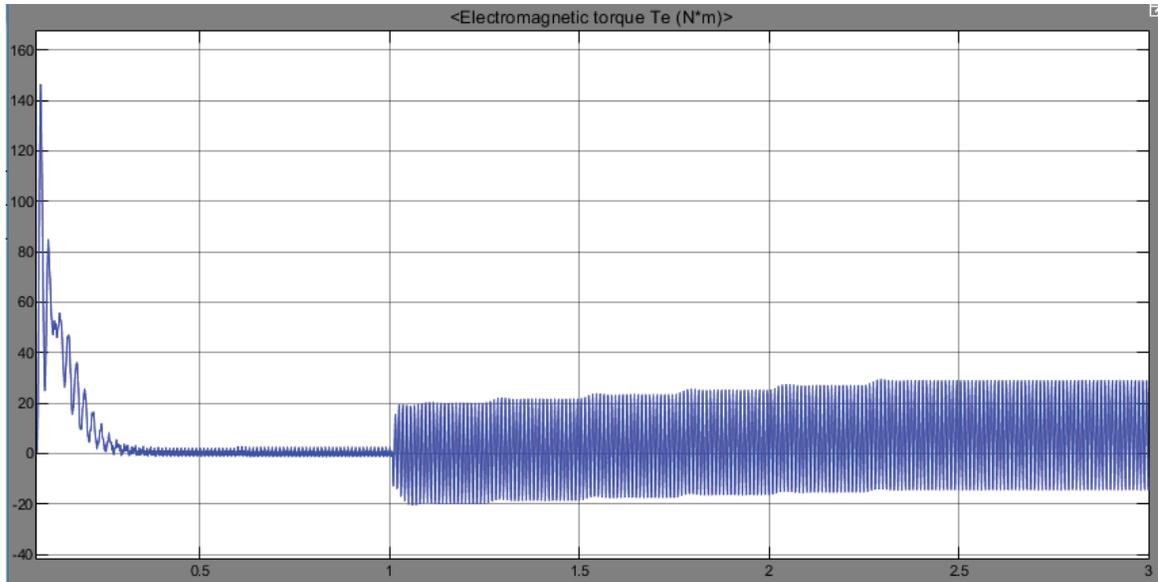


Figura 4-6.4: Torque eléctrico.

En la Figura 4-6.4 se puede observar el torque eléctrico experimentado por el motor de inducción trifásico cuando se abre una línea en el estator a los 1 segundos, mientras que se va agregando carga en el generador de corriente continua desde los 1,25 segundos hasta los 2,25 segundos. Se puede apreciar el importante ruido en la señal de torque a partir de que se realiza la falla en la fase C, evidenciando un marcado torque pulsante el cual llevado a la realidad se traduce en marcadas vibraciones mecánicas en la máquina.

En las imágenes que se presentan a continuación, se mostrará el contenido armónico que se presenta en la corriente de fase A, en la velocidad y en el torque eléctrico.

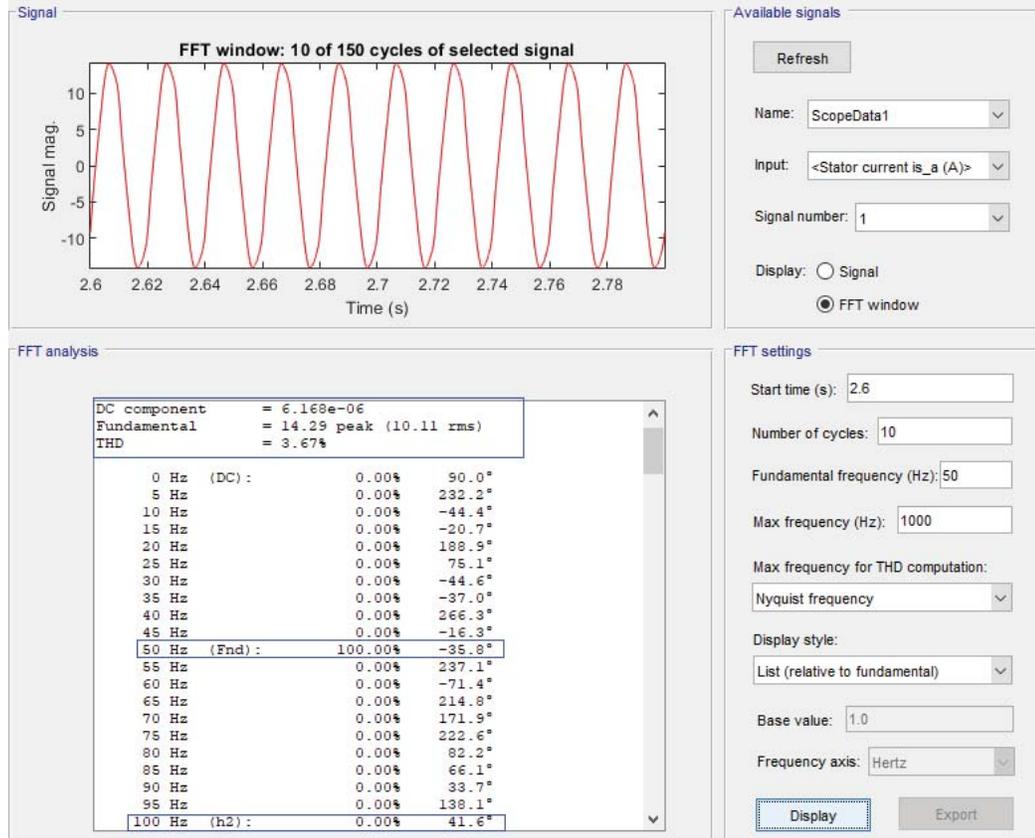


Figura 4-6.5: Listado de armónicos de corriente en la fase A.

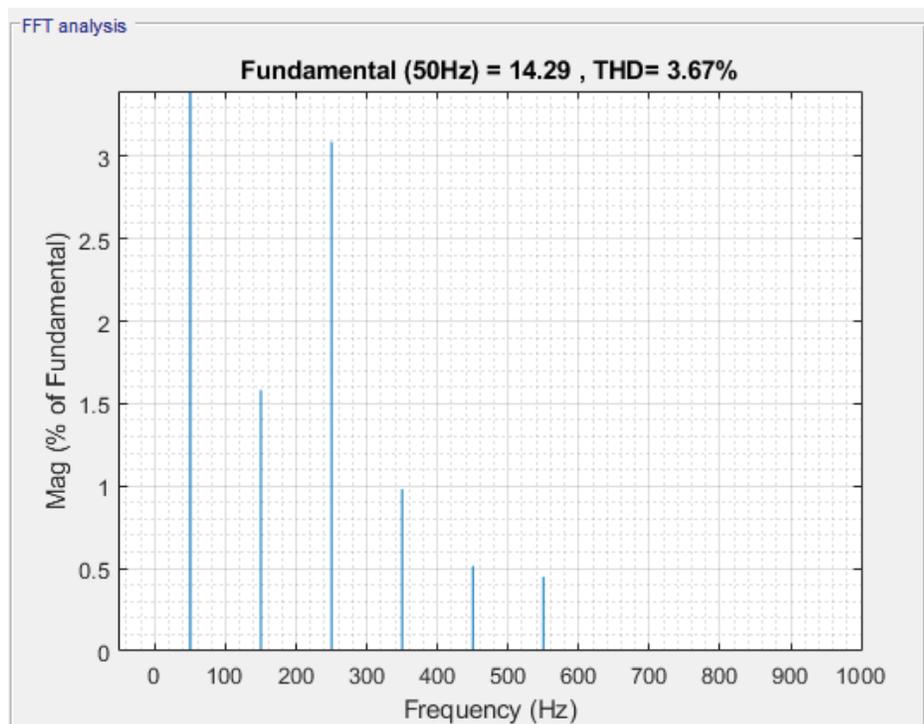


Figura 4-6.6: Contenido armónico de corrientes en la fase A en gráfico de barras.

Se puede observar en la Figura 4-6.5 el listado de armónicos de corriente de la fase A, desde los 2,6 [s] hasta los 2,8 [s], donde se puede apreciar una distorsión armónica total de 3,67%, además se observa que los armónicos pares no poseen valor. En la figura 4-6.6 se muestra el gráfico de barras asociado al contenido armónico de la misma fase, donde se puede apreciar que el armónico de frecuencia 250 [Hz] es el que presenta mayor valor.

Tabla 4-6.1: Contenido armónico en la fase A.

