



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Modelo Digital de un Motor de Inducción para su uso  
en el desarrollo de Gemelos Digitales

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el  
grado de

Ingeniera en Automatización

Presenta

Judith Martinez Olvera

Dirigido por

Dr. José Luis González Córdoba

Querétaro, Qro., a 30 de septiembre del 2022



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales  
de Información



Modelo digital de un motor de inducción para su uso  
en el desarrollo de gemelos digitales

**por**

Judith Martínez Olvera

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons  
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0  
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

**Clave RI:** IGLIN-235363



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería en Automatización



Modelo Digital de un Motor de Inducción para su uso en el desarrollo de Gemelos  
Digitales

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
INGENIERO EN AUTOMATIZACIÓN

Presenta:

**Judith Martínez Olvera**

Dirigido por:

**Dr. José Luis González Córdoba**

SINODALES

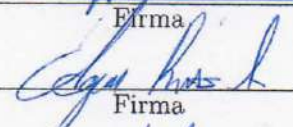
Dr. José Luis González Córdoba  
Presidente

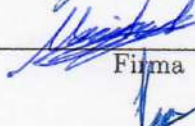
Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza  
Secretario


Dr. Mariano Garduño Aparicio  
Vocal

M.C. José Luis Avendaño Juárez  
Suplente

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

Centro Universitario  
Querétaro, QRO  
México.  
Septiembre 2022



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería en Automatización



**Modelo Digital de un Motor de Inducción para su uso en el desarrollo de Gemelos Digitales**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
**INGENIERO EN AUTOMATIZACIÓN**

Presenta:

**Judith Martinez Olvera**

Dirigido por:

**Dr. José Luis González Córdoba**

SINODALES

Dr. José Luis González Córdoba  
Presidente

Firma

Dr. Edgar Alejandro Rivas Araiza  
Secretario

Firma

Dr. Mariano Garduño Aparicio  
Vocal

Firma

M.C. José Luis Avendaño Juárez  
Suplente

Firma

Centro Universitario  
Querétaro, QRO  
México.  
Septiembre 2022



© 2022 - Judith Martinez Olvera

Derechos reservados.

*Esta tesis está dedicada a mi familia y a Eric.*

# Agradecimientos

Agradezco a mi asesor el Dr. José Luis González Córdoba y a todo mi sínodo por su paciencia, guía y consejos. Gracias a la Universidad Autónoma de Querétaro y a sus profesores y coordinadores de la Facultad de Ingeniería que compartieron conmigo sus conocimientos invaluable, su dedicación y su tiempo. Agradezco la ayuda de mi mamá Edith, de mis abuelos Guadalupe y Marcelo, mis tíos Alfredo, Enrique y Carlos, a mi prima Valentina y a mi novio Eric, todos ellos me acompañaron a lo largo de mi formación como ingeniera, impulsaron mis sueños y siempre estuvieron a mi lado.





# Abstract

In this work, a digital model of an AC three-phase induction motor was developed and implemented for the virtual simulation of industrial processes through digital numerical structures. A CAD model of an induction motor was first developed. The instruments CAD model for monitoring signals of current, temperature, speed, position, and torque of the induction motor were also made. A test bench was developed, which included a work table, the induction motor, and the instruments for signal monitoring. A data acquisition system was designed, and developed to model the behavior of the digital model. A graphical user interface was created to monitor and control the digital model. Finally, validation tests of the digital model and an analysis of the results were carried out.



# Resumen

En este trabajo se desarrolló e implementó un modelo digital de un motor de inducción trifásico de corriente alterna para la simulación virtual de procesos industriales por medio de estructuras numéricas digitales. Primero se desarrolló un modelo asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) de un motor de inducción. También se realizó el modelo CAD de instrumentos para el monitoreo de señales de corriente, temperatura, velocidad, posición y torque del motor de inducción. Se elaboró un banco de pruebas, que lo integró una mesa de trabajo, el motor de inducción y los instrumentos para el monitoreo de señales. Se diseñó y desarrolló un sistema para la adquisición de datos para modelar el comportamiento del modelo digital. Se realizó una interfaz gráfica de usuario para la monitorización y control del modelo digital. Finalmente se realizaron pruebas de validación del modelo digital y un análisis de los resultados.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	
<b>Abstract</b>	I
<b>Resumen</b>	III
<b>Índice</b>	IV
<b>Índice de figuras</b>	VI
<b>Índice de tablas</b>	IX
<b>1. Introducción</b>	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Descripción del problema	3
1.4. Hipótesis y objetivos	4
1.4.1. Hipótesis	4
1.4.2. Objetivo general	4
1.4.3. Objetivos particulares	4
1.5. Justificación	4
1.6. Planteamiento general	5
<b>2. Revisión de la literatura</b>	6
2.1. Gemelos digitales	6
2.1.1. Características de los Gemelos Digitales	6
2.1.2. Modelo digital	7
2.1.3. Interfaz Ciberfísica	7
2.1.4. Sistemas de adquisición de señales	7
2.2. El motor de inducción	8
2.2.1. Partes del motor de inducción	8
2.2.2. Principio de operación	9
2.2.3. Modelo del motor de inducción	11
2.2.4. Señales de voltaje y corriente en el motor de inducción	12
2.2.5. Calentamiento del motor de inducción	12

2.2.6. Sobrecargas en el motor de inducción . . . . .	15
2.2.7. Bancos de pruebas para motores de inducción . . . . .	16
<b>3. Metodología</b>	<b>22</b>
3.1. Descripción general de la metodología . . . . .	22
3.2. Materiales . . . . .	23
3.2.1. Software y hardware . . . . .	23
3.3. Métodos . . . . .	24
<b>4. Resultados</b>	<b>28</b>
4.1. Implementación en Solidworks . . . . .	28
4.2. Implementación en Matlab . . . . .	34
4.3. Caracterización del MI . . . . .	36
4.4. Sistema de adquisición de datos . . . . .	37
4.5. Interfaz gráfica de usuario ( <i>Dashboard</i> - GUI) . . . . .	38
4.6. Modelo digital del motor de inducción . . . . .	39
4.7. Pruebas de validación . . . . .	41
4.7.1. Simulación con arranque en vacío . . . . .	41
4.7.2. Simulación con carga de 10 Nm . . . . .	44
4.7.3. Simulación con carga de 11.9 Nm . . . . .	47
4.7.4. Simulación con carga de 20 Nm . . . . .	50
4.7.5. Simulación con carga de 32 Nm . . . . .	53
<b>5. Análisis y discusión de resultados</b>	<b>56</b>
5.1. Análisis de la prueba de validación . . . . .	56
5.2. Discusión . . . . .	60
5.3. Aplicaciones . . . . .	60
5.4. Impacto tecnológico . . . . .	60
5.5. Impacto social . . . . .	60
<b>6. Conclusiones</b>	<b>61</b>
<b>Referencias</b>	<b>65</b>
<b>Apéndice A. Dibujos de ensamble</b>	<b>66</b>
A.1. Prototipo 1 . . . . .	66
A.2. Prototipo 2 . . . . .	66
A.3. Prototipo 3 . . . . .	66
<b>Apéndice B. Hojas de datos</b>	<b>70</b>
B.1. Diagrama de pines de la tarjeta BBB . . . . .	70
B.2. Motor WEG 3 Hp . . . . .	70
<b>Apéndice C. Códigos en Matlab</b>	<b>76</b>
C.1. Sistema de adquisición de datos . . . . .	76
<b>Apéndice D. Bloques de Simulink-Matlab</b>	<b>79</b>

# Índice de figuras

1.1. Diagrama a bloques de un Gemelo Digital de MI. . . . .	3
2.1. Arquitectura general de GD, tomado y adaptado de [1]. . . . .	6
2.2. Aplicaciones industriales de un gemelo digital, tomado y adaptado de [2]. . . . .	8
2.3. Vista esquemática de las partes que conforman un MI [3]. . . . .	8
2.4. Un motor de inducción trifásico de cuatro polos, tomado y adaptado de [4]. . . . .	9
2.5. Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción, tomado y adaptado de [4]. . . . .	10
2.6. Circuito equivalente por fase de un MI, tomado y adaptado de [4]. . . . .	11
2.7. Diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos, tomado y adaptado de [5]. . . . .	13
2.8. Lugares de mayor producción de energía térmica en el MI de [6]. . . . .	13
2.9. Mapa térmico en el MI de [6]. . . . .	14
2.10. Gráfica de señales del motor con un arranque en vacío (sin carga) de [7]. a) Corriente de la fase A del rotor [A], b) Corriente de la fase A del estator [A], Velocidad del rotor $\omega_n[\frac{rad}{min}]$ y d) Torque electromagnético $[\frac{N}{m}]$ . . . . .	16
2.11. Gráfica de señales del motor con sobrecarga de la fuente de alimentación de [7]. a) Corriente de la fase A del rotor [A], b) Corriente de la fase A del estator [A], Velocidad del rotor $\omega_n[\frac{rad}{min}]$ y d) Torque electromagnético $[\frac{N}{m}]$ . . . . .	17
2.12. Componentes electrónicos y PC del BPMI de [8]. . . . .	18
2.13. Diagrama de bloques del BPMI de [9]. . . . .	19
2.14. Esquema experimental del BPMI desarrollado por [10]. . . . .	20
2.15. Composición del banco de pruebas de [11]. . . . .	20
2.16. Diagrama de bloques del BPMI junto con el sensor inteligente propuesto por [12]. . . . .	21
2.17. Banco de pruebas de [13]. . . . .	21
3.1. Diagrama general de la metodología. . . . .	22
3.2. Diagrama metodológico. . . . .	26
3.3. Modelo físico del MI. . . . .	27
4.1. Modelo CAD de los botones de inicio y de paro. . . . .	28
4.2. Modelo CAD de botones de inicio-paro y de conector banana de 4 mm. . . . .	29
4.3. Modelo CAD del contactor e interruptor termomagnético de 3 polos. . . . .	29
4.4. Modelo CAD del variador de frecuencia y del sensor de temperatura RTD. . . . .	30
4.5. Modelo CAD del torquímetro. . . . .	30
4.6. Piezas del MI en Solidworks. . . . .	31
4.7. Vista isométrica del ensamble del MI. . . . .	32

4.8. Prototipos del banco de pruebas. . . . .	33
4.9. Mesa de trabajo en Matlab. . . . .	34
4.10. Tablero en Matlab. . . . .	34
4.11. Componentes electrónicos en Matlab. . . . .	35
4.12. Conectores banana en Matlab. . . . .	35
4.13. MI en Matlab. . . . .	36
4.14. Banco de pruebas junto con el MI en Matlab. . . . .	36
4.15. Diagrama de bloques en Simulink del MI. . . . .	37
4.16. Gráfica de obtención de datos del MI para su uso en tiempo real. . . . .	38
4.17. Interfaz gráfica de usuario. . . . .	39
4.18. Diagrama de bloques en Simulink del modelo digital del motor de inducción junto con la GUI. . . . .	40
4.19. Modelo digital del motor de inducción. . . . .	40
4.20. Respuesta del MI con un arranque en vacío. . . . .	41
4.21. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI sin carga. . . . .	42
4.22. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI sin carga en su estado transitorio. . . . .	42
4.23. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI sin carga. . . . .	43
4.24. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI sin carga en su estado transitorio. . . . .	43
4.25. Respuesta del MI con una carga de 10 Nm. . . . .	44
4.26. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 10 Nm. . . . .	45
4.27. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 10 Nm en su estado transitorio. . . . .	45
4.28. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 10 Nm. . . . .	46
4.29. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 10 Nm en su estado transitorio. . . . .	46
4.30. Respuesta del MI con una carga de 11.9 Nm. . . . .	47
4.31. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 11.9 Nm. . . . .	48
4.32. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 11.9 Nm en su estado transitorio. . . . .	48
4.33. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 11.9 Nm. . . . .	49
4.34. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 11.9 Nm en su estado transitorio. . . . .	49
4.35. Respuesta del MI con una carga de 20 Nm. . . . .	50
4.36. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 20 Nm. . . . .	51
4.37. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 20 Nm en su estado transitorio. . . . .	51
4.38. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 20 Nm. . . . .	52
4.39. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 20 Nm en su estado transitorio. . . . .	52
4.40. Respuesta del MI con una carga de 32 Nm. . . . .	53
4.41. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 32 Nm. . . . .	54
4.42. Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 32 Nm en su estado transitorio. . . . .	54
4.43. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 32 Nm. . . . .	55



4.44. Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 32 Nm en su estado transitorio. . . . .	55
B.1. Diagrama de pines de la tarjeta BBB. . . . .	70

# Índice de tablas

3.1. Hardware utilizado para el desarrollo del proyecto.	23
3.2. Software utilizado para el desarrollo del proyecto.	24
3.3. Características principales del MI usado para el MD.	24
4.1. Unidades de medida de las señales simuladas.	41
5.1. Comportamiento en estado estacionario del MI con un arranque en vacío.	56
5.2. Comportamiento en estado transitorio del MI con un arranque en vacío.	56
5.3. Comportamiento en estado estacionario del MI con una carga de 10 Nm.	57
5.4. Comportamiento en estado transitorio del MI con una carga de 10 Nm.	57
5.5. Comportamiento en estado estacionario del MI con una carga de 11.9 Nm.	57
5.6. Comportamiento en estado transitorio del MI con una carga de 11.9 Nm.	58
5.7. Comportamiento en estado estacionario del MI con una carga de 20 Nm.	58
5.8. Comportamiento en estado transitorio del MI con una carga de 20 Nm.	58
5.9. Comportamiento en estado estacionario del MI con una carga de 32 Nm.	59
5.10. Comportamiento en estado transitorio del MI con una carga de 32 Nm.	59



---

# Introducción

## 1.1. Introducción

Hoy en día nos encontramos en la cuarta revolución industrial, la cual es impulsada por el desarrollo de las tecnología de la información y comunicación (TIC), en la cual su base tecnológica es la automatización inteligente de sistemas ciberfísicos con control descentralizado y conectividad avanzada [10], ejemplo de ello es el empleo de gemelos digitales (GD) en la industria, un estudio reciente destaca que el mercado empresarial de GD en 2020 fue de 5,100 millones de dólares y alcanzará los 115,100 millones de dólares en 2035 [14].

Los modelos digitales (MD) reproducen digitalmente con la máxima precisión, el comportamiento y desempeño de su contraparte de la vida real a la que están ligados [15]. El MD de un motor de inducción (MI) se puede emplear en el desarrollo de GD que actualmente está en auge, ya que la cuarta revolución industrial requiere de metodologías novedosas que ayuden a emerger nuevas técnicas de mantenimiento y detección de fallas de máquinas eléctricas como lo es un MI.

En este trabajo se encontrarán antecedentes y revisión de la literatura de los GD, MD, interfaz ciberfísica (ICF), sistema de adquisición de señales, MI y banco de prueba de un motor de inducción (BPMI), con el objetivo de desarrollar e implementar un MD de un BPMI para su uso en el desarrollo de GD.

## 1.2. Antecedentes

Los MI son las máquinas eléctricas más comunes en la industria, las cuales representan entre el 60 y el 70% del consumo total de energía eléctrica en todo el mundo [16]. A pesar de ser máquinas robustas, los MI pueden operar bajo diferentes condiciones de estrés mecánico y eléctrico, tales como: sobrecarga mecánica [16], desalineamiento y desbalance mecánico [17], ruptura de rodamientos [18], barras rotas [19, 20], caídas y elevaciones de voltaje [21, 22], desbalances de voltaje [16, 23], fluctuaciones de voltaje [24] y armónicos [25], los cuales afectan negativamente el comportamiento del motor reduciendo su vida útil de una manera drástica [16]. En este sentido, las técnicas de monitoreo y análisis de fallas para los MI realizadas en el laboratorio, bajo las diferentes condiciones de operación del motor, proporcionan un diagnóstico efectivo de una falla en particular, sin embargo, la emulación de diferentes condiciones de falla en los laboratorios requiere del desarrollo de costosos bancos de experimentación y prueba que además son muy inflexibles y nada robustos. Dicho en

otras palabras, para cada condición de falla o estado que se requiera estudiar, se debe modificar el banco de pruebas, lo que aumenta el costo de operación y el tiempo de producción.

Actualmente, con la consolidación del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y la Industria 4.0 [26], sumada a los nuevos avances en las técnicas de procesamiento y transmisión de datos, así como el aprendizaje automático mediante el análisis de grandes cantidades de datos (BDA, por sus siglas en inglés), han posibilitado el desarrollo de nuevos conceptos industriales, tales como los denominados GD [27]. Los GD son representaciones digitales de los dispositivos y/o procesos que componen un sistema, con todas sus funciones y sus datos, así como sus capacidades de comunicación en un mundo digital [27]. En adición a esto, los sistemas utilizados actualmente en la industria son incapaces de almacenar y tratar los volúmenes de datos necesarios para crear y evolucionar a los GD para que realmente representen el comportamiento de los elementos físicos que representan y no sólo sus características físicas [28]. Estos subsistemas digitales son conectados junto con el sistema real al que representan mediante sistemas ciberfísicos<sup>1</sup> [29], con el objetivo de obtener un modelo de alta precisión, cuyo comportamiento se asemeje fielmente al del sistema real original. Como resultado de esto, puede ser desarrollado un entorno protegido y de bajo costo para la experimentación y desarrollo de nuevas técnicas y metodologías de diagnóstico de fallas, donde además se puedan detectar problemas antes de que ocurran, planificar tareas, y desarrollar nuevos esquemas de fabricación [30]. Así mismo, la información generada por un GD sirve para crear un enfoque de desarrollo virtual (banco de pruebas virtual) retroalimentado en un sistema físico real, lo que ofrece una plataforma de diseño, análisis y verificación para el desarrollo de nuevas técnicas y metodologías de control, análisis y predicción de fallas, así como para el desarrollo de diferentes sistemas integrados de protección y soporte, con posibilidades de capacitación y automatización de procesos industriales, todo esto de una manera virtual, reduciendo costos y aumentando los tiempos de producción. Desafortunadamente, los GD son hoy en día un concepto en desarrollo que, además, presentan diversas barreras tecnológicas para su adopción en el sector industrial, debido a la dificultad técnica para monitorizar varios tipos de señales al mismo tiempo, los diversos protocolos de comunicación no estandarizados, así como la digitalización de procesos y equipos industriales que además se enfrentan a una estricta arquitectura cerrada de integración.

Un MD replica propiedades o el comportamiento de un sistema, así como también de productos, procesos y medios de fabricación existentes y futuros, que permiten modelar e integrar información relevante en una pantalla. Debido a esto, la presente tesis plantea la posibilidad de desarrollar un MD de un MI que permita el desarrollo y simulación de diferentes procesos para el análisis virtual de diferentes sistemas mecatrónicos. Aunque el desarrollo propuesto no es propiamente un GD, se considera parte fundamental del mismo, como se muestra en la Figura 1.1, dado que puede considerarse en esencia la representación virtual del sistema o gemelo físico. Por otro lado, el MD propuesto reflejará todas las condiciones del motor de inducción físico, bajo diferentes esquemas de operación como lo son condiciones de arranque en vacío, arranque a tensión plena y sobrecarga mecánica.

---

<sup>1</sup>Sistema que integra capacidades de computación, almacenamiento y comunicación junto con capacidades de seguimiento y control de objetos en el mundo físico. Estos sistemas ciberfísicos son normalmente conectados entre sí y a su vez conectados con el mundo virtual.

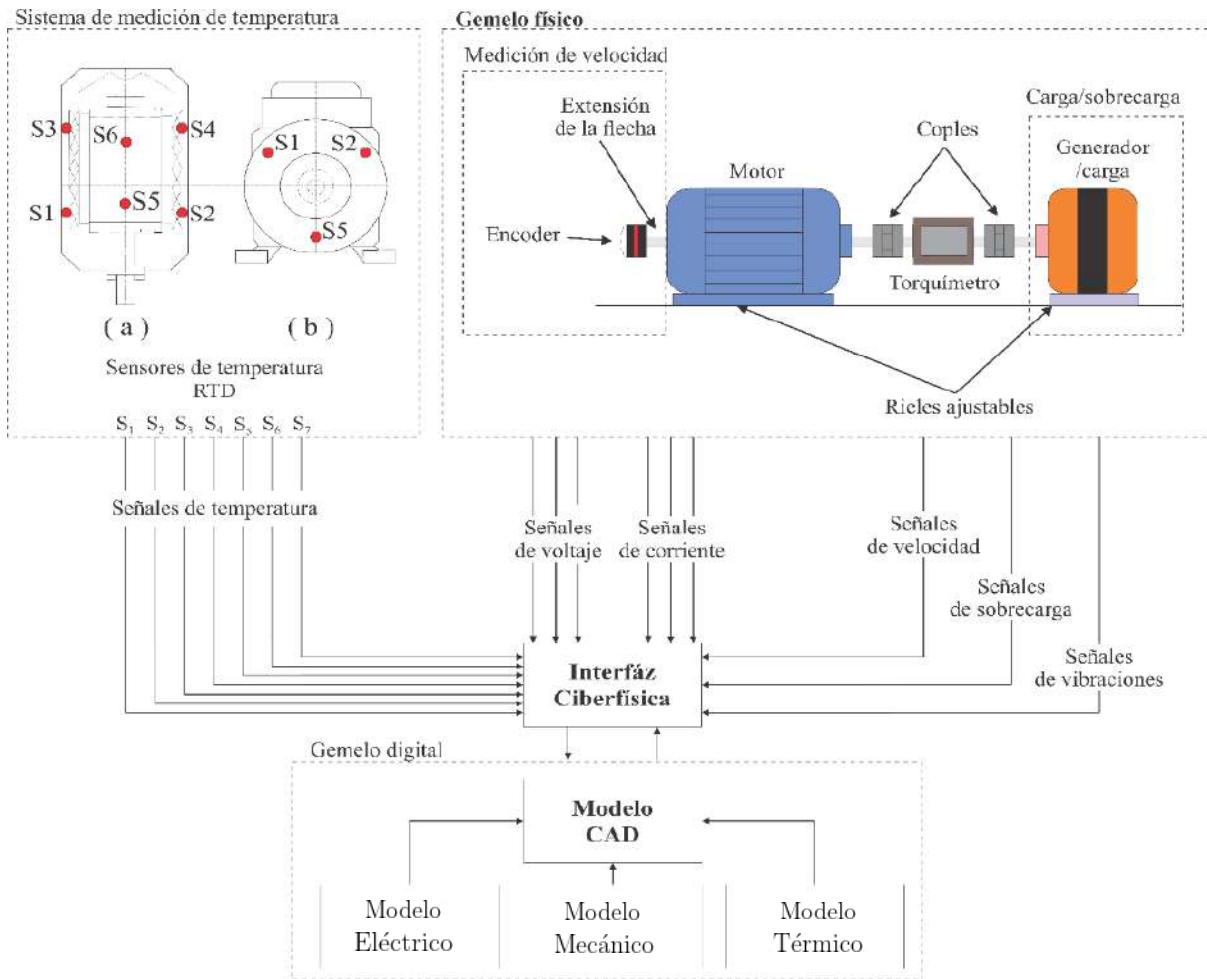


Figura 1.1: Diagrama a bloques de un Gemelo Digital de MI.

### 1.3. Descripción del problema

Hoy en día, la necesidad de hacer pruebas en MI y en general en sistemas físicos constituidos por diversos subsistemas con la finalidad de conocer su funcionamiento y sus características de operación es una actividad necesaria para la formación del Ingeniero en Automatización. Por otro lado, en el 2020 la contingencia sanitaria ocasionada por la pandemia de COVID-19 provocó que en las universidades los alumnos de diferentes niveles de estudio no pudieran asistir a clases presenciales, por lo que asistir a algún laboratorio o taller para complementar sus clases teóricas ya no fue posible debido a las restricciones sanitarias establecidas por la contingencia. COVID-19 ha transformado la vida de los seres humanos y la infraestructura de un GD puede facilitar el trabajo remoto durante el brote de alguna pandemia o condición que no nos permita estar presentes en algún lugar, al reducir la carga sobre los servicios y la infraestructura [31]. Debido a esto, el desarrollo de un modelo digital de un motor de inducción para su uso en el desarrollo de gemelos digitales es una herramienta que permitirá observar lo que pasa en un ambiente virtual, recolectando datos para la toma de decisiones, con la finalidad de implementar distintos procesos virtuales remotos para cuestiones didácticas, de investigación y desarrollos tecnológicos.

## 1.4. Hipótesis y objetivos

### 1.4.1. Hipótesis

El desarrollo de un modelo digital de un motor de inducción permitirá implementar distintos procesos virtuales y remotos para la investigación, diseño y análisis en diversas disciplinas y procesos de la ciencia, la educación y la investigación, donde se requiera del desarrollo de un gemelo digital.

### 1.4.2. Objetivo general

Desarrollar e implementar un modelo digital de un motor de inducción para la simulación virtual de procesos industriales por medio de estructuras numéricas digitales.

