

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

**SIMULACIÓN DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ARRANQUE DE
UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN**

**SIMULACIÓN DE TIPOS DE ARRANQUE DE UN MOTOR
TRIFÁSICO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO SUPERIOR
EN ELECTROMECAÁNICA**

DYLAN DANIEL VALENCIA RODRÍGUEZ

DIRECTOR: ARACELY INÉS YANDÚN TORRES

DMQ, septiembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, DYLAN DANIEL VALENCIA RODRÍGUEZ declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



DYLAN DANIEL VALENCIA RODRÍGUEZ

dylan.valencia@epn.edu.ec

dani02valencia@gmail.com

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DYLAN DANIEL VALENCIA RODRÍGUEZ, bajo mi supervisión.



ARACELY INÉS YANDÚN TORRES
DIRECTOR

aracely.yandun@epn.edu.ec

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmo que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DYLAN DANIEL VALENCIA RODRÍGUEZ

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico principalmente a Dios, por darme inteligencia, fuerzas e inspiración para poder continuar con este proceso de cumplir mis metas y objetivos planteados.

A mis padres, por el amor incondicional y su sacrificio diario en todos estos años, gracias a ellos que nunca dudaron de mí y me apoyaron en cada una de mis decisiones. Es un orgullo poder llamarles padres.

A mi hermano, que a pesar de las circunstancias y momentos difíciles nunca me dejo solo, tanto física como moralmente.

A mis profesores y maestros que fueron pilar fundamental para mi formación profesional con buenas bases, impartíendome conocimiento y experiencias las cuales fueron de guía para poder avanzar en este proceso.

A mis amigos y compañeros que me apoyaron desde el comienzo y a pesar de tener caídas ellos me levantaron, ayudándome a seguir adelante.

Finalmente dedico a las personas que me apoyaron desde pequeño y ya no están en este mundo, pero me llenaron de amor y palabras sabias para alcanzar a ser un buen profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la bendición de la vida, por darme fuerzas, inteligencia y guía a lo largo de mi existencia, ser mi apoyo en mis momentos de debilidad y dificultad.

Gracias a mis padres y hermano: Juan Valencia, Nancy Rodríguez y Samuel Valencia, por ser mi apoyo y los principales promotores para poder conseguir este objetivo, por nunca dudar y creer en mis sueños, gracias por los valores, principios y consejos que me inculcaron desde pequeño.

Agradezco a todos aquellos que forman parte de la Escuela Politécnica Nacional, especialmente a la Escuela de Formación de Tecnólogos, por abrirme las puertas a sus conocimientos, infraestructura y docentes de calidad. De manera especial, a la Ing. Aracely Yandún tutor de este trabajo de investigación quien me ha brindado todo su apoyo, conocimiento, paciencia y rectitud como docente durante el desarrollo de este trabajo.

Finalmente agradezco a mis amigos y familiares que me apoyaron desde un inicio, que nunca dejaron de creer en mí y en todas mis capacidades para alcanzar este camino al éxito.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| CERTIFICACIONES | I |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA | II |
| DEDICATORIA | III |
| AGRADECIMIENTO | IV |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | V |
| RESUMEN..... | VII |
| ABSTRACT | VIII |
| 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO..... | 1 |
| 1.1 Objetivo general | 1 |
| 1.2 Objetivos específicos..... | 1 |
| 1.3 Alcance..... | 2 |
| 1.4 Marco teórico..... | 2 |
| Motor trifásico de inducción | 2 |
| Componentes y principio de funcionamiento..... | 2 |
| Tipos de arranque de un motor trifásico de inducción | 5 |
| Arranque directo | 5 |
| Arranque estrella-triángulo..... | 6 |
| Arranque por autotransformador | 6 |
| Arrancadores suaves | 7 |
| Variadores de velocidad | 8 |
| Software Matlab..... | 9 |
| Simulink..... | 10 |
| Simscape electrical..... | 10 |
| 2 METODOLOGÍA..... | 11 |
| 2.1 Esquemas eléctricos..... | 13 |
| Arranque directo | 13 |
| Arranque estrella- triángulo..... | 14 |

| | |
|---|-----|
| Arranque de motor a voltaje reducido con autotransformador | 15 |
| 2.2 Características del motor a simular..... | 16 |
| 2.3 Implementación en Simulink de Matlab..... | 16 |
| Arranque directo | 17 |
| Arranque estrella-triángulo..... | 17 |
| Arranque de motor a voltaje reducido con autotransformador | 18 |
| 3 RESULTADOS | 20 |
| 3.1 Arranque directo | 20 |
| 3.2 Arranque estrella-triángulo..... | 21 |
| 3.3 Arranque de motor a voltaje reducido | 23 |
| 3.4 Comparación de resultados entre arranques | 25 |
| 4 Conclusiones | 29 |
| 5 Recomendaciones | 30 |
| 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 31 |
| 7 ANEXOS..... | I |
| Anexo I. Certificado de Turnitin | I |
| Anexo II. Certificado de funcionamiento de trabajo de integración curricular..... | II |
| Anexo III. Datasheet del motor simulado..... | III |
| Anexo IV. Video de funcionamiento | IV |

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla la simulación de los principales tipos de arranque de un motor trifásico de inducción. En el primer capítulo, se detallan los objetivos general y específicos así como el alcance del proyecto. Posteriormente se realiza una investigación del motor trifásico de inducción y sus diferentes técnicas de arranque, para finalmente detallar las características principales del software que se implementó para la simulación, en este caso Matlab juntamente con sus librerías y componentes.

En el segundo capítulo, mismo que corresponde a la metodología, se plantea un diagrama de flujo donde se detalla el procedimiento que se va a utilizar para la elaboración del trabajo, además se incluye los esquemas eléctricos de los tres tipos de arranque a implementar. Luego, se realiza una pequeña investigación del motor a simular con sus características y datos de placa. Posteriormente, estos esquemas se implementaron en Simulink de Matlab.

En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos donde se realiza un análisis de las diferentes curvas de corriente, par y velocidad. Además, se realiza una comparación de estas tres variables para los diferentes tipos de arranques estudiados.

En el cuarto y quinto capítulo se describen las conclusiones y recomendaciones realizadas a partir del desarrollo de este trabajo.

PALABRAS CLAVE: Matlab, Simscape, Simulink, Motor Trifásico, Arranques, Esquemas Eléctricos.

ABSTRACT

This work develops the simulation of the main types of starting of a three-phase induction motor. In the first chapter, the general and specific objectives as well as the extent of the project are detailed. Subsequently, an investigation of the three-phase induction motor and its different starting techniques is carried out, to finally detail the main characteristics of the software implemented for the simulation, in this case MATLAB together with its libraries and components.

In the second chapter, which corresponds to the methodology, a flow chart is presented detailing the procedure to be used for the elaboration of the work, and also includes the electrical diagrams of the three types of starting to be implemented. Then, a small investigation of the motor to be simulated is carried out with its characteristics and datasheet. Subsequently, these diagrams were implemented in Simulink of MATLAB.

In the third chapter, the results obtained are presented, where an analysis of the different current, torque and speed curves is performed. In addition, a comparison of these three variables is made for the different types of starts studied.

The fourth and fifth chapters describe the conclusions and recommendations made from the development of this work.

KEYWORDS: MATLAB, Simscape, Simulink, Three-phase motor, Starters, Electrical Diagrams.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Para el desarrollo del presente trabajo se inició con el planteamiento de los objetivos y el alcance que desea tener, luego se realizó un estudio e investigación de un motor trifásico de inducción donde se observará los componentes, el funcionamiento y las diferentes técnicas de arranque de este, además se estudia el software a utilizar para simulación, en este caso Matlab juntamente con sus librerías y recursos, también se desarrolló una pequeña investigación del motor a simular con sus características y datos de placa.

Posteriormente se diseñó en CADE-simu los esquemas eléctricos de los tres tipos de arranque a implementar, siendo estos: arranque directo, arranque estrella-triángulo y arranque a voltaje reducido. Una vez verificados los esquemas planteados en CADE-simu se implementaron estos en Simulink de Matlab, donde se utilizó bloques de la librería de Simulink y Simscape. Ya validados los esquemas se pasó a la etapa de simulación.

Dentro de la etapa de simulación se desarrolló pruebas de funcionamiento donde se verificó las diferentes curvas de corriente, par y velocidad en los tres tipos de arranque antes mencionados, donde se realizó una toma de datos y su respectivo análisis. Posteriormente ingresamos a la etapa de comparación donde por medio de las gráficas obtenidas por el osciloscopio utilizado, se sobreponen estas y se desarrolla su respectivo análisis.

Al final de este trabajo se redactan las conclusiones y recomendaciones obtenidas por el desarrollo de este proyecto.

1.1 Objetivo general

Implementar a través de simulación los principales tipos de arranque de un motor trifásico de inducción.

1.2 Objetivos específicos

Para el presente proyecto se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1. Estudiar las diferentes técnicas de los tipos de arranque de un motor trifásico de inducción.
2. Simular y comparar en Matlab varias de las técnicas de arranque estudiadas.

3. Realizar las respectivas pruebas de funcionamiento de la simulación implementada.

1.3 Alcance

Se estudiarán diferentes técnicas para arrancar un motor trifásico de inducción. A través del software Matlab, se implementará a través de simulación al menos 3 de estas técnicas y se compararán las principales características de cada arranque. Finalmente, se realizarán pruebas de funcionamiento de la simulación implementada.

1.4 Marco teórico

Motor trifásico de inducción

Los motores trifásicos de inducción son los más comunes dentro de las aplicaciones industriales, de la misma manera también se los usa en electrodomésticos. Las principales ventajas de estos tipos de motores comienzan por su diseño que es simple, además de resistente, tiene un bajo costo, bajo mantenimiento y una conexión que existe de forma directa a una fuente de alimentación de CA. Según la aplicación y uso, se tiene una gran variedad de este tipo de motores [1].



Figura 1.1. Motor trifásico de inducción [2].

Componentes y principio de funcionamiento

Dentro de un motor de inducción existe una parte fija que es exterior, llamada estator y el rotor el cual gira dentro del mismo, con una distancia calculada cuidadosamente entre estos llamada entrehierro. En su estator se puede encontrar un conjunto de devanados, mismos que debido a su suministro de CA, por medio de la naturaleza alterna de la tensión existente, se induce una fuerza electromagnética en el rotor, generando así otro conjunto de electroimanes, por tal motivo es denominado motor de inducción. Por medio de la interacción que existe entre sus devanados y campo magnético, se genera una

fuerza de torsión o también denominada par, obteniendo así que el motor gire en dirección del par resultante [3].

El estator, también denominada la parte fija del motor está conformada por varias láminas delgadas de acero de alta permeabilidad o hierro fundido, estas se encuentran perforadas y sujetas formando así un cilindro hueco con ranuras, como se muestra en la Figura 1.2. Dentro de las mismas se insertan bobinas de cables aislados, estas bobinas junto con el núcleo que rodea forman un devanado (polos) y el número de estos dependen de la conexión interna de sus devanados. Los devanados que existen en el estator se conectan directamente a la fuente de alimentación. Dentro de un motor trifásico de inducción se tiene el devanado del estator el cual se constituye por tres arrollamientos desfasados 120° en el espacio [3].

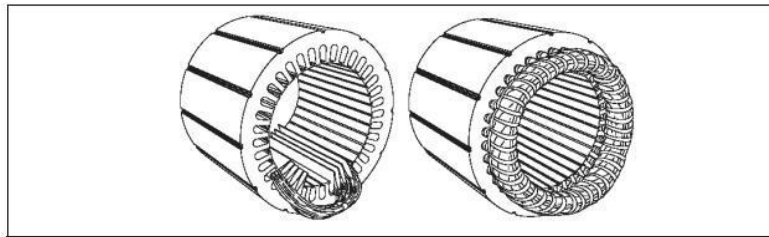


Figura 1.2. Estator de un motor trifásico [3].

El rotor se compone por varias láminas de acero delgadas, ranuradas por barras espaciadas uniformemente, las barras se conectan de forma mecánica y eléctrica a sus extremos mediante el uso de anillos. El rotor más utilizado se denomina jaula de ardilla, siendo más del 80% de los motores de inducción que lo utilizan, esto se debe a que su construcción es más simple y resistente [3].

Dentro del rotor se puede encontrar un núcleo laminado de forma cilíndrica con ranuras paralelas que se colocan de forma axial para transportar conductores. Las barras del rotor se encuentran en cortocircuito permanente en sus extremos por medio de sus anillos, como se muestra en la Figura 1.3. [3].

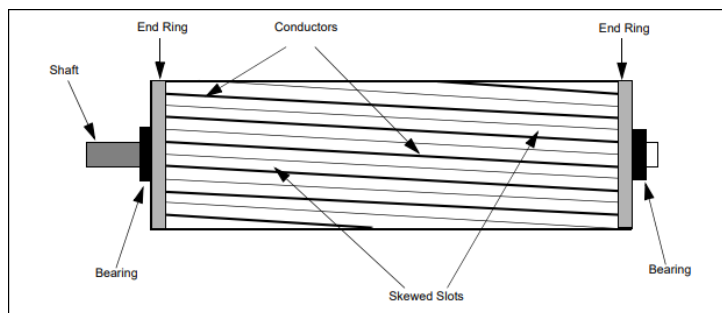


Figura 1.3. Rotor de un motor trifásico [3].

Su principio de funcionamiento como el de la mayoría de motores y máquinas asíncronas, se basa en la rotación que existe por el campo magnético, haciendo girar sus rotores, estos tipos de motores son los únicos que generan un campo magnético giratorio de forma natural dentro del estator, esto debido al suministro y su naturaleza. La velocidad que existe dentro de un motor de inducción depende del campo magnético creado por medio del estator girando a una velocidad síncrona (N_s) y se puede calcular con la Ecuación 1.1. [3].

$$N_s = 120 * \frac{f}{P}$$

Ecuación 1.1. Velocidad síncrona [3].