Frecuencia	Porcentaje de armónico con respecto a la fundamental.
100 [Hz]	0%
150 [Hz]	1,58%
200 [Hz]	0%
250 [Hz]	3,09%
300 [Hz]	0%
350 [Hz]	0,98%
400 [Hz]	0%

En la Tabla 4-6.1 se muestra más detalladamente los resultados obtenidos de la simulación con respecto al contenido armónico en la fase A. Con respecto a la fase B se obtiene una distorsión armónica de valor 3,48%. Cabe señalar la distorsión armónica en la fuente de alimentación, las cuales se presentan en la Tabla 4-6.2.

Tabla 4-6.2: Distorsión armónica en la fuente de alimentación.

Fase	Porcentaje de armónico con respecto a la fundamental.
A	3,05%
B	2,92%
C	3,31%

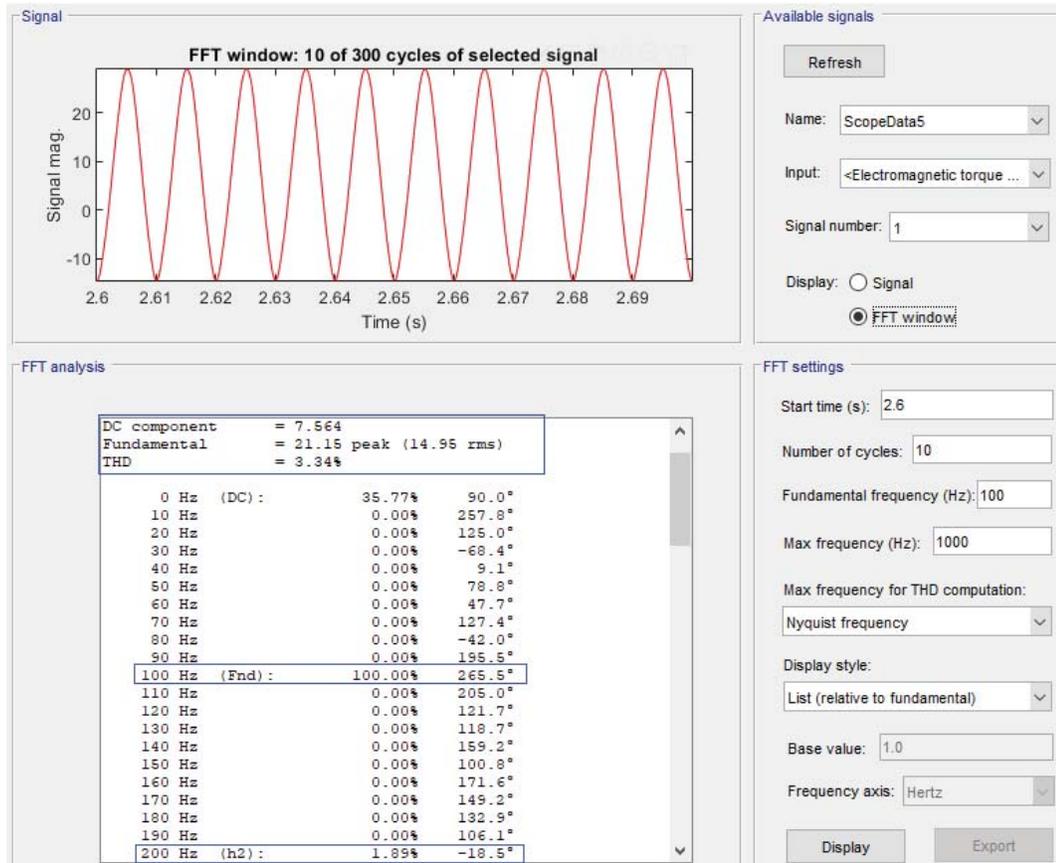


Figura 4-6.7: Contenido armónico del torque eléctrico.

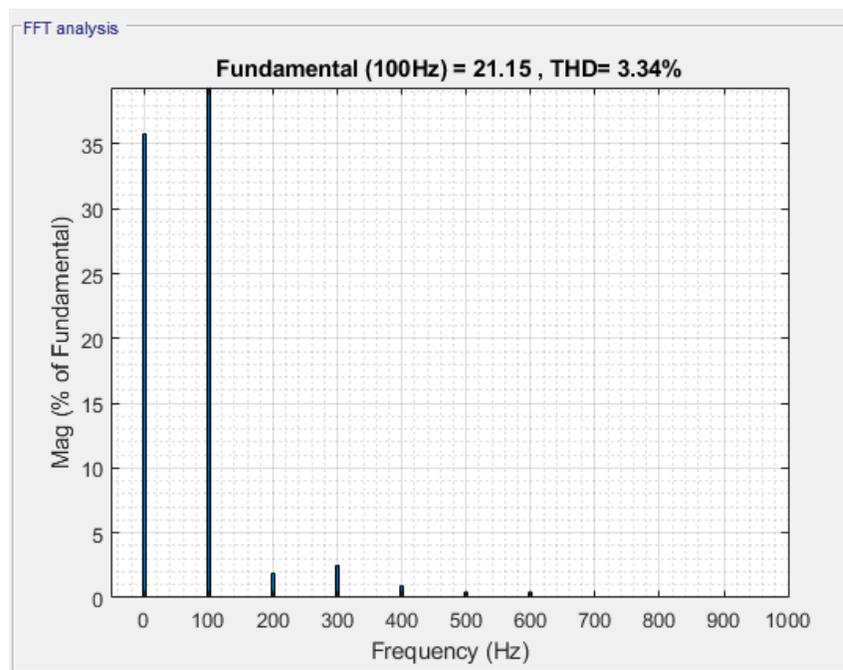


Figura 4-6.8: Contenido armónico del torque eléctrico en gráfico de barras.

Se puede observar en la Figura 4-6.7, que el torque pulsante que se produce en el motor de inducción trifásico es bastante marcado, además que la frecuencia de la onda de torque eléctrico es de 100 [Hz]. Posee una distorsión armónica de 3,34%. Además, se puede apreciar en la tabla 4-6.3 la presencia de armónicos pares en el torque eléctrico.

Tabla 4-6.3: Contenido armónico del torque eléctrico.

Frecuencia	Porcentaje de armónico con respecto a la fundamental.
100 [Hz]	100%
200 [Hz]	1,89%
300 [Hz]	2,52%
400 [Hz]	0,92%
500 [Hz]	0,45%
600 [Hz]	0,43%
700 [Hz]	0%

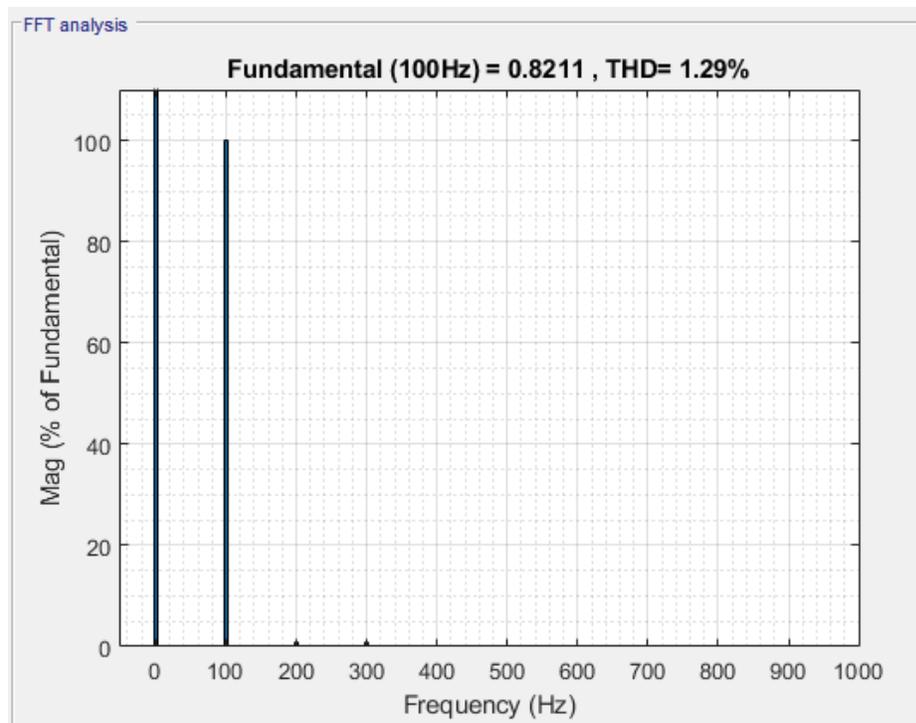


Figura 4-6.9: Contenido armónico de la velocidad en gráfico de barras.