### 1.4.3. Objetivos particulares

Los objetivos específicos planteados en la realización de este trabajo se enlistan a continuación:

1. Desarrollar el modelo en un diseño asistido por computadora (CAD) de un motor de inducción (MI).
2. Desarrollar el modelo en un diseño asistido por computadora de instrumentos para el monitoreo de señales de temperatura, velocidad, posición y torque del motor de inducción.
3. Desarrollar el modelo en un diseño asistido por computadora de un banco de pruebas que integre al motor de inducción y a los instrumentos.
4. Diseñar y desarrollar un sistema que adquiera datos y modele el comportamiento del modelo digital.
5. Diseñar y desarrollar una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) para la monitorización y control del modelo digital (MD).

## 1.5. Justificación

Originalmente los GD se desarrollaron para mejorar procesos de manufactura por medio de la digitalización de maquinaria y sistemas de producción en el año 2000, lo que hace de esta tecnología una tecnología relativamente nueva y poco explorada [32]. El desarrollo de un GD sirve para conocer el funcionamiento en tiempo real de un sistema físico en cualquier lugar. Se puede predecir el comportamiento futuro del modelo, sistema físico o del proceso [33] dado que el GD tiene como objetivo emular el comportamiento real de su gemelo real. En este sentido, gracias al desarrollo de otras tecnologías, como el IoT, y el BDA, los GD actualmente están ganando terreno alrededor del mundo en la mayoría de los procesos industriales [34].

Por otro lado, el desarrollo del MD representa a un sistema, cubre varios aspectos y puede responder preguntas detalladas en varias disciplinas o con respecto al sistema en general [28] lo cual es útil en el área industrial. Debido a esto, el desarrollo de este proyecto permite atender a nuevas necesidades industriales de hoy en día. Además, plantea la posibilidad de atender las necesidades académicas de los alumnos de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, fomentando la aplicación del conocimiento en proyectos que tengan un alto impacto a nivel industrial e impulsando la creación y desarrollo de nuevos sistemas y mejoras de productos.

## 1.6. Planteamiento general

Se va a realizar un modelo digital del motor de inducción (MDMI). Un MD ayuda alcanzar el objetivo de un producto deseado, el objetivo se puede lograr con el amplio uso de un MD durante el diseño, la planeación, y durante otras fases de vida del producto. Lo cual puede asegurar un comportamiento de un sistema adecuado durante el curso de su producción [35]. También se va a realizar el MD de instrumentos para el monitoreo de señales de voltaje, corriente, temperatura y velocidad del MDMI. En un CAD se va a realizar el MD de todo lo mencionado anteriormente. Luego, se va a diseñar y desarrollar un sistema que adquiera y modele el comportamiento del MD. También se va a diseñar y desarrollar una GUI para la monitorización y control del MDMI. Se debe tener en cuenta que el MDMI tendrá que estar diseñado con distintos sensores para la obtención de señales. El modelo CAD del MI, estará basado en un modelo real de un MI trifásico con una potencia de 15 kW, el cual se tiene que desarmar y posteriormente tomar medidas de cada pieza. Las piezas se realizan de manera individual y posteriormente, se hace un ensamble con todas ellas para obtener el modelo final del MI. El MI debe de estar en un banco de pruebas, el cual también tendrá su diseño CAD. El modelo CAD del MI debe de estar diseñado en un banco de pruebas que cumpla con las características necesarias, como la correcta instrumentación para el monitoreo de señales y espacio para el equipo encargado del análisis de datos.



# Revisión de la literatura

## 2.1. Gemelos digitales

### 2.1.1. Características de los Gemelos Digitales

En la literatura se pueden encontrar varias definiciones de un GD, una definición muy acertada es que un GD es una imagen digital casi en tiempo real de un objeto o proceso físico que ayuda a optimizar el rendimiento de una empresa [1, 36]. Un GD tiene como características que está altamente sincronizado con un espacio físico, ya que el espacio virtual es una reflexión en tiempo real del espacio físico con varios niveles de fidelidad. Tiene una integración completa de fases de sistemas, elementos, servicios e interacción. La información generada en las varias fases del espacio físico es accesible. El GD es una plataforma integrada que proporciona una conexión bidireccional fluida entre los dos espacios y está disponible para actualizar información en tiempo real automáticamente, ya que refleja a su gemelo físico [1], se puede ver la arquitectura general de un GD en la Figura 2.1.

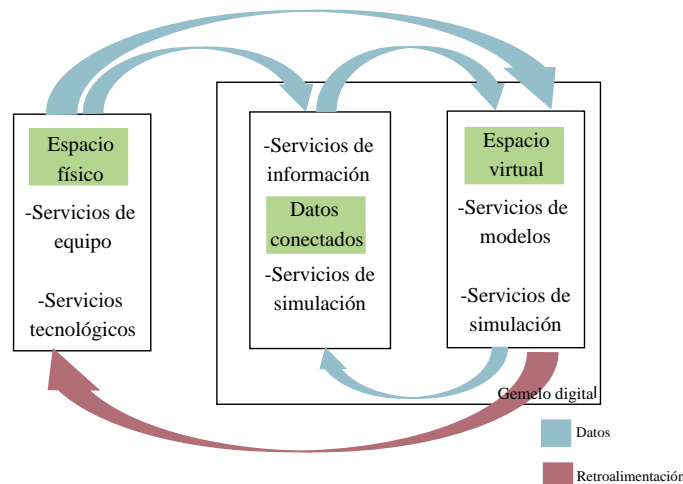


Figura 2.1: Arquitectura general de GD, tomado y adaptado de [1].

### 2.1.2. Modelo digital

Un modelo digital debe reproducir de manera realista las geometrías, las propiedades físicas, los comportamientos y las reglas del mundo físico. Estos modelos virtuales no solo son altamente consistentes con las partes físicas en términos de geometría y estructura, sino que también pueden simular su estado espaciotemporal, comportamientos, funciones y más [37].

### 2.1.3. Interfaz Ciberfísica

Un sistema ciberfísico es un sistema que interactúa con un medio físico determinado que puede tener la capacidad de comunicación, computación y control. Estas capacidades les permiten a modelos digitales involucrarse con diferentes tipos de sistemas físicos [38]. En este sentido, una ICF es capaz de llevar a cabo procesos en tiempo real en conjunto con diferentes protocolos, sensores y sistemas [39]. Un sistema ciberfísico adquiere datos en tiempo real del mundo físico por medio de diferentes tipos de sensores y el análisis de datos proporcionando una retroalimentación de información al ciberespacio, lo que le permite a un modelo digital tener una capacidad analítica y computacional [40].

### 2.1.4. Sistemas de adquisición de señales

De acuerdo a [41] un sistema de adquisición de datos toma muestras de una señal externa a él y las convierte en tensiones eléctricas, acondiciona la señal y posteriormente la digitaliza para permitir trabajar con ella. Las señales externas normalmente provienen de un sensor. En cuanto al procesamiento de datos, el software Matlab es muy útil para esta tarea ya que cuenta con paquetes de soporte de hardware que ofrecen soporte integrado y limitado para hardware, programadores y compiladores específicos [42]. Según [43], un GD proporciona una forma única de reflejar en el mundo virtual las propiedades de las entidades físicas como forma, posición, estado, movimiento, entre otras, utilizando técnicas de adquisición de datos y protocolos de transferencia de datos. Y en cuanto a sus aplicaciones, puede usarse para monitoreo, diagnóstico, pronóstico y optimización a través de inteligencia artificial, análisis de datos y algoritmos de aprendizaje automático. Los GD tienen distintas aplicaciones industriales, las cuales se muestran en la Figura 2.2, en esta figura podemos ver tiene aplicaciones en la fase de diseño de un producto así como en la fase de producción y servicio. Que de acuerdo a [2], en la fase de diseño, el GD permite la fusión entre el modelo de información y el modelo físico del producto y su optimización iterativa, lo que acorta el ciclo de diseño y reduce el costo de reelaboración. En la fase de fabricación, tradicionalmente se refiere a un proceso de producción industrial a través del cual las materias primas se transforman en productos terminados, actualmente la fabricación moderna requiere una interacción física y digital en un circuito cerrado, con el GD se puede comparar la formación del producto físico con el producto virtual, para asegurar que se está produciendo lo que se quiere producir y finalmente colaborar con otros para tener un conocimiento actualizado de los productos que están produciendo. Y en cuanto a la fase de servicio, el GD tiene aplicaciones para el mantenimiento predictivo, detección y diagnóstico de fallas, monitoreo de estado, para predicción de rendimiento y pruebas virtuales [2].

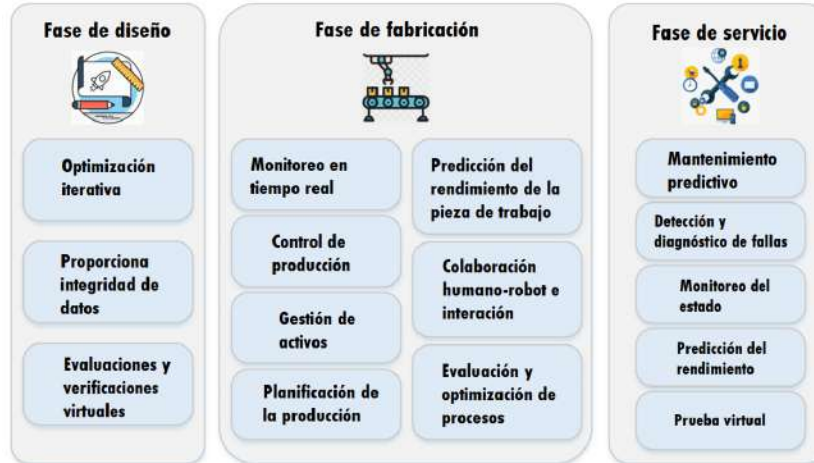


Figura 2.2: Aplicaciones industriales de un gemelo digital, tomado y adaptado de [2].

## 2.2. El motor de inducción

### 2.2.1. Partes del motor de inducción

Un motor de inducción (MI) es una máquina eléctrica que convierte energía electromagnética de una red monofásica o trifásica a energía mecánica de rotación del eje del motor [11]. El MI tiene 3 principales componentes: rotor, estator y rodamientos [3]. En la Figura 2.3 se puede ver un desglose más amplio de las partes que conforman el MI. Los MI trifásicos son sistemas no lineales,

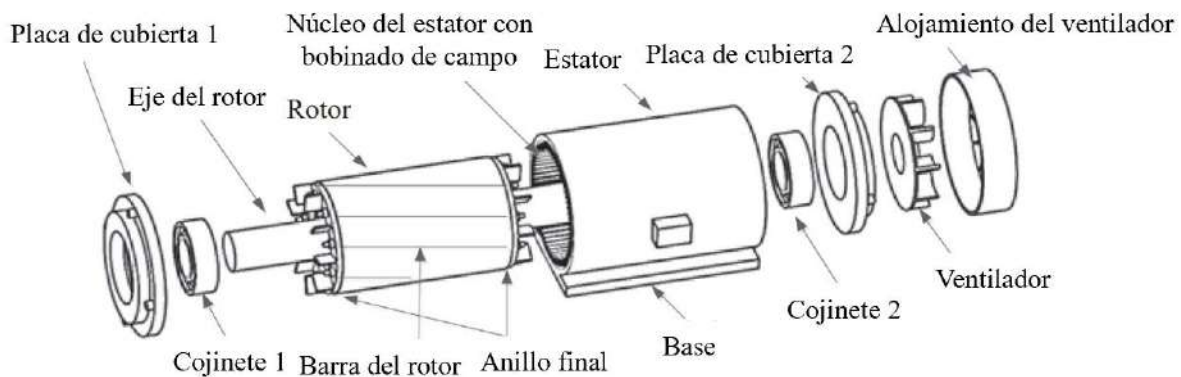


Figura 2.3: Vista esquemática de las partes que conforman un MI [3].

por lo que se necesita de un control avanzado para su funcionamiento en cuestiones de control de velocidad. Algunas técnicas de control de MI son: control de lógica difusa (CLD), control orientado al campo (COC), control directo de par (CDP), control proporcional-integral-derivativo (PID), control proporcional-integral (PI) y control proporcional-derivativo (PD) [44].

### 2.2.2. Principio de operación

De acuerdo a [45], en un MI, al alimentar el devanado del estator se genera un campo magnético de tipo giratorio que induce una corriente sobre el devanado del rotor (sea de barras o bobinado). Esta corriente a su vez genera por inducción un campo magnético rotórico que se comporta como si de imanes permanentes se tratara. De esta forma, el rotor intenta alinearse con el campo del estator, provocando en él un par de fuerzas que provocan el giro. Así, siempre que se mantenga el campo del inductor, el rotor gira buscando su alineamiento. La velocidad del campo giratorio es la de sincronismo, sin embargo, la del rotor siempre debe estar por debajo de ella, ya que si ambas llegaran a igualarse, el motor se pararía.

Conforme a [4], un MI tiene dos componentes principales: un estator estacionario y un rotor giratorio. El rotor está separado del estator por un pequeño espacio de aire. En la Figura 2.4 se muestra que al estator se le está aplicando un conjunto trifásico ( $a, b, c$ ) de voltajes, por lo que fluye un conjunto de corrientes trifásicas ( $I_a, I_b$  e  $I_c$ ). Estas corrientes producen un campo magnético giratorio con cuatro polos N-S alternos. Por lo tanto, el motor de la Figura 2.4 se denomina MI trifásico de cuatro polos. La velocidad de rotación del campo magnético, que también se denomina velocidad sincrónica  $n_s$  (rpm), se puede expresar como:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

donde  $f$  es la frecuencia del estator en Hertz y  $p$  es el número de polos por fase. La velocidad de

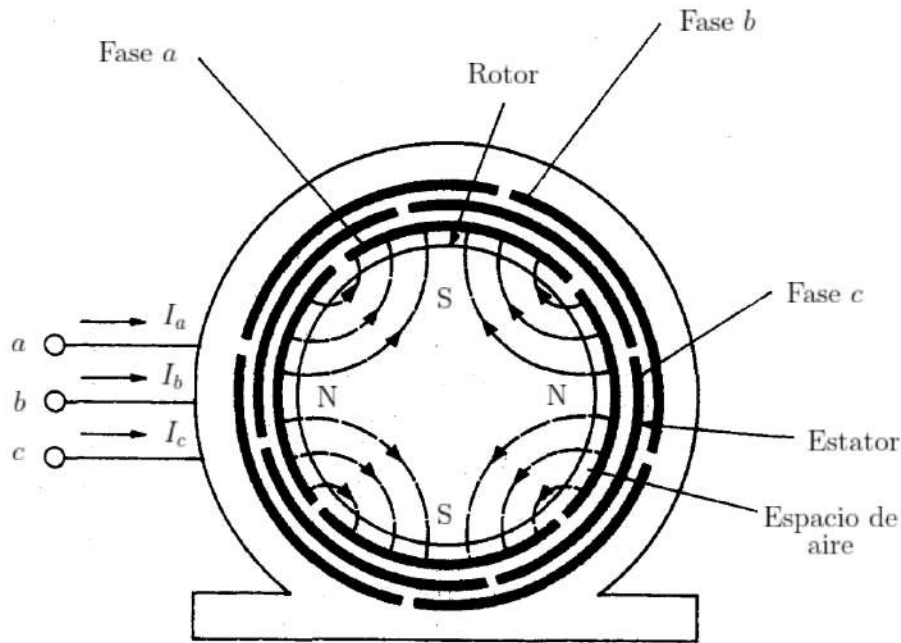


Figura 2.4: Un motor de inducción trifásico de cuatro polos, tomado y adaptado de [4].

rotación de un MI, es siempre ligeramente menor que la velocidad sincrónica  $n_s$ . El deslizamiento  $s$  expresado como porcentaje de la velocidad sincrónica se define como la diferencia entre la velocidad

síncrona  $n_s$  y la velocidad del rotor  $n$ , es decir:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.2)$$

La Figura 2.5 muestra cómo la energía eléctrica se convierte en energía mecánica en un MI. Primero, la energía eléctrica  $P_{in}$  fluye desde la línea hacia el estator trifásico. Debido a las pérdidas por el cobre del estator, una parte de la potencia eléctrica  $P_{scl}$  se disipa como calor en los devanados. La otra porción de energía eléctrica  $P_{il}$  se disipa como calor en el núcleo del estator debido a las pérdidas de hierro. Por lo tanto, la energía eléctrica restante  $P_{ag}$  se transporta a través del entrehierro y se transfiere al rotor por inducción electromagnética. Otra parte de la energía eléctrica  $P_{rcl}$  se disipa en forma de calor debido a las pérdidas por el cobre del rotor. Finalmente, la energía eléctrica restante  $P_m$  está disponible en forma de energía mecánica. En la práctica, la potencia mecánica disponible para accionar la carga es ligeramente inferior a  $P_m$  debido a las pérdidas por viento y fricción  $P_{wfl}$ . Las pérdidas en el cobre del rotor  $P_{rcl}$  relacionadas con la potencia de entrada del rotor  $P_{ag}$  se pueden expresar como:

$$P_{rcl} = sP_{ag} \quad (2.3)$$

Basado en lo anterior, la potencia mecánica se puede expresar como:

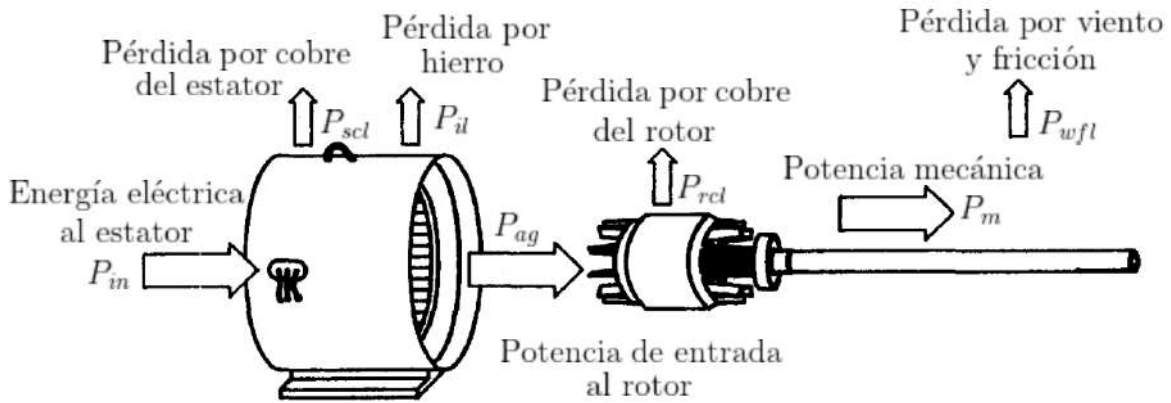


Figura 2.5: Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción, tomado y adaptado de [4].

$$P_m = P_{ag} - P_{rcl} = (1 - s)P_{ag} \quad (2.4)$$

Combinando (2.2) y (2.3), el torque del motor  $T_m$  desarrollado por la potencia mecánica se puede expresar como:

$$T_m = \frac{P_m}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{60}{2\pi} \frac{(1 - s)P_{ag}}{(1 - s)n_s} \approx 9.55 \frac{P_{ag}}{n_s} \quad (2.5)$$

En la Figura 2.6, se muestra el circuito equivalente por fase de un MI, esta imagen ayuda a comprender mejor las características de un MI.

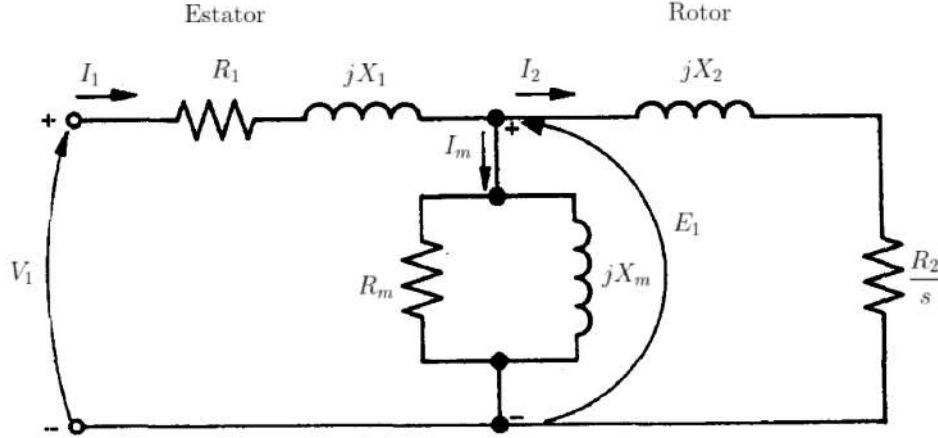


Figura 2.6: Circuito equivalente por fase de un MI, tomado y adaptado de [4].

La potencia  $P_{ag}$  transferida a través del entrehierro desde el estator se puede expresar como:

$$P_{ag} = qI_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.6)$$

donde  $q$  es el número de fases ( $q = 3$ ),  $I_2$  es la corriente del rotor,  $R_2$  es la resistencia del devanado del rotor y  $s$  el deslizamiento. Sustituyendo (2.6) en (2.5), el torque del motor desarrollado por la potencia mecánica se reescribe como:

$$T_m = 28.65 \frac{I_2^2 R_2}{sn_s} \quad (2.7)$$

La corriente del rotor  $I_2$  es muy difícil o imposible de medir directamente del MI, pero es fácil de medir la corriente del estator  $I_1$ . La corriente del rotor  $I_2$  se puede determinar a partir de la corriente del estator  $I_1$  usando la siguiente ecuación:

$$I_2 = \frac{E_1}{Z_2} = \frac{V_1 \frac{Z_4}{Z_1 + Z_4}}{Z_2} = \frac{Z_4}{Z_2} \frac{V_1}{Z_1 + Z_4} = \frac{Z_4}{Z_2} I_1 \quad (2.8)$$

donde  $Z_1 = R_1 + jX_1$ ,  $Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2$ ,  $Z_3 = \frac{jX_m R_m}{jX_m + R_m}$ ,  $Z_4 = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}$ ,  $V_1$  es el voltaje de entrada del estator,  $R_1$  es la resistencia del devanado del estator,  $X_1$  es la inductancia de fuga del estator,  $X_2$  es la inductancia de fuga del rotor,  $R_m$  es la resistencia equivalente para las pérdidas por hierro y las pérdidas por viento y fricción y  $X_m$  es la inductancia magnetizante. Con base en las ecuaciones (2.7) y (2.8), se muestra que la corriente del estator al cuadrado ( $I_1^2$ ) del MI es proporcional al torque electromagnético  $T_m$  desarrollado por el motor.

### 2.2.3. Modelo del motor de inducción

Es difícil de explicar teóricamente a los MI trifásicos debido a los repentinos cambios en la carga o las condiciones de velocidad. Pese a lo anterior, hay una representación general del modelo electromagnético-mecánico del MI. En [46] un MI y un eje giratorio son un sistema multifásico; este sistema está conformado por dos subsistemas: el subsistema electromagnético del motor de inducción y el subsistema mecánico del eje giratorio. En este sentido, el comportamiento dinámico

del subsistema mecánico es representado por un grupo de ecuaciones diferenciales mostradas en (2.9) donde  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{K}$  y  $\mathbf{C}$  son las matrices constantes de masa, rigidez y amortiguación, respectivamente.

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{Q}(t)}{dt} + \begin{pmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{I}_d \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{Q}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{pmatrix} (\mathbf{T}_{\text{em}}(t) + \mathbf{F}_{\text{ext}}(t)) \\ \mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}(t)}{dt} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{I}(t) \frac{d\phi(t)}{dt} = \mathbf{V}(t) \end{cases} \quad (2.9)$$

Además,  $\mathbf{T}_{\text{em}}(t)$  representa los vectores del torque electromagnético y  $\mathbf{F}_{\text{ext}}(t)$  representa los vectores de fuerzas externas, ambos generados por el MI.  $\mathbf{I}_d$  es una matriz de identidad. Las variables de estado están en  $\mathbf{Q}(t)$  (2.10), en donde  $x(t)$  es el vector de desplazamiento generalizado del eje de rotación.

$$\mathbf{Q}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Como el eje generalmente se modela mediante una representación discreta,  $x(t)$  representa el desplazamiento de los grados de libertad. Por otro lado, la segunda ecuación diferencial en (2.9) representa el comportamiento dinámico del MI, en donde;

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_r \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_r \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

El vector  $\mathbf{I}(t)$  es el vector generalizado de las fases del estator y las corrientes del rotor,  $\frac{d\phi}{dt}$  es la derivada del vector de las fases del estator y de flujo magnético del rotor en el tiempo y  $\mathbf{V}(t)$  es el vector de voltaje de las fases del estator y del rotor.  $\mathbf{L}$  es la matriz de inductancias y  $\mathbf{R}$  es la matriz de resistencia.  $\mathbf{L}_s$  y  $\mathbf{R}_s$  son las  $(n_{ph}, n_{ph})$  matrices diagonales de las inductancias de fuga del estado y las resistencias del estado, respectivamente.  $\mathbf{L}_r$  y  $\mathbf{R}_r$  son las  $(n_r, n_r)$  matrices del segmento del anillo del rotor fuga inductancias y segmento del anillo del rotor resistencias [46].