Donde:

N_s = velocidad síncrona del campo magnético del estator en RPM

P = el número de polos que existen dentro del estator.

f = frecuencia con la que se trabaja en Hertz.

Para poder reducir su velocidad relativa, con respecto al estator, el rotor funciona en la misma dirección que el flujo del estator alcanzando el flujo giratorio, sin embargo, de manera real este no logrará “alcanzar” el campo del estator, haciendo que el rotor funcione de manera más lenta que la velocidad del campo del estator, obteniendo la velocidad base (N_b) [3].

La diferencia entre velocidad síncrona y velocidad base se denomina deslizamiento y este varía con la carga. Al aumentar la carga generará que el rotor disminuya de velocidad o aumente su deslizamiento y al reducir la misma el rotor aumentará de velocidad o disminuirá su deslizamiento. El deslizamiento se expresa en porcentaje y se determina con la Ecuación 1.2. [3].

$$s(\%) = \frac{N_s - N_b}{N_s} * 100$$

Ecuación 1.2. Deslizamiento [3].

Donde:

N_s = velocidad síncrona del campo magnético del estator en RPM

N_b = velocidad base en RPM o velocidad del rotor

Tipos de arranque de un motor trifásico de inducción

Los motores trifásicos de inducción no generan los mismos problemas de arranque que los motores síncronos, además estos pueden ser conectados directamente a la red para ponerlos en marcha, sin embargo, no es recomendable. Una de las principales causas es su alta corriente de arranque, ya que esta puede causar una caída de voltaje del sistema de potencia produciendo problemas en el arranque a través de la línea. Dentro de los motores de inducción jaula de ardilla, la corriente de arranque varía con una gran amplitud esto depende de la resistencia efectiva del rotor en sus condiciones de arranque y la potencia nominal del motor [4].

Arranque directo

Es un arranque que no es complicado, ya que se aplica el voltaje nominal de forma directa al motor, el cual se realiza a través de las borneras (U, V, W) y para ello se utiliza un contactor o un interruptor. Además, este tipo de arranque se aplica en motores con bajas potencias y compatibles con la red, en este caso las corrientes absorbidas por el motor se observa que toma valores entre 5 a 7 veces la corriente nominal (I_n), así mismo se utiliza en máquinas que no necesitan aceleración gradual [5].

Los motores con arranque directo son los más accesibles para ser conectados a la red de forma directa, este sistema se denomina motor con rotor en cortocircuito o arranque directo. La reducción de voltaje en el arranque de estos motores va acompañada con la reducción del par de arranque, dando como resultado que este no es regulable [5].

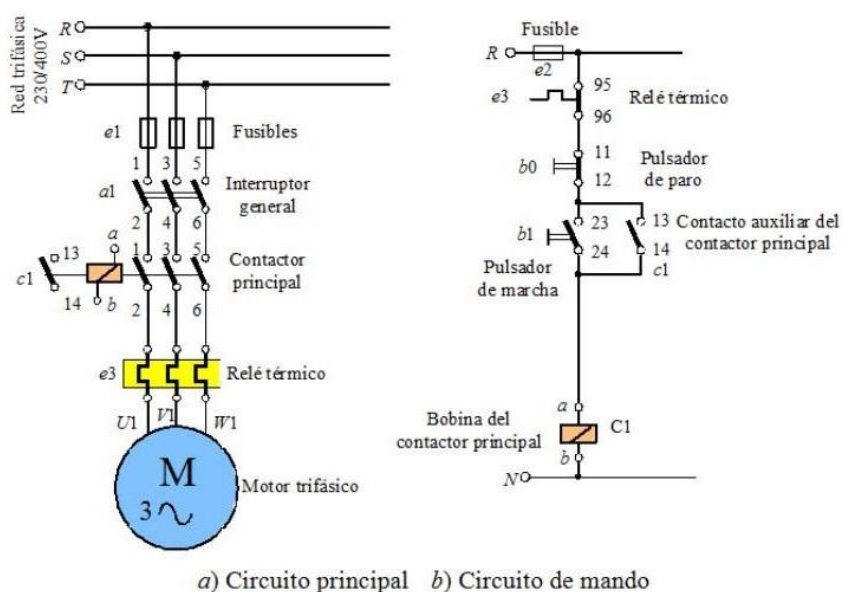


Figura 1.4. Esquema eléctrico de un arranque directo con guardamotor [6].

Arranque estrella-triángulo

Es utilizado para altas y medias potencias iguales o menores a 30 o 40 HP, así mismo los motores que son usados deben tener 6 terminales de fase hacia el área externa y el voltaje nominal similar a la red para que logre una correcta conexión, es decir, entre 220 a 380 V. Cuando los motores se encienden, el voltaje nominal se reduce un 58% o en cada bobina ocurre una disminución de $\sqrt{3}$. Por lo cual, estos motores deben ser asíncronos trifásicos con rotor en cortocircuito para que la conexión genere una corriente de arranque entre 1.3 y 2.6 de corriente nominal (I_n) o $1/3$ del valor inicial. Este tipo de alteración se consigue con circuitos abiertos los cuales son los más comunes o circuitos cerrados, en algunos casos aplicando resistores extras en el sistema de traspaso [5].

Al comienzo el sistema tiene una conexión en Y, a medida que va en aumento el movimiento, en un rango entre el 70 y 90% de su velocidad realiza el cambio a la conexión a delta. Después que sucede la permutación las características nominales son reestablecidas: la corriente pico de 2.5 al dato nominal y el torque de arranque 1.5 veces al dato nominal que estaba en el arranque directo. Si la transición ocurre muy rápido, la intensidad pico llega a valores mayores, lo que podría averiar los devanados e incitar a que el motor se detenga [5].

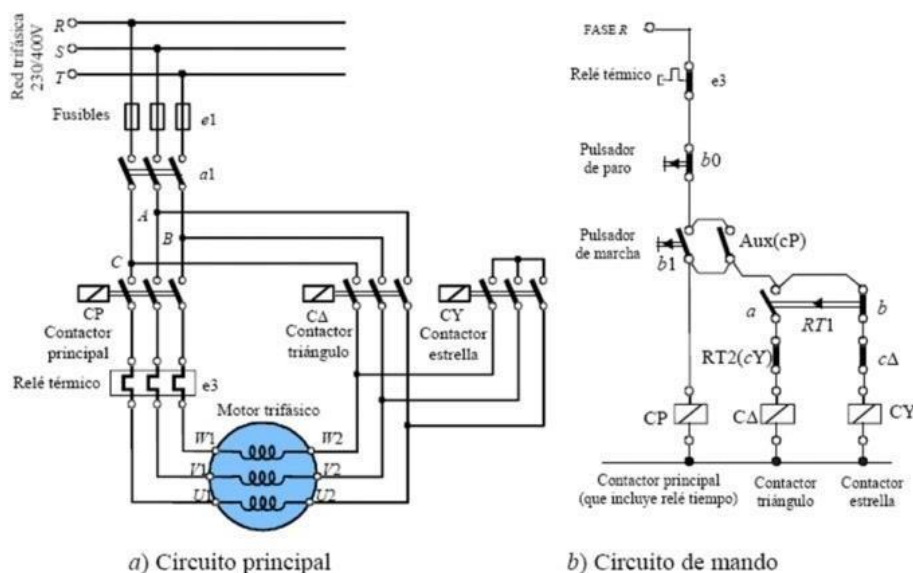


Figura 1.5. Esquema eléctrico de un arranque estrella-triángulo de un motor trifásico[7].

Arranque por autotransformador

Este arranque se basa en conectar un autotransformador en estrella con una serie de salidas de voltajes fijos, por medio de la introducción de varias tensiones reducidas al

motor, siendo estas cada vez mayores así logrando conseguir su arranque. Los motores que emplean autotransformadores obtienen salidas que corresponden al 50, 65 y 85% del voltaje de red, logrando así valores de 25, 42 y 64% en comparación con los torques que se obtienen al realizar un arranque directo. Gracias a este sistema se obtendrán características favorables en comparación con otros tipos de arranques, como una corriente pico menor y un torque de arranque más elevado, siendo este sistema más empleado en arranques de motores de potencia elevada [5].

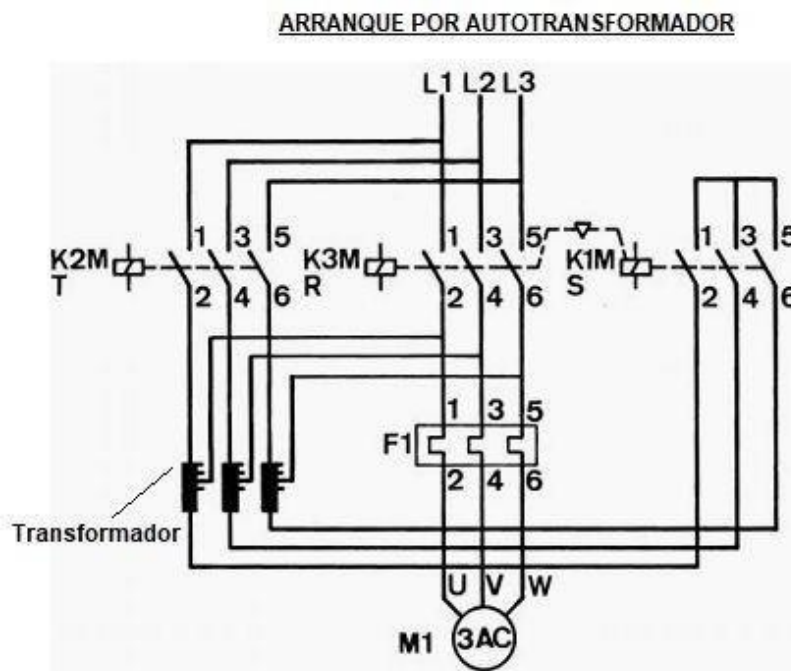


Figura 1.6. Esquema eléctrico de un arranque por autotransformador [8].

Arranadores suaves

Con los avances tecnológicos y el alcance de la electrónica de potencia, los métodos de arranque de motores han sido reemplazados por arranques electrónicos, estos más conocidos como arranques suaves, su principio de funcionamiento son los elementos de estado sólido. Gracias a este tipo de arranques se alarga la vida útil de las partes mecánicas utilizadas además de un ahorro en repuestos y sus tiempos de parada en el mantenimiento. Se aplican principalmente en motores asíncronos por su ventaja al momento de arranque y parada suave [5].

Se equipan con un control ángulo de fase que es monitoreado por un microprocesador para su parada y arranque suave. Por este control de ángulo de fase varía únicamente la tensión que existe en el motor, su frecuencia es constante siendo esta siempre la de la red. Al momento de su arranque se entrega una tensión reducida, reduciendo así el

par del motor en forma cuadrática y obteniendo así una corriente casi lineal a la tensión. En los motores con arrancador suave, se debe tener en cuenta que la tensión no debe superar los límites de los valores determinados y que es posible programar sus límites de corriente de arranque dentro de los valores de corriente nominal del motor por un número de veces, de la misma manera se puede configurar el tiempo de arranque y de parada [5].

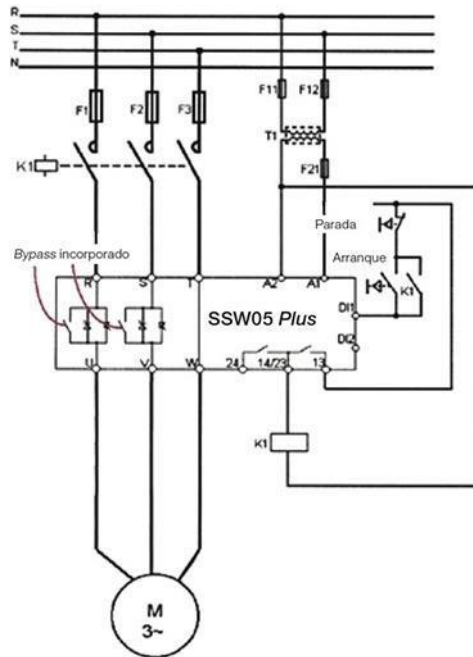


Figura 1.7. Esquema eléctrico de un arrancador suave [9].

Variadores de velocidad

Para poder efectuar el arranque y parada de forma controlada de un motor es necesario conectar un dispositivo electrónico de potencia, así como controlar la variación de velocidad y el par de fuerza de un motor, esto es posible a través de la alteración de frecuencia aplicada en el motor, logrando convertir las magnitudes fijas de frecuencia y tensión de red en magnitudes variables. Todo esto es por la rectificación de la tensión alterna de red generada por transistores que trabajan en modulación de ancho de pulso lo cual genera una corriente trifásica de frecuencia y tensión variable, lo que nos permite controlar el par de arranque de motor y su aceleración [10].

La ventaja principal de los arrancadores con variador es que genera una corriente con picos muy bajos comparados con los demás tipos de arranques, mismos que generan sobreesfuerzo en los conductores exigiendo mayor par de arranque, traducido en

perturbaciones y caídas de tensión, durante el proceso desgaste y golpes mecánicos, y de manera interna el calentamiento y desgaste prematura de acoplamientos [10].