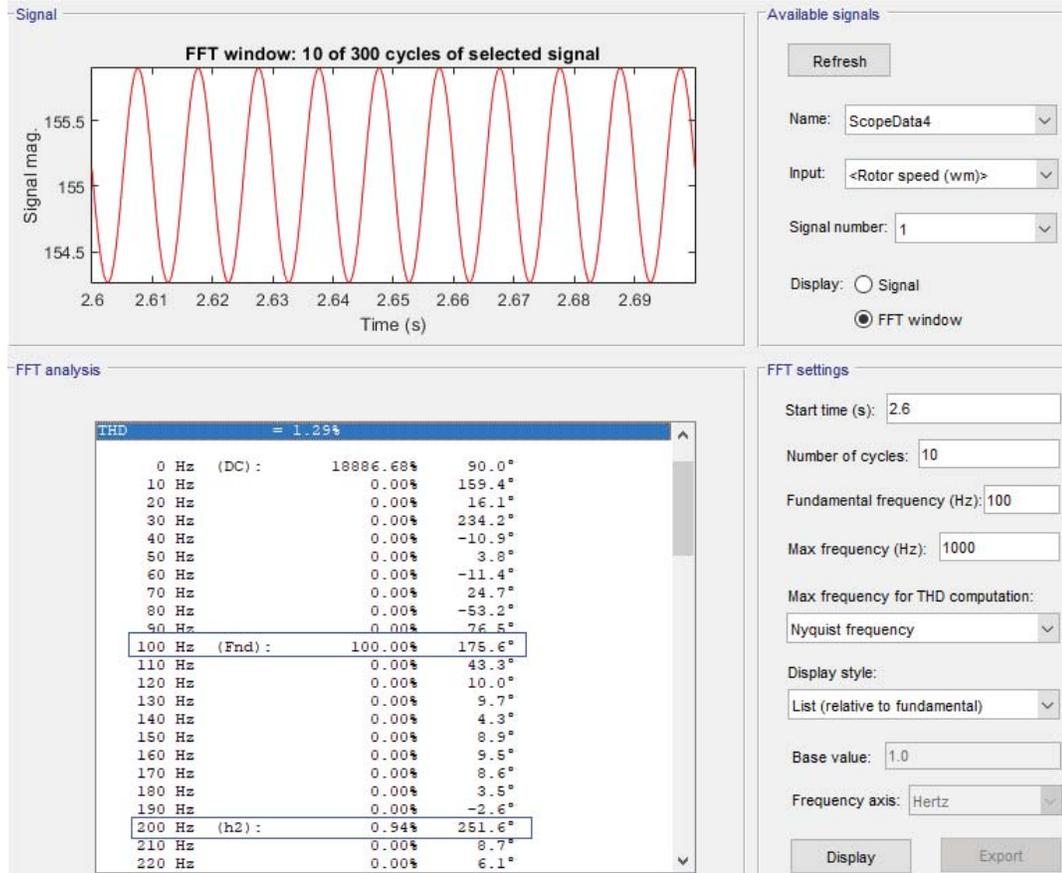


Figura 4-6.10: Contenido armónico de la velocidad.

Se puede observar en las Figuras 4-6.9 y 4-6.10 que la velocidad se ve también afectada por la presencia del torque pulsante en la máquina, presentando una distorsión armónica de 1,29%, lo cual refleja que la onda de velocidad es muy parecida a una senoide, también se observa la presencia de armónicos pares.

4.7 Comparación ensayos de laboratorio-simulación.

En esta sección se compararán los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorios realizados, con respecto a los resultados obtenidos de las simulaciones mostradas anteriormente. Se mostrarán las comparaciones de distorsiones armónicas totales de corriente y voltaje, como también las corrientes RMS en el estator.

4.7.1 Comparación motor de inducción con carga.

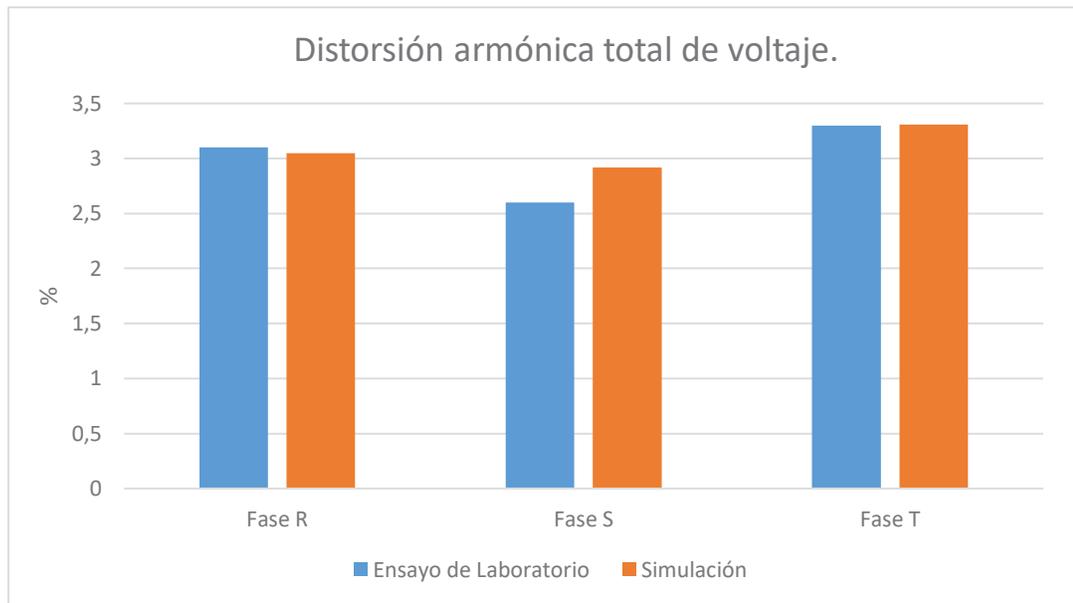


Figura 4-7.1: Comparación de distorsión armónica de voltaje.

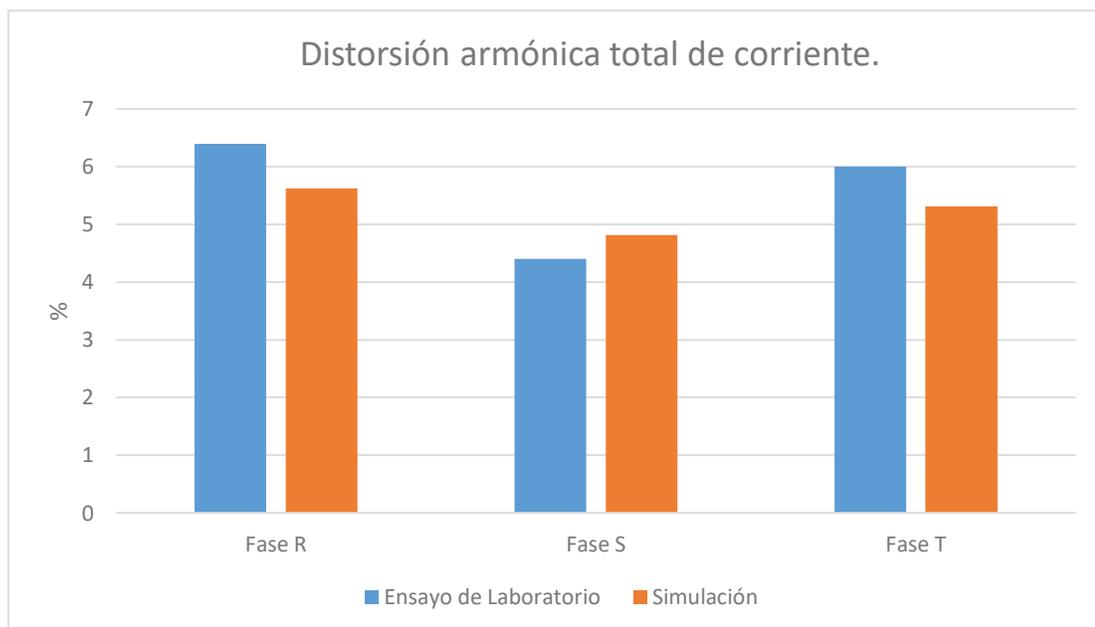


Figura 4-7.2: Comparación de distorsión armónica de corriente.