#### 2.2.4. Señales de voltaje y corriente en el motor de inducción

El diagrama de bloques mostrado en la Figura 2.7, se muestra la configuración del equipo para adquirir señales de corriente y voltaje de un motor de inducción. Las señales analógicas medidas se someten a un acondicionamiento de señal, antes de digitalizarse y finalmente enviarse a la computadora para su procesamiento. El *software* implementado en la computadora consta de dos programas principales, que son para la adquisición de datos y el análisis de datos. El programa de adquisición de datos se utiliza para realizar monitoreo, detección y registro de datos de corriente y voltaje en tiempo real, mientras que el programa de análisis de datos es para el análisis de datos posterior a la adquisición [5].

#### 2.2.5. Calentamiento del motor de inducción

Con arreglo a [6], durante el proceso de conversión de energía en un motor eléctrico, una fracción de la potencia absorbida de la red de alimentación no se convierte en potencia útil, sino que se disipa en la máquina: en los conductores (pérdidas eléctricas por efecto Joule), en el hierro (pérdidas por

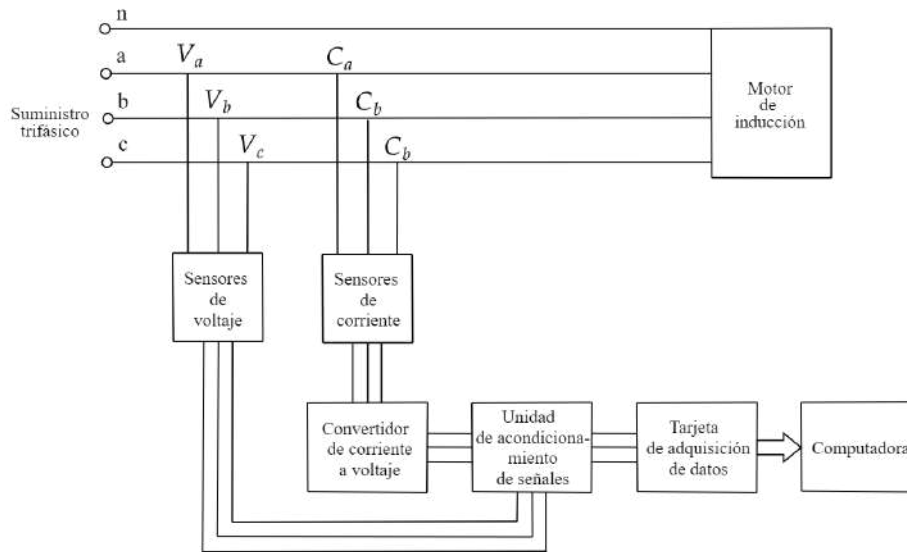


Figura 2.7: Diagrama de bloques de un sistema de adquisición de datos, tomado y adaptado de [5].

corrientes Foucault generadas en los núcleos magnéticos y pérdidas por histéresis) y en los diferentes rozamientos en las partes móviles de la máquina (pérdidas mecánicas). La potencia que se pierde, internamente se convierte en calor y en consecuencia se produce un incremento exponencial de la temperatura en el interior del motor. En la Figura 2.8, se muestra las principales fuentes de calentamiento en el MI, la suma de todo el calor producido en esos puntos se debe evacuar hacia el exterior. En la Figura 2.9, se muestra la tendencia de las trayectorias del flujo de calor en el interior del MI y su transferencia al exterior.

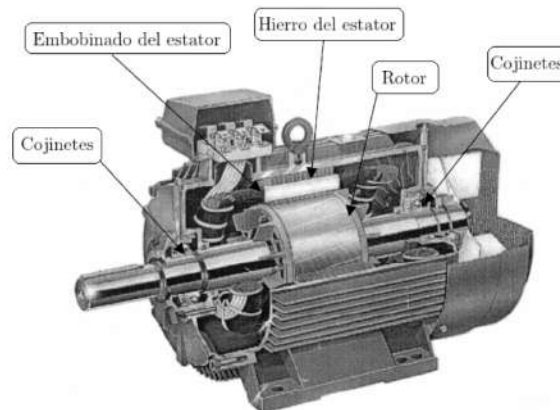


Figura 2.8: Lugares de mayor producción de energía térmica en el MI de [6].



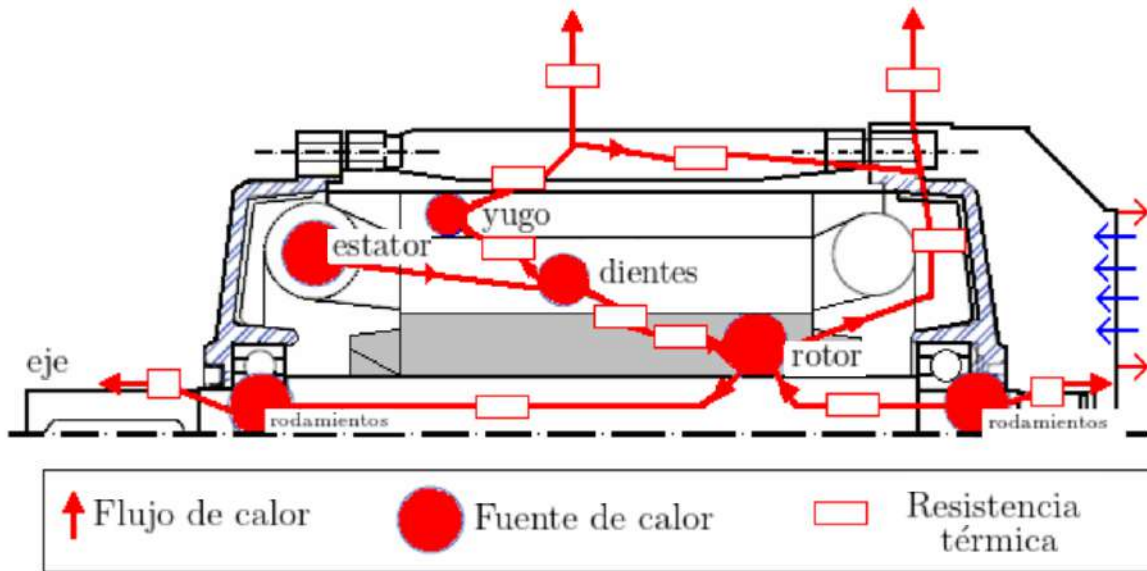


Figura 2.9: Mapa térmico en el MI de [6].

La temperatura es un escalar y su transferencia es una cantidad vectorial. Su valor de inducción es función del tiempo y para poder modelarla se deben determinar las condiciones de estabilidad térmica. La obtención de temperatura se lleva a cabo mediante técnicas convencionales a través de la aplicación de instrumentos clásicos de lectura directa o sensores electrónicos de contacto o sin contacto, tales como:

- Termómetros de bulbo líquido
- Termómetros de bulbo con gas
- Indicadores bimetálicos
- Detectores de temperatura por resistencia (alambre de platino), RTD
- Termopares
- Termistores
- Sensores de infrarrojo
- Sensores ópticos (fibra óptica)
- Pirómetros
- Detectores infrarrojos/cámaras
- Cristales líquidos (oscilaciones de cuarzo)

### 2.2.6. Sobrecargas en el motor de inducción

De acuerdo a [7], la condición de sobrecarga del MI se refiere a la corriente que fluye a través del motor en un cierto tiempo de operación que es mayor que la corriente nominal. La capacidad de sobrecarga del motor es la relación entre el par máximo y el par nominal medido, que es equivalente a la relación entre el valor máximo del motor y el valor estándar de la carga real, cuanto mayor sea la relación, más fuerte será la capacidad de sobrecarga del motor y con mejor rendimiento. El concepto de par de carga se refiere al par requerido por el motor para impulsar la carga. A continuación se resumen las tres situaciones en las que los motores producen sobrecargas:

- Cuando hay una falla en la maquinaria que se arrastra y la rotación en funcionamiento no es lo suficientemente flexible o se atasca, el motor asíncrono se sobrecargará, lo que provocará un sobrecalentamiento del devanado del motor.
- La carga mecánica transportada por el motor asíncrono no funciona correctamente y la carga mecánica puede ser grande o pequeña durante el funcionamiento, lo que provoca un sobrecalentamiento debido a la sobrecarga del motor asíncrono.
- La elección de equipos no coincidentes hace que la potencia de carga del motor asíncrono sea superior a la potencia nominal, lo que hace que el motor asíncrono se caliente en caso de funcionamiento con sobrecarga a largo plazo.

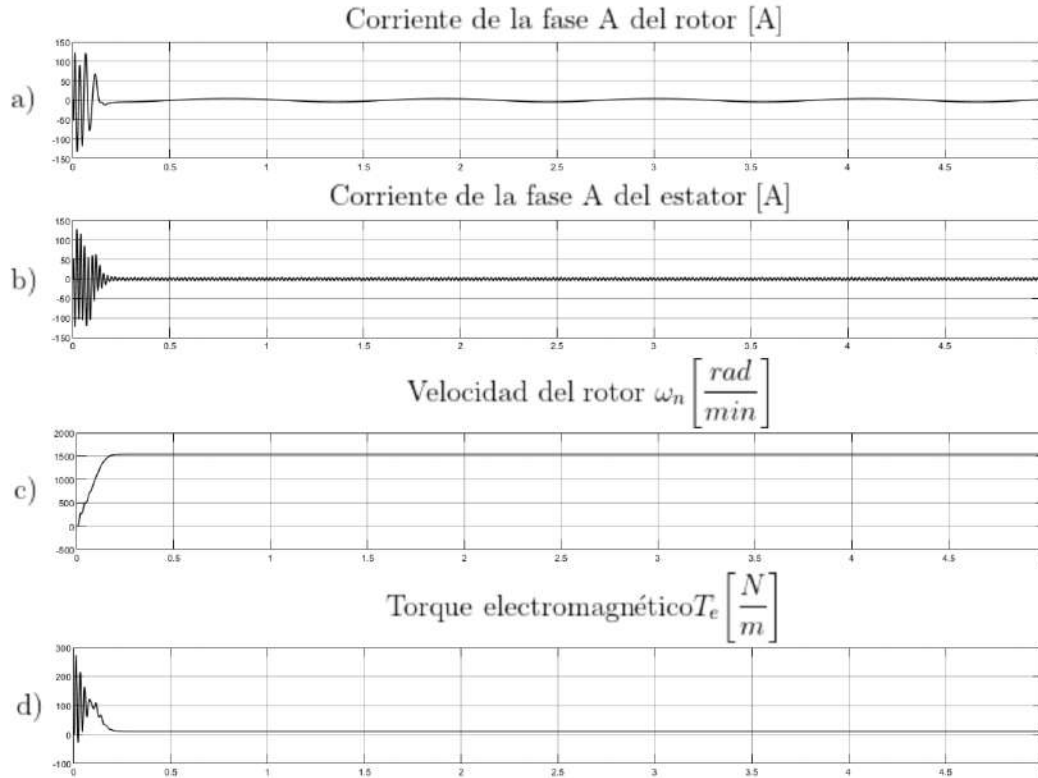


Figura 2.10: Gráfica de señales del motor con un arranque en vacío (sin carga) de [7]. a) Corriente de la fase A del rotor [A], b) Corriente de la fase A del estator [A], Velocidad del rotor  $\omega_n$   $\left[\frac{rad}{min}\right]$  y d) Torque electromagnético  $T_e$   $\left[\frac{N}{m}\right]$

Según [6], de acuerdo a la Figura 2.10, se puede concluir que la corriente del rotor y la corriente del estator varían significativamente durante la fase de arranque de prueba inicial y luego comienzan a variar suavemente con períodos más pequeños durante la operación suave posterior, mientras que la velocidad y el torque electromagnético se mantienen en valores constantes. Por otro lado, en la Figura 2.11 muestra una simulación del estado de operación de sobrecarga. De acuerdo con la gráfica, se puede analizar y encontrar que el estado de sobrecarga del motor produce y mantiene una alta variación periódica de la corriente del rotor y la corriente del estator después de la oscilación de arranque, y la amplitud de esta variación es aproximadamente 50 veces mayor que la condición normal, mientras tanto, debido a la sobrecarga, la tasa de reducción del motor aumenta, lo que hace que la velocidad real comience a disminuir y no pueda alcanzar el valor máximo nominal. El par electromagnético también aumenta debido al aumento de la corriente del rotor y se mantiene en un valor más alto.

### 2.2.7. Bancos de pruebas para motores de inducción

En [16] se menciona que los MI son las máquinas eléctricas más comunes en la industria debido a que su mantenimiento es bastante simple, su forma de operación es muy sencilla, su costo es reducido y sus rangos de velocidad y torque son bastante amplios [8]. Como resultado del alto uso de los MI es importante monitorear permanentemente características del motor como los son torque, vibraciones,

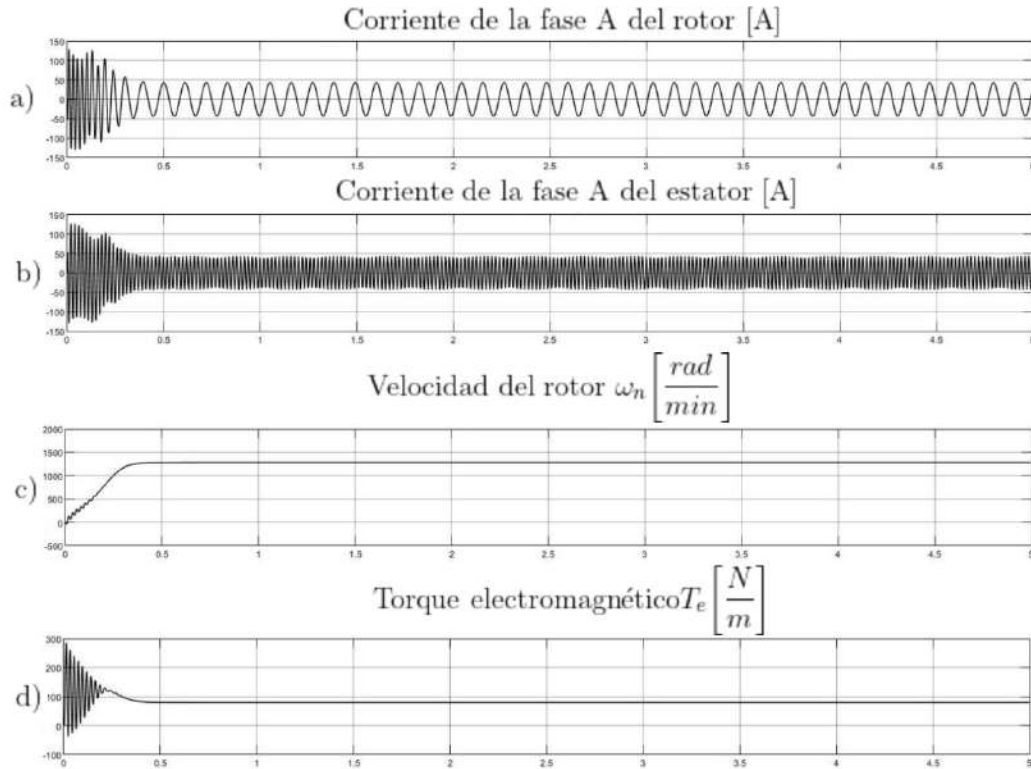


Figura 2.11: Gráfica de señales del motor con sobrecarga de la fuente de alimentación de [7]. a) Corriente de la fase A del rotor [A], b) Corriente de la fase A del estator [A], Velocidad del rotor  $\omega_n \left[ \frac{rad}{min} \right]$  y d) Torque electromagnético  $T_e \left[ \frac{N}{m} \right]$

temperatura y velocidad, esto con el fin de detectar fallas y evitar errores en el proceso en que estén instalados los motores [10]. En este punto surge la necesidad de crear bancos de pruebas para los MI (BPPI) en los cuales se puede conocer el desempeño y las características de funcionamiento de dichos motores. Además, los BPPI permiten el estudio e investigación de diferentes tipos de estrategias de control para el manejo de los motores [8]. A continuación, se muestran algunas características de diferentes trabajos que han desarrollado un BPPI bajo diferentes enfoques.

El BPPI de [8] mostrado en la Figura 2.12, desarrollado con propósitos de investigación y docencia, cuenta con una plataforma electromecánica especificada para soportar el MI y un sensor de par. Una plataforma informática monitorea al MI para obtener los datos de corriente, voltaje, temperatura, posición y velocidad. El BPPI cuenta con sensores de par, corriente, voltaje, posición y velocidad, finalmente cuenta con computador con el software Matlab-simulink y un controlador embebido en tiempo real compatible con Matlab-simulink.

Por otro lado, el BPPI desarrollado por [9] tuvo como objetivo: desarrollar un BPPI económico para medir parámetros de rendimiento de MI. El BPPI cuenta con un motor de corriente directa que actúa como generador y sensores de carga, temperatura, corriente, voltaje y tacómetro, así como un PLC y una pantalla HMI la cual muestra los resultados del monitoreo del MI. Un diagrama de bloques de la estructura que integra este BPPI es mostrado en la Figura 2.13



Figura 2.12: Componentes electrónicos y PC del BPMI de [8].

En el BPMI de [10] además del MI, cuenta con sensores de voltaje, corriente y velocidad, una tarjeta de adquisición de datos y una computadora con el software Labview, como se muestra en la Figura 2.14. Este banco de pruebas fue diseñado con el fin de extraer parámetros del MI para usarlos en la simulación del MI en Matlab.

Así mismo, en el banco de pruebas de [11] mostrado en la Figura 2.15, consiste en un mega ohmímetro, un micro ohmímetro, un instrumento de medida de parámetros de la red eléctrica, un módulo de entrada de señales analógicas, un módulo de salida de señales discretas y un sensor de vibraciones.

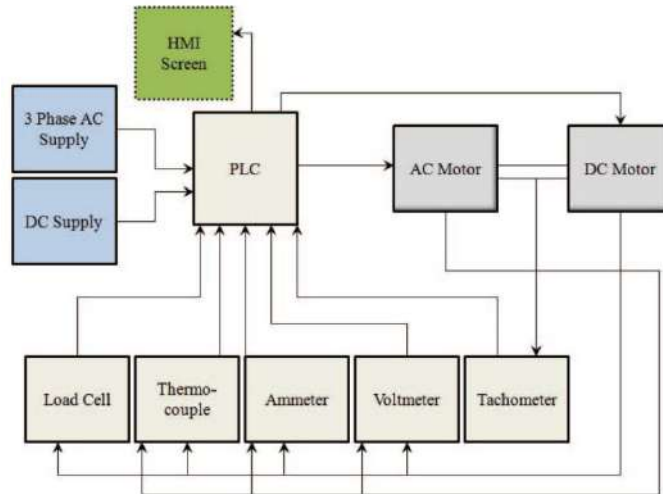


Figura 2.13: Diagrama de bloques del BPMI de [9].

Además, el banco de pruebas desarrollado por [12] consiste solamente en agregarle al MI un sensor inteligente de flujo parásito. El sensor inteligente fue agregado para monitorear y diagnosticar fallas electromecánicas tempranas de MI. Un diagrama esquemático de este BPMI es mostrado en la Figura 2.16.

Finalmente, el BPMI de [13] mostrado en la Figura 2.17 tiene como objetivo la detección de fallas del MI, por medio del diseño de una red neuronal de aprendizaje profundo para la detección de fallas.

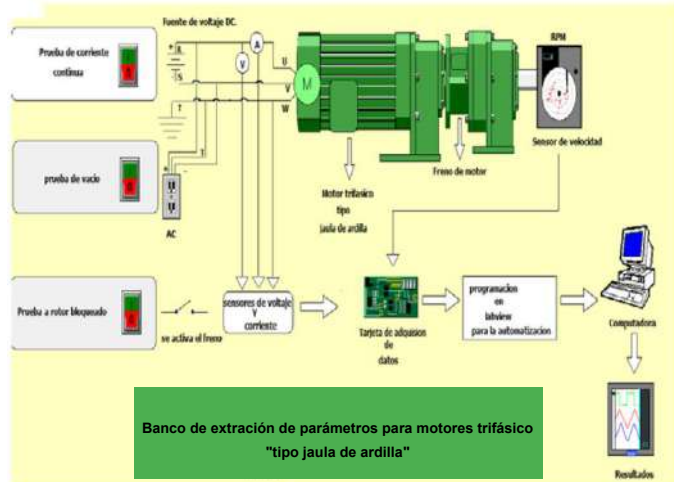


Figura 2.14: Esquema experimental del BPMI desarrollado por [10].

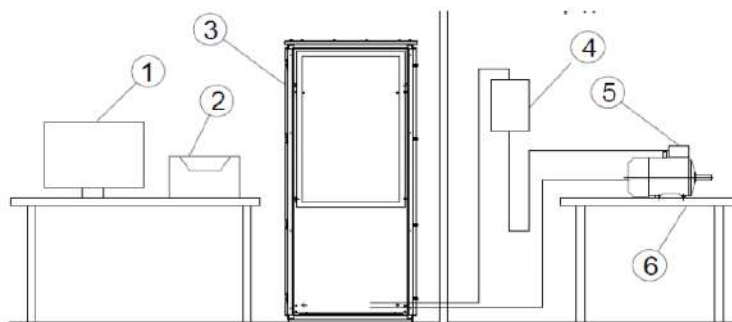


Figura 2.15: Composición del banco de pruebas de [11].

De la información anterior podemos decir que distintos BPMI presentados tienen características muy similares entre sí: una plataforma electromecánica, un sistema de adquisición y análisis de datos, así como una computadora que recibe la información de este sistema. Por otro lado, ninguno de los BPMI mencionados cuenta con un modelo digital que permita al banco de pruebas ser flexible dependiendo de su aplicación, lo cual posibilitaría la personalización de los bancos de prueba.

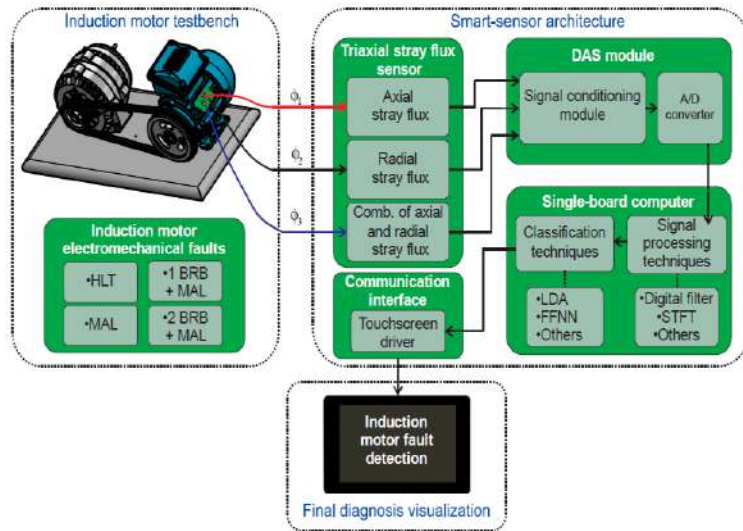


Figura 2.16: Diagrama de bloques del BPMI junto con el sensor inteligente propuesto por [12].



Figura 2.17: Banco de pruebas de [13].



# Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología seguida para la prueba y validación de la hipótesis planteada en el capítulo 1, así como cada uno de los sistemas desarrollados.

## 3.1. Descripción general de la metodología

Primero, se va desarrollar el CAD del MI y de los instrumentos para el monitoreo de señales de corriente, temperatura y velocidad del motor, también el banco de pruebas que integre el MI y los instrumentos. Después se va a diseñar y desarrollar un sistema que adquiera datos del MI físico y una GUI para la monitorización y control del MD.

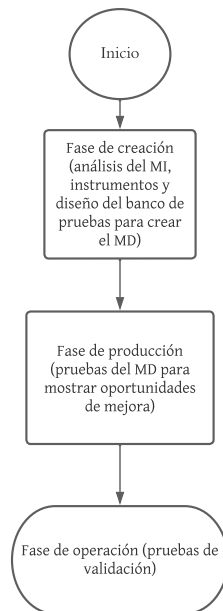


Figura 3.1: Diagrama general de la metodología.

La Figura 3.1 muestra el diagrama general de la metodología seguida en este trabajo para la realización y alcance de los objetivos planteados en el capítulo 1. Para el desarrollo del presente trabajo de tesis se plantea seguir 3 fases, en base a [47], las cuales componen el ciclo de vida de un MD: creación, producción y operación, las cuales se explican a continuación.

En la fase de la creación del MD, se realizará un análisis del sistema que se quiere digitalizar. En este análisis se deben considerar las características, parámetros y todas las variables físicas que se requiere para monitorear y procesar la información del sistema físico.

Por otro lado, en la fase de la creación se deben realizar simulaciones del MD para su validación, así como para la evaluación de posibles comportamientos inesperados y mostrar oportunidades de mejora.

Finalmente, en la fase de operación se realizarán pruebas con el fin de verificar el comportamiento predictivo del modelo desarrollado en la primera fase del proyecto [47] y donde el modelo será validado para su posterior utilización en algún gemelo digital y/o proceso.

## 3.2. Materiales

### 3.2.1. Software y hardware

La Tabla 3.1 introduce el hardware utilizado para el desarrollo del proyecto.