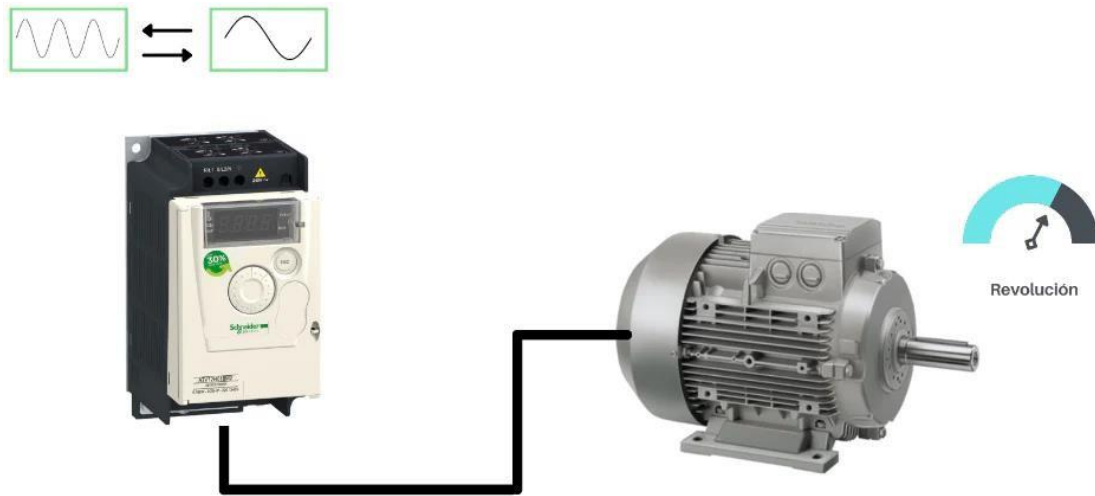


Figura 1.8. Variador de velocidad [11].

Software Matlab

Matlab es un software interactivo utilizado de forma general, se aplica como instrumento de computación simple y versátil además de tener en su poder un desarrollo en aplicaciones simbólicas, numéricas y gráficas. Este tiene una gran variedad de funciones predefinidas utilizadas en ingeniería y ciencias.

La interacción utilizada en este software es mediante instrucciones o comandos, funciones y un lenguaje estructurado. Los objetos básicos de Matlab son matrices [12].



Figura 1.9. Matlab [13].

Algunas de las características principales de Matlab son:

- Utiliza un cálculo numérico rápido y preciso
- Utiliza funciones para visualizar y graficar de forma avanzada
- Tiene una extensa biblioteca
- Su programación es mediante lenguaje de alto nivel

- Sus operaciones son: simples, eficientes, interactivo, programable con un sistema de ayuda en línea [12].

Simulink

Simulink es una herramienta que viene integrada en el software Matlab, donde su interfaz principal es la herramienta de forma gráfica, la cual es utilizada para describir el sistema mediante diagramas de bloques. Esta herramienta se utiliza en ciencias e ingenierías donde se controla y procesa señales de un sistema simulado además de que sus diseños son basados en modelos [14].



Figura 1.10. Matlab-Simulink [15]

Simscape electrical

Simscape es una herramienta que proporciona bibliotecas compuesta por componentes para simular y modelar sistemas mecatrónicos, electrónicos y de energía eléctrica. Existen modelos de semiconductores, motores y componentes donde sus aplicaciones son de accionamiento electromecánico, redes inteligentes además de energía renovable. Estos componentes son normalmente utilizados para evaluar construcciones de circuitos analógicos, desarrollando sistemas mecatrónicos con accionamiento eléctrico y analiza la generación, transmisión, conversión y el consumo de energía dentro de la red. Simscape nos ayuda a desarrollar estos sistemas de control y se logrará probar el rendimiento de estos [16].

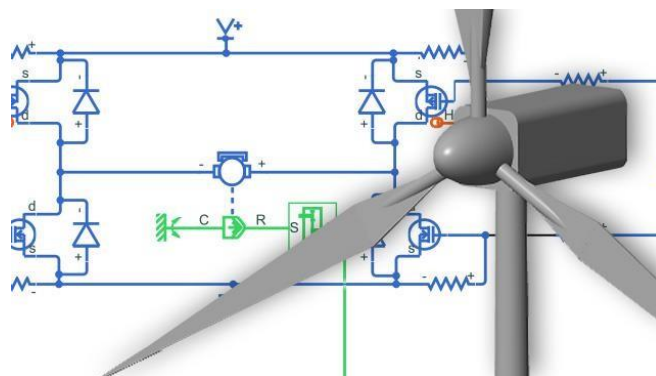


Figura 1.11. Simscape Electrical [17].

2 METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrolló bajo la siguiente metodología: partiendo desde su fase teórica, se estudió las diferentes técnicas de los tipos de arranque de un motor trifásico de inducción, además de las diferentes librerías y recursos del software Matlab para la simulación del sistema planteado. Posteriormente en la fase de diseño, se diseñará los diferentes esquemas eléctricos de cada una de las técnicas a ser simuladas para su correcta implementación. Luego, en la fase de simulación, se implementará a través de simulación en Matlab, tres de las diferentes técnicas de los tipos de arranque de un motor trifásico de inducción. Finalmente, en la fase de validación y análisis de resultados, se realizarán pruebas de funcionamiento del sistema y se compararán las diferentes técnicas de los tipos de arranque implementados en simulación.

En la Figura 2.1 se observa el diagrama de flujo de la metodología utilizada, acorde a este diagrama, se inicia con la investigación, donde se hará una recolección de información disponible del programa utilizado y de la teoría necesaria para este estudio, luego se realizará el desarrollo de esquemas eléctricos donde se implementará los conocimientos de circuitos eléctricos y máquinas eléctricas referentes al tema investigado. Una vez finalizado los esquemas eléctricos, se continuará con un proceso de validación de los mismos, los cuales, si no cumplen los estándares establecidos se volverá al proceso de investigación, de lo contrario, una vez validado los esquemas y circuitos se iniciará el proceso de simulación en Matlab.

Una vez identificado las librerías y elementos a usar en Simulink, se implementará los esquemas eléctricos validados donde se comprobará su comportamiento, si estos no funcionan se volverá al punto de validación, si estos funcionan acorde a lo establecido se iniciará el proceso de simulación donde una vez verificado el software se procederá a simular, así se obtendrá los resultados estimados bajo las consideraciones establecidas.

Para poder validar los datos, es necesario analizar los resultados obtenidos de la simulación, si los datos son erróneos se volverá al proceso de simulación o a la implementación de circuitos, caso contrario, una vez validado, se llevará a cabo la obtención y análisis de resultados, posteriormente con esto se logrará comparar los resultados obtenidos y definir las conclusiones en cada uno de los arranques.

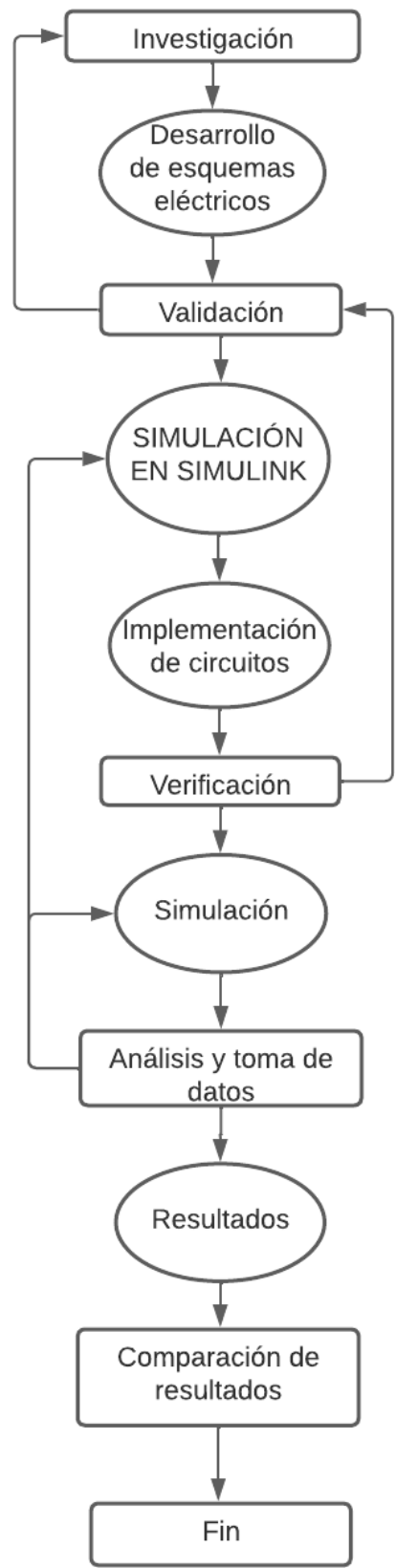


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada.

2.1 Esquemas eléctricos

En el presente subcapítulo, se desarrollarán los esquemas eléctricos de los tres diferentes tipos de arranque de un motor trifásico de inducción, mismos que se implementarán en el software Simulink de Matlab.

Arranque directo

En la Figura 2.2 se muestra el esquema principal y de mando para el arranque directo de un motor trifásico de inducción. En el esquema principal se encontrará una red trifásica L1, L2 y L3 siendo esta la fuente principal del motor, fusibles, un interruptor general y el respectivo contactor para sus bobinas, finalmente se conecta a los bornes del motor U1, V1 y W1. Para el circuito de mando se tiene una fase y un neutro, en medio de estos se conectará un fusible como protección, un pulsador de emergencia PE, pulsador de arranque MC1, un contactor para enclavamiento y una bobina C1.

El funcionamiento para arrancar el motor de forma directa comienza cuando se activa el interruptor general IG, luego el pulsador MC1, activando así la bobina C1 y enclavando el contactor C1, de esta forma se activará el motor M con arranque directo.

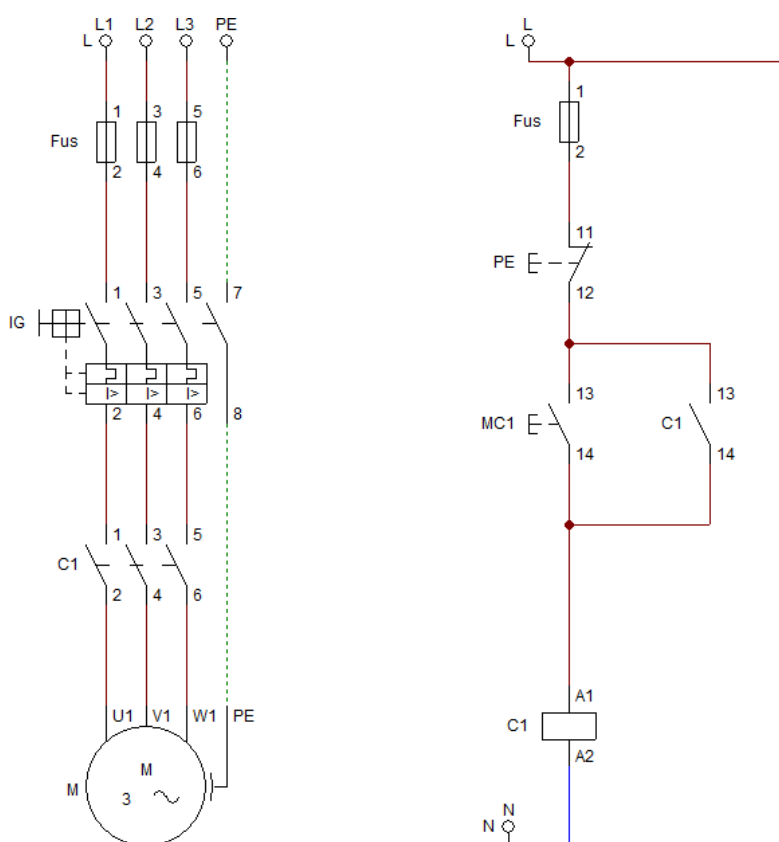


Figura 2.2. Esquema eléctrico arranque directo.

Arranque estrella- triángulo

En la Figura 2.3 se muestra el esquema principal y de mando para el arranque estrella-triángulo de un motor trifásico de inducción. En el esquema principal se encontrará una red trifásica L1, L2 y L3 siendo esta la fuente principal del motor, fusibles de protección, un interruptor general, en este esquema se tiene 3 contactores, el primero es el contactor principal CP que activa al motor, el segundo es el contactor estrella CE y el tercero es el contactor triángulo CT, y finalmente la conexión a los bornes del motor U1, V1 y W1. Para el circuito de mando se tiene una fase y un neutro, en medio de estos se conectará un fusible como protección, un pulsador de emergencia PE, pulsador de arranque MC1, un contactor para enclavamiento CP, una bobina CP, un temporizador CM1, bobinas y contactores CE y CT.

El funcionamiento para arrancar el motor estrella-triángulo comienza cuando se activa el interruptor general IG, luego el pulsador MC1 activa la bobina CP y enclava el contactor CP, se activa también la bobina y contactor CE, de esta manera el motor M arranca en estrella, luego de 5 segundos se activa el temporizador CM1, desactivando bobinas y contactores CE y CP, activando bobinas y contactores CT. De este modo, se logra la conexión del motor M en triángulo.