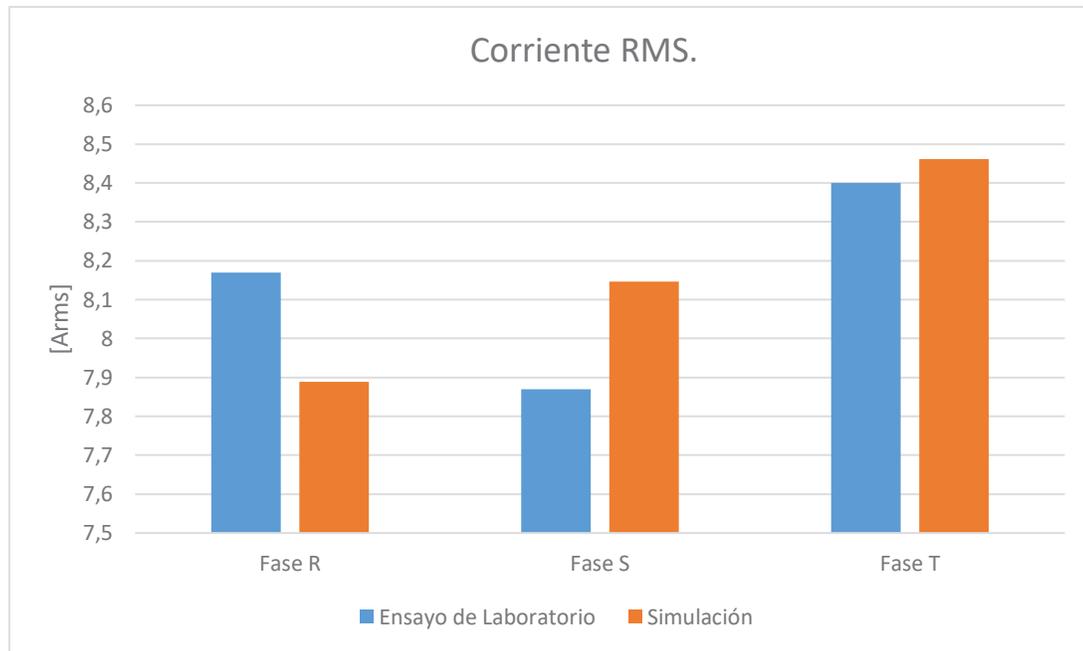


Figura 4-7.3: Comparación de corriente RMS en el estator.

En la Figura 4-7.1 se puede observar que la distorsión armónica de voltaje obtenida en los ensayos de laboratorio es bastante cerca a la obtenida en las simulaciones, presentando la variación máxima en la fase S con una diferencia de 0,32%, reflejando que los resultados obtenidos en las simulaciones son bastante cercanos con respecto a los ensayos de laboratorio. Lo mismo se puede apreciar en la Figura 4-7.2 con respecto a la distorsión armónica de corriente, presentando una variación máxima en la fase R que tiene un valor igual a 0,78%.

En la Figura 4-7.3 se puede observar la comparación de las corrientes RMS en el estator del motor de inducción, presentando una variación máxima en la fase S, la cual presenta una diferencia de 0,277 [Arms], reflejando que los resultados obtenidos en las simulaciones son bastante cercanos con respecto a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Con respecto a los valores de voltaje RMS los valores aún más cercanos debido ya que en las simulaciones se tomaron los valores tomados de los ensayos de laboratorio y estos fueron utilizados en ellas, de tal forma que los valores son casi idénticos.

4.7.2 Comparación desconexión de una fase de alimentación en el motor de inducción trifásico aplicando una baja carga.

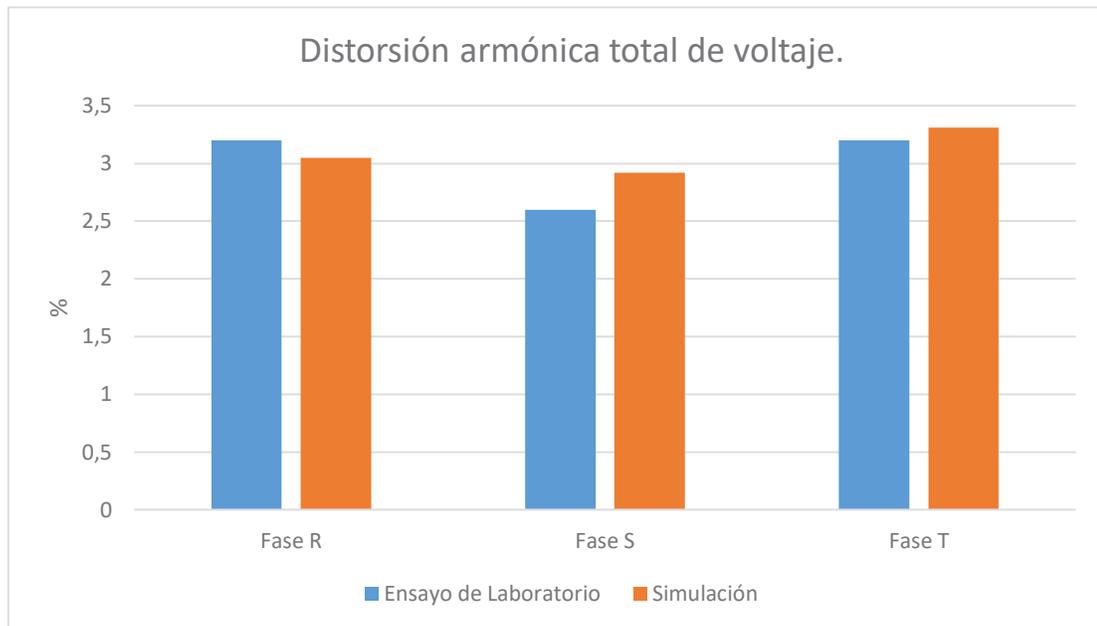


Figura 4-7.4: Comparación de distorsión armónica de voltaje.

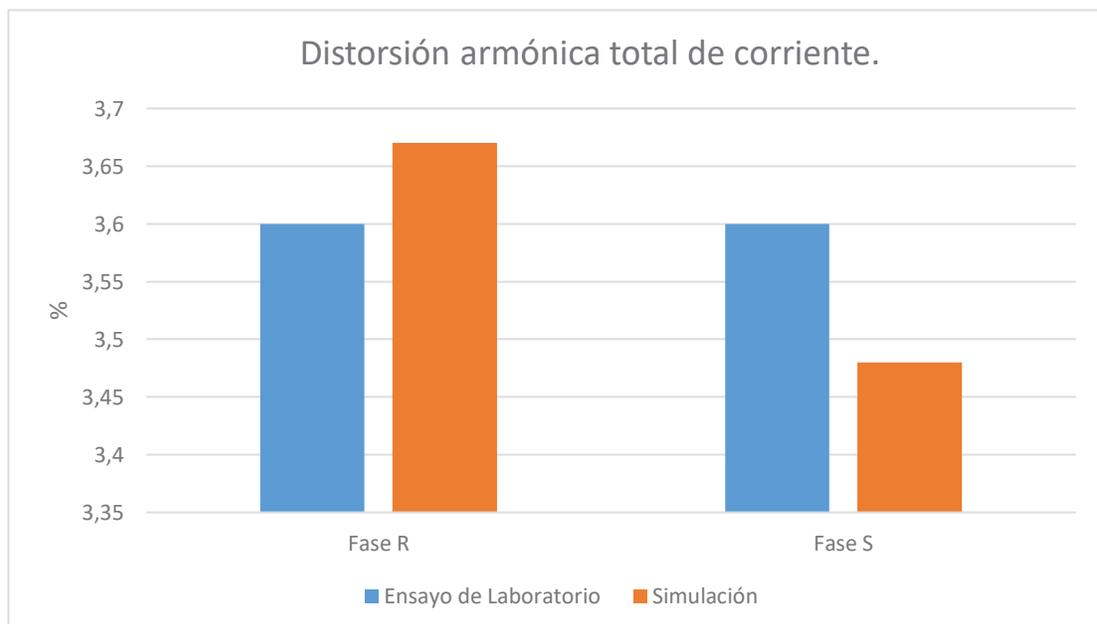


Figura 4-7.5: Comparación de distorsión armónica de corriente.