Tabla 3.1: Hardware utilizado para el desarrollo del proyecto.

Hardware	Características	Uso
Computadora personal	Modelo: X1 Carbon 4th Gen (Type 20FB, 20FC) Laptop (ThinkPad) - Type 20FC Sistema operativo: Windows 10 Pro Tipo de sistema: SO de 64 bits, procesador x64 RAM: 8.00 GB Procesador: Intel(R) Core(TM) i7-6600U CPU @ 2.60GHz 2.81 GHz	Utilizada para el uso del software Solidworks 2018 y Matlab 2017b
BeaglesBone Black (BBB)	Procesador: AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8 Compatibilidad de programas: Debian, Ubuntu, Android, entre otros Conectividad: puerto USB para alimentación y comunicaciones, ethernet, HDMI 2x46 pines	Tarjeta de adquisición de datos

La Tabla 3.2 presenta el software utilizado para el desarrollo de los MD y la Tabla 3.3 presenta las características principales del MI utilizado para el diseño del MD, en el Anexo B se encuentra información técnica del MI obtenida de un catálogo técnico realizado por el proveedor del motor.

Tabla 3.2: Software utilizado para el desarrollo del proyecto.

Programa	Licencia	Uso
Solidworks 2018	41042707	Utilizado para realizar el modelo CAD del MI, de los instrumentos de medición, mesa de trabajo y tablero
Matlab R2021b	40816183	Utilizado para usar Simscape multibody en Simulink, que sirve para realizar por ejemplo, enlaces mecánicos, además es el entorno de desarrollo del MD

Tabla 3.3: Características principales del MI usado para el MD.

Magnitud	Motor marca WEG modelo Z000160663
Número de fases	3 ~
Tensión nominal de operación	208-230/460 V
Clase de aislamiento	F
Frecuencia	60 Hz
Potencia nominal del motor	5.0 Hp
Velocidad nominal del motor	1750 RPM
Corriente nominal de operación	3.9 A
Factor de potencia	0.81
Número de polos	4
Factor de servicio	1.25
Eficiencia	87.5 %
Par nominal	11.9 Nm
Peso	40 Kg

### 3.3. Métodos

1. **Obtención de los parámetros y características del MI físico:** para el desarrollo del modelo CAD del MI físico, el motor se debe desarmar para analizar cada pieza fundamental con el fin de obtener de cada una, sus medidas y tomar en cuenta sus principales características para así poder recrear el MI en Solidworks. En la Figura 3.3 se muestran fotos del desarmado de MI físico para el proceso de obtención de sus características.
2. **Implementación en Solidworks:** en este software se va a desarrollar el modelo CAD del sistema físico del MI en base a la información obtenida del paso anterior. También se va realizar el modelo CAD de los siguientes instrumentos: botón de paro, botón de inicio, botón de inicio-paro, conector banana de 4 mm, contactor de 3 polos, interruptor termomagnético de 3 polos, variador de frecuencia, sensor de temperatura RTD, torquímetro. Por último, se va a hacer el diseño del banco de pruebas en donde se integren los instrumentos y el MI.
3. **Implementación en Matlab:** los modelos CAD hechos en Solidwords se van a migrar a Matlab en el entorno de programación visual Simulink con el bloque Simscape multibody, una vez que se migre todo el banco de pruebas, al MI digital se le van a aplicar las características

ya mencionadas en la Tabla 3.3, para que su comportamiento sea como el del MI físico. En Simulink se va a desarrollar un tablero (*Dashboard* - GUI) teniendo en cuenta que la señal de entrada del MI (carga) se debe manipular y se deben graficar las señales de la corriente de cada una de sus fases, torque, velocidad, potencia real y potencia reactiva. En este software también se va a hacer el sistema de adquisición de datos donde se obtendrá información del MI físico con la tarjeta BBB.

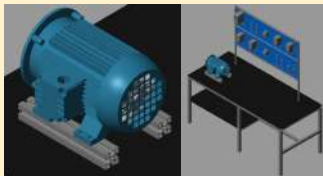
4. **Pruebas de validación:** el MD del MI se va a terminar una vez que el banco de pruebas cuente con su interfaz, las pruebas de validación consisten en realizar varias simulaciones del MD con distintas cargas en el MI, cuyo comportamiento es monitoreado con la GUI.

La Figura 3.2 resume la metodología desarrollada, en donde el primer paso es la obtención de parámetros y características del MI físico, posteriormente en el software Solidworks se desarrolla el modelo digital tanto del MI como de los instrumentos de medición, una vez que ya se tienen los modelos, estos se migran al ambiente virtual en Matlab. En el ambiente virtual de Matlab, el modelo digital se va a regir bajo el comportamientos de los parámetros mostrados en la Tabla 3.3, además los modelos matemáticos del comportamiento del MI son obtenidos por medio de lo reportado en la literatura [3, 4, 16, 46]. En Matlab es también donde se desarrolla un *dashboard* para el monitoreo del comportamiento del modelo digital del MI. Finalmente, se hacen pruebas de validación, las cuales consisten en hacer simulaciones para el análisis del comportamiento del MI bajo distintas cargas, por ejemplo; sin carga, con su carga nominal y en sobrecarga.

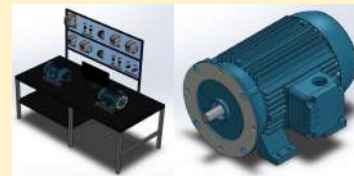
## Obtención de los parámetros y características del MI



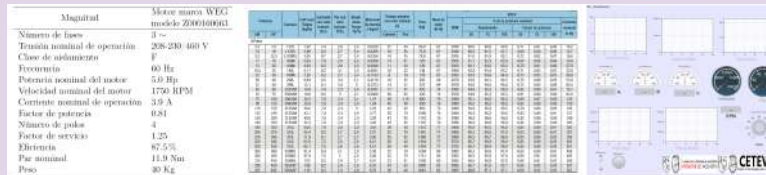
### Desarrollo del Modelo Digital en Solidworks



### Migración del Modelo Digital al ambiente virtual en Matlab



## Caracterización del MI y monitoreo del Modelo Digital



## Pruebas de validación

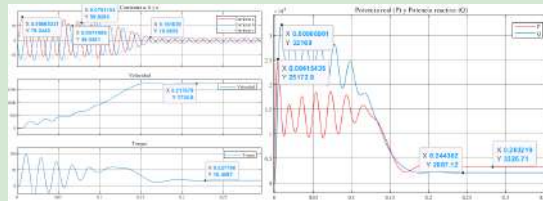
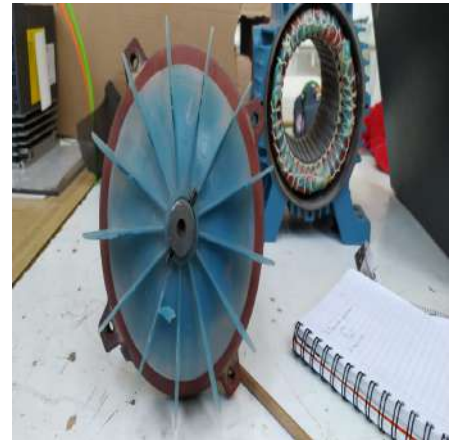


Figura 3.2: Diagrama metodológico.



(a) Rotor del MI físico.



(b) Vista frontal del ventilador del MI físico.



(c) Caja de bornes del MI físico.



(d) Vista lateral, caja de bornes del MI físico.



(e) Vista lateral del MI físico.



(f) Motor físico.

Figura 3.3: Modelo físico del MI.

## Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo.

### 4.1. Implementación en Solidworks

La implementación de Solidworks consistió en realizar el modelo CAD de los instrumentos mencionados en la metodología, se muestra a continuación el resultado de los modelos elaborados:



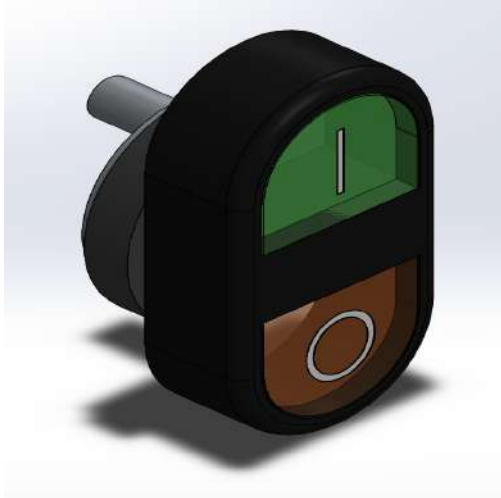
(a) Botón de inicio.



(b) Botón de paro.

Figura 4.1: Modelo CAD de los botones de inicio y de paro.



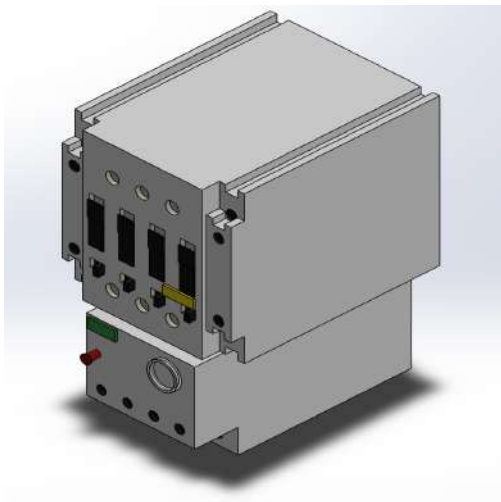


(a) Botón de inicio-paro.

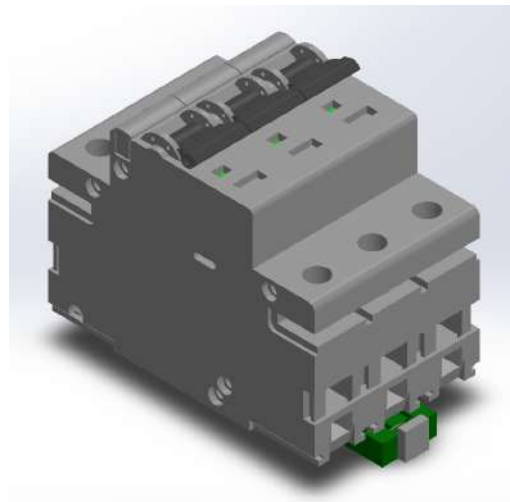


(b) Conector banana de 4 mm.

Figura 4.2: Modelo CAD de botones de inicio-paro y de conector banana de 4 mm.



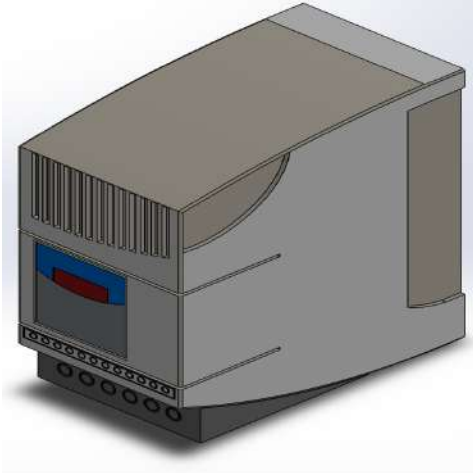
(a) Contactor de 3 polos.



(b) Interruptor termomagnético de 3 polos

Figura 4.3: Modelo CAD del contactor e interruptor termomagnético de 3 polos.





(a) Variador de frecuencia.



(b) Sensor de temperatura RTD.

Figura 4.4: Modelo CAD del variador de frecuencia y del sensor de temperatura RTD.

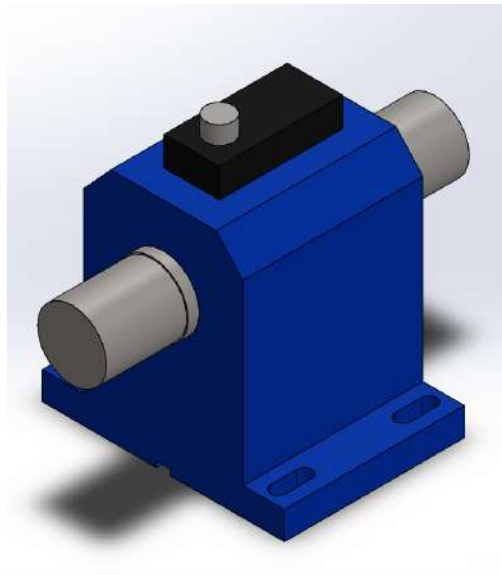
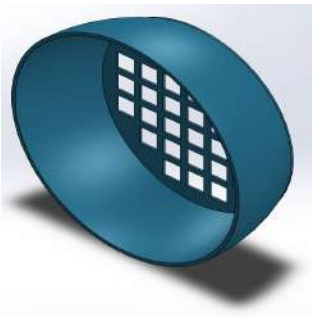
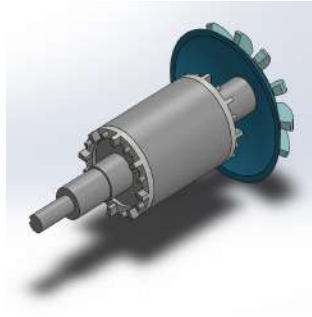


Figura 4.5: Modelo CAD del torquímetro.

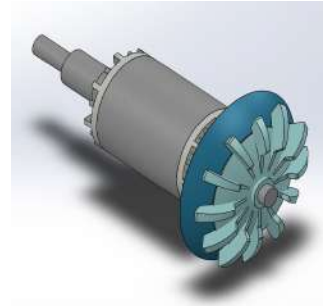
El modelo CAD del MI fue hecho por piezas y después todas ellas se ensamblaron. En la Figura [4.6](#) se puede ver el modelo CAD de las partes del MI.



(a) Tapa del ventilador.



(b) Rotor con eje y ventilador.



(c) Rotor con eje y ventilador, vista desde el ventilador.



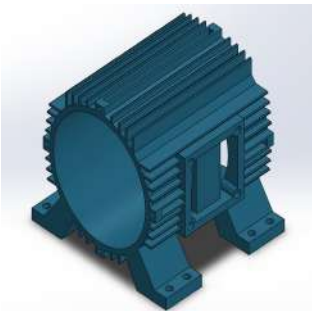
(d) Bobinas.



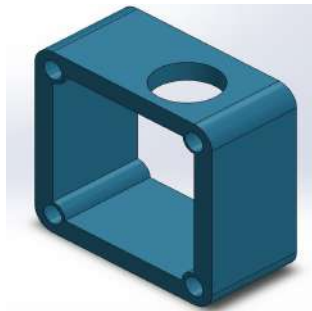
(e) Estator.



(f) Papel aislante.



(g) Carcasa.



(h) Caja de bornes.



(i) Tapa de la caja de bornes.

Figura 4.6: Piezas del MI en Solidworks.

En la Figura 4.7 se muestra el ensamblaje de las piezas del MI:

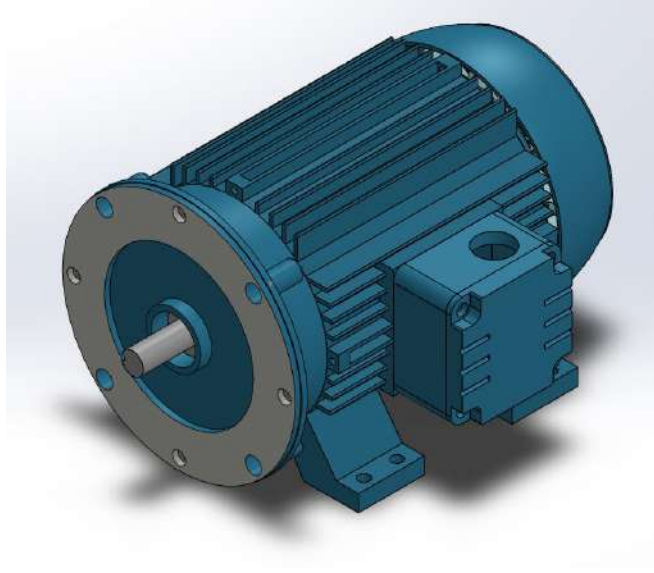
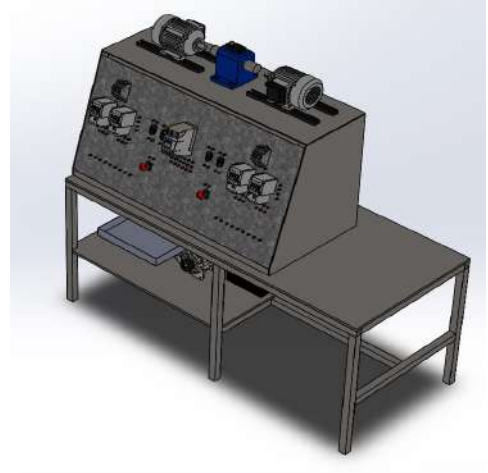


Figura 4.7: Vista isométrica del ensamblaje del MI.

Finalmente, en la Figura 4.8 se muestran 3 prototipos de bancos de pruebas en donde están el MI y los instrumentos de medición de señales. En el Anexo A se pueden encontrar mayores especificaciones sobre el diseño de los bancos de pruebas elaborados en Solidworks.



(a) Primer prototipo del banco de pruebas propuesto.



(b) Segundo prototipo del banco de pruebas propuesto.

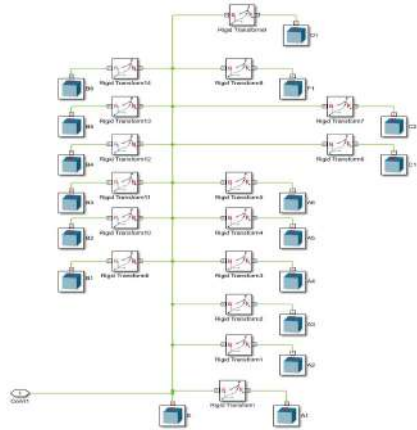


(c) Tercer prototipo del banco de pruebas propuesto.

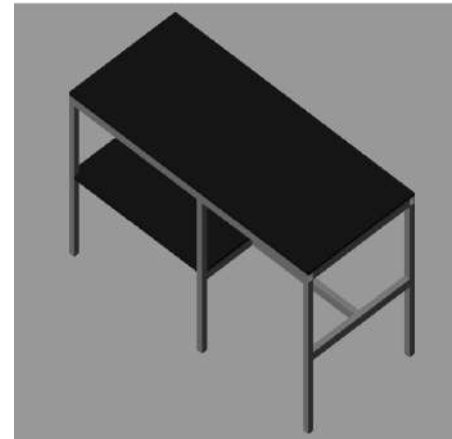
Figura 4.8: Prototipos del banco de pruebas.

## 4.2. Implementación en Matlab

Para la implementación en Matlab, se eligió el prototipo 3 de la Figura 4.8, se migraron todos los archivos de los modelos CAD hechos en Solidworks a Matlab del tercer prototipo que se complementó con el MI de la Figura 4.7 junto con los siguientes instrumentos: botón de inicio, botón de paro, botón de inicio-paro, conector banana de 4 mm, contactor de 3 polos, interruptor termomagnético de 3 polos, variador de frecuencia y el sensor de temperatura RTD. A continuación, se muestran los diagramas de bloques en Simulink junto con su respectivo modelo.

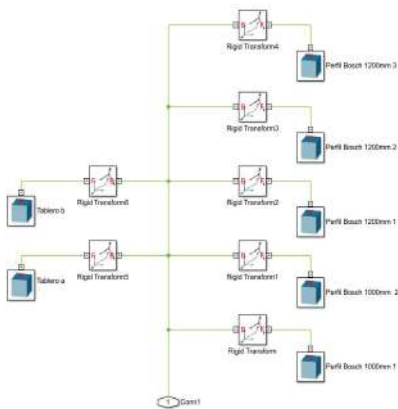


(a) Diagrama de bloques en Simulink para la implementación de la mesa de trabajo.

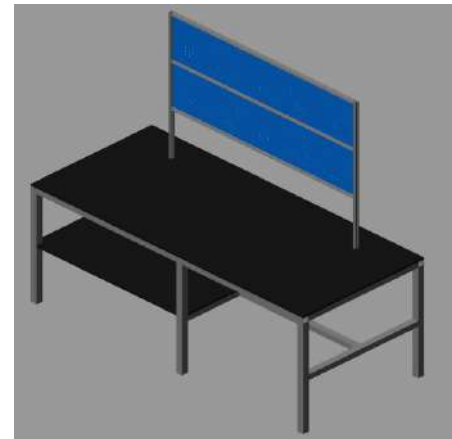


(b) Implementación en Matlab del programa de la Figura 4.9a.

Figura 4.9: Mesa de trabajo en Matlab.

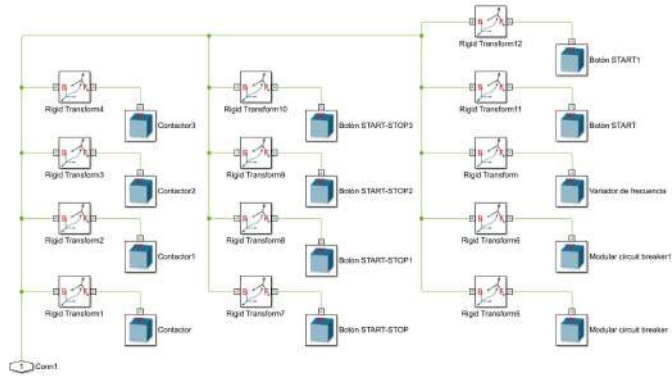


(a) Diagrama de bloques en Simulink para la implementación del tablero.

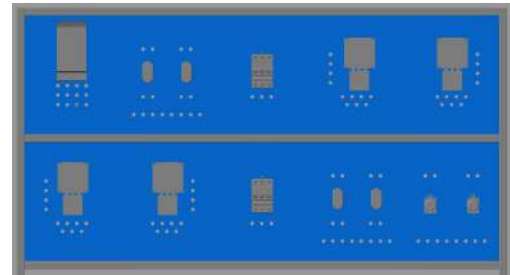


(b) Implementación en Matlab del programa de la Figura 4.10a.

Figura 4.10: Tablero en Matlab.

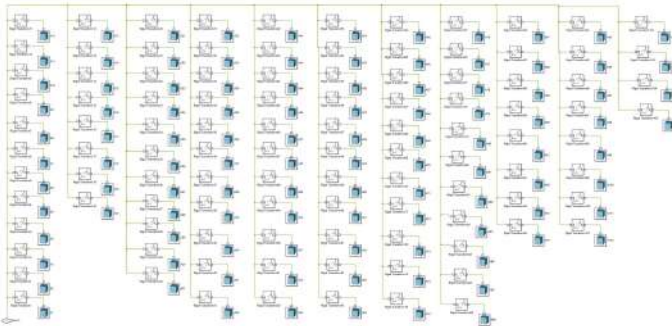


(a) Diagrama de bloques en Simulink para la implementación de componentes electrónicos.

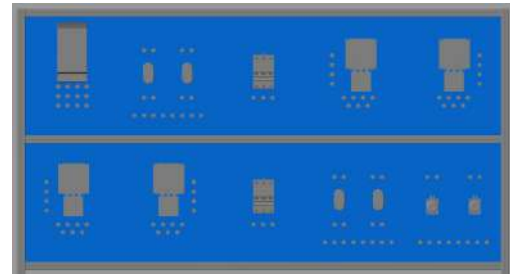


(b) Implementación en Matlab del programa de la Figura 4.11a.

Figura 4.11: Componentes electrónicos en Matlab.

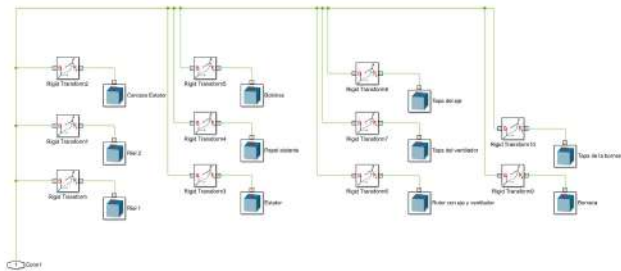


(a) Diagrama de bloques en Simulink para la implementación de los conectores banana.

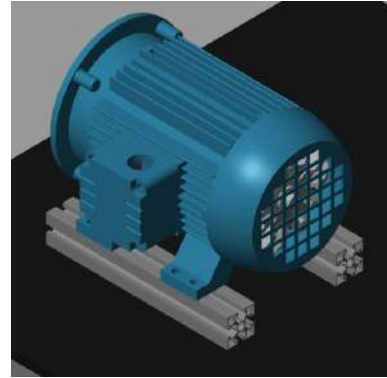


(b) Implementación en Matlab del programa de la Figura 4.12a.

Figura 4.12: Conectores banana en Matlab.

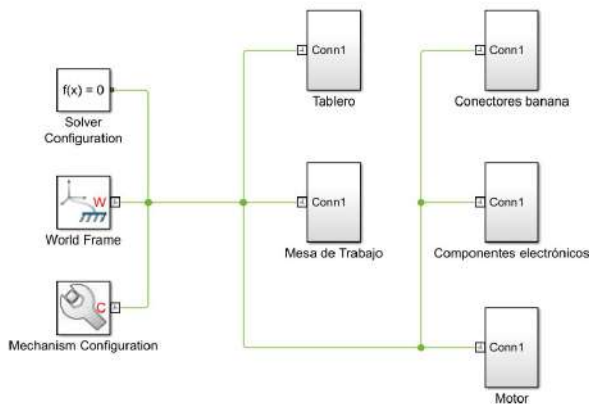


(a) Diagrama de bloques en Simulink para la implementación del motor.