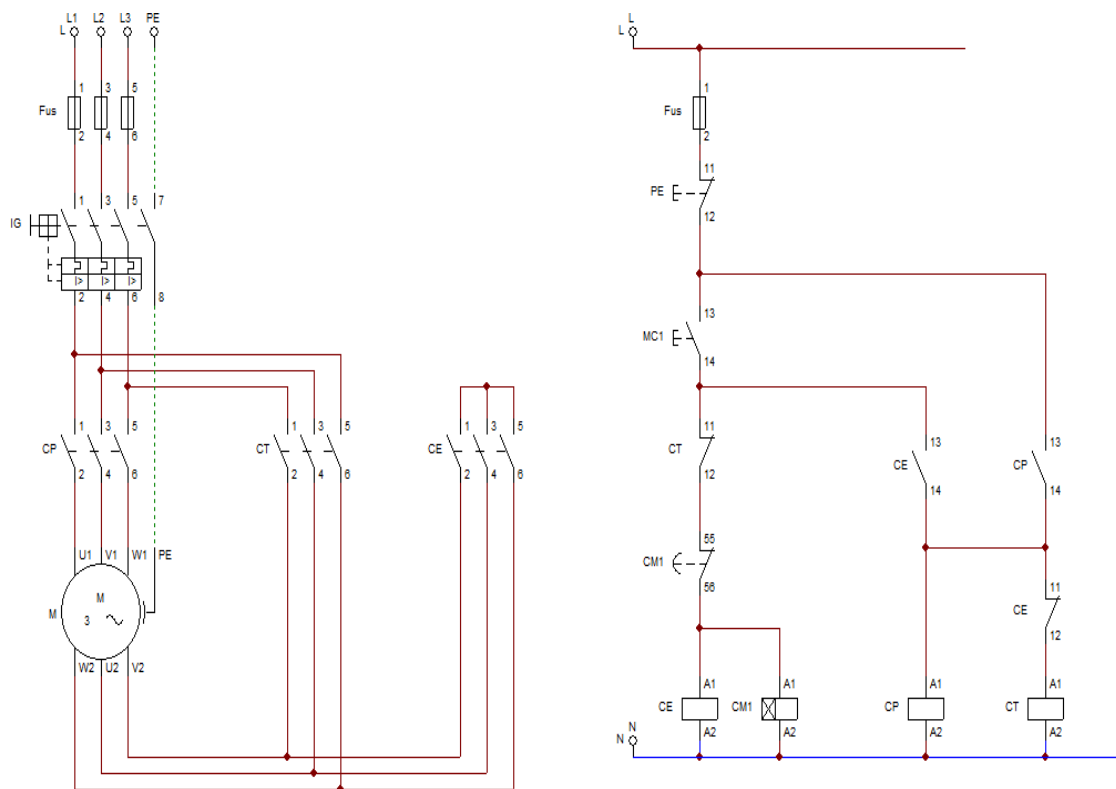


Figura 2.3. Esquema eléctrico arranque estrella-triángulo.

Arranque de motor a voltaje reducido con autotransformador

En la Figura 2.4 se muestra el esquema principal y de mando para el arranque de un motor a voltaje reducido con autotransformador. En el esquema principal se encuentra una red trifásica L1, L2 y L3 siendo esta la fuente principal del motor, fusibles de protección, un interruptor general, tres contactores MC2, CPE y CA, un autotransformador y finalmente la conexión a los bornes del motor U1, V1 y W1. Para el circuito de mando se tiene una fase y un neutro, en medio de estos se conectará un fusible como protección, un pulsador de emergencia PE, pulsador de arranque MC1, un contactor para enclavamiento CPE, un contactor cerrado MC2, en paralelo una bobina CPE y temporizador CA, que activa al pulsador CA, bobina y contactor MC2.

El funcionamiento para arrancar el motor a voltaje reducido con autotransformador comienza cuando se activa el interruptor general IG, luego se activa el pulsador MC1, activando la bobina CPE poniendo en marcha el autotransformador y el motor a voltaje reducido, luego el temporizador activa al pulsador CA encendiendo la bobina MC2 que pone en marcha el motor M.

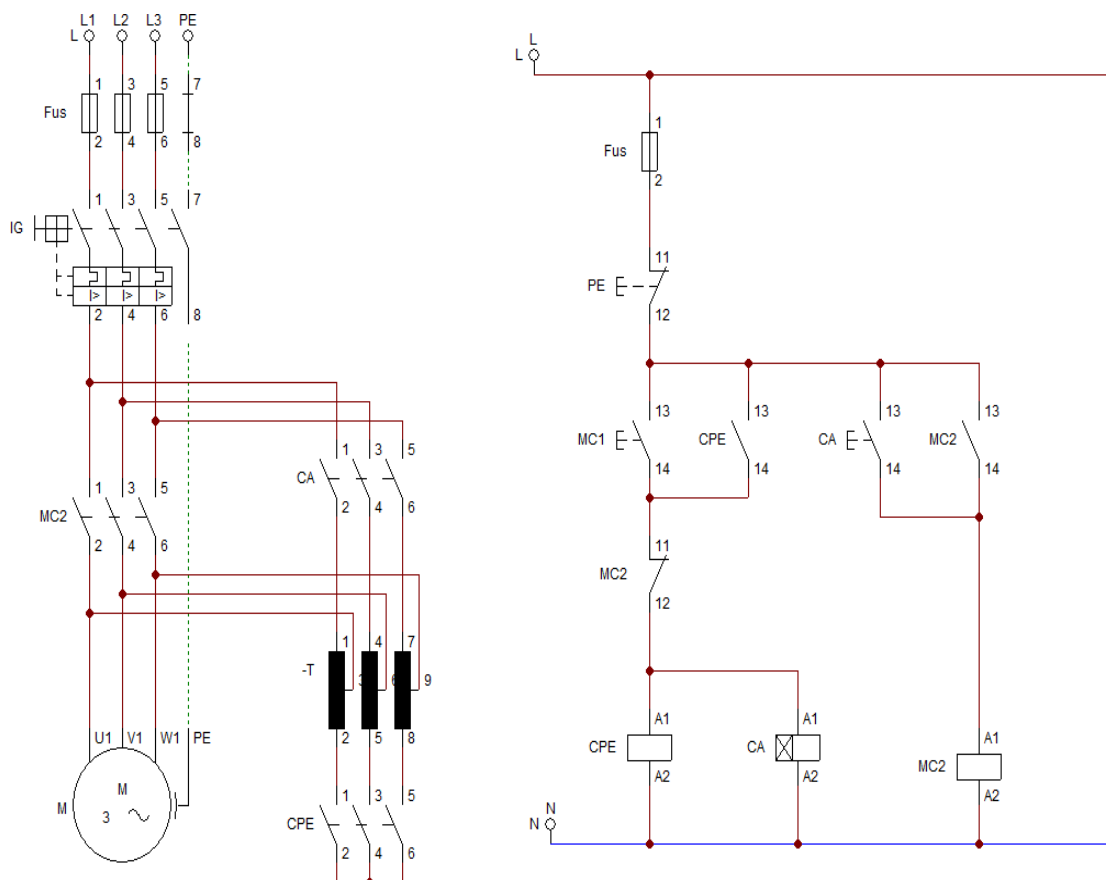


Figura 2.4. Esquema eléctrico arranque de motor a voltaje reducido con autotransformador.

2.2 Características del motor a simular

Para desarrollar la simulación de la mejor manera, se tomará los datos de un motor real mismo que se observa en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Motor trifásico de inducción (WEG)

En la Tabla 2.1 se detalla las características principales del motor con el que se va a trabajar.

Tabla 2.1. Datos de placa del motor a utilizar.

| Motor trifásico de inducción (143T a 184T) | |
|--|---------|
| Potencia (kW/Hp) | 15/20 |
| Voltaje (V) | 220/460 |
| Frecuencia (Hz) | 60 |
| RPM | 3520 |
| Corriente nominal (A) | 23,2 |
| # Polos | 2 |

Adicionalmente, en el Anexo III, se adjunta el datasheet del motor antes mencionado.

2.3 Implementación en Simulink de Matlab

En el siguiente subcapítulo, se implementarán los esquemas eléctricos desarrollados en CADE-Simu de los tres diferentes tipos de arranque de un motor trifásico de inducción en Simulink de Matlab, utilizando bloques de Simulink y Simscape para su correcto funcionamiento donde se obtendrá gráficos y resultados semejantes a datos reales de un motor trifásico de inducción.

Arranque directo

En la Figura 2.6 se muestra el circuito para el arranque directo de un motor trifásico de inducción implementado en Simulink de Matlab. El desarrollo de este, se basa en el esquema planteado en la Figura 2.2 y funciona de la misma manera, se tendrá una fuente trifásica simétrica de 220 V y 60 Hz, en su salida se tendrá un interruptor que se activa con un bloque *step*, el cual funciona al momento de iniciar la simulación, un motor trifásico de inducción con los datos de placa de la Tabla 2.1 con salidas a neutro y tierra, también se conectará un bloque de inercia para que el motor no arranque en vacío, un amperímetro trifásico para medir corriente, un permutador de fase de 123 a 231 el cual ejemplifica la salida de un motor trifásico y en sus salidas se tendrán varios osciloscopios que medirán y generarán las gráficas de corriente, torque y velocidad. Como es un arranque directo al momento de iniciar la simulación el motor arrancará de manera instantánea obteniendo datos a los 2 segundos.

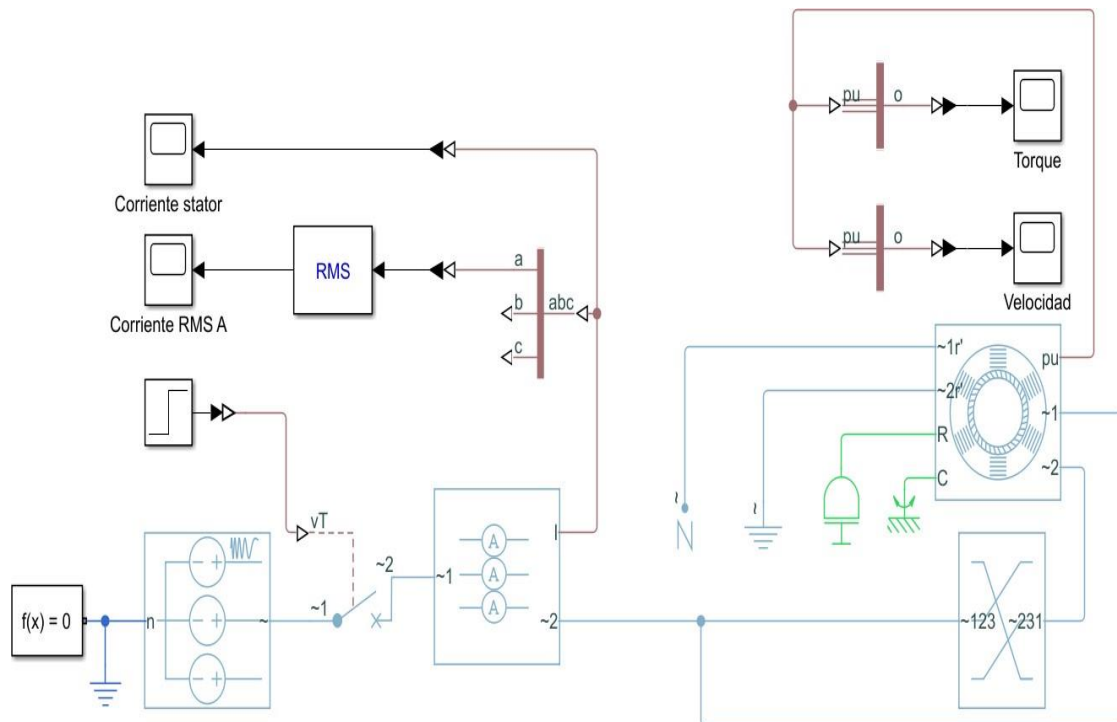


Figura 2.6. Implementación en Simulink de Matlab arranque directo.

Arranque estrella-triángulo

En la Figura 2.7 se muestra el circuito para el arranque estrella-triángulo de un motor trifásico de inducción implementado en Simulink de Matlab. El desarrollo de este se basa en el esquema planteado en la Figura 2.3 y funciona de la misma manera, contará con una fuente trifásica simétrica al igual que en el arranque directo de 220 V y 60 Hz, en su

salida se tendrá un interruptor que se activa con un bloque *step*, el cual funciona al momento de iniciar la simulación, un motor trifásico de inducción con los datos de placa de la Tabla 2.1 con salidas a neutro y tierra, también se conectará un bloque de inercia para que el motor no arranque en vacío, un amperímetro trifásico para medir corriente, un permutador de fase el cual ejemplifica la salida de un motor trifásico, para poder realizar el cambio estrella-triángulo se aumentará dos interruptores con sus respectivos bloques *step* para controlar su tiempo de funcionamiento, estos estarán conectados a la salida del motor y en sus salidas se tendrán varios osciloscopios que medirán y generarán las gráficas de corriente, torque y velocidad. Como es un arranque estrella-triángulo al momento de iniciar la simulación se activará el interruptor en estrella juntamente con el interruptor principal de la fuente activando así el motor en conexión estrella, por la configuración del bloque *step* después de 2.51 segundos se apagará el interruptor en estrella y a los 2.52 segundos se activará el interruptor en triángulo haciendo el cambio a conexión triángulo.

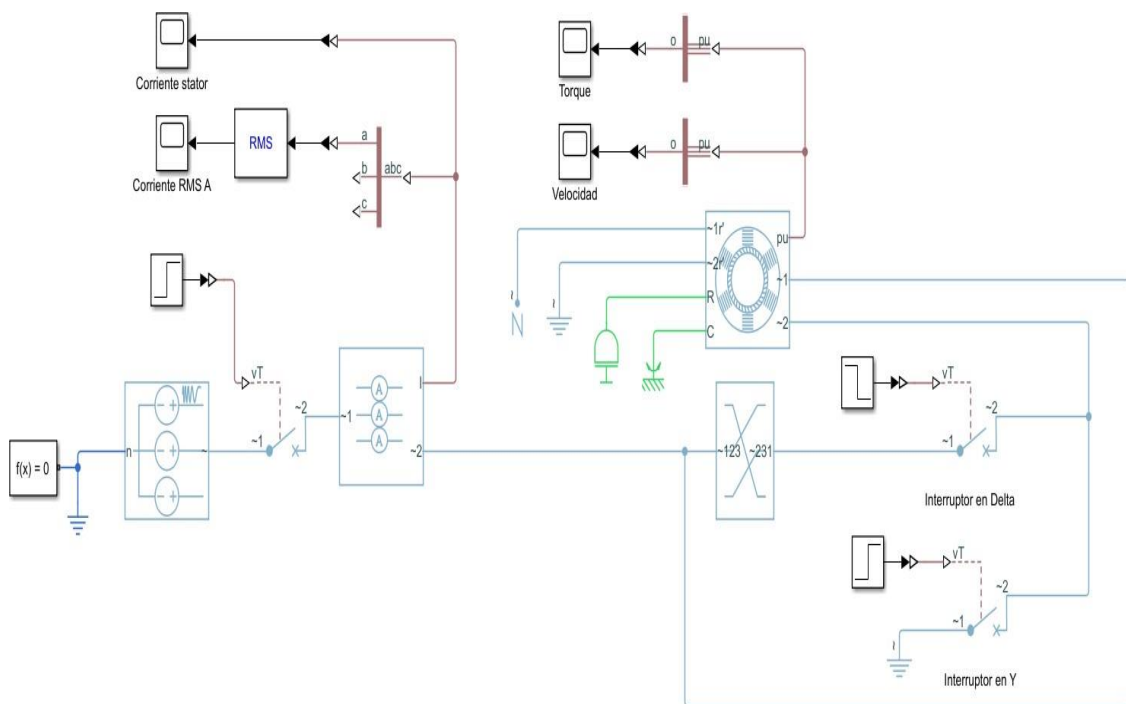


Figura 2.7. Implementación en Simulink de Matlab arranque estrella-triángulo.