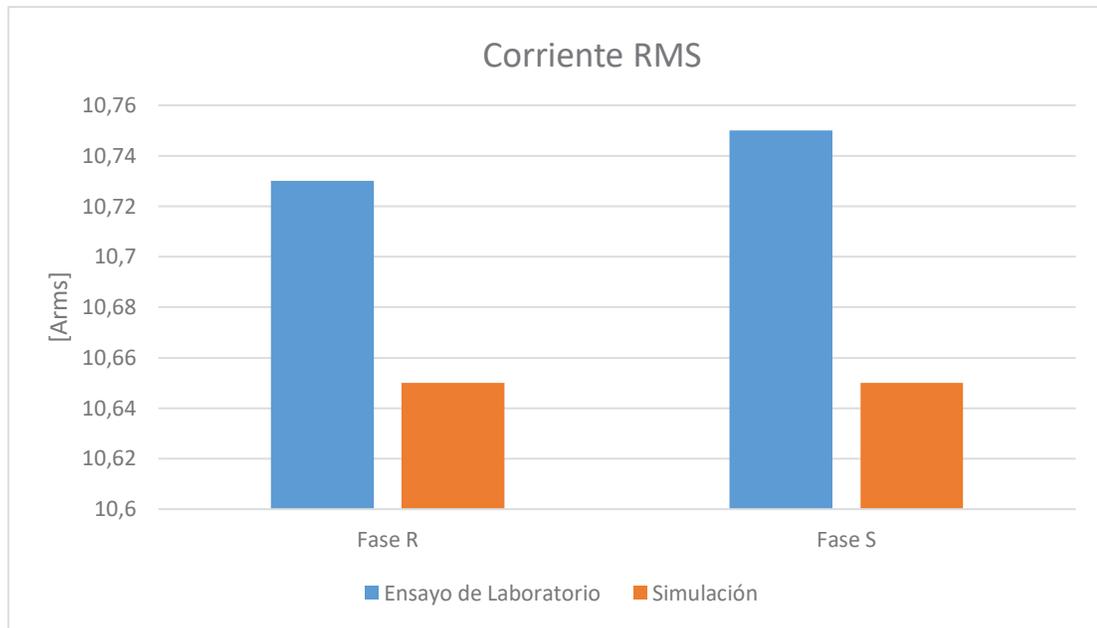


Figura 4-7.6: Comparación de corriente RMS en el estator.

En la Figura 4-7.4 se puede observar que la distorsión armónica de voltaje obtenida en los ensayos de laboratorio es bastante cerca a la obtenida en las simulaciones, presentando la variación máxima en la fase S con una diferencia de 0,32%, reflejando que los resultados obtenidos en las simulaciones son bastante cercanos con respecto a los ensayos de laboratorio. Lo mismo se puede apreciar en la Figura 4-7.5 con respecto a la distorsión armónica de corriente, presentando una variación máxima en la fase S que tiene un valor igual a 0,12%.

En la Figura 4-7.6 se puede observar la comparación de las corrientes RMS en el estator del motor de inducción, presentando una variación máxima en la fase S, la cual presenta una diferencia de 0,1 [Arms], reflejando que los resultados obtenidos en las simulaciones son bastante cercanos con respecto a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Con respecto a los valores de voltaje RMS los valores aún más cercanos debido ya que en las simulaciones se tomaron los valores tomados de los ensayos de laboratorio y estos fueron utilizados en ellas, de tal forma que los valores son casi idénticos.

Cabe mencionar que las velocidades medidas en ambos ensayos de laboratorio se acercan bastante a las entregadas en las simulaciones. El torque presenta ciertas variaciones, esto se debe a que el método utilizado para medir el torque mecánico en los ensayos de laboratorio no es del todo exacto.

El tipo de control a utilizar en los ensayos y en las simulaciones es el control escalar V/f (voltaje-frecuencia), debido a que en los ensayos reales solo se puede realizar un ensayo escalar en lazo abierto ya que no existe un retorno al variador desde el motor. Es así como solamente se regula la velocidad mediante la variación de la frecuencia en el display del VDF. [4]

5.2 Comparación de forma de onda y valores de tensión.

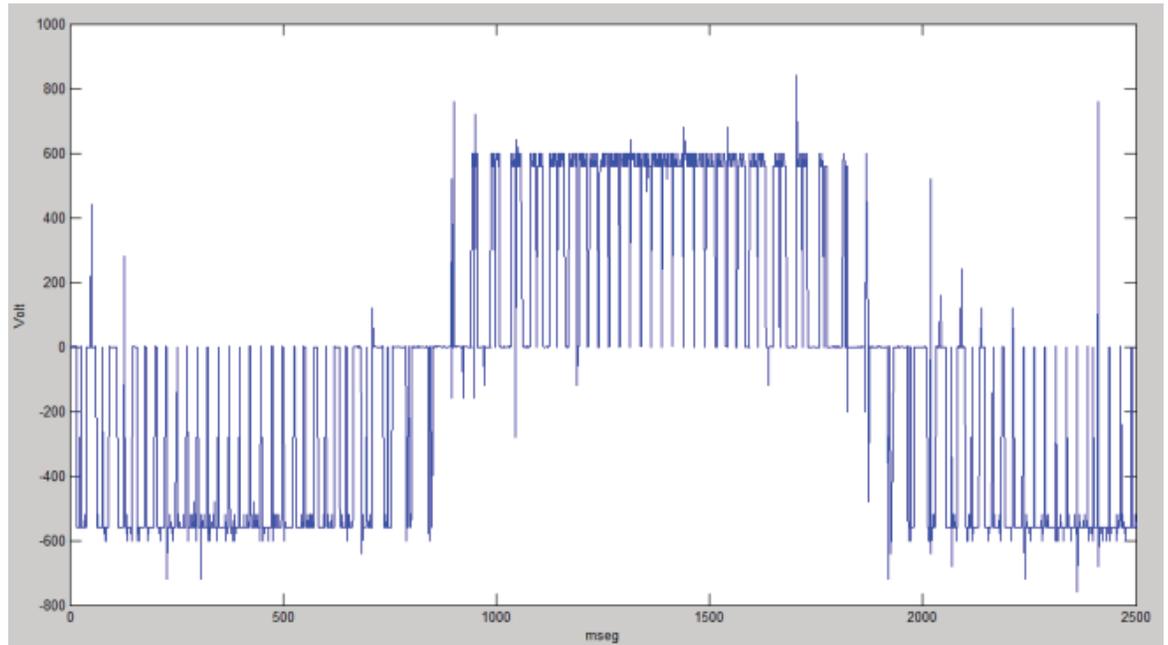


Figura 5-2.1: Forma de onda de tensión en la entrada del motor.

En la Figura 5-2.1 se muestra la forma de onda de tensión en la entrada del motor de inducción trifásico, forma de onda que corresponde a la obtenida en los ensayos de laboratorio, en donde la cresta de la sinusoidal se encuentra aproximadamente en los 560 [V] (valor peak to peak entre fases).

En la Figura 5-2.2 se muestra la forma de onda de tensión obtenida de las simulaciones, donde se puede observar que la forma de onda cuadrada tiende a ser sinusoidal y su peak más alto alcanza los 562 [V] línea a línea, valor muy cercano al medido en los ensayos de laboratorio.

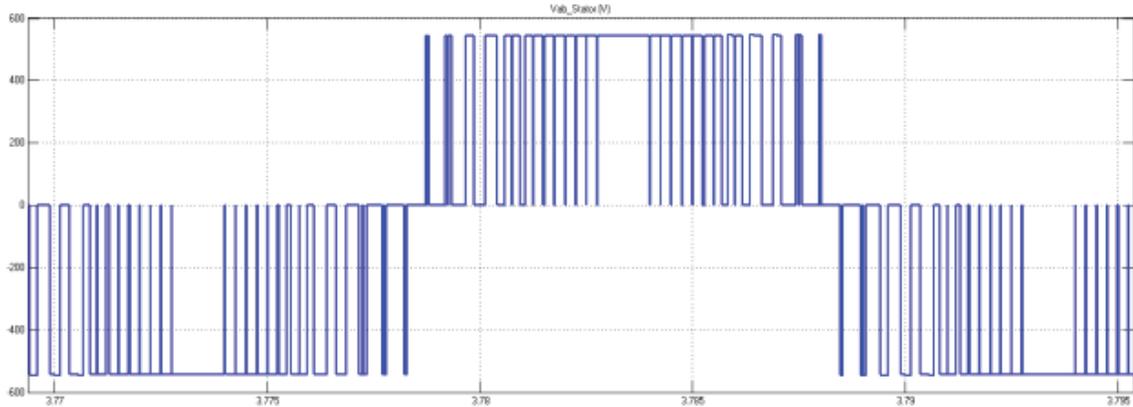


Figura 5-2.1: Forma de onda de tensión obtenida en la simulación.