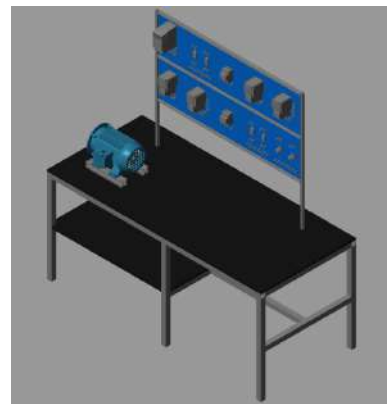


(b) Implementación en Matlab del programa de la Figura 4.13a.

Figura 4.13: MI en Matlab.



(a) Diagrama de bloques en Simulink para la implementación del banco de pruebas junto con el MI.



(b) Implementación en Matlab del programa de la Figura 4.14a.

Figura 4.14: Banco de pruebas junto con el MI en Matlab.

### 4.3. Caracterización del MI

Una vez que se migró todo el banco de pruebas de Solidworks a Matlab, al MI se le aplicaron las características reales del MI físico de la Tabla 3.3, para ello se modificó el diagrama de bloques de la Figura 4.13 agregándole el bloque *Asynchronous Machine*, este bloque implementa una máquina asíncrona de tres fases y es nativo de Simulink, de él salen las señales de corriente de las tres fases (fase a, fase b, fase c) todas en amperes (A), la velocidad del rotor en RPM, el torque en Nm, la potencia real en W y la potencia reactiva en VAR. Gracias a este bloque, la GUI podrá graficar el comportamiento del MI digital.



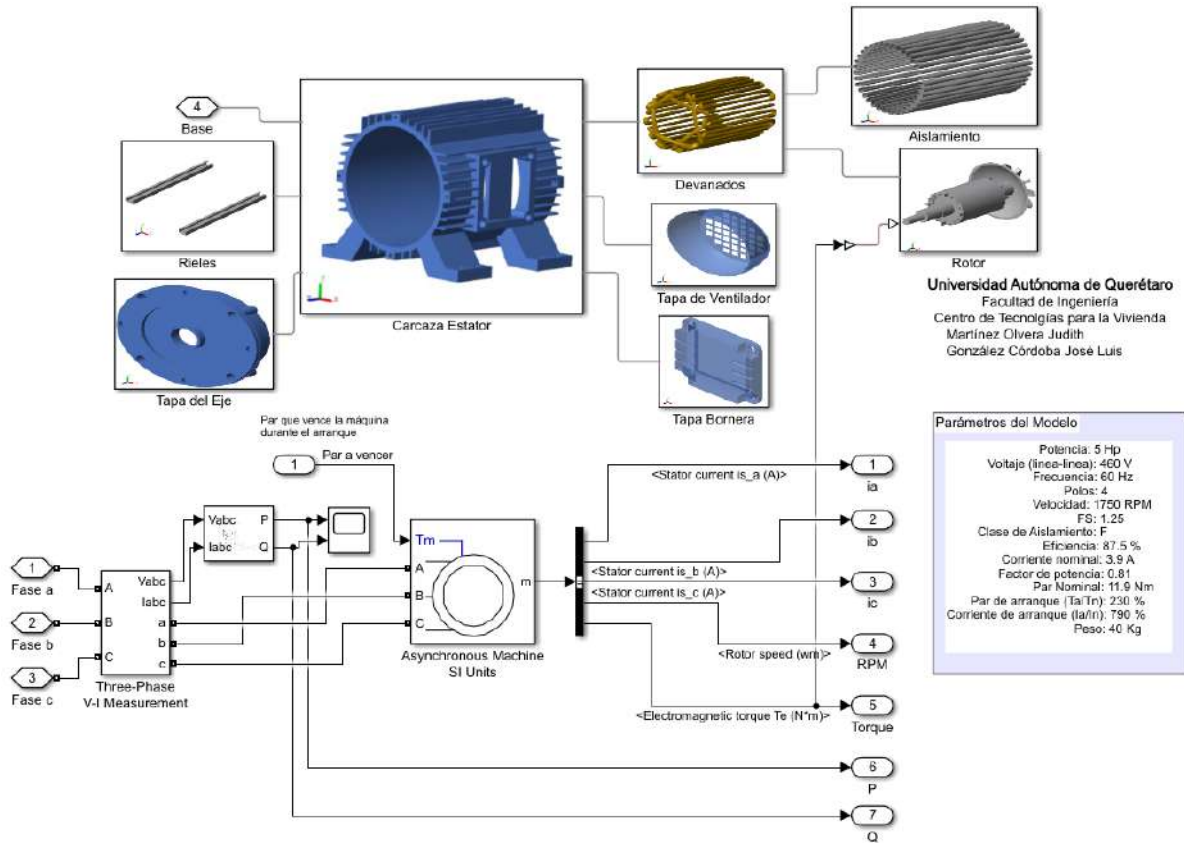


Figura 4.15: Diagrama de bloques en Simulink del MI.

#### 4.4. Sistema de adquisición de datos

Para la obtención de datos en tiempo real del MI físico se realizó la interfaz mostrada en la Figura 4.16, cuyo código se encuentra en el Anexo C y el diagrama de pines de la tarjeta BBB se encuentra en el Anexo B. Debido a que el MI físico no se instrumentó no se realizaron pruebas de validación con el sistema de adquisición de datos.



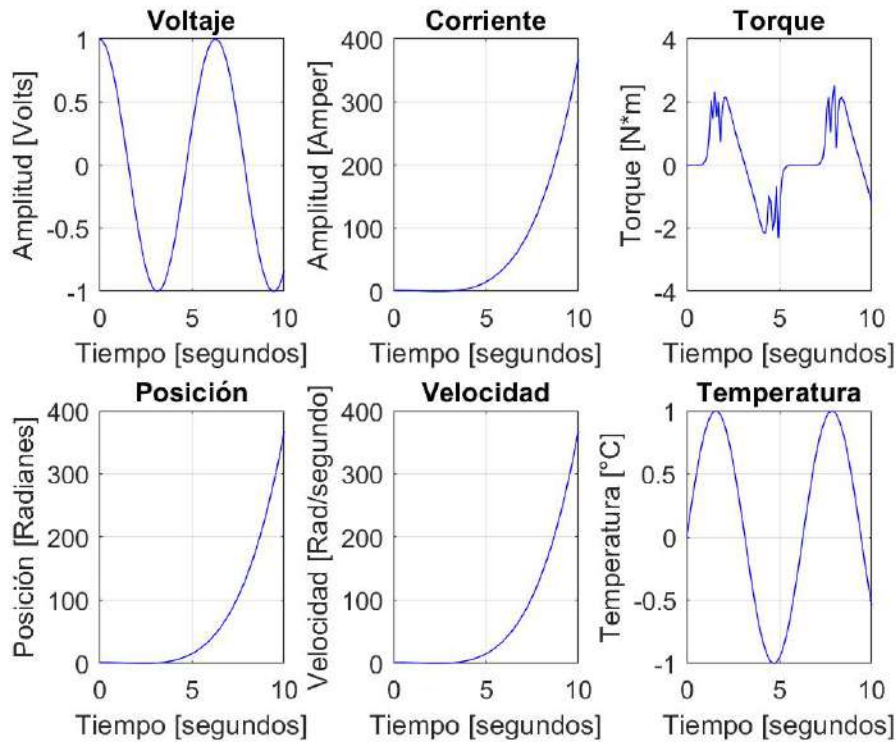


Figura 4.16: Gráfica de obtención de datos del MI para su uso en tiempo real.

#### 4.5. Interfaz gráfica de usuario (*Dashboard* - GUI)

La interfaz gráfica de usuario se realizó en Simulink y se muestra en la Figura 4.17, esta GUI muestra el comportamiento del MI digital y es con la cual, el usuario final podrá interactuar. En la parte superior de la GUI están 3 gráficas: la primera de ellas es para graficar las corrientes de línea, la segunda es para graficar la señal de voltaje y finalmente, la tercera para la señal del torque. La GUI cuenta con monitores para visualizar los valores de las corrientes a, b y c, velocidad y par. En la parte inferior, hay otras dos gráficas, las cuales son para la potencia real y la potencia reactiva. El sistema tiene distintos resultados de acuerdo a la carga que recibe el MI, para esto hay una perilla con la que se manipula el valor de la carga. Finalmente, para encender o apagar el sistema, tiene un botón de encendido y apagado (*On-Off*), además de un indicador que se prende color verde al funcionar la bobina.

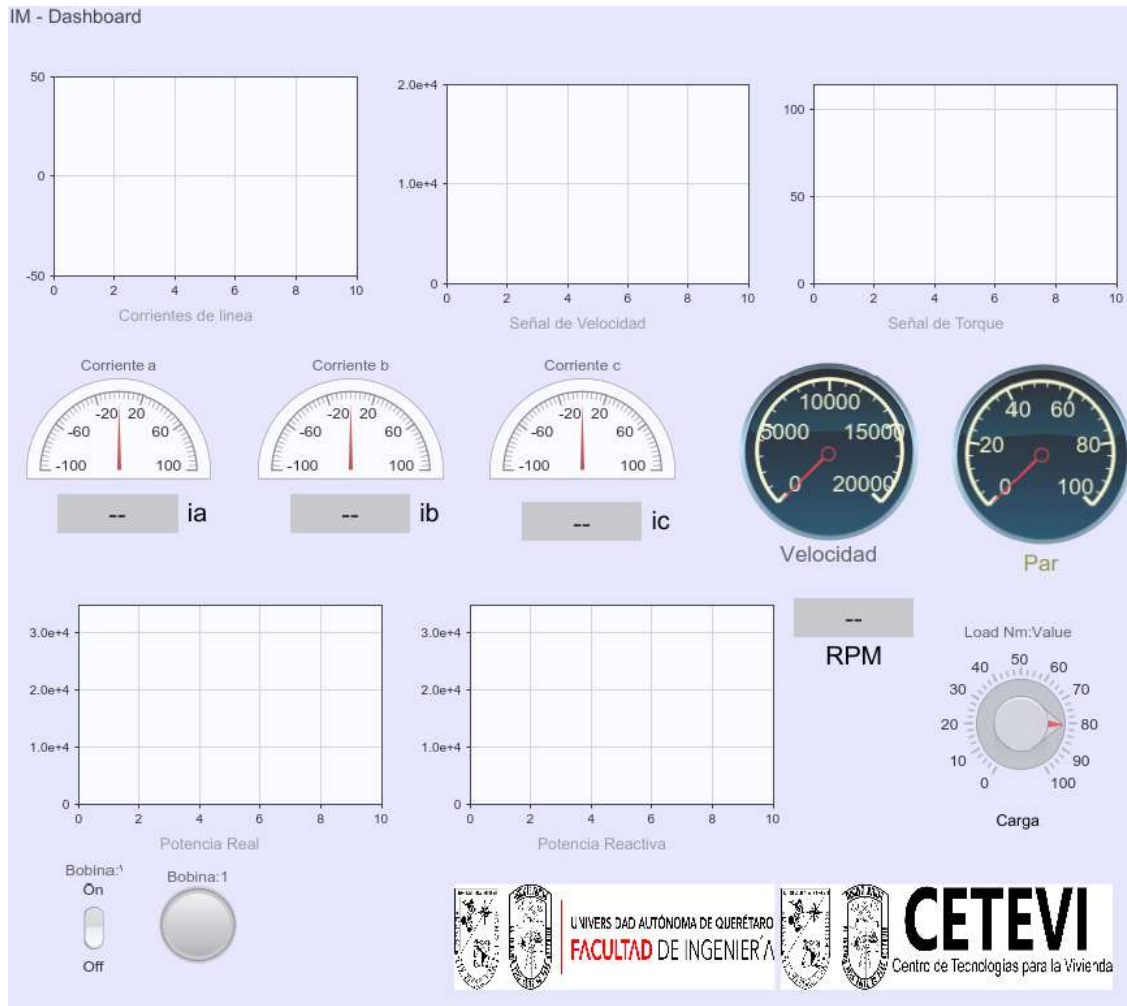


Figura 4.17: Interfaz gráfica de usuario.

## 4.6. Modelo digital del motor de inducción

En las Figuras 4.18 y 4.19, se muestra el resultado final del proyecto, el modelo digital de un motor de inducción. En la Figura 4.18 se puede apreciar que está la mesa de trabajo, el tablero y el MI, el MI está alimentado con 3 fuentes de CA que pasan por un contactor (cuyo modelo se muestra en la Figura 4.3a), se agregaron dos osciloscopios para observar a detalle la respuesta del MI, y además, está la GUI para el monitoreo del comportamiento del MI digital. Cabe señalar que dos bloques de Simulink, el de *Asynchronous Machine* y *Revolute Join*, fueron pilares para el desarrollo del modelo digital ya que fueron los encargados de modelar matemáticamente el motor así como darle un grado de libertad y permitir su movimiento, respectivamente. En el Anexo D, se encuentra información más detallada de los bloques mencionados [48, 49].

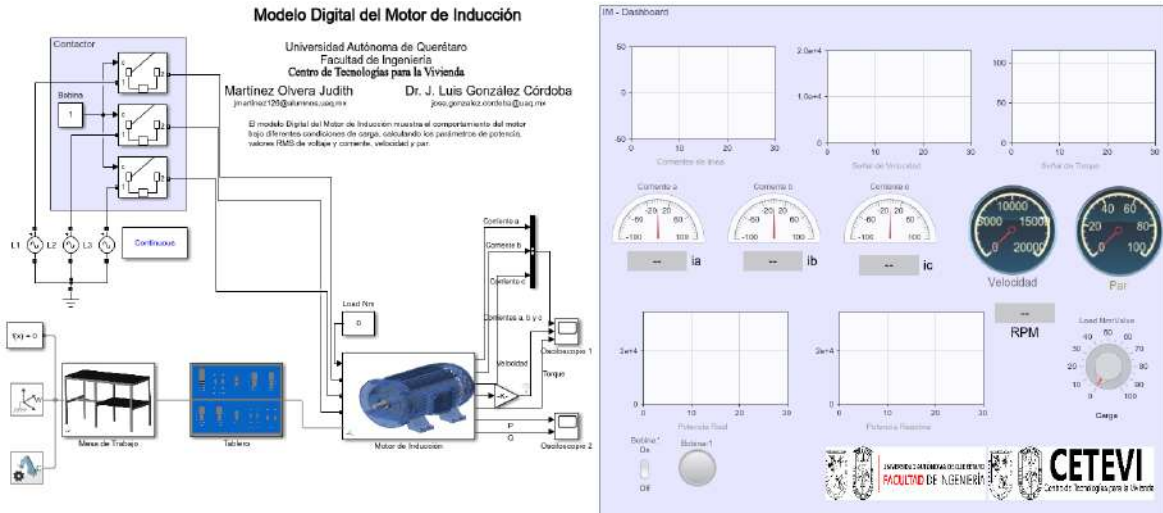


Figura 4.18: Diagrama de bloques en Simulink del modelo digital del motor de inducción junto con la GUI.

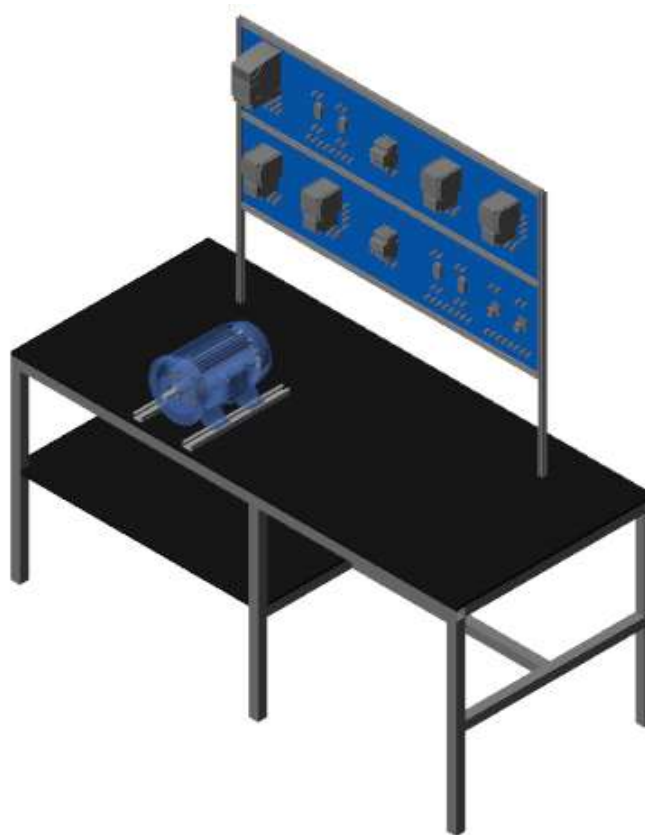


Figura 4.19: Modelo digital del motor de inducción.

## 4.7. Pruebas de validación

Las pruebas de validación consistieron en realizar múltiples simulaciones con distintas cargas al MI digital, todas ellas constantes en toda la simulación, el valor de la carga se modificó con la perilla del tablero al inicio de cada prueba. Cabe señalar que las unidades de cada variable usadas en las simulaciones se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Unidades de medida de las señales simuladas.

Señales del MI digital	Unidades
Corriente fase a	A
Corriente fase b	A
Corriente fase c	A
Velocidad	RPM
Torque	Nm
Potencia real	W
Potencia reactiva	VAR
Tiempo	s

### 4.7.1. Simulación con arranque en vacío

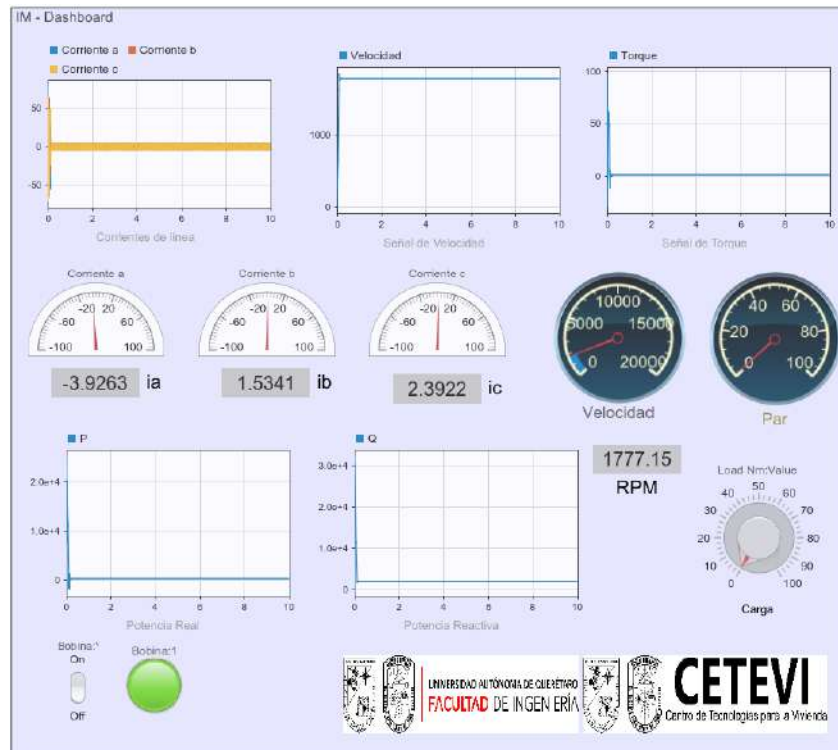


Figura 4.20: Respuesta del MI con un arranque en vacío.

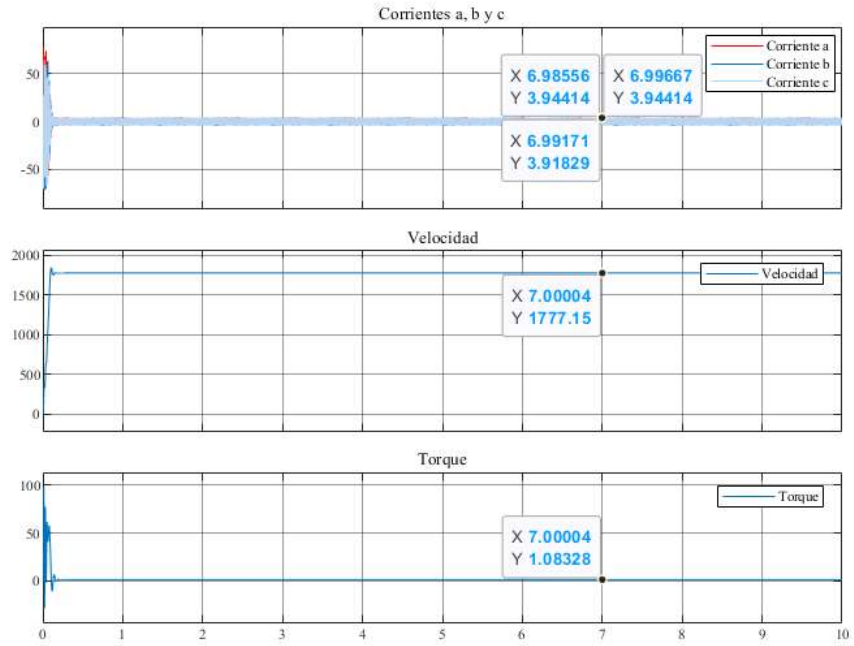


Figura 4.21: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI sin carga.

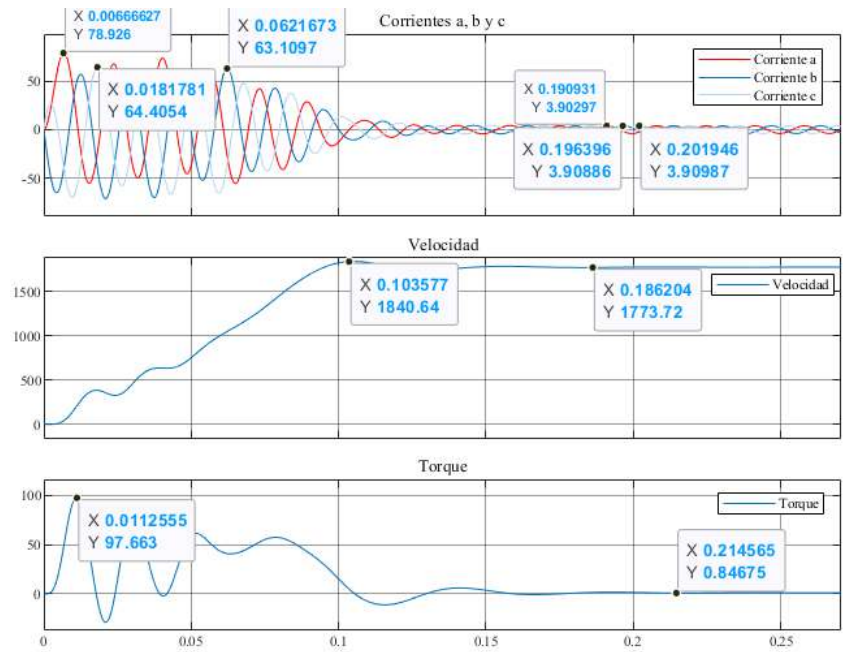


Figura 4.22: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI sin carga en su estado transitorio.

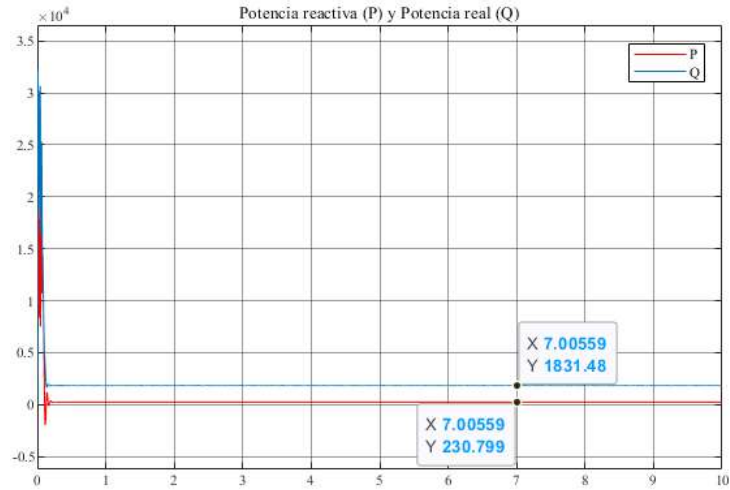


Figura 4.23: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI sin carga.