Arranque de motor a voltaje reducido con autotransformador

En la Figura 2.8 se muestra el circuito para el arranque de motor a voltaje reducido con autotransformador de un motor trifásico de inducción implementado en Simulink de Matlab. El desarrollo de este, se basa en el esquema planteado en la Figura 2.4 y

funciona de la misma manera, contará con una fuente trifásica simétrica al igual que en los anteriores arranques de 220 V y 60 Hz, en su salida se tendrá un interruptor que se activa con un bloque *step*, el cual funciona al momento de iniciar la simulación, un motor trifásico de inducción con los datos de placa de la Tabla 2.1 con salidas a neutro y tierra, también se conectará un bloque de inercia para que el motor no arranque en vacío, un amperímetro trifásico para medir corriente, un permutador de fase el cual ejemplifica la salida de un motor trifásico y en sus salidas se tendrán varios osciloscopios que medirán y generarán las gráficas de corriente, torque y velocidad. Como es un arranque con voltaje reducido se necesitará un autotransformador para regular el nivel de voltaje que se ingresará al sistema, para esto se configurará la fuente, misma que se programará de forma escalar para que aumente su voltaje, este comenzará con 60 V y aumentará cada segundo 20 V, durante 8 segundos, llegando a 220 V que es lo que soporta el motor, este proceso comenzará al momento de iniciar la simulación.

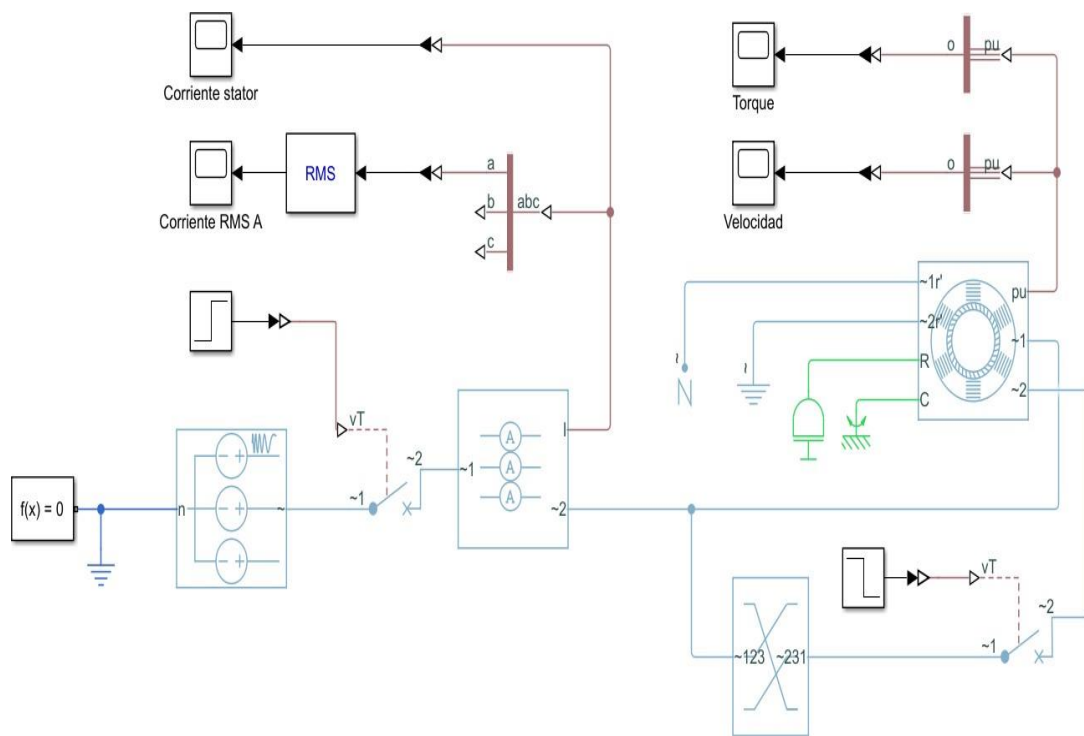


Figura 2.8. Implementación en Simulink de Matlab arranque estrella-triángulo.

3 RESULTADOS

En el presente subcapítulo por medio de la implementación y simulación de los arranques simulados en Simulink de Matlab, se realizará una toma de datos y su respectivo análisis comparando el funcionamiento de los tres diferentes tipos de arranque de un motor trifásico de inducción.

Una vez finalizada la simulación se obtendrá datos gráficos donde se observará la variación de la curva de corriente, par/torque y velocidad de los diferentes tipos de arranque.

3.1 Arranque directo

En la Figura 3.1 se puede observar la curva de corriente para el arranque directo implementado. Acorde a la misma se puede observar que el pico máximo de corriente es de 375 A aproximadamente y a partir de los 0.72 segundos la corriente comienza a decrecer llegando a su corriente nominal después de un segundo con un valor de 21.72 A.

Es importante mencionar que el valor de la corriente nominal alcanzada en simulación es similar a la corriente nominal de la Tabla 2.1 del motor real.

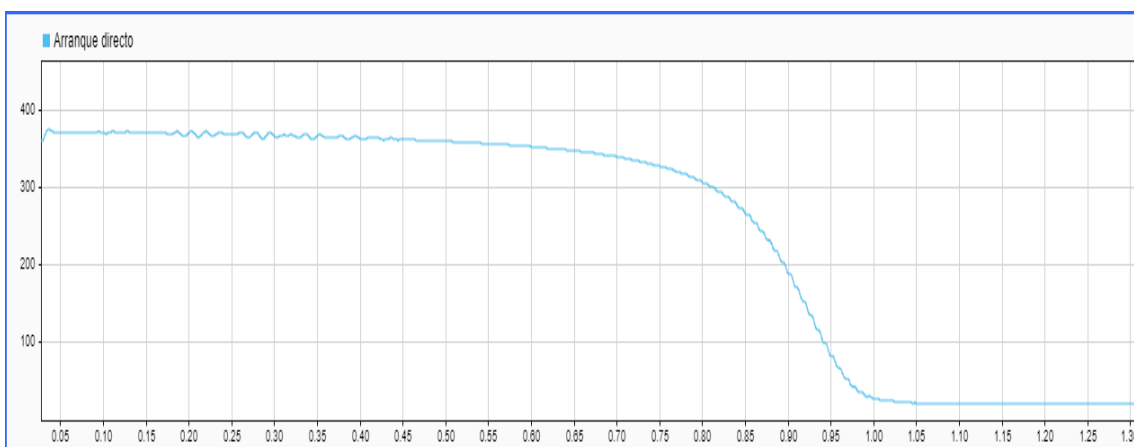


Figura 3.1. Curva de corriente arranque directo.

En la Figura 3.2 se puede observar la curva de par para el arranque directo implementado. Acorde a la misma se puede observar que existe una curva oscilatoria durante 0.45 segundos esto se produce debido a que el motor no arranca de forma completa hasta llegar a estabilizarse, esto ocurre solo a nivel de simulación ya que en la vida real no existiría este tipo de oscilaciones dentro de un motor, luego a los 0.85 segundos llega su punto máximo de torque que es de 3.5 Nm y a los 0.87 segundos

comienza a decrecer la curva llegando a estabilizarse a los 1.05 segundos el torque en 0 Nm.

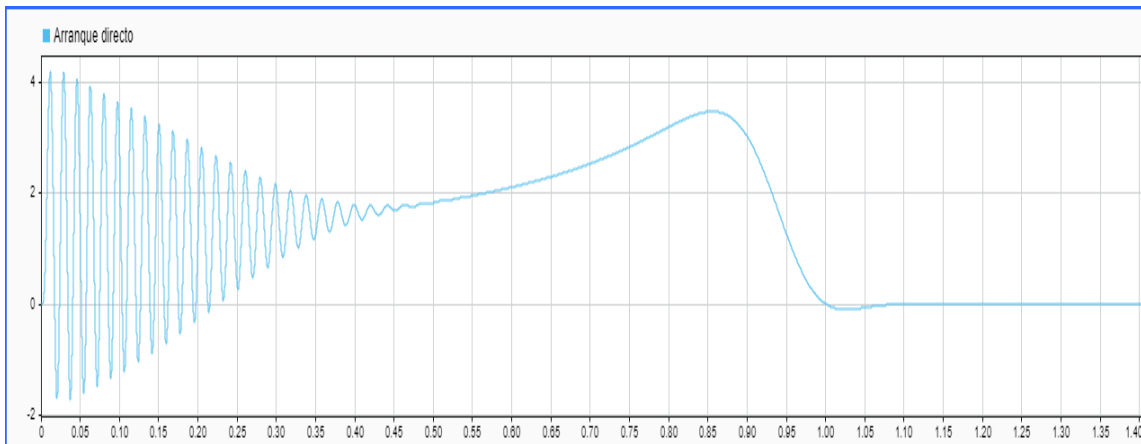


Figura 3.2. Curva de par arranque directo.

En la Figura 3.3 se puede observar la curva de velocidad para el arranque directo implementado. Acorde a la misma se puede observar que existe un incremento de la velocidad desde los 0 segundos de forma constante llegando a su punto máximo a un segundo.

Cabe aclarar que la velocidad se está midiendo en p.u. y alcanza su valor máximo en 1, se podría decir que el motor alcanza su velocidad máxima que son las 3520rpm.

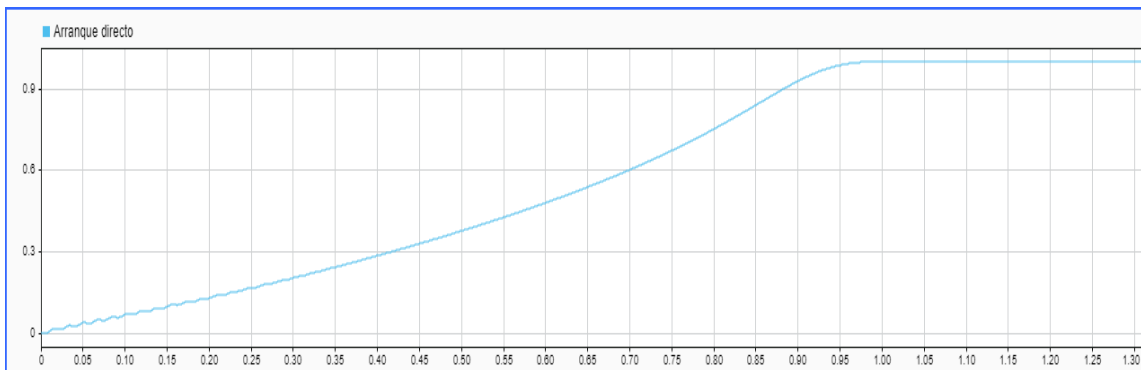


Figura 3.3. Curva de velocidad arranque directo.

3.2 Arranque estrella-triángulo

En la Figura 3.4 se puede observar la curva de corriente para el arranque estrella-triángulo implementado. Acorde a la misma se puede observar que el pico máximo de corriente es de 136.4 A aproximadamente y a partir de los 1.5 segundos comienza a decrecer hasta los 2.51 segundos, luego se observa un incremento brusco de corriente con un pico de 173.1 A esto se produce por el cambio de conexión de estrella a triángulo,

sin embargo, este pico tan elevado no se produce con un motor real sino solo a nivel de simulación, esto debido al tiempo que existe al momento de cambiar una conexión a otra y a partir de los 2.7 segundos se llegará a su corriente nominal de 21.8 A.

Es importante mencionar que al igual que el arranque directo el valor de la corriente nominal alcanzada es similar a la corriente nominal de la Tabla 2.1 del motor real.

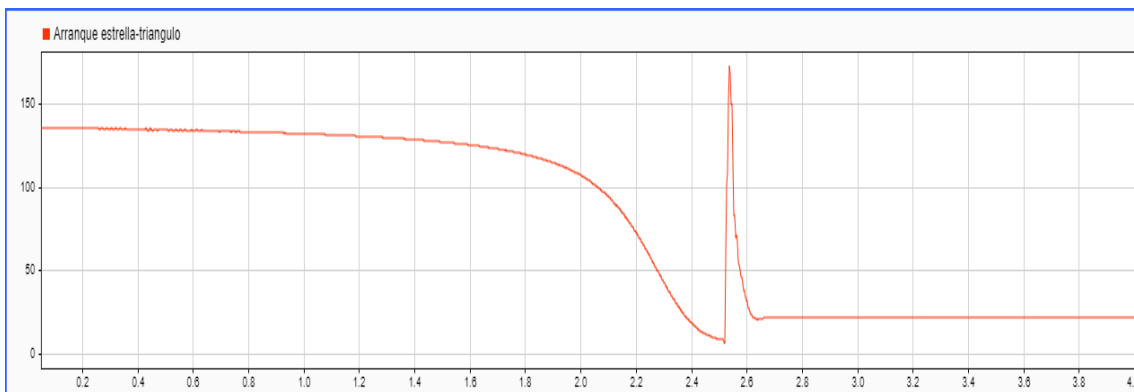


Figura 3.4. Curva de corriente arranque estrella-triángulo.