5.3 Comparación de corriente.

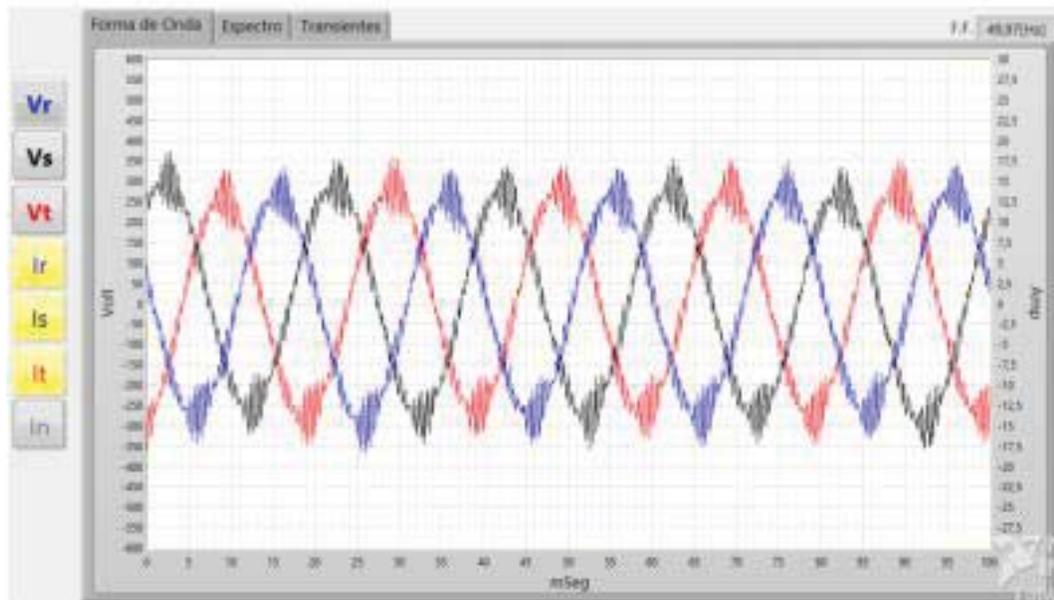


Figura 5-3.1: Forma de onda de corriente.

En la Figura 5-3.1 se muestra la forma de onda de corriente medida por el instrumento de medición SAMTE en el ensayo de laboratorio, donde se obtiene un valor de corriente RMS aproximado de 10 [A].

En la Figura 5-3.2 se muestra la forma de onda de corriente obtenida de la simulación, donde se obtiene un valor de corriente RMS aproximado de 10,6 [A].

Se puede observar además el importante contenido armónico que presentan las dos formas de onda de corriente mencionadas anteriormente.

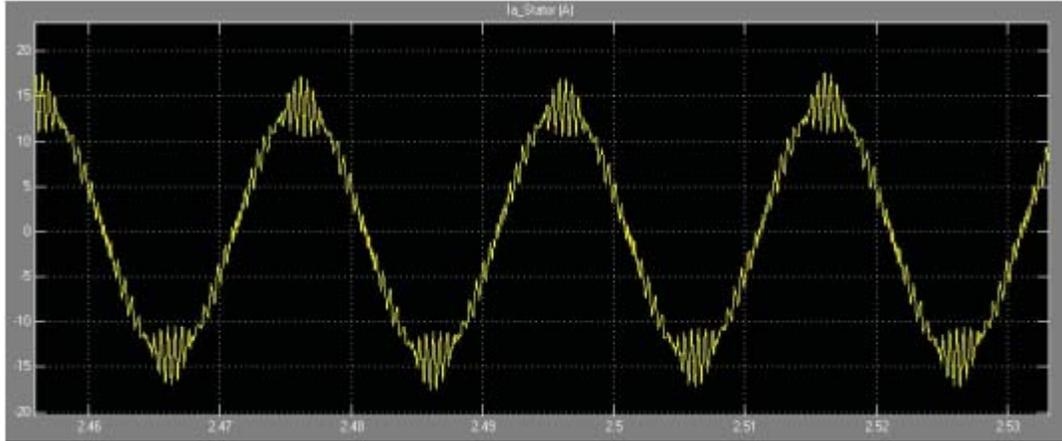


Figura 5-3.2: Forma de onda de corriente.

5.4 Ensayo a motor de inducción con carga a velocidad nominal.

En este ensayo el variador de frecuencia se ajusto de tal forma que el motor desarrollará una velocidad igual a 1500 [rpm] con una frecuencia de 50 [Hz] (frecuencia nominal), como carga se utilizó el mismo banco de ampollitas mostrado en el capítulo 3.

A continuación, se mostrarán los espectros armónicos de voltaje y corriente obtenidos en las simulaciones como también en los ensayos de laboratorio.

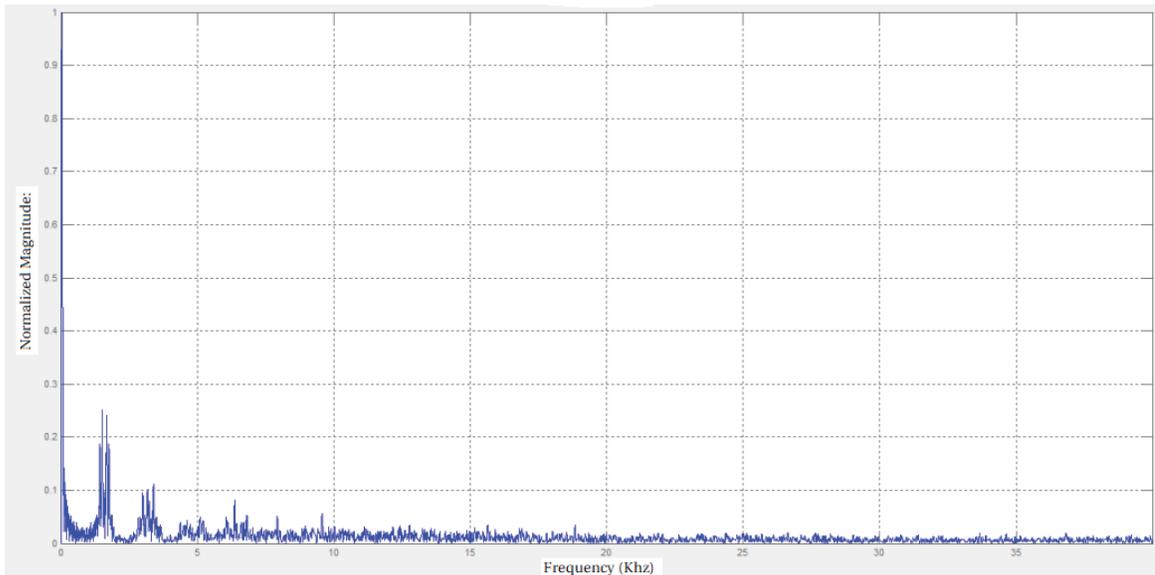


Figura 5-4.1: Espectro armónico de tensión (ensayo de laboratorio).

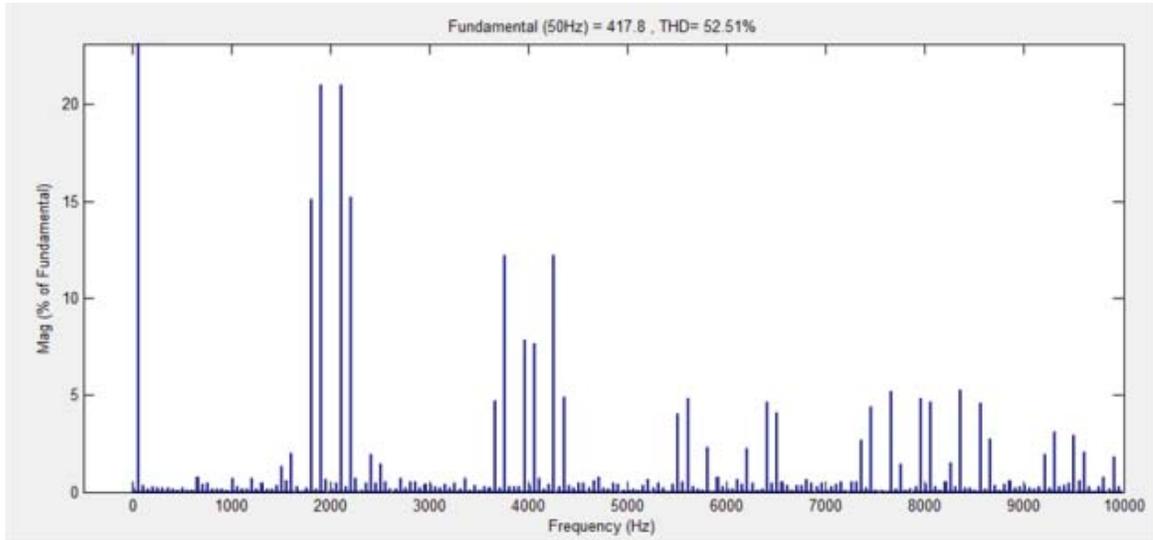


Figura 5-4.2: Espectro armónico de tensión (Simulación).

En la Figura 5-4.1 se muestra el espectro armónico de tensión obtenido desde el ensayo de laboratorio, donde la distorsión armónica total es igual a 41,2% (THD) con respecto a la fundamental. Las armónicas más influyentes se encuentran cercanas a la frecuencia de 2000 [Hz], presentando una amplitud igual a 105 [V].