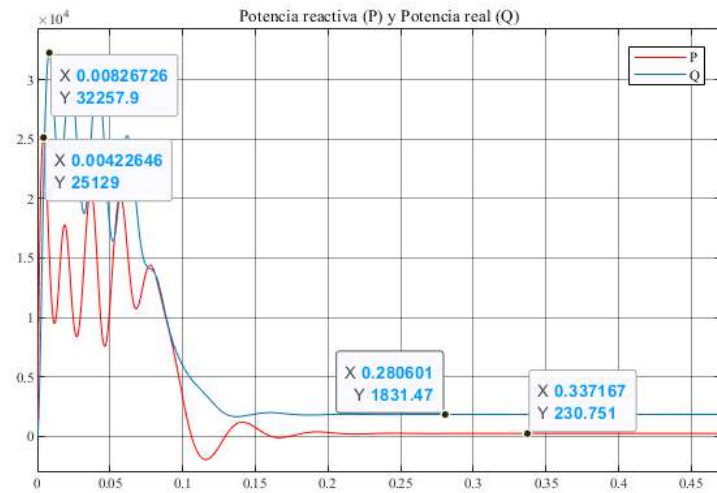


Figura 4.24: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI sin carga en su estado transitorio.

#### 4.7.2. Simulación con carga de 10 Nm

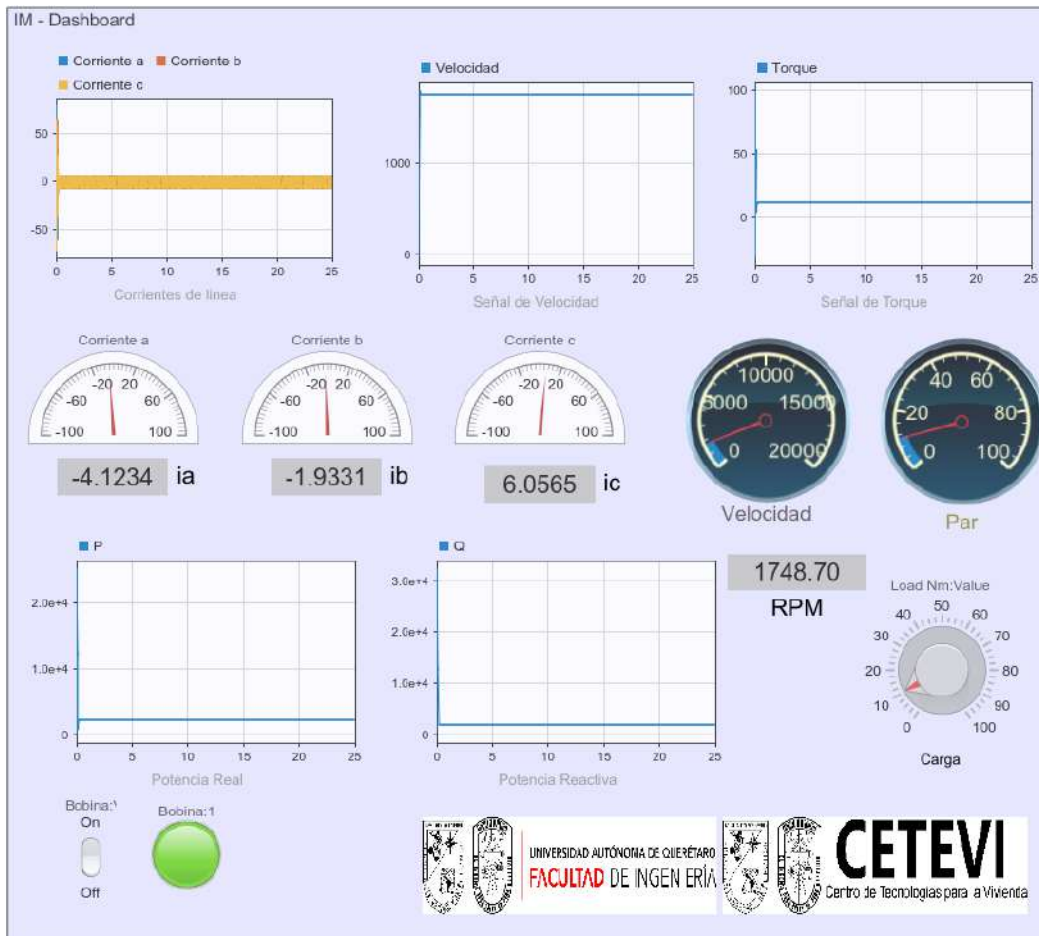


Figura 4.25: Respuesta del MI con una carga de 10 Nm.



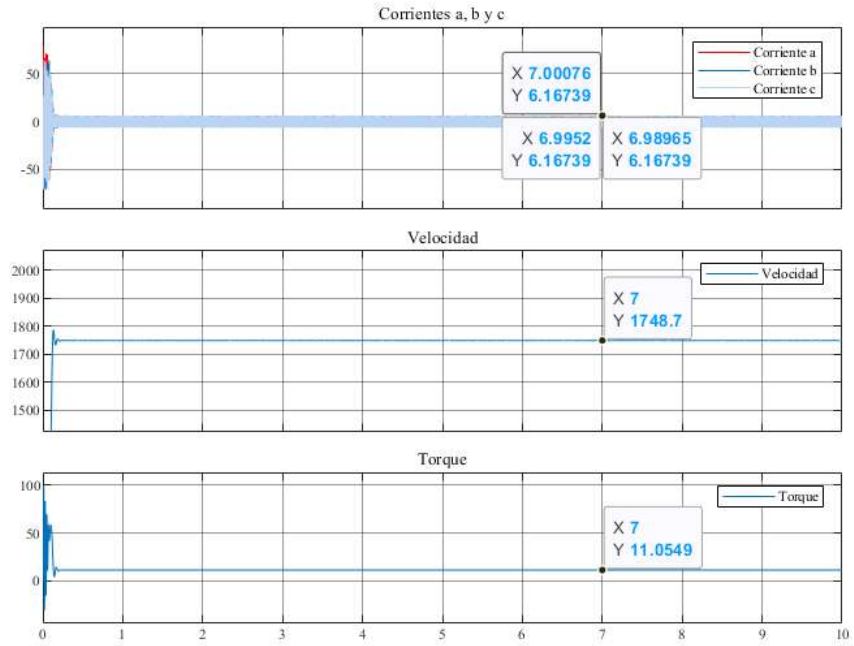


Figura 4.26: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 10 Nm.

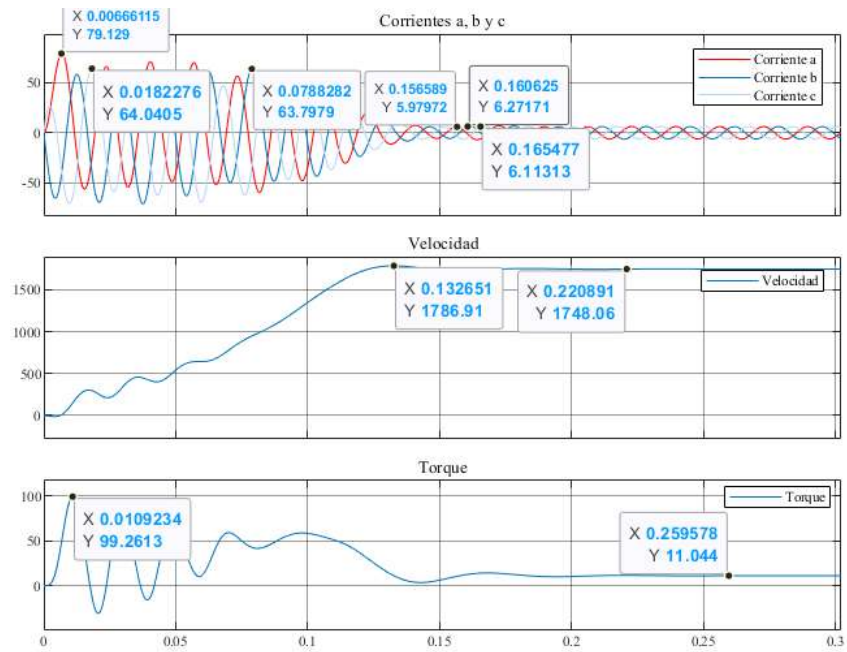


Figura 4.27: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 10 Nm en su estado transitorio.



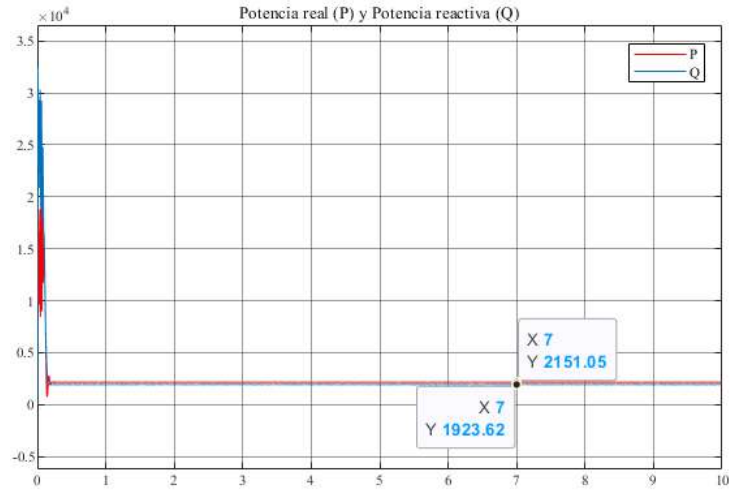


Figura 4.28: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 10 Nm.

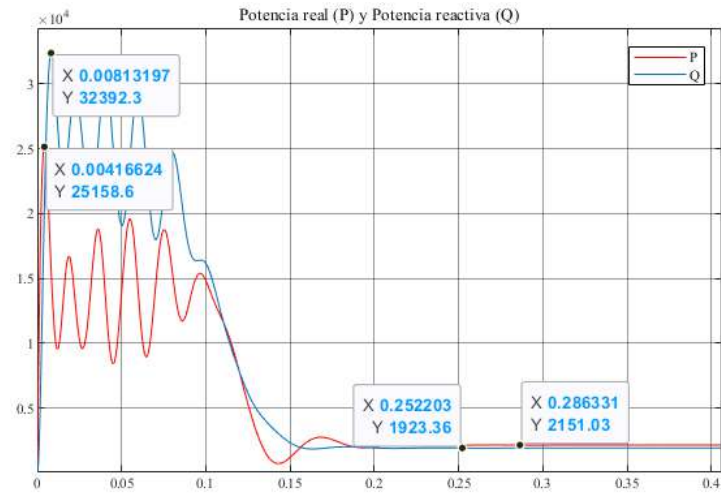


Figura 4.29: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 10 Nm en su estado transitorio.

### 4.7.3. Simulación con carga de 11.9 Nm

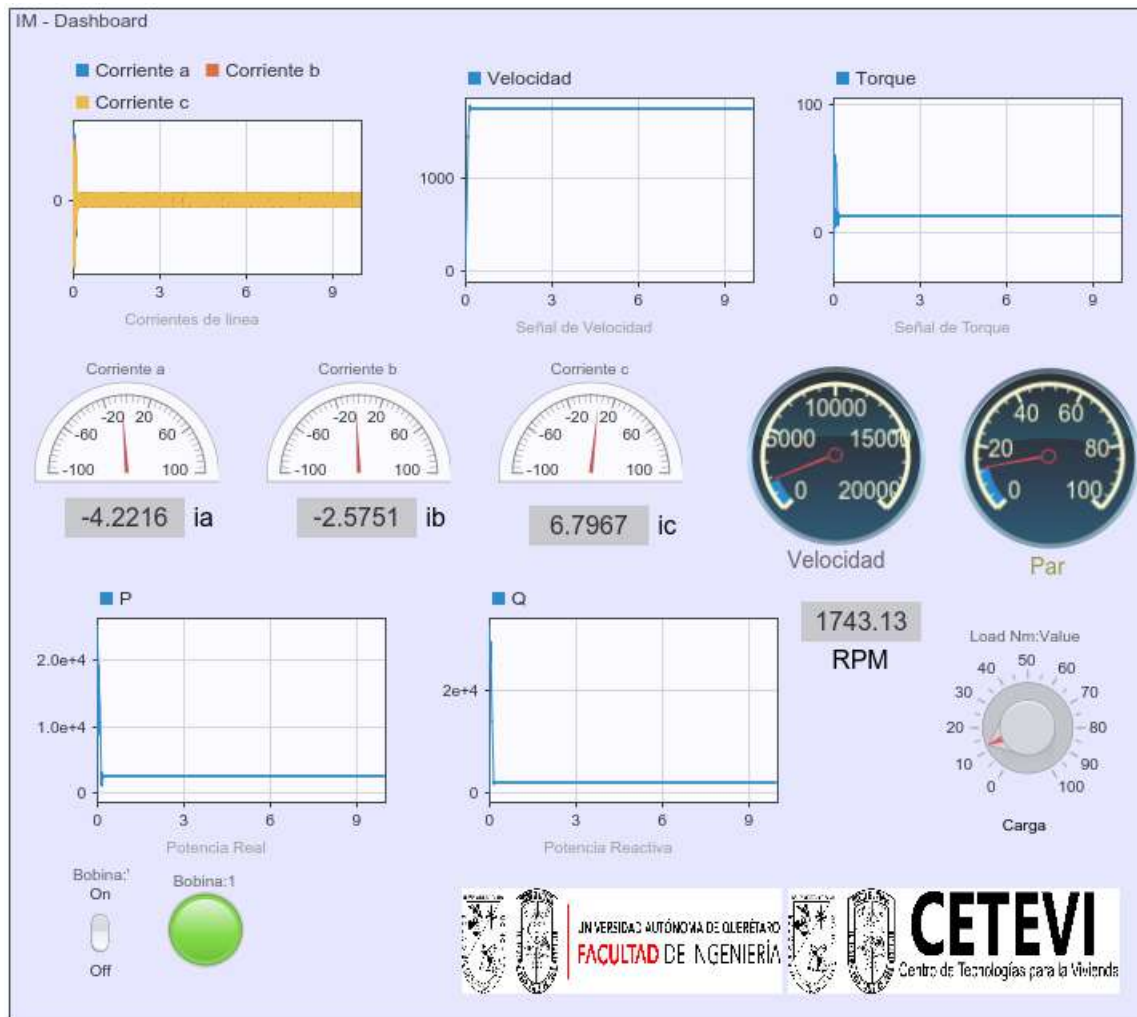


Figura 4.30: Respuesta del MI con una carga de 11.9 Nm.

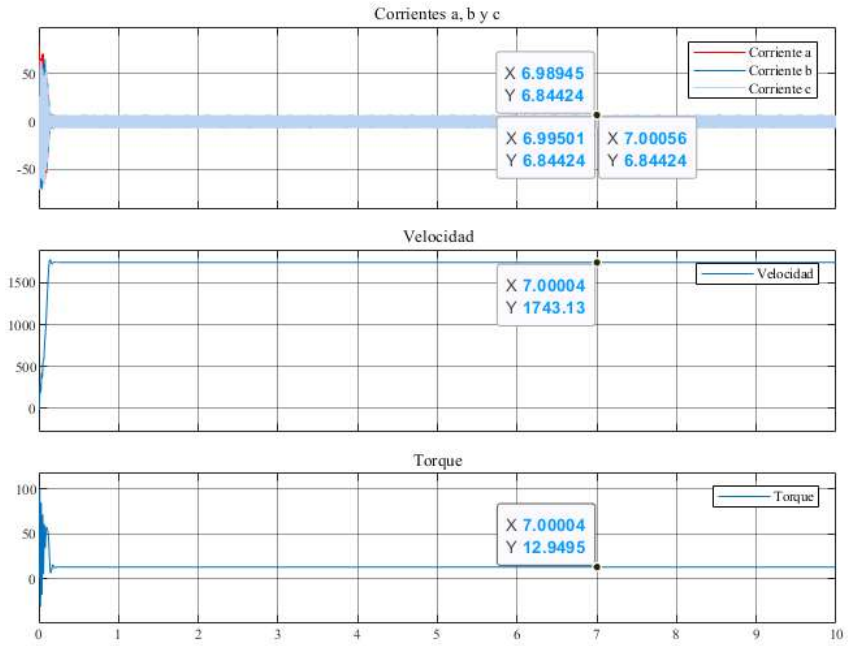


Figura 4.31: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 11.9 Nm.

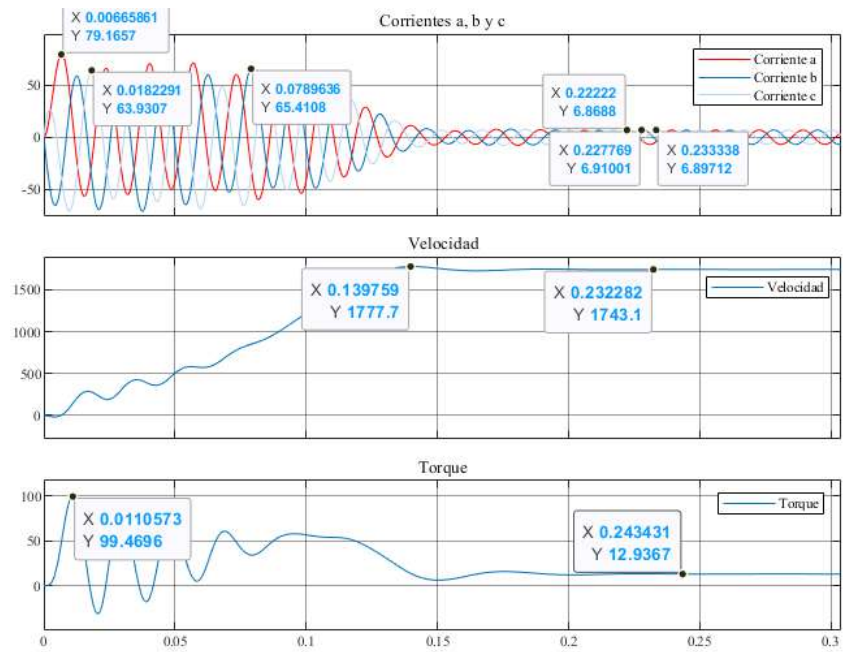


Figura 4.32: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 11.9 Nm en su estado transitorio.

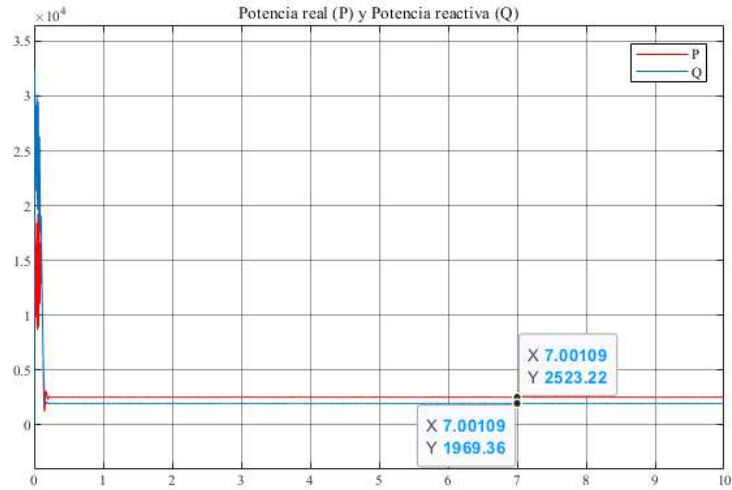


Figura 4.33: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 11.9 Nm.

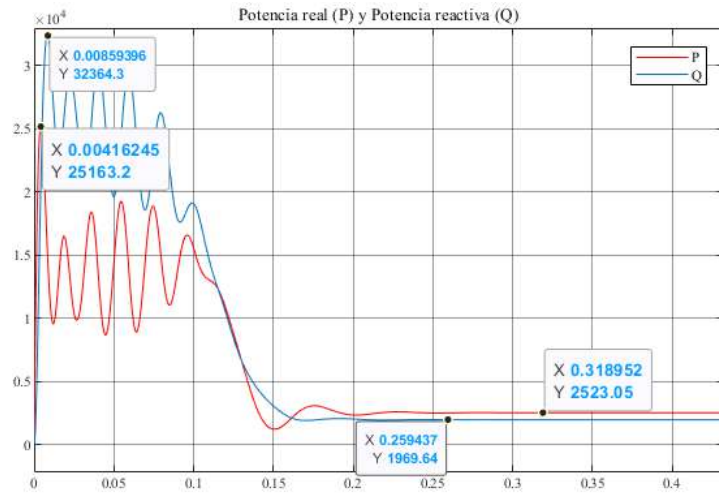


Figura 4.34: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 11.9 Nm en su estado transitorio.

#### 4.7.4. Simulación con carga de 20 Nm

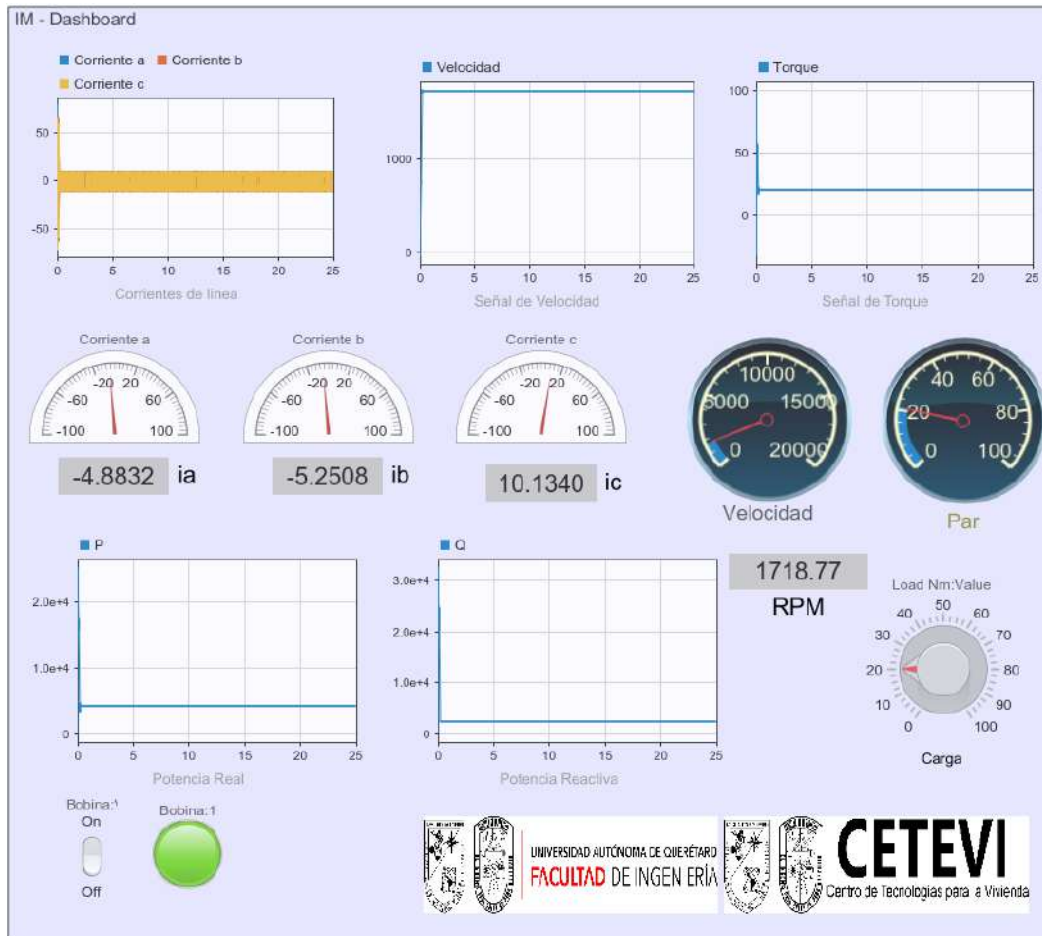


Figura 4.35: Respuesta del MI con una carga de 20 Nm.

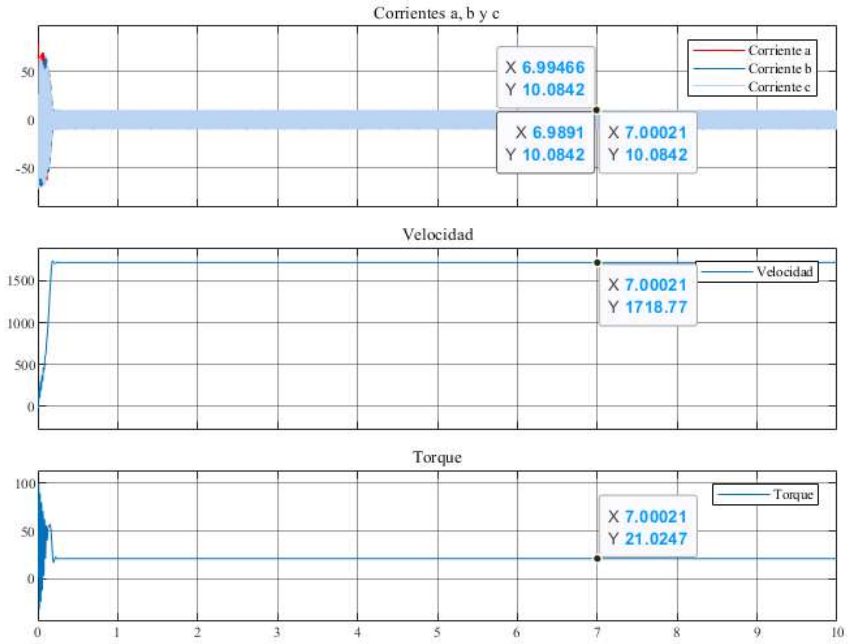


Figura 4.36: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 20 Nm.