En la Figura 3.5 se puede observar la curva de par para el arranque estrella-triángulo implementado. Acorde a la misma se puede observar de la misma manera que el arranque directo que existe una curva oscilatoria durante 0.8 segundos producida por el mismo efecto del anterior arranque, luego a los 2 segundos llega a su punto máximo de torque que es 1.3 Nm y a los 2.2 segundos comienza a decrecer llegando a los 2.5 segundos, donde existe un incremento de torque brusco, esto se debe al cambio de conexión que existe de estrella a triángulo, sin embargo, esto solo se puede ver a nivel de simulación ya que con un motor real este pico no existiría, luego a los 2.7 segundos llega a estabilizarse el torque en 0 Nm.

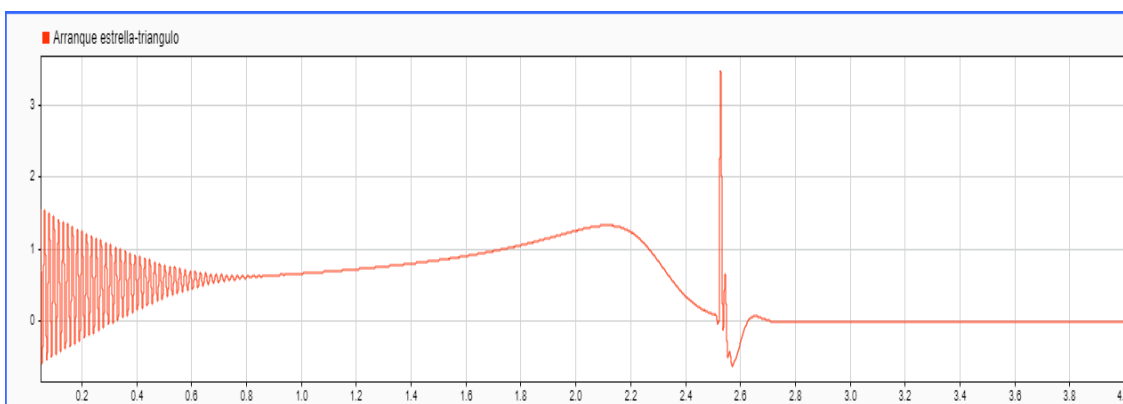


Figura 3.5 Curva de par arranque estrella-triángulo.

En la Figura 3.6 se puede observar la curva de velocidad para el arranque directo implementado. Acorde a la misma se puede observar que existe un incremento de la velocidad desde los 0 segundos de forma constante llegando a su punto máximo a los 2.5 segundos.

Cabe aclarar que la velocidad se está midiendo en p.u. y alcanza su valor máximo en 1, se podría decir que el motor alcanza su velocidad máxima que son las 3520rpm.

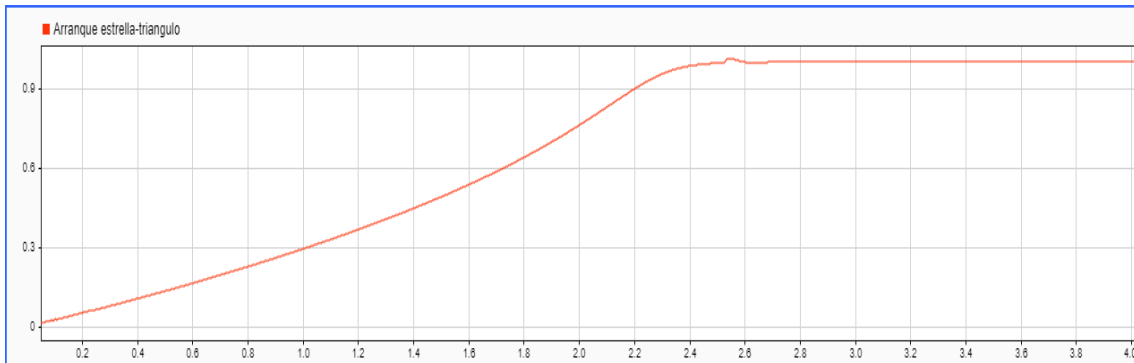


Figura 3.6. Curva de velocidad arranque estrella-triángulo.

3.3 Arranque de motor a voltaje reducido

En la Figura 3.7 se puede observar la curva de corriente para el arranque de motor a voltaje reducido con autotransformador implementado. Acorde a la misma se puede observar que el pico máximo de corriente es de 115.4 A aproximadamente y partir de los 0.3 segundos comienza a decrecer hasta los 6 segundos donde crece hasta llegar a su punto máximo de corriente que son 137.2 A, esto se debe al autotransformador que comienza a funcionar a los 6 segundos incrementando su voltaje de forma escalar hasta llegar a su corriente máxima, luego decrece hasta los 8.5 segundos y se estabiliza a partir de los 15 segundos llegando a su corriente nominal de 21.9 A.

Es importante mencionar que al igual que los anteriores arranques de la corriente nominal alcanzada es similar a la corriente nominal de la Tabla 2.1 del motor real.

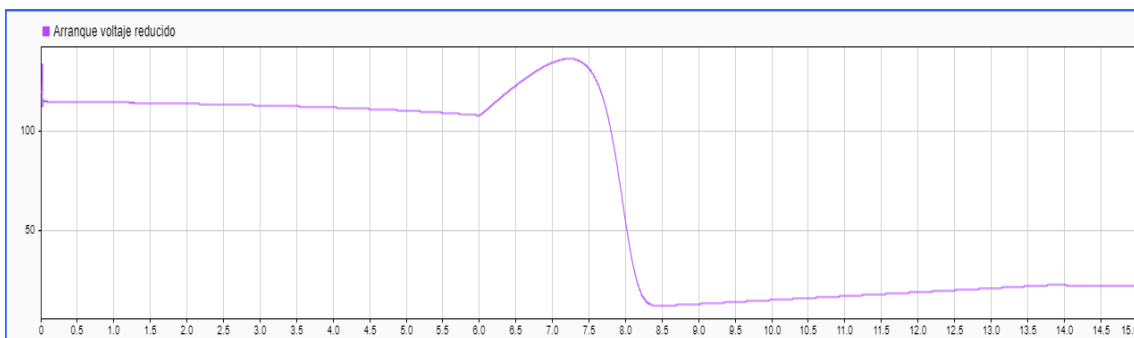


Figura 3.7. Curva de corriente arranque a voltaje reducido.

En la Figura 3.8 se puede observar la curva de par para el arranque de motor a voltaje reducido con autotransformador implementado. Acorde a la misma, se puede observar de la misma manera que en los anteriores arranques, que existe una curva oscilatoria, esta más pequeña, producida por el mismo efecto de los anteriores arranques y en este caso con una duración de 1.4 segundos, luego de los 7.7 segundos llega a su punto máximo de torque que es 0.8 Nm y a los 7.85 segundos comienza a decrecer llegando a los 8.32 segundos donde se estabiliza el torque en 0 Nm.

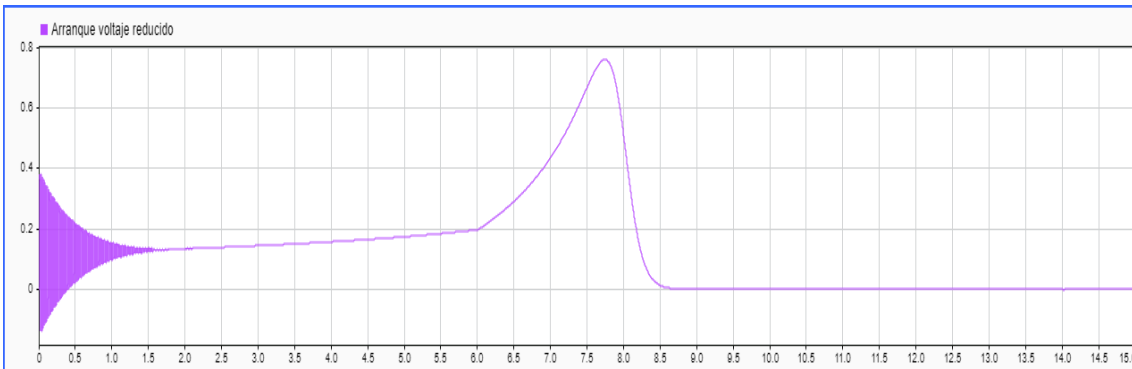


Figura 3.8. Curva de par arranque a voltaje reducido.

En la Figura 3.9 se puede observar la curva de velocidad para el arranque de motor a voltaje reducido con autotransformador implementado. Acorde a la misma se puede observar que existe un incremento de la velocidad desde los 0 segundos de forma constante hasta los 6 segundos aproximadamente, luego existe un incremento de velocidad brusco debido a que el motor debe alcanzar su velocidad nominal en este corto periodo de tiempo, llegando a estabilizarse en su punto máximo a los 8 segundos.

Cabe aclarar que la velocidad se está midiendo en p.u. y alcanza su valor máximo en 1, se podría decir que el motor alcanza su velocidad máxima que son las 3520rpm.

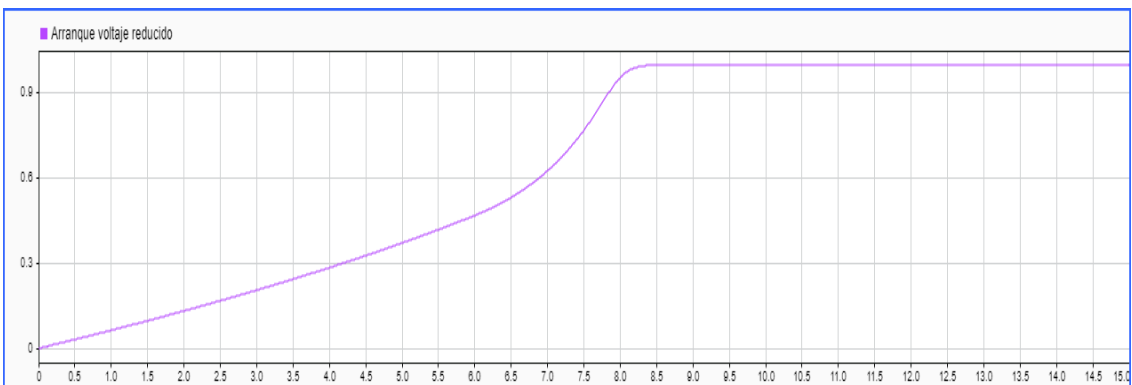


Figura 3.9. Curva de velocidad arranque a voltaje reducido.

3.4 Comparación de resultados entre arranques

En la Figura 3.10 se sobrepone las tres corrientes obtenidas para cada uno de los arranques. Como se puede observar, el pico más alto corresponde al arranque directo.

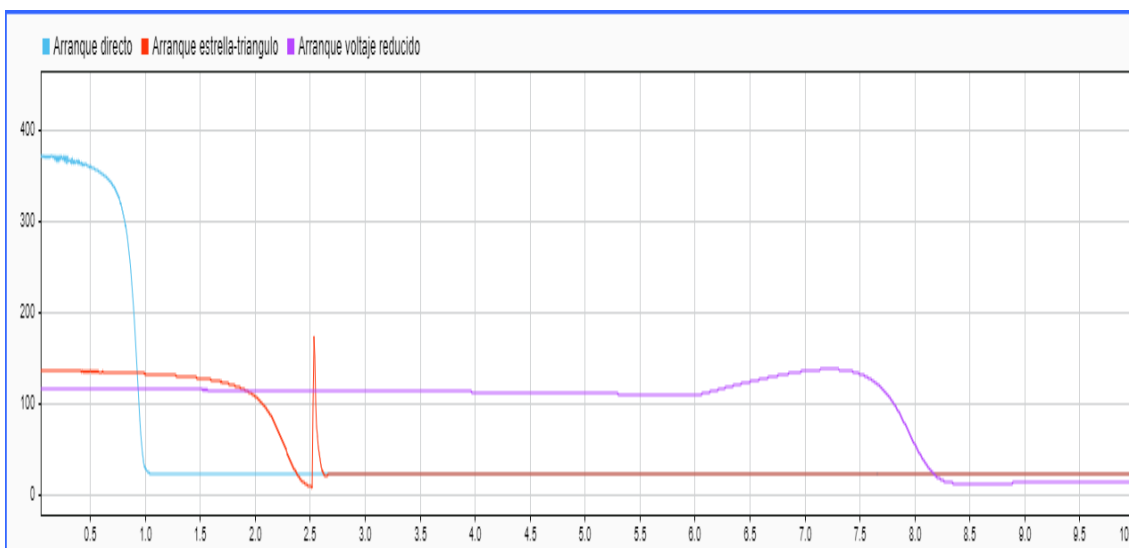


Figura 3.10. Comparación de curvas de corriente.

En la Tabla 3.1 se observa la relación de la corriente de arranque en función de la corriente nominal, acorde a esto se puede decir que el pico más grande de corriente es por arranque directo ya que es 16.15 veces la corriente nominal (I_N), en cambio el pico más bajo de corriente es por arranque a voltaje reducido con 4.9 veces la corriente nominal (I_N).