En la Figura 5-4.2 se muestra el espectro armónico de tensión obtenido desde el programa Matlab-Simulink, donde la distorsión armónica total es igual a 52,51% con respecto a la frecuencia fundamental. Al igual que el espectro armónico obtenido del ensayo de laboratorio las armónicas más influyentes se encuentran cercanas a la frecuencia de 2000 [KHz]. Con los datos anteriores se puede notar la similitud entre ensayo de laboratorio y simulación.

Cabe señalar que la forma de onda de voltaje para los casos (ensayo de laboratorio y simulación), la forma de onda de voltaje obtenida es del tipo PWM, en donde en el caso del ensayo de laboratorio se obtiene una tensión igual a 530 [V] aproximadamente entre fases y con respecto a la simulación se obtiene una tensión igual a 420 [V] aproximadamente entre fases.

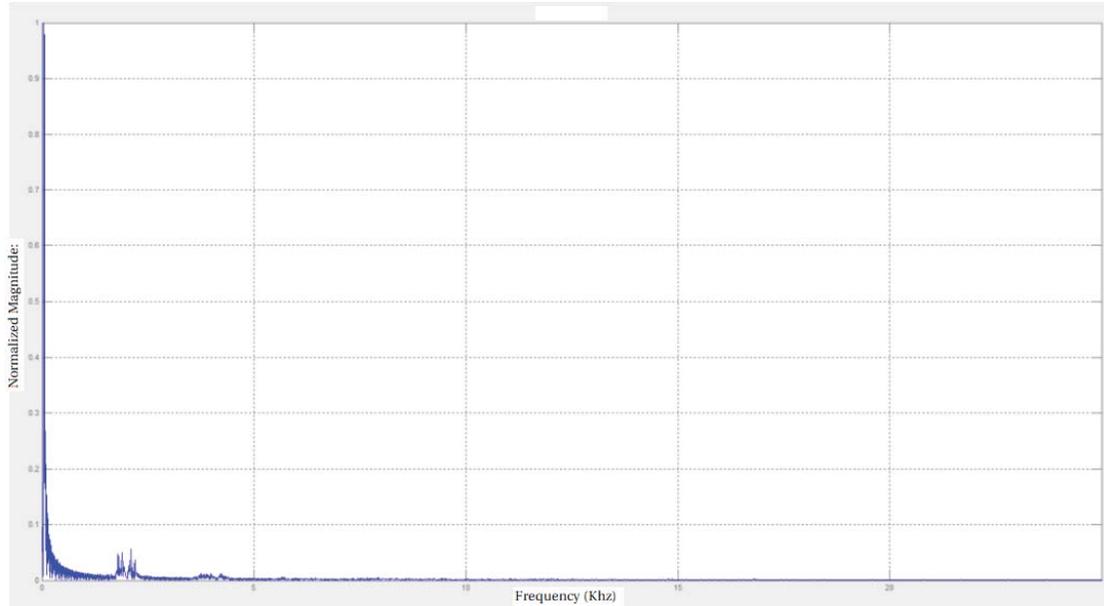


Figura 5-4.3: Espectro armónico de corriente (ensayo de laboratorio).

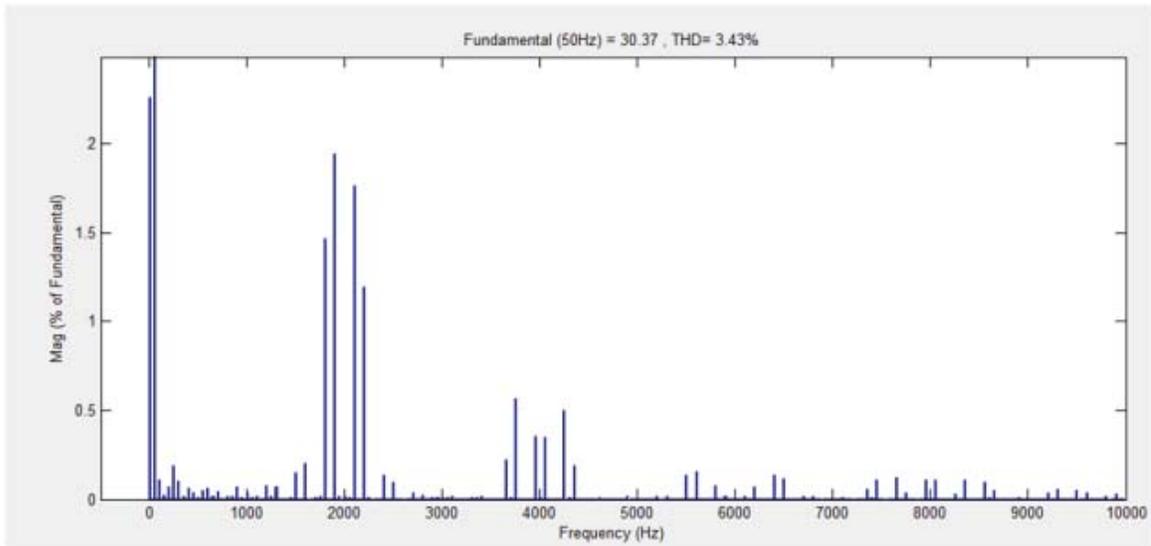


Figura 5-4.4: Espectro armónico de corriente (Simulación).

En la Figura 5-4.3 se muestra el espectro armónico de corriente obtenido desde el ensayo de laboratorio, donde la distorsión armónica total es igual a 4,02% (THD) con respecto a la fundamental. Las armónicas más influyentes se encuentran cercanas a la frecuencia de 2000 [Hz], con respecto a la fundamental presenta una amplitud máxima de 30 [A] con una frecuencia igual a 50 [Hz].

En la Figura 5-4.4 se muestra el espectro armónico de corriente obtenido desde el programa Matlab-Simulink, donde la distorsión armónica total es igual a 3,43% con respecto a la frecuencia fundamental. Al igual que el espectro armónico obtenido del ensayo de laboratorio las armónicas más influyentes se encuentran cercanas a la frecuencia de 2000 [KHz]. Con los datos anteriores se puede notar la similitud entre ensayo de laboratorio y simulación.

Cabe señalar que la forma de onda de corriente para los casos (ensayo de laboratorio y simulación), la forma de onda de corriente obtenida es del tipo sinusoidal, en donde en el caso del ensayo de laboratorio se obtiene una corriente media igual a 21 [A] aproximadamente y se obtiene una corriente media igual a 21,21 [A] en la simulación realizada en Matlab-Simulink.

Como se puede notar en las figuras mostradas anteriormente, el contenido armónico de voltaje es importante como también el de corriente, viendo el espectro armónico de ambos se puede deducir que al momento de estar realizando el ensayo de laboratorio el motor de inducción trifásico estaba sometido a un importante torque pulsante, el que pudo haber sido notado por marcadas vibraciones en el armazón del motor de inducción.

Discusión y conclusiones

Sin duda el motor de inducción o asíncrono trifásico tiene una gran importancia a nivel de trabajos que se desarrollan de manera industrial, debido a que su mantención es sencilla y el valor de estos motores no es muy elevado al momento de invertir en ellos.

En un principio el control de velocidad de estos motores era un problema sumamente importante, pero a medida que el tiempo fue avanzando y con los avances desarrollados en el campo de la electrónica de potencia se pudo crear instrumentos que facilitan el control de velocidad de estos, uno de estos instrumentos y sumamente conocido en el área de ingeniería es el variador de frecuencia. El variador de frecuencia se posiciona entre las fuentes de alimentación y el motor, la energía de la fuente de alimentación pasa a través del variador de frecuencia y este regula la energía antes de que esta llegue al motor eléctrico para luego ajustar la frecuencia y la tensión en función de los requisitos del procedimiento en el cual se encuentre inserto.

En los ensayos de laboratorio se pudo comprobar que existe un contenido armónico asociado al sistema, esto se debe a que las fuentes de alimentación no entregan una señal sinusoidal perfecta, presentando aproximadamente una distorsión armónica total de 3,6%. Esto conlleva a la presencia de armónicos en todos los ensayos de laboratorio, provocando torques pulsantes en la máquina de inducción. Además, existen torques pulsantes por el propio diseño de la máquina debido al número discreto de devanados de estator y los efectos de saturación del hierro.