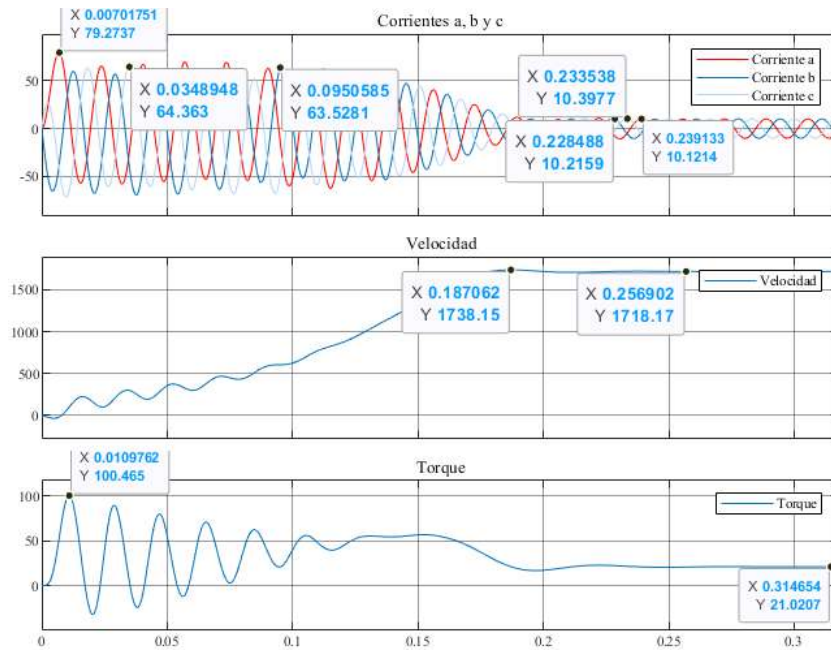


Figura 4.37: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 20 Nm en su estado transitorio.

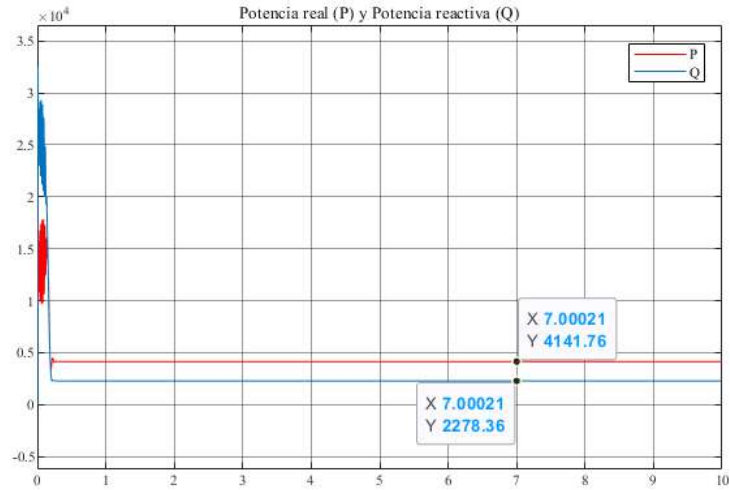


Figura 4.38: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 20 Nm.

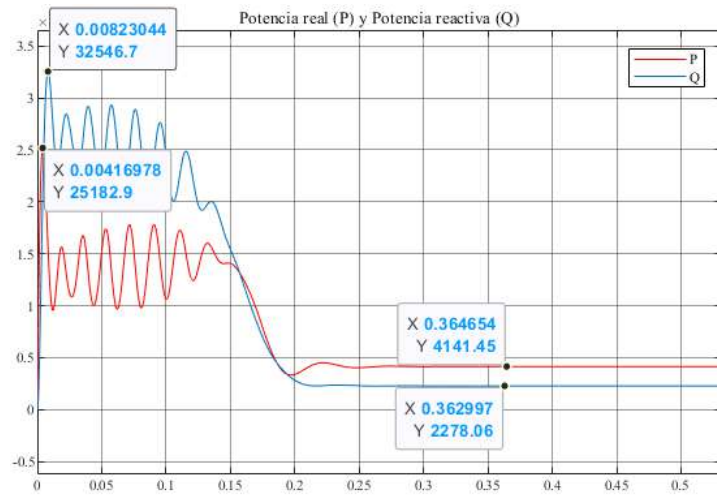


Figura 4.39: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 20 Nm en su estado transitorio.

#### 4.7.5. Simulación con carga de 32 Nm

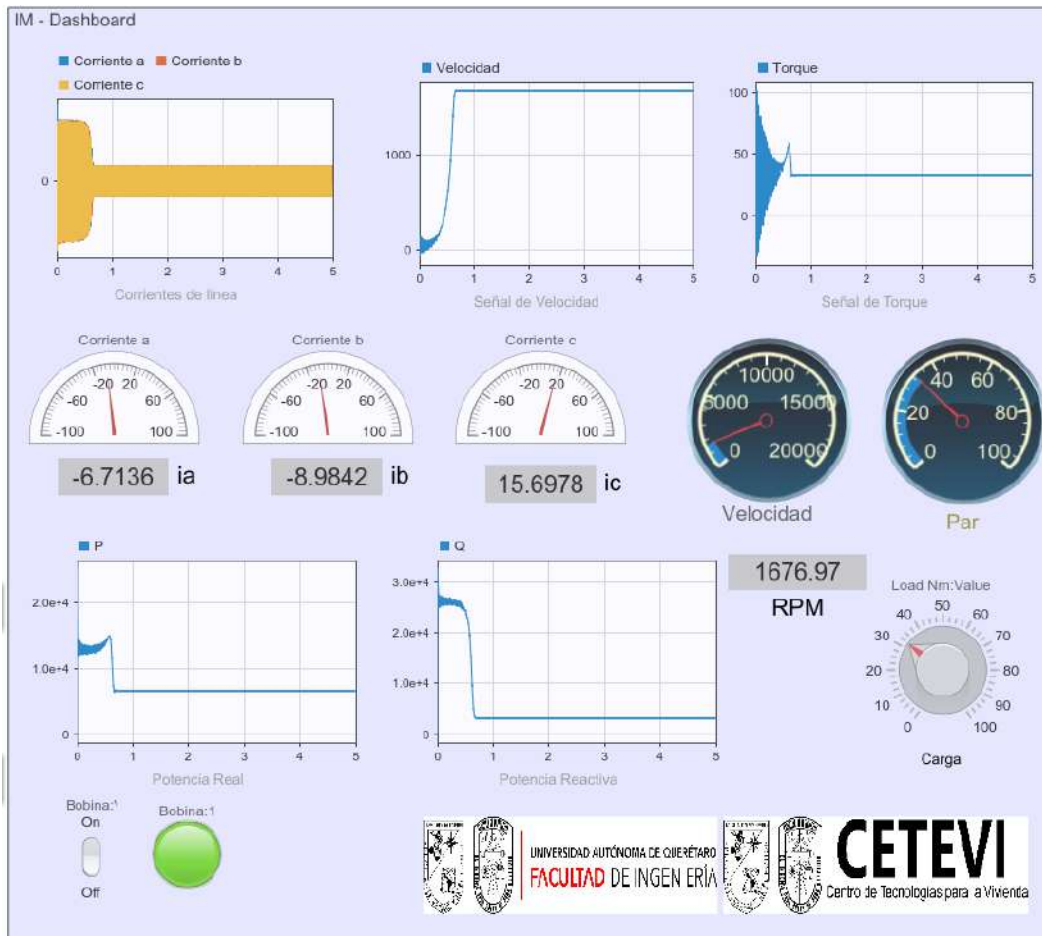


Figura 4.40: Respuesta del MI con una carga de 32 Nm.



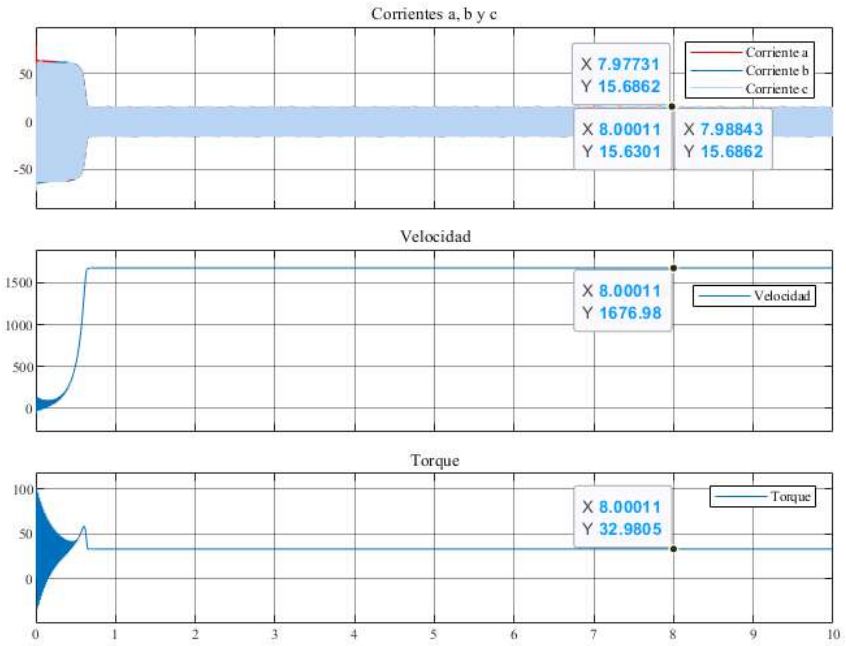


Figura 4.41: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 32 Nm.

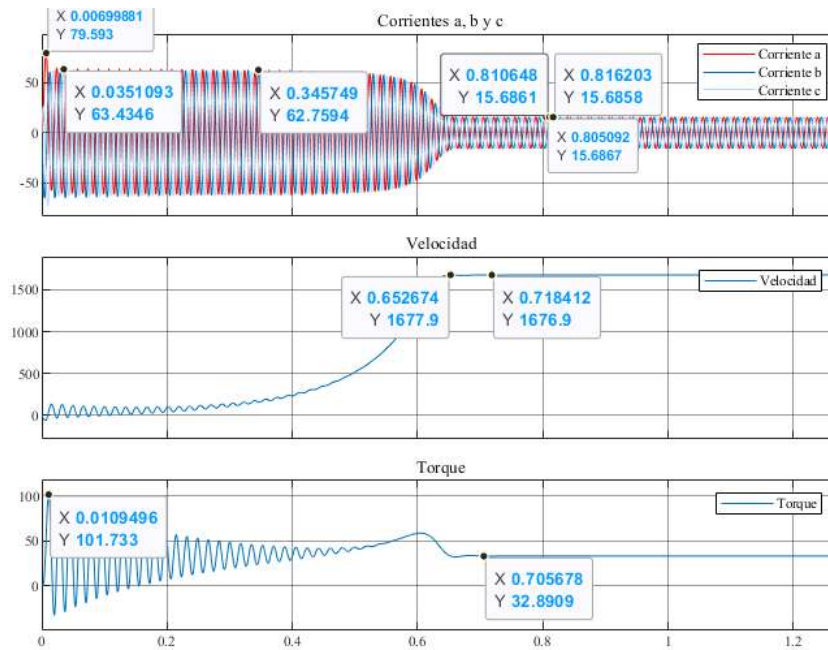


Figura 4.42: Gráfica de las fases a, b y c, velocidad y torque del MI con una carga de 32 Nm en su estado transitorio.

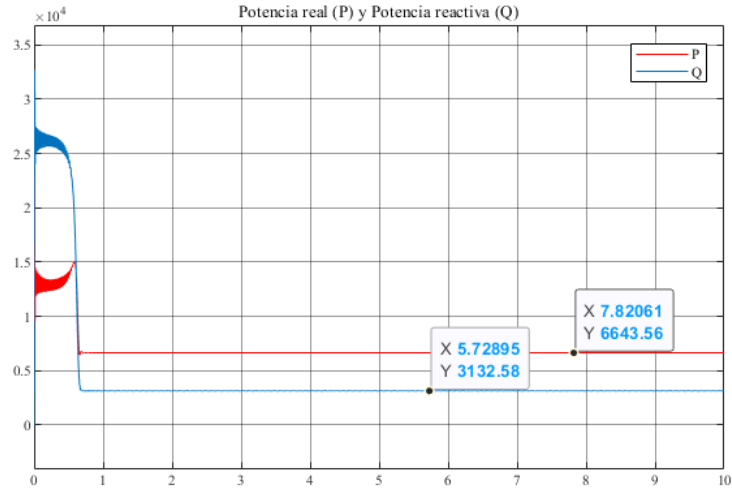


Figura 4.43: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 32 Nm.

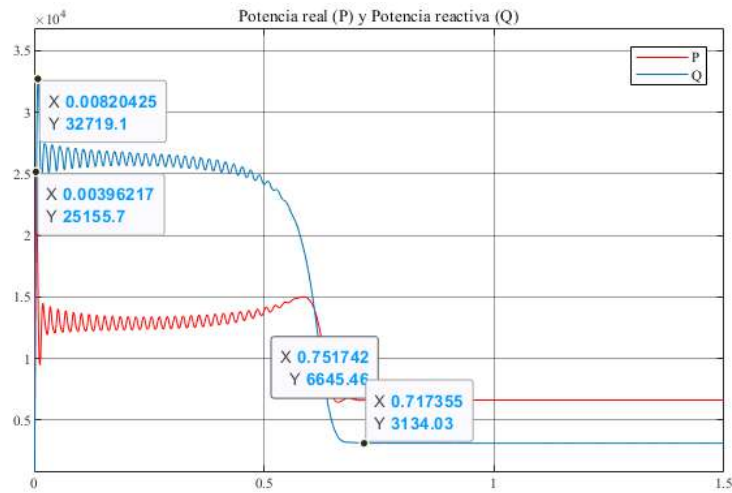


Figura 4.44: Gráfica de la potencia real y la potencia reactiva del MI con una carga de 32 Nm en su estado transitorio.

# Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos en el desarrollo del presente trabajo.

## 5.1. Análisis de la prueba de validación

En la validación de resultados se obtuvieron gráficas para distintos valores de carga aplicados al MI, y a partir de ellas, se obtuvieron las siguientes tablas.

Tabla 5.1: Comportamiento en estado estacionario del MI con un arranque en vacío.

Señales del MI digital	Tiempo [s]
Corriente fase a [A] = 3.94414	6.98556
Corriente fase b [A] = 3.91829	6.99171
Corriente fase c [A] = 3.94414	6.99667
Velocidad [RPM] = 1777.15	7.00004
Torque [Nm] = 1.08328	7.00004
Potencia real [W] = 230.799	7.00559
Potencia reactiva [VAR] = 1831.48	7.00559

Tabla 5.2: Comportamiento en estado transitorio del MI con un arranque en vacío.

Señales de MI digital	Valor máximo al arranque	Tiempo del valor máximo [s]	Valor al tiempo de establecimiento	Tiempo de establecimiento [s]
Corriente fase a [A]	78.926	0.00666	3.90297	0.19093
Corriente fase b [A]	63.1097	0.06216	3.90886	0.19639
Corriente fase c [A]	64.4054	0.01817	3.90987	0.201946
Velocidad [RPM]	1840.64	0.10357	1773.72	0.18620
Torque [Nm]	97.663	0.01125	0.84675	0.21456
Potencia real [W]	25129	0.00422	230.731	0.33716
Potencia reactiva [VAR]	32257.9	0.00826	1831.47	0.28061

Tabla 5.3: Comportamiento en estado estacionario del MI con una carga de 10 Nm.

Señales del MI digital	Tiempo [s]
Corriente fase a [A] = 6.16739	7.00076
Corriente fase b [A] = 6.16739	6.9952
Corriente fase c [A] = 6.16739	6.98965
Velocidad [RPM] = 1748.7	7
Torque [Nm] = 11.0549	7
Potencia real [W] = 2151.05	7
Potencia reactiva [VAR] = 1923.62	7

Tabla 5.4: Comportamiento en estado transitorio del MI con una carga de 10 Nm.

Señales de MI digital	Valor máximo al arranque	Tiempo del valor máximo [s]	Valor al tiempo de establecimiento	Tiempo de establecimiento [s]
Corriente fase a [A]	79.129	0.00666	5.97972	0.15658
Corriente fase b [A]	63.7979	0.07882	6.27171	0.16062
Corriente fase c [A]	64.0405	0.01822	6.11313	0.16547
Velocidad [RPM]	1786.91	0.13265	1748.06	0.22089
Torque [Nm]	99.2613	0.01092	11.044	0.25957
Potencia real [W]	25158.6	0.00416	2151.03	0.28633
Potencia reactiva [VAR]	32392.3	0.00813	1923.36	0.25220

Tabla 5.5: Comportamiento en estado estacionario del MI con una carga de 11.9 Nm.

Señales del MI digital	Tiempo [s]
Corriente fase a [A] = 6.84424	6.98945
Corriente fase b [A] = 6.84424	6.99501
Corriente fase c [A] = 6.84424	7.00056
Velocidad [RPM] = 1743.13	7.00004
Torque [Nm] = 12.9495	7.00004
Potencia real [W] = 2523.22	7.00109
Potencia reactiva [VAR] = 1969.36	7.00109

Tabla 5.6: Comportamiento en estado transitorio del MI con una carga de 11.9 Nm.

Señales de MI digital	Valor máximo al arranque	Tiempo del valor máximo [s]	Valor al tiempo de establecimiento	Tiempo de establecimiento [s]
Corriente fase a [A]	79.1657	0.00665	6.8688	0.22222
Corriente fase b [A]	65.4108	0.07896	6.91001	0.22776
Corriente fase c [A]	63.9307	0.01822	6.89712	0.23333
Velocidad [RPM]	1777.7	0.13975	1743.1	0.23228
Torque [Nm]	99.4696	0.01105	12.9367	0.24343
Potencia real [W]	25163.2	0.00416	2523.05	0.31895
Potencia reactiva [VAR]	32364.3	0.00859	1969.64	0.25943

Tabla 5.7: Comportamiento en estado estacionario del MI con una carga de 20 Nm.

Señales del MI digital	Tiempo [s]
Corriente fase a [A] = 10.0842	6.9891
Corriente fase b [A] = 10.0842	6.99466
Corriente fase c [A] = 10.0842	7.00021
Velocidad [RPM] = 1718.77	7.00021
Torque [Nm] = 21.0247	7.00021
Potencia real [W] = 4141.76	7.00021
Potencia reactiva [VAR] = 2278.36	7.00021

Tabla 5.8: Comportamiento en estado transitorio del MI con una carga de 20 Nm.

Señales de MI digital	Valor máximo al arranque	Tiempo del valor máximo [s]	Valor al tiempo de establecimiento	Tiempo de establecimiento [s]
Corriente fase a [A]	79.2737	0.00701	10.1214	0.23913
Corriente fase b [A]	63.5281	0.09505	10.2159	0.22848
Corriente fase c [A]	64.363	0.03489	10.3977	0.23353
Velocidad [RPM]	1738.15	0.18706	1718.17	0.25690
Torque [Nm]	100.465	0.01097	21.0207	0.31465
Potencia real [W]	25182.9	0.00416	4141.45	0.36465
Potencia reactiva [VAR]	32546.7	0.00823	2278.06	0.36299

Tabla 5.9: Comportamiento en estado estacionario del MI con una carga de 32 Nm.

Señales del MI digital	Tiempo [s]
Corriente fase a [A] = 15.6862	7.97731
Corriente fase b [A] = 15.6862	7.98843
Corriente fase c [A] = 15.6301	8.00011
Velocidad [RPM] = 1676.98	8.00011
Torque [Nm] = 32.9805	8.00011
Potencia real [W] = 6643.56	7.82061
Potencia reactiva [VAR] = 3132.58	5.72895

Tabla 5.10: Comportamiento en estado transitorio del MI con una carga de 32 Nm.

Señales de MI digital	Valor máximo al arranque	Tiempo del valor máximo [s]	Valor al tiempo de establecimiento	Tiempo de establecimiento [s]
Corriente fase a [A]	79.593	0.00699	15.6867	0.80509
Corriente fase b [A]	62.7594	0.34574	15.6861	0.81064
Corriente fase c [A]	63.4346	0.03510	15.6858	0.81620
Velocidad [RPM]	1677.9	0.65267	1676.9	0.71841
Torque [Nm]	101.733	0.01094	32.8909	0.70567
Potencia real [W]	25155.7	0.00396	6645.46	0.75174
Potencia reactiva [VAR]	32719.1	0.00820	3134.03	0.71735

En general, la corriente de las fases a, b y c, varía significativamente durante la fase del arranque (estado transitorio), luego comienzan a variar suavemente con períodos más pequeños, mientras que la velocidad y el torque se mantienen en valores constantes, pero conforme aumenta el valor de la carga se puede analizar que se mantiene por más tiempo una alta variación de la corriente, haciendo que la velocidad comience a disminuir y no alcance el valor máximo nominal, además tanto el torque como la potencia real también aumentan conforme la carga va cambiando a valores más grandes, por otro lado la potencia reactiva que se requiere por la corriente consumida, también va incrementando. Otra observación, es que en el estado transitorio del MI digital sin importar la carga, el valor de la corriente no sobrepasa los 80 A, pero el tiempo de estabilización depende de la cantidad de carga.

En casos particulares, en la prueba donde el arranque es en vacío y de acuerdo a las Tablas 5.1 y 5.2, el tiempo de establecimiento para las corrientes a, b y c, es aproximadamente de 0.2019 s. En cuando a las demás variables, el tiempo de establecimiento es similar. Un análisis más que parte de esta primera simulación, es que los valores de la corriente y velocidad son muy similares al valor nominal mostrado en la Tabla 3.3, el torque tiende a cero ya que no hay carga que mover. Se realizó una prueba con una carga de 11.9 Nm, el consumo de corriente aumentó 3 A a comparación de la simulación sin carga, la velocidad disminuyó poco (con una diferencia de 34 RPM) y al ya tener que mover una carga, el toque requerido fue de 12.9495 Nm. Finalmente, se hizo una prueba con una carga de 32 Nm, esta prueba ya es una sobrecarga al MI ya que el torque nominal es de 11.9 Nm pero de acuerdo a la Tabla 5.9, el torque requerido para mover esa carga es de 32.9805 Nm, la velocidad también es menos pero el consumo de corriente es mayor, además de que tarda más tiempo en estabilizarse, para este tipo de pruebas con sobrecarga, con un MI físico ya hubiera

sobrecalentamiento en los devanados del motor acortando la vida útil del motor e incluso se hubieran hecho daños irreversibles como quemar el embobinado.

## 5.2. Discusión

Los resultados de este proyecto son una gran cantidad de material de investigación y de productos. En cuanto a los productos, están los modelos CAD que se hicieron en Solidworks: el botón de paro, botón de inicio, botón inicio-paro, conector banana, contactor de 3 polos, interruptor termomagnético de 3 polos, variador de frecuencia, sensor de temperatura RTD y el MI por piezas. Además, se realizaron 3 prototipos para el desarrollo de un banco de pruebas, se utilizó el de la Figura 4.8c como prototipo final por sus dimensiones finales y el acomodo de componentes. En Simulink se utilizó todo el material de los modelos CAD para crear el banco de pruebas unificado, es decir, es una mesa de trabajo que contiene al MI y los instrumentos listos para una simulación. En cuanto a las propiedades de la GUI, pudo graficar las corrientes de cada una de las fases del motor, velocidad, torque, potencia real y potencia reactiva. La carga puede ser variable ya que hay una perilla para modificar su valor.

## 5.3. Aplicaciones

Para fines de docencia, el modelo digital del motor de inducción es útil para el estudio de los motores de inducción bajo diferentes condiciones de operación. Por otro lado, desde un punto de vista industrial, el desarrollo del modelo digital permitirá el desarrollo de diferentes esquemas de producción, y sistemas que lleven como herramienta principal un motor de inducción trifásico.

## 5.4. Impacto tecnológico

El modelo digital del motor de inducción seguirá siendo de gran utilidad para la investigación y prueba de fallas en motores y podrá ser utilizado en el desarrollo de GD, los cuales actualmente están ganando terreno alrededor del mundo en la mayoría de los procesos industriales.

## 5.5. Impacto social

Este proyecto puede ser utilizado en áreas de la docencia e investigación, plantea la posibilidad de atender las necesidades académicas de los alumnos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, facilitar el trabajo remoto y fomenta la aplicación del conocimiento de máquinas eléctricas, electrónica de potencia y digitalización de diseños en proyectos que tengan un alto impacto a nivel industrial e impulsa la creación y desarrollo de nuevos sistemas y mejoras de productos.