Tabla 3.1. Relación corriente nominal (I_N).

| | # I_N |
|--|-------------|
| Arranque directo [A] | 16.15 I_N |
| Arranque estrella-triángulo [A] | 5.9 I_N |
| Arranque voltaje reducido [A] | 4.9 I_N |

En la Tabla 3.2 se puede observar que el arranque que se acerca a la corriente nominal del motor implementado es el arranque a voltaje reducido con 21.9 A de corriente nominal (I_N), sin embargo, el tiempo de establecimiento es el más grande en comparación a los otros arranques siendo este de 13 segundos. Por otra parte, el arranque directo es el más rápido en estabilizarse al segundo de iniciar la simulación, sin embargo, este presenta una corriente nominal un poco más baja que la producida por arranque de voltaje reducido que es de 21.72 A.

Tabla 3.2. Corriente nominal por arranque (I_N).

| I_N motor real [A] | 23.2 | T. establecimiento |
|---------------------------------|-------|--------------------|
| Arranque directo [A] | 21.72 | 1 s |
| Arranque estrella-triángulo [A] | 21.8 | 2.5 s |
| Arranque voltaje reducido [A] | 21.9 | 13 s |

En la Figura 3.11 se sobrepone los tres pares obtenidos para cada uno de los arranques. Como se puede observar, el pico más alto corresponde al arranque directo.

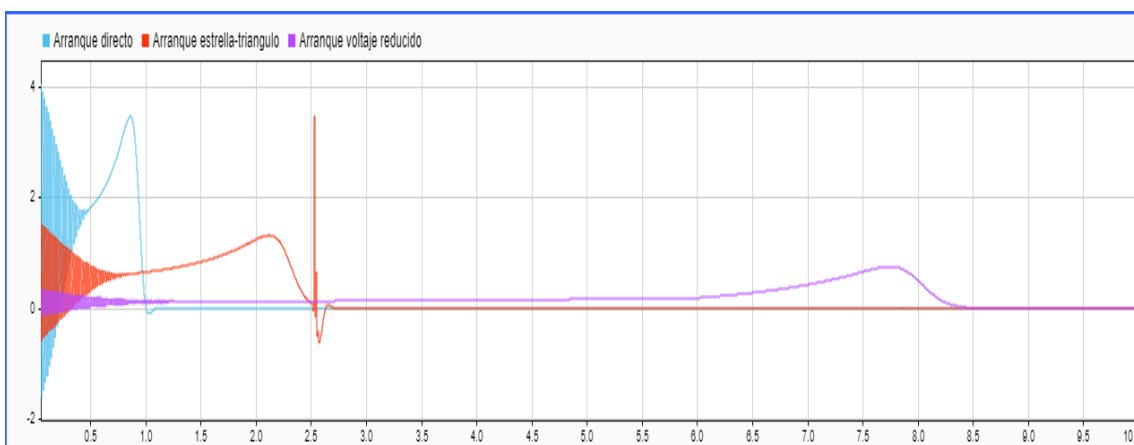


Figura 3.11. Comparación de curvas de par.

En la Tabla 3.3 se observa el valor del par máximo de los diferentes tipos de arranques, acorde a esto se puede decir que el pico más grande de par es por arranque directo ya que son 3.5 Nm, en cambio el pico más bajo de par es por arranque a voltaje reducido con 0.8 Nm.

Tabla 3.3. Par máximo [Nm].

| | T. MAX |
|----------------------------------|--------|
| Arranque directo [Nm] | 3.5 |
| Arranque estrella-triángulo [Nm] | 2.5 |
| Arranque voltaje reducido [Nm] | 0.8 |

Acorde a la Figura 3.11, en la Tabla 3.4 se puede observar que todos los pares de los tres arranques simulados llegan al torque nominal que es 0 Nm. Además, se puede observar que en el arranque directo el tiempo de establecimiento para llegar al par nominal es de 1 segundo siendo este el más bajo, por otra parte, en el arranque por voltaje reducido el par nominal tarda un tiempo de establecimiento de aproximadamente 9 segundos.

Tabla 3.4. Par nominal [Nm].

| Torque [Nm] | T. establecimiento | |
|---|--------------------|-------|
| Arranque directo [Nm] | 0 | 1 s |
| Arranque estrella-triángulo [Nm] | 0 | 2.5 s |
| Arranque voltaje reducido [Nm] | 0 | 9 s |

En la Figura 3.12 se sobrepone las tres velocidades para cada uno de los arranques. Como se puede observar, el arranque en alcanzar más rápido su velocidad nominal corresponde al arranque directo.

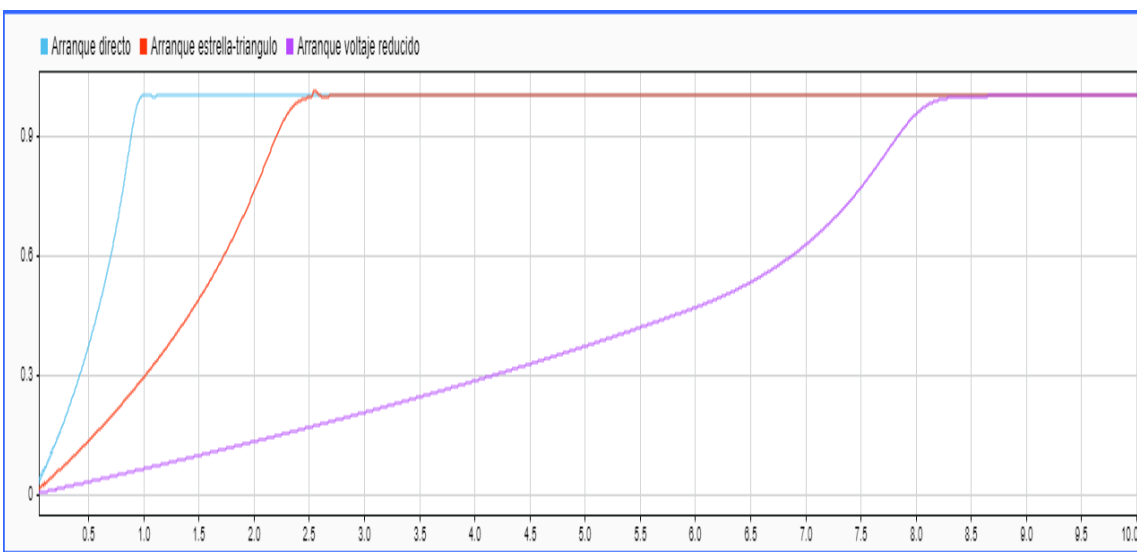


Figura 3.12. Comparación de curvas de velocidad.

En la Tabla 3.5 se observa la relación de tiempos que existen para alcanzar la velocidad nominal, acorde a esto se puede decir que el tiempo más corto en relación con los demás es por arranque directo, llegando a su velocidad nominal a un segundo, además se observa que el tiempo más extenso para llegar a su velocidad nominal es por voltaje reducido a los 8 segundos aproximadamente.

Tabla 3.5. Tiempo para alcanzar la velocidad nominal (s).

| | Tiempo Nm. |
|--|------------|
| Arranque directo [s] | 1 |
| Arranque estrella-triángulo [s] | 2.5 |
| Arranque voltaje reducido [s] | 8 |

En la Tabla 3.6 se puede observar la velocidad nominal para cada arranque, esta medida se encuentra en p.u., alcanzando todos los arranques el valor nominal de la

velocidad que es 1, sin embargo, se tiene en cuenta que la velocidad que alcanzó el motor es la misma de los datos de la Tabla 2.1 que es de 3520rpm.

Tabla 3.6. Velocidad nominal [p.u.]

| Torque [p.u.] | 1 |
|---|----------|
| Arranque directo [p.u.] | 1 |
| Arranque estrella-triángulo [p.u.] | 1 |
| Arranque voltaje reducido [p.u.] | 1 |

En el Anexo IV se puede tener acceso al link donde consta el video de funcionamiento de las simulaciones realizadas.

4 CONCLUSIONES

- Se puede implementar a través de simulación los diferentes tipos de arranque de un motor trifásico de inducción para hacer comparaciones de las variables principales como son: velocidad, par y corriente.
- Es importante conocer los fundamentos teóricos del funcionamiento de un motor trifásico, así como las diferentes técnicas de arranque para luego implementar y comparar en motores reales y simulaciones.
- Es posible simular y comparar las distintas técnicas de arranques debido a las herramientas que Matlab presenta, una de estas es el osciloscopio que nos permitió sobreponer las imágenes obtenidas teniendo datos más precisos al momento de comparar.
- Se realizaron pruebas de funcionamiento de los arranques y se hizo una comparación donde se pudo observar relacionando con la parte de la teoría, que la corriente en el arranque directo es muy alta, además que dentro de los tipos de arranques existen características importantes que los hacen a unos más convenientes que otros.
- Por medio de las pruebas de funcionamiento y comparaciones entre arranques se pudo definir que el arranque directo es el más veloz en efectuarse y estabilizarse en todas las variables planteadas. Por otra parte, el arranque a voltaje reducido es el más eficiente a utilizar por los bajos índices de corriente al momento de arrancar y estabilizarse, sin embargo, este arranque suele ser más costoso para implementarlo. Por otro lado, el arranque estrella-triángulo en comparación al arranque directo, reduce la corriente de arranque a la mitad aproximadamente y en temas de costo es más viable.

5 RECOMENDACIONES

- Desarrollar una investigación más a profundidad de los diferentes tipos de arranque de un motor trifásico, debe tomar en cuenta para futuros trabajos que no existen solo tres métodos de arranque. Además, acorde a la aplicación se deberá seleccionar el más conveniente para su implementación.
- Al momento de implementar simulaciones de motores es necesario basarse en datos de motores reales ya que se debe considerar que en simulación podemos ingresar cualquier información mientras que de forma real es posible que estos parámetros no existan.
- Antes de desarrollar implementaciones de máquinas o conexiones eléctricas es necesario realizar esquemas eléctricos en softwares fáciles de manejar, así se podrá comprobar su funcionamiento y verificar datos para su correcta implementación.
- Para la obtención de datos más precisos, es recomendable realizar este tipo de pruebas en motores reales, ya que a veces las simulaciones pueden presentar picos o distorsiones en las gráficas que de forma real no existirían.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Third edit. 2001. doi: 10.5860/choice.40-0320.
- [2] Fujian Mindong Electric Co.; Ltd., “Motor trifasico de induccion,” *Motor trifásico EM series*, 2015. <http://twitter.com/DirectIndustry>. <https://www.directindustry.es/prod/fujian-mindong-electric-co-ltd/product-126201-1570026.html%0A%0A>
- [3] K. Sundareswaran, “Induction Motor Fundamentals,” *Elem. Concepts Power Electron. Drives*, pp. 263–276, 2019, doi: 10.1201/9780429423284-9.
- [4] S. J. Chapman, “Maquinas Electricas.” pp. 439–440, 2000.
- [5] C. Bolaños and A. Portilla, “Arrancador suave para motores trifásicos de inducción,” p. 142, 2002, [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10433/3/T2043.pdf>
- [6] T. arranques de Motores, “Esquema electrico de un arranque directo con guardamotor.” 2022. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/teoriaarranquesmotores/#TOC-Arranque-Estrella-Tri-ngulo%0A%0A>
- [7] T. arranques de Motores, “Esquema eléctrico de un arranque estrella-triángulo de un motor trifásico.” 2022. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/teoriaarranquesmotores/#TOC-Arranque-Estrella-Tri-ngulo%0A%0A>
- [8] J. Vaello, “Arranque por Autotransformador.” 2014. [Online]. Available: <https://n9.cl/f9rl>
- [9] Data 2000 Sistemas, “Esquema electrico de un arrancador suave.” 2017. [Online]. Available: <https://www.data2000sistemas.com/arrancador-suave-ssw05/%0A%0A>
- [10] J. A. Carrillo Romero and J. A. Rojas Boyacá, “El variador de velocidad como método de arranque ideal para motores eléctricos de inducción,” *Ing. Investig. y Desarro.*, vol. 13, no. 1, p. 34, 2013, doi: 10.19053/1900771x.3414.
- [11] Industrias GSL, “Variador De Velocidad.” 2021. [Online]. Available: <https://industriasgsl.com/blogs/automatizacion/variador-de-velocidad>

- [12] L. R. Ojeda, *MATLAB® Conceptos Básicos y Programación TUTORIAL Instituto de Ciencias Matemáticas Escuela Superior Politécnica del Litoral*. 2007.
- [13] U. of Wisconsin, “Logo Matlab.” 2017. [Online]. Available: https://www.upct.es/contenido/destacados/imagenes_medianas/img_10512_img_9003matlab.jpg
- [14] I. de S. y Automática and U. de de O. Oviedo, “Control Continuos,” 2019, [Online]. Available: http://isa.uniovi.es/~alonsog/Regulacion/PL_06_Simulacion_de_sistemas_de_control_continuo_con_SIMULINK.pdf
- [15] M. A, “Logo_Simulink.” 2019. [Online]. Available: <https://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/2682-adquisicion-de-matlab-y-simulink>
- [16] The MathWorks Inc, “User ’ s Guide R 2016 b,” 2016.
- [17] The MathWorks Inc, “Simscape electrical logo.” 2022. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simscape-electrical.html%0A%0A>

7 ANEXOS

ANEXO I. CERTIFICADO DE TURNITIN



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS
CAMPUS POLITÉCNICO "ING. JOSÉ RUBÉN ORELLANA"**

CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

Quito, D.M. 6 de septiembre de 2022

De mi consideración:

Yo, ARACELY INÉS YANDÚN TORRES, en calidad de Directora del Trabajo de Integración Curricular titulado SIMULACIÓN DE TIPOS DE ARRANQUE DE UN MOTOR TRIFÁSICO asociado al proyecto SIMULACIÓN DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ARRANQUE DE UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN elaborado por el estudiante DYLAN DANIEL VALENCIA RODRÍGUEZ de la carrera en TECNOLOGÍA SUPERIOR EN ELECTROMECAÁNICA, certifico que he empleado la herramienta Turnitin para la revisión de originalidad de las secciones (carátula, resumen, abstract, capítulo 1, capítulo 2, capítulo 3, capítulo 4 y capítulo 5) del documento escrito producto del Trabajo de Integración Curricular indicado.