El variador de frecuencia es ampliamente utilizado de manera industrial para el accionamiento de máquinas, principalmente al momento de accionar el motor de inducción, ya que su velocidad depende de la frecuencia que se le está imponiendo de la red o fuente de alimentación. Es por esto que es importante analizar lo que ocurre al momento de utilizar un variador de frecuencia al momento de accionar un motor de inducción. Observando las formas de onda obtenidas de las simulaciones realizadas se puede comprobar el importante contenido armónico que presenta la salida del variador de frecuencia, entregando una tensión de pulsos cuadrados al motor de inducción, como la forma de onda de voltaje entregada al motor no es puramente sinusoidal el contenido armónico es considerable. Utilizando la función “FTT Analysis” (análisis de Fourier) de Matlab-Simulink que nos permite ver el espectro de frecuencia

de alguna señal, se analizan los armónicos presentes en la corriente y torque eléctrico, comprobando que la distorsión armónica en estas señales tiene un valor elevado, además se comprueba con las formas de onda de estas señales el ruido producido por el variador de frecuencia. Finalmente enfocándose en la forma de onda del torque eléctrico, se observa el importante contenido de ruido, generando a si un torque pulsante, lo cual desde el punto de vista físico genera vibraciones mecánicas en el motor de inducción.

Al analizar la falla en el estator se puede observar que las corrientes aumentan tanto como en el ensayo de laboratorio y en la simulación. Se puede apreciar también que el desfase entre las fases que continúan en funcionamiento es de 180° . El aumento abrupto de corriente se debe a que las fases que continúan en funcionamiento deben entregar la potencia no entregada por la fase faltante.

Al observar los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Pontificia Universidad de Valparaíso y compararlos con los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el programa Matlab-Simulink, se puede apreciar que existe una variación pequeña con respecto a la distorsión armónica entregada por el SAMTE y la entregada por Matlab-Simulink. La cual refleja que las simulaciones son concordantes con los ensayos de laboratorio.

En la realidad los torques pulsantes pudieron ser comprobados en los ensayos de laboratorio ya que estos se traducen en vibraciones mecánicas en el eje del motor, los cuales fueron apreciados tomando la barra de metal adosada a la carcasa del generador de corriente continua.

Bibliografía

- [1] J. F. Mora, Máquinas Eléctricas, Madrid España: Concepción Fernández Madrid, 2003.
- [2] T. Wilde, Máquinas eléctricas y sistemas de potencia., México: PEARSON EDUCACIÓN, 2007.
- [3] L. Yingjie, L. Silong y S. Bulent, «Analysis of Pulsating Torque in Squirrel Cage,» Wisconsin, 2013.
- [4] C. F. E. Melo Velgard, «Simulación y ensayos del Vdf SD700 para análisis de armónicos, transitorios y componentes Simétricas.,» Valparaíso, 2017.
- [5] LABSEI, «Labsei.ucv.cl,» 2017. [En línea]. Available: <http://labsei.ucv.cl/Trabajos/trabajos.htm>.
- [6] S. J.Chapman, Máquinas Eléctricas, Colombia: MCGRAW_HILL, 2000.
- [7] D. A. Ruiz Caballero, «Apuntes Electrónica de Potencia,» Valparaíso, 2017.
- [8] J. Song Manguelle, G. Ekemb, M. Nzongo y T. JIN, «A theoretical Analysis of Pulsating Torque Components in AC machines wiht Variable Frequency Drives and Dynamic Mechanical Loads,» 2017.
- [9] CNE, «NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DE,» Santiago de Chile, 2017.
- [10] P. Kumar Hari y G. Narayanan, «Theorical and experimental Evaluation of Pulsating Torque Produced by induction Motor Drives Controlled with Advanced Bus-Clamping Pulse Width Modulation,» 2015.

A Samte

A.1 Información relevante sobre SAMTE.

El registrador de variables eléctricas está compuesto de una unidad electrónica y de un computador tipo notebook.

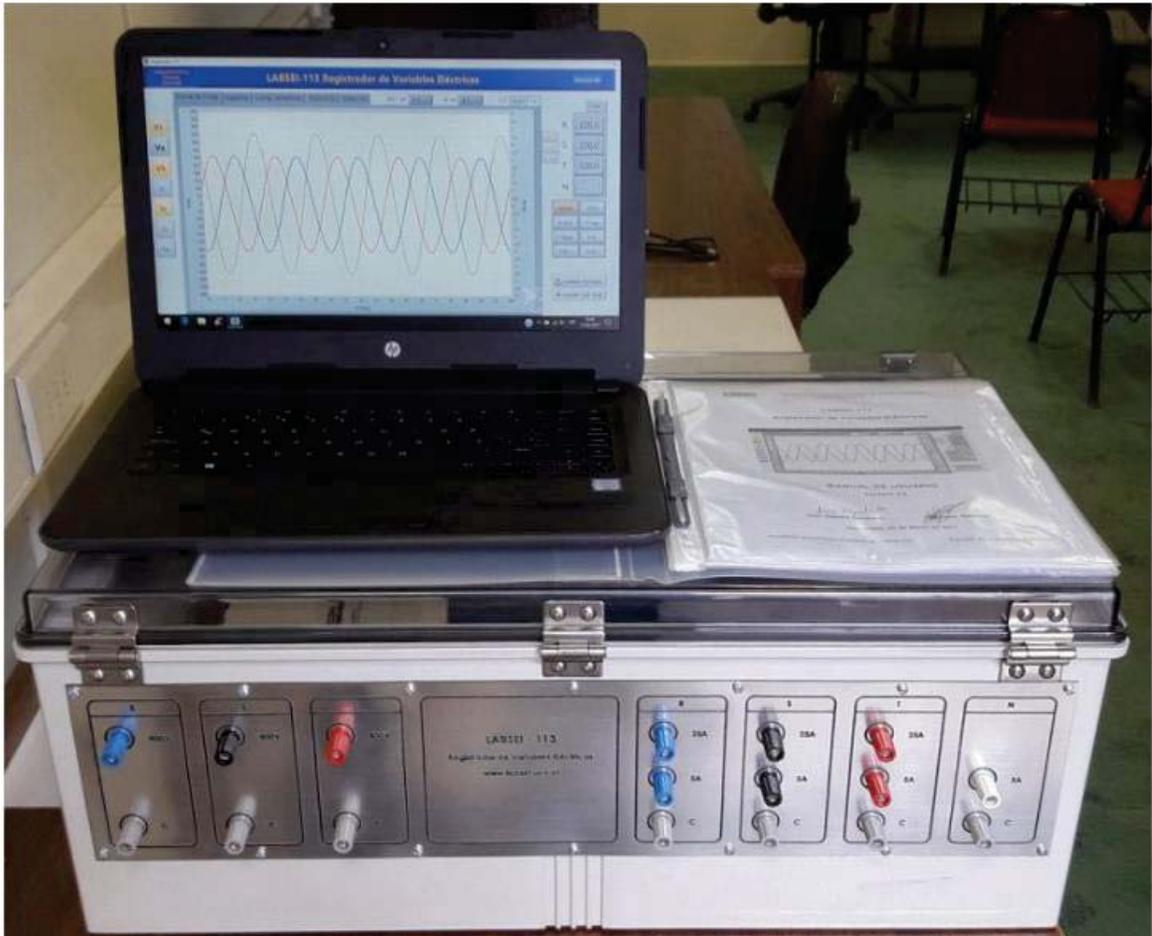


Figura A-1: Samte.

La unidad electrónica es idéntica a la del proyecto de título original de Francisco Nahmías. Fue fabricada por la empresa TECHDEV del ex alumno Fernando Rubio.

Se agrega al programa original la capacidad de medir componentes simétricas, capturar Transientes mecánicas de larga duración (partida de motores) y medir corrientes grandes con transformadores externos.

El equipo tiene tres canales de tensión (Fase R, S y T) y cuatro de corriente (Fases R, S, T y neutro). Los primeros tienen un rango de 400 Vrms, y los segundos disponen de rangos de 5 y 25 Arms, excepto el del neutro, que sólo tiene el rango menor. El sistema selecciona automáticamente la escala de corriente en base al borne utilizado. [5]

La adquisición se realiza a una tasa de 10.000 m/s por canal con una resolución de 16 bit.

Los sensores de los equipos proveen aislación galvánica entre los canales de voltaje, de corriente y el computador. Los canales de corriente cuentan con fusibles rápidos de protección.

El programa corrige automáticamente el offset de los sensores y elimina el ruido residual del hardware.

La versión 2.0 del programa permite:

- Visualizar formas de onda de las tensiones y corrientes.
- Visualizar contenido armónico de las tensiones y las corrientes.
- Capturar y visualizar transientes de corta duración (0,5 Segundos).
- Capturar y visualizar transientes de larga duración (1 minuto).
- Medir frecuencia y valores RMS.
- Medir potencias activas, reactivas, aparentes y factores de potencia.
- Medir el nivel de distorsión armónica de las variables.
- Medir magnitudes, fases y componentes simétricas.

Las señales originales, los resultados del procesamiento y las pantallas del programa pueden ser grabadas en archivos para realizar análisis posteriores con programas tales como Excel y Matlab.