El documento escrito tiene un índice de similitud del 8%.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo el interesado hacer uso del presente documento para los trámites de titulación.

NOTA: Se adjunta el informe generado por la herramienta Turnitin.

Atentamente,

**Ing. Aracely Yandún Torres, Mgs.
Docente
ESFOT**

TIC - Dylan Valencia Rodríguez

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|--|-----|
| 1 | docplayer.es Fuente de Internet | 1% |
| 2 | revistas.uptc.edu.co Fuente de Internet | 1% |
| 3 | Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante | 1% |
| 4 | notional-impact-95704.appspot.com Fuente de Internet | 1% |
| 5 | repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet | 1% |
| 6 | repository.javeriana.edu.co Fuente de Internet | <1% |
| 7 | repositorio.ecci.edu.co Fuente de Internet | <1% |
| 8 | www.slideshare.net Fuente de Internet | <1% |
| 9 | renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet | <1% |

ANEXO II.
CERTIFICADO DE FUNCIONAMIENTO DE TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

DMQ, 8 de septiembre de 2022

Yo, Aracely Inés Yandún Torres, docente a tiempo completo de la Escuela Politécnica Nacional y como directora de este trabajo de integración curricular, certifico que he constatado el correcto funcionamiento del entregable del proyecto de titulación **SIMULACIÓN DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE ARRANQUE DE UN MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCIÓN**, el cual fue desarrollado por el estudiante Dylan Daniel Valencia Rodríguez.

El proyecto cumple con los requerimientos de diseño y parámetros necesarios para que los usuarios de la ESFOT puedan usarlo sin inconvenientes.



DIRECTOR

Ing. Aracely Inés Yandún Torres, Mgs.

Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía | Edificio N. 21 | Oficina 2 – Módulo 12

Correo: aracely.yandun@epn.edu.ec | **Ext:** 2711

ANEXO III.
DATASHEET DEL MOTOR SIMULADO

Datos Electricos

W22 - Eficiencia Premium - 60 Hz

| Potencia | | Carcasa | Par nominal Tn (Nm) | Corriente con rotor trabado I/In | | Par de arranque Ta/Tn | Par máximo Tm/Tn | Inercia J (kgm ²) | Tiempo máx. con rotor trabado (s) | | Peso (kg) | Nivel de ruido dB (A) | RPM | 60 V | | | | | | Corriente nominal In (A) | |
|------------|-------|----------|---------------------|----------------------------------|-----|-----------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------|-----------|-----------------------|------|-------------|------|------|--------------------|------|------|--------------------------|-----|
| HP | kW | | | % de la potencia nominal | | | | | Caliente | Frío | | | | Rendimiento | | | Factor de potencia | | | | |
| | | | | 50 | 75 | | | | | | | | | 100 | 50 | 75 | 100 | 50 | 75 | | 100 |
| Il polos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0,75 | 143/5T | 2,02 | L | 8,2 | 2,8 | 3,4 | 0,0014 | 22 | 48 | 16,5 | 68,0 | 3480 | 75,0 | 79,0 | 81,5 | 0,63 | 0,74 | 0,80 | 1,44 | |
| 1,5 | 1,1 | 143/5T | 3,02 | L | 8,9 | 3,5 | 3,8 | 0,0020 | 21 | 46 | 18,5 | 68,0 | 3490 | 81,5 | 84,0 | 84,0 | 0,70 | 0,80 | 0,84 | 1,96 | |
| 2 | 1,5 | 143/5T | 4,04 | L | 8,9 | 3,5 | 3,8 | 0,0026 | 17 | 37 | 23,5 | 68,0 | 3475 | 82,5 | 85,5 | 85,5 | 0,71 | 0,80 | 0,86 | 2,56 | |
| 3 | 2,2 | 182/4T | 5,99 | K | 8,6 | 2,5 | 3,8 | 0,0080 | 41 | 90 | 40,0 | 69,0 | 3515 | 82,5 | 86,5 | 86,5 | 0,75 | 0,84 | 0,88 | 3,63 | |
| 5 | 3,7 | 182/4T | 10,0 | J | 7,6 | 2,3 | 3,5 | 0,0094 | 25 | 55 | 40,0 | 69,0 | 3500 | 86,5 | 88,5 | 88,5 | 0,76 | 0,85 | 0,89 | 5,90 | |
| 7,5 | 5,5 | 213/5T | 15,0 | H | 7,2 | 2,1 | 3,0 | 0,0197 | 27 | 59 | 63,0 | 72,0 | 3520 | 87,5 | 89,5 | 89,5 | 0,75 | 0,84 | 0,88 | 8,76 | |
| 10 | 7,5 | 213/5T | 20,0 | H | 7,2 | 2,2 | 2,9 | 0,0268 | 24 | 53 | 74,0 | 72,0 | 3520 | 89,5 | 90,2 | 90,2 | 0,79 | 0,87 | 0,90 | 11,6 | |
| 15 | 11 | 254/6T | 29,9 | G | 6,7 | 2,2 | 2,7 | 0,0530 | 25 | 55 | 107 | 72,0 | 3530 | 89,5 | 91,0 | 91,0 | 0,77 | 0,85 | 0,88 | 17,2 | |
| 25 | 18,5 | 284/6TS | 49,7 | G | 6,3 | 2,0 | 2,5 | 0,1135 | 17 | 37 | 164 | 72,0 | 3535 | 91,0 | 91,7 | 91,7 | 0,82 | 0,87 | 0,89 | 28,5 | |
| 30 | 22 | 284/6TS | 59,6 | G | 6,3 | 2,0 | 2,5 | 0,1419 | 15 | 33 | 178 | 72,0 | 3535 | 91,7 | 91,7 | 91,7 | 0,82 | 0,87 | 0,89 | 33,8 | |
| 40 | 30 | 324/6TS | 79,0 | G | 6,3 | 2,3 | 2,4 | 0,2063 | 22 | 48 | 248 | 78,0 | 3555 | 91,7 | 92,4 | 92,4 | 0,82 | 0,87 | 0,89 | 45,8 | |
| 50 | 37 | 324/6TS | 98,9 | F | 6,2 | 2,2 | 2,3 | 0,2422 | 23 | 51 | 265 | 78,0 | 3550 | 93,0 | 93,0 | 93,0 | 0,83 | 0,87 | 0,89 | 56,1 | |
| 60 | 45 | 364/5TS | 118 | G | 6,6 | 2,0 | 2,6 | 0,4485 | 14 | 31 | 374 | 79,0 | 3560 | 91,7 | 93,0 | 93,6 | 0,81 | 0,88 | 0,90 | 67,0 | |
| 75 | 55 | 364/5TS | 148 | G | 6,7 | 2,0 | 2,6 | 0,5023 | 10 | 22 | 384 | 79,0 | 3555 | 92,4 | 93,6 | 93,6 | 0,83 | 0,88 | 0,90 | 81,9 | |
| 100 | 75 | 404/5TS | 198 | G | 6,5 | 2,0 | 2,4 | 0,5561 | 14 | 31 | 474 | 79,0 | 3545 | 93,0 | 94,1 | 94,1 | 0,85 | 0,90 | 0,91 | 110 | |
| 125 | 90 | 444/5TS | 246 | G | 6,6 | 2,0 | 2,5 | 1,41 | 29 | 64 | 725 | 81,0 | 3570 | 93,6 | 94,5 | 95,0 | 0,82 | 0,87 | 0,89 | 134 | |
| 150 | 110 | 444/5TS | 295 | G | 6,5 | 1,8 | 2,4 | 1,65 | 22 | 48 | 775 | 81,0 | 3570 | 94,1 | 95,0 | 95,0 | 0,83 | 0,88 | 0,89 | 163 | |
| 200 | 150 | 445/7TS | 394 | G | 6,5 | 2,1 | 2,3 | 1,88 | 14 | 31 | 868 | 81,0 | 3570 | 95,0 | 95,4 | 95,4 | 0,86 | 0,89 | 0,90 | 219 | |
| 250 | 185 | 447/9TS | 493 | F | 6,5 | 2,0 | 2,2 | 2,12 | 18 | 40 | 979 | 81,0 | 3565 | 95,4 | 95,8 | 95,8 | 0,87 | 0,90 | 0,91 | 266 | |
| 300 | 220 | 447/9TS | 590 | G | 6,8 | 2,1 | 2,4 | 2,45 | 14 | 31 | 1154 | 81,0 | 3570 | 95,4 | 95,8 | 95,8 | 0,86 | 0,89 | 0,90 | 320 | |
| 350 | 260 | 586/7TS | 687 | G | 6,6 | 1,6 | 2,3 | 5,75 | 28 | 62 | 1642 | 84,0 | 3580 | 95,4 | 96,2 | 96,2 | 0,86 | 0,90 | 0,91 | 373 | |
| 400 | 300 | 586/7TS | 785 | G | 6,8 | 1,8 | 2,2 | 5,15 | 48 | 106 | 1700 | 84,0 | 3580 | 95,8 | 96,2 | 96,2 | 0,88 | 0,90 | 0,91 | 430 | |
| 450 | 330 | 586/7TS | 883 | F | 6,6 | 2,0 | 2,3 | 5,58 | 34 | 75 | 1777 | 84,0 | 3580 | 95,8 | 96,2 | 96,2 | 0,88 | 0,90 | 0,91 | 473 | |
| 500 | 370 | 586/7TS | 981 | G | 6,8 | 2,2 | 2,4 | 6,01 | 39 | 86 | 1853 | 84,0 | 3580 | 95,8 | 96,2 | 96,2 | 0,88 | 0,90 | 0,91 | 530 | |
| 550 | 400 | 588/9TS | 1078 | G | 7,4 | 2,3 | 2,7 | 6,54 | 33 | 73 | 2000 | 89,0 | 3585 | 96,0 | 96,5 | 96,5 | 0,84 | 0,89 | 0,90 | 578 | |
| 600 | 440 | 588/9TS | 1176 | H | 7,4 | 2,3 | 2,7 | 6,54 | 33 | 73 | 2000 | 89,0 | 3585 | 96,0 | 96,5 | 96,5 | 0,84 | 0,89 | 0,90 | 650 | |
| 650 | 480 | 588/9TS | 1274 | G | 7,1 | 2,0 | 2,4 | 7,40 | 56 | 123 | 2102 | 89,0 | 3585 | 96,1 | 96,6 | 96,6 | 0,86 | 0,90 | 0,91 | 685 | |
| 700 | 515,2 | 588/9TS* | 1371 | G | 7,2 | 2,3 | 2,5 | 7,72 | 34 | 75 | 2179 | 89,0 | 3585 | 96,2 | 96,6 | 96,6 | 0,86 | 0,90 | 0,91 | 736 | |
| Opcionales | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 2,2 | 143/5T | 6,09 | J | 8,1 | 3,3 | 3,6 | 0,0026 | 14 | 31 | 23,5 | 68,0 | 3460 | 85,5 | 86,5 | 86,5 | 0,70 | 0,81 | 0,86 | 3,71 | |
| 3 | 2,2 | 145T | 6,09 | J | 8,1 | 3,3 | 3,6 | 0,0026 | 14 | 31 | 23,5 | 68,0 | 3460 | 85,5 | 86,5 | 86,5 | 0,70 | 0,81 | 0,86 | 3,71 | |
| 7,5 | 5,5 | 182/4T | 15,1 | J | 8,2 | 2,7 | 3,3 | 0,0095 | 17 | 37 | 42,0 | 69,0 | 3485 | 88,5 | 89,5 | 89,5 | 0,75 | 0,84 | 0,88 | 8,76 | |
| 7,5 | 5,5 | 184T | 15,1 | J | 8,2 | 2,7 | 3,3 | 0,0095 | 17 | 37 | 42,0 | 69,0 | 3485 | 88,5 | 89,5 | 89,5 | 0,75 | 0,84 | 0,88 | 8,76 | |
| 15 | 11 | 213/5T | 30,0 | H | 7,6 | 2,4 | 2,8 | 0,0268 | 14 | 31 | 74,0 | 72,0 | 3510 | 90,2 | 91,0 | 91,0 | 0,76 | 0,85 | 0,89 | 17,0 | |
| 15 | 11 | 215T | 30,0 | H | 7,6 | 2,4 | 2,8 | 0,0268 | 14 | 31 | 74,0 | 72,0 | 3510 | 90,2 | 91,0 | 91,0 | 0,76 | 0,85 | 0,89 | 17,0 | |
| 350 | 260 | 447/9TS | 689 | G | 7,0 | 2,4 | 2,5 | 2,87 | 10 | 22 | 1225 | 81,0 | 3570 | 95,4 | 96,2 | 96,2 | 0,85 | 0,89 | 0,90 | 377 | |
| 400 | 300 | L447/9TS | 786 | G | 6,7 | 2,2 | 2,5 | 3,87 | 25 | 55 | 1432 | 88,0 | 3575 | 95,4 | 95,8 | 95,8 | 0,85 | 0,90 | 0,91 | 432 | |
| 450 | 330 | L447/9TS | 884 | G | 7,2 | 2,4 | 2,6 | 4,22 | 26 | 57 | 1482 | 88,0 | 3575 | 95,4 | 95,8 | 95,8 | 0,84 | 0,89 | 0,91 | 475 | |

*Motores con elevación de temperatura "F" ΔT 105 K.

ANEXO IV.
VIDEO DE FUNCIONAMIENTO

Enlace del video de simulación

[Video simulación TIC-Dylan Valencia](#)

Código QR del video de simulación