## Conclusiones

El desarrollo del modelo digital del motor de inducción permitirá la fusión de los mundos real y virtual para el estudio de diferentes metodologías y sistemas de inteligentes de compensación, protección, predicción y control, bajo el paradigma de la industria 4.0, generando una base de conocimiento experimental por medio del desarrollo de bancos de prueba virtuales, bajo diferentes esquemas de simulación integral en un entorno operativo diversificado. En este sentido, el contar con un entorno de desarrollo tecnológico y de investigación como el desarrollado en esta TESIS permitirá atender las nuevas necesidades industriales de hoy en día, además, de atender las necesidades académicas de los alumnos de la FI, así como de los diferentes programas de posgrado de la UAQ, impulsando la creación y el desarrollo de nuevos sistemas y mejoras de procesos y productos. Por otro lado, en cuanto a la integración de los entornos de desarrollo de Simulink de MatLab y SolidWorks, la fusión de ambos permite que los modelos tridimensionales desarrollados puedan integrarse con los modelos matemáticos (funciones de transferencia) para simular en un ambiente virtual el comportamiento de los sistemas, además de poder desarrollar e integrar diferentes esquemas y entornos virtuales, como sistemas de control, sistemas inteligentes, sistemas de predicción, entre otros.



---

# Bibliografía

- [1] I. Onaji, D. Tiwari, P. Soulatiantork, B. Song, and A. Tiwari, “Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 1–28, 2022.
- [2] M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, “Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 58, pp. 346–361, 2021.
- [3] P. Gangsar and R. Tiwari, “Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review,” *Mechanical systems and signal processing*, vol. 144, p. 106908, 2020.
- [4] H. Liu, B. Lee, and Y. Tarng, “Monitoring of drill fracture from the current measurement of a three-phase induction motor,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, no. 6, pp. 729–738, 1996.
- [5] P. Sushma, B. R. Samaga, and K. Vittal, “Dq modeling of induction motor for virtual flux measurement,” in *2010 Conference Proceedings IPEC*, pp. 903–908, IEEE, 2010.
- [6] J. T. Sánchez, “Determinacion de la distribucion de temperatura en motores de inducción jaula de ardilla utilizando métodos experimentales y digitales,” *México DF: Instituto Politécnico Nacional México*, 2007.
- [7] Y. Li, F. Lin, and J. Zhu, “Research on thermal fault analysis of asynchronous motor based on simulation experiment,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2030, p. 012097, IOP Publishing, 2021.
- [8] E. F. Mejía, J. Posada, and J. M. Ramírez, “Banco de pruebas para motores de inducción..” *Energía y Computación*, vol. 16, no. 1, 2008.
- [9] T. Izhar, M. Ali, M. Sohaib, and A. Nazir, “Development of a motor test bench to measure electrical/mechanical parameters,” in *2017 International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)*, pp. 64–67, IEEE, 2017.
- [10] C. E. J. Ruiz, F. A. P. León, M. A. R. Blanco, I. Durán, and J. L. V. Ávila, “Automatización de un banco de pruebas para extracción de parámetros de un motor de inducción (automated test bench to extract the parameters of an induction motor),” *Pistas Educativas*, vol. 40, no. 130, 2018.

- [11] N. Rozhentsova, V. Ivanova, L. Fetisov, and I. Yarmuhametov, "Development of a stand construction concept for safe and efficient after-repair tests of induction motors up to 1 kv," in *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, pp. 1–4, IEEE, 2019.
- [12] I. Zamudio-Ramírez, R. A. Osornio-Ríos, J. A. Antonino-Daviu, and A. Quijano-Lopez, "Smart-sensor for the automatic detection of electromechanical faults in induction motors based on the transient stray flux analysis," *Sensors*, vol. 20, no. 5, p. 1477, 2020.
- [13] Y. O. Lee, J. Jo, and J. Hwang, "Application of deep neural network and generative adversarial network to industrial maintenance: A case study of induction motor fault detection," in *2017 IEEE international conference on big data (big data)*, pp. 3248–3253, IEEE, 2017.
- [14] F. Pilati, R. Tronconi, G. Nollo, S. S. Heragu, and F. Zerzer, "Digital twin of covid-19 mass vaccination centers," *Sustainability*, vol. 13, no. 13, p. 7396, 2021.
- [15] M. Bertoni and A. Bertoni, "Designing solutions with the product-service systems digital twin: What is now and what is next?," *Computers in Industry*, vol. 138, p. 103629, 2022.
- [16] J. L. González-Córdoba, R. A. Osornio-Rios, D. Granados-Lieberman, R. D. J. Romero-Troncoso, and M. Valtierra-Rodriguez, "Correlation model between voltage unbalance and mechanical overload based on thermal effect at the induction motor stator," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 4, pp. 1602–1610, 2017.
- [17] Y. Yao, Y. Li, and Q. Yin, "A novel method based on self-sensing motor drive system for misalignment detection," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 116, pp. 217–229, 2019.
- [18] A. Glowacz, W. Glowacz, Z. Glowacz, and J. Kozik, "Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals," *Measurement*, vol. 113, pp. 1–9, 2018.
- [19] C. G. Dias and F. H. Pereira, "Broken rotor bars detection in induction motors running at very low slip using a hall effect sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 11, pp. 4602–4613, 2018.
- [20] P. A. Panagiotou, I. Arvanitakis, N. Lophitis, J. A. Antonino-Daviu, and K. N. Gyftakis, "A new approach for broken rotor bar detection in induction motors using frequency extraction in stray flux signals," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 4, pp. 3501–3511, 2019.
- [21] A. Imakiire and T. A. Lipo, "Induction machine with localized voltage unbalance compensation," in *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 1248–1255, IEEE, 2019.
- [22] E. A. Nagata, D. D. Ferreira, C. A. Duque, and A. S. Cequeira, "Voltage sag and swell detection and segmentation based on independent component analysis," *Electric Power Systems Research*, vol. 155, pp. 274–280, 2018.
- [23] J. L. González-Córdoba, R. A. Osornio-Rios, D. Granados-Lieberman, R. d. J. Romero-Troncoso, and M. Valtierra-Rodriguez, "Thermal-impact-based protection of induction motors

- under voltage unbalance conditions,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 4, pp. 1748–1756, 2018.
- [24] A. Miron, A. C. Cziker, and H. C. Bogariu, “Knowledge-based system for the analysis of voltage fluctuations and flicker,” in *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.
- [25] P. Gnaciński, D. Hallmann, M. Pepliński, and P. Jankowski, “The effects of voltage subharmonics on cage induction machine,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 111, pp. 125–131, 2019.
- [26] L. D. Xu, E. L. Xu, and L. Li, “Industry 4.0: state of the art and future trends,” *International journal of production research*, vol. 56, no. 8, pp. 2941–2962, 2018.
- [27] M. Schluse, M. Priggemeyer, L. Atorf, and J. Rossmann, “Experimentable digital twins—streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0,” *IEEE Transactions on industrial informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 1722–1731, 2018.
- [28] J. A. A. Robles, C. F. Nava, and L. G. C. Ramirez, “Los gemelos digitales, la última frontera de la ingeniería mecatrónica,” 2021.
- [29] P. Hehenberger and D. Bradley, “Digital twin—the simulation aspect,” *Mechatronic Futures*, pp. 59–74, 2016.
- [30] C. Dufour, Z. Soghomonian, and W. Li, “Hardware-in-the-loop testing of modern on-board power systems using digital twins,” in *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp. 118–123, IEEE, 2018.
- [31] S. Alrashed, N. Min-Allah, I. Ali, and R. Mehmood, “Covid-19 outbreak and the role of digital twin,” *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1–15, 2022.
- [32] A. El Saddik, “Digital twins: The convergence of multimedia technologies,” *IEEE multimedia*, vol. 25, no. 2, pp. 87–92, 2018.
- [33] C. D. Bosque Peón, “Los gemelos digitales en la industria 4.0,” 2019.
- [34] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. Nee, “Digital twin in industry: State-of-the-art,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, 2018.
- [35] R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, “About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing,” *Ifac-papersonline*, vol. 48, no. 3, pp. 567–572, 2015.
- [36] S. Sierla, V. Kyrki, P. Aarnio, and V. Vyatkin, “Automatic assembly planning based on digital product descriptions,” *Computers in Industry*, vol. 97, pp. 34–46, 2018.
- [37] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, and A. Nee, “Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: Correlation and comparison,” *Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 653–661, 2019.

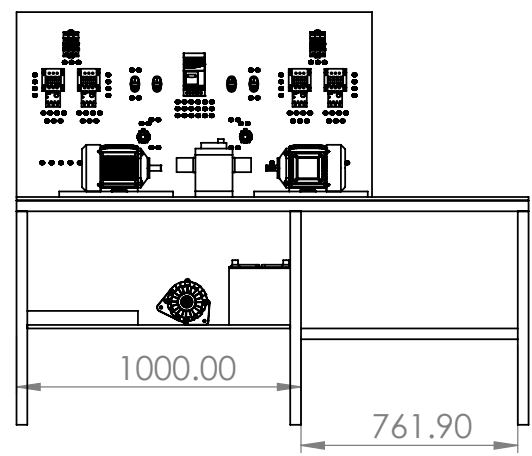
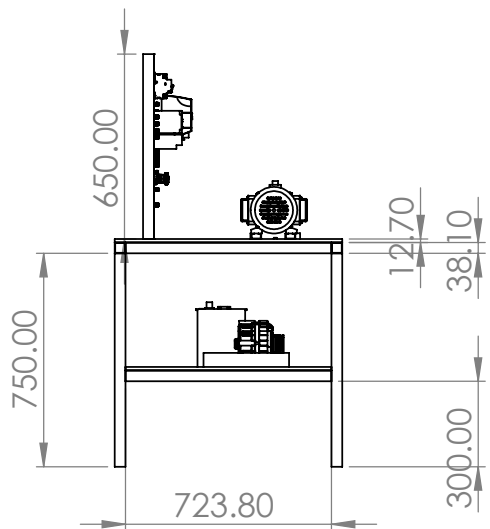
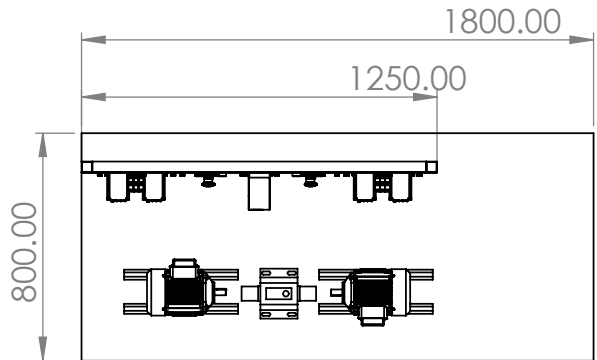
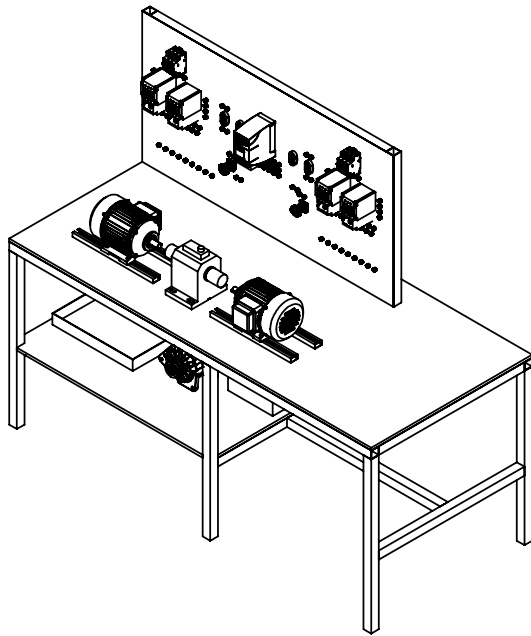
- [38] C. Ierandi, L. Orihuela Espina, I. Jurado Flores, Á. Rodríguez Del Nozal, A. Tapia Córdoba, *et al.*, “Revisión sistemática de la literatura en ingeniería de sistemas. caso práctico: técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos,” *Actas de las XXXVIII Jornadas de Automática*, 2017.
- [39] V. Quintero-Rosas, M. Camarillo-Ramos, F. Ibañez-Salas, G. García-Gómez, H. S. Hernández-Tabares, and M. Oropeza, “Adaptabilidad en la producción aeroespacial utilizando sistemas ciberfísicos,” *Industrial data*, vol. 21, no. 1, pp. 7–16, 2018.
- [40] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, “A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems,” *Manufacturing letters*, vol. 3, pp. 18–23, 2015.
- [41] V. Garrido San Martín, “Sistema naval de adquisición de datos,” 2017.
- [42] T. MathWorks, “Beaglebone black support from embedded coder,” 2021. Excerpted from The MathWorks page. Available: <https://www.mathworks.com/hardware-support/beaglebone-black.html>.
- [43] C. E. B. López, “Real-time event-based platform for the development of digital twin applications,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, no. 3, pp. 835–845, 2021.
- [44] M. Hannan, J. A. Ali, A. Mohamed, and A. Hussain, “Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1611–1626, 2018.
- [45] J. C. M. Castillo, *Máquinas eléctricas*. Editex, 2012.
- [46] A. Fourati, A. Bourdon, N. Feki, D. Rémond, F. Chaari, and M. Haddar, “Angular-based modeling of induction motors for monitoring,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 395, pp. 371–392, 2017.
- [47] A. Pérez Seoane *et al.*, “El gemelo digital como base tecnológica para el desarrollo logístico de la armada 4.0,” 2020.
- [48] T. MathWorks, “Asynchronous machine,” 2022. Excerpted from The MathWorks page. Available: <https://es.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html>.
- [49] T. MathWorks, “Revolute joint,” 2022. Excerpted from The MathWorks page. Available: [https://es.mathworks.com/help/sm/ref/revolutejoint.html?s\\_tid=doc\\_ta](https://es.mathworks.com/help/sm/ref/revolutejoint.html?s_tid=doc_ta).

## Dibujos de ensamble

A.1. Prototipo 1

A.2. Prototipo 2

A.3. Prototipo 3



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO: REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM

ACABADO SUPERFICIAL:

TOLERANCIAS:

LINEAL:

ANGULAR:

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

# Banco de pruebas

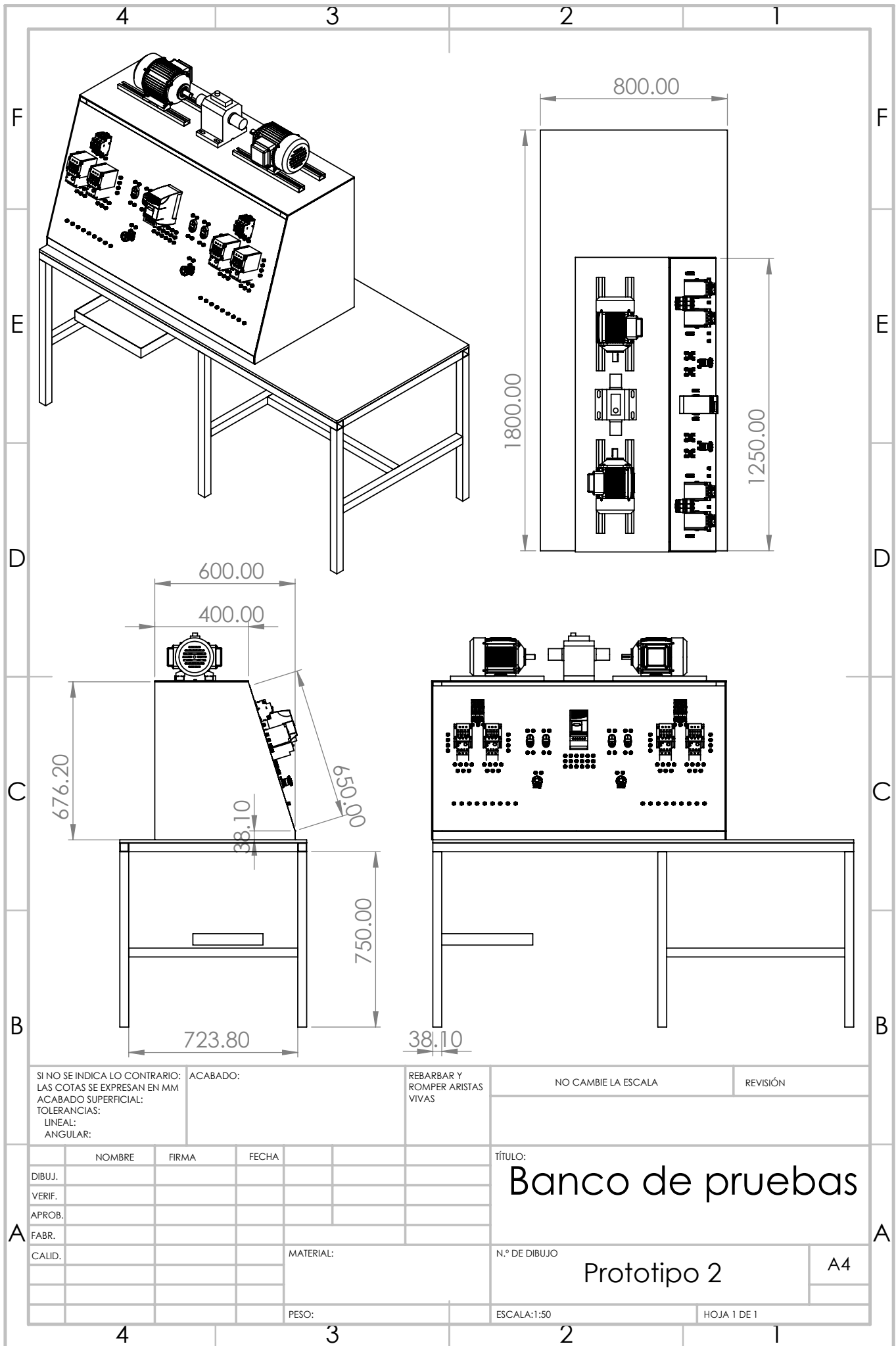
N.º DE DIBUJO

## Prototipo 1

ESCALA: 1:25

HOJA 1 DE 1

A4



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
 ACABADO SUPERFICIAL:  
 TOLERANCIAS:  
 LINEAL:  
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y  
 ROMPER ARISTAS  
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:  
**Banco de pruebas**

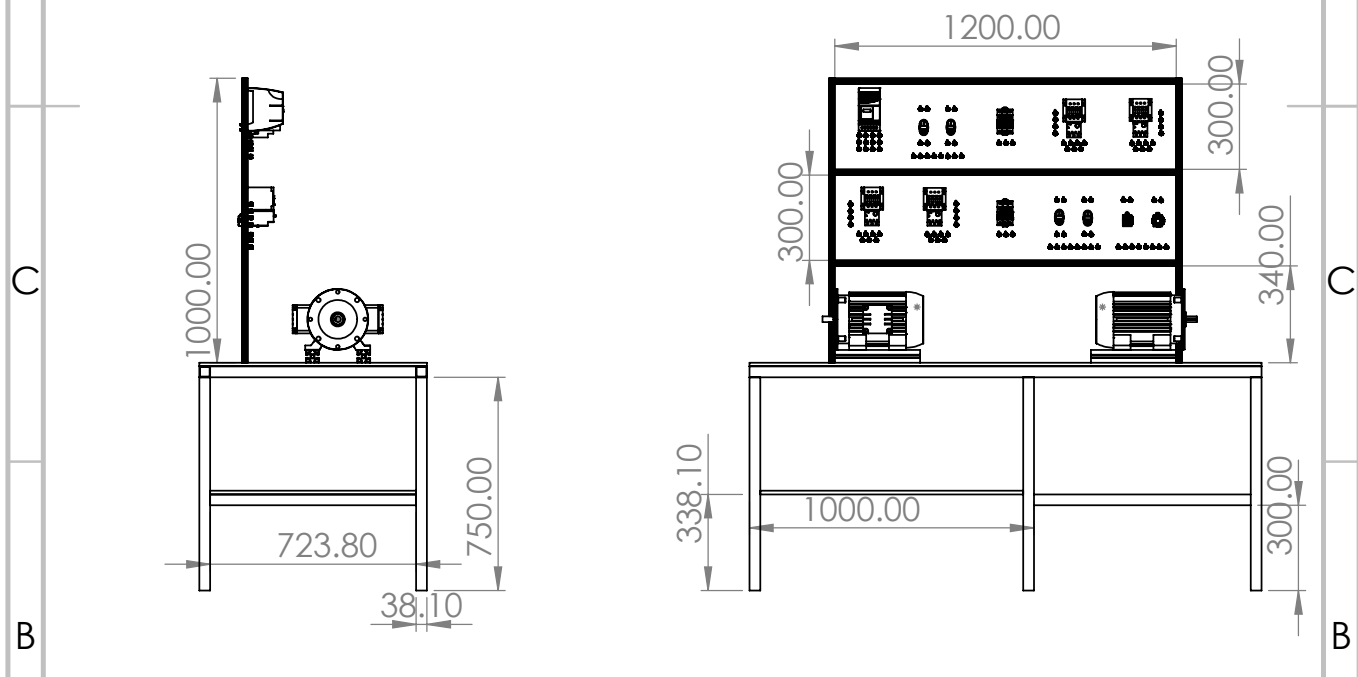
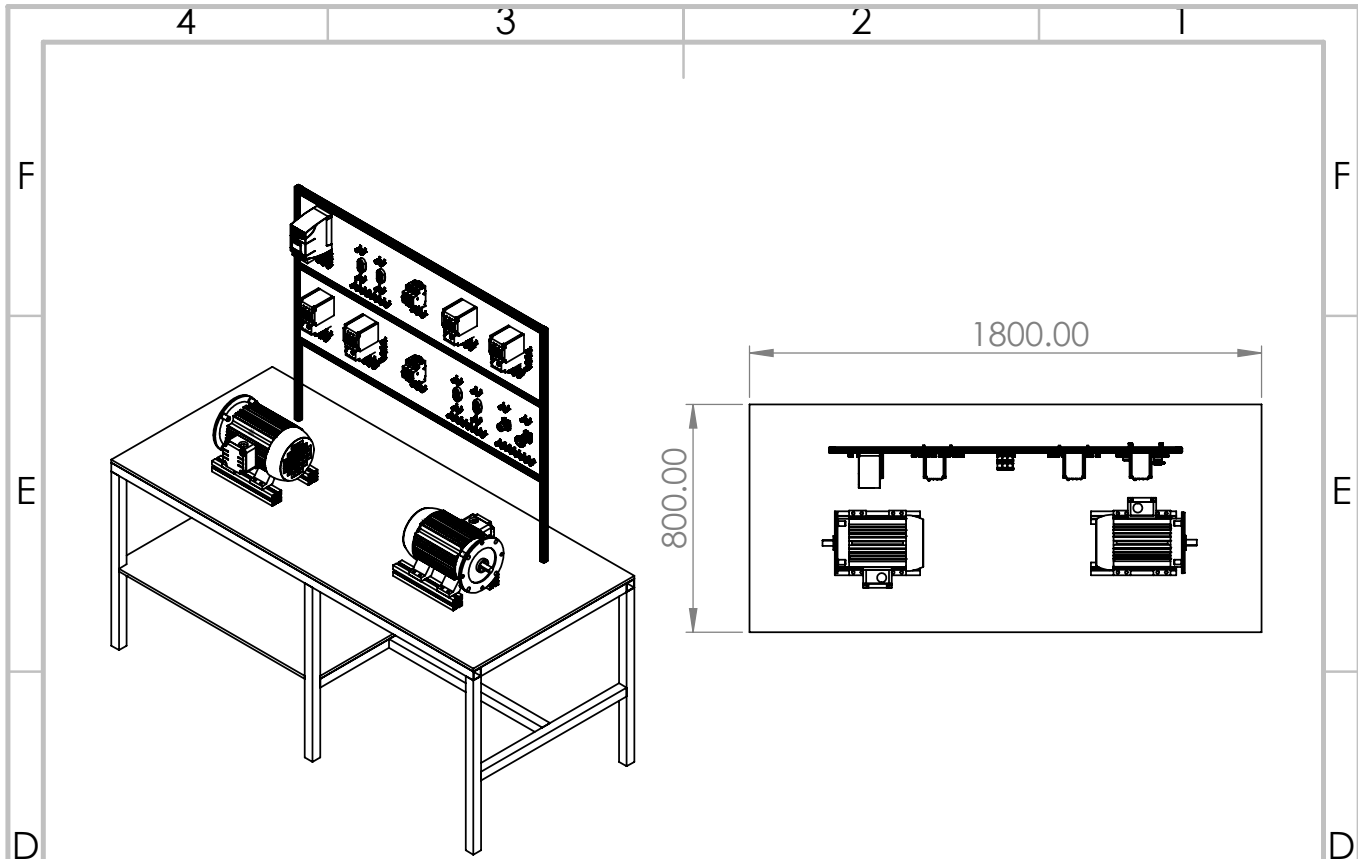
N.º DE DIBUJO

**Prototipo 2**

A4

ESCALA: 1:50

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO: REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS REVISIÓN

LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:

NOMBRE				FIRMA				FECHA				TÍTULO: <b>Banco de pruebas</b>			
DIBUJ.				VERIF.				APROB.				N.º DE DIBUJO <b>Prototipo 3</b>			
FABR.				CALID.				MATERIAL:				ESCALA: 1:25			
PESO:				ESCALA: 1:25				HOJA 1 DE 1				A4			



# Hojas de datos

## B.1. Diagrama de pines de la tarjeta BBB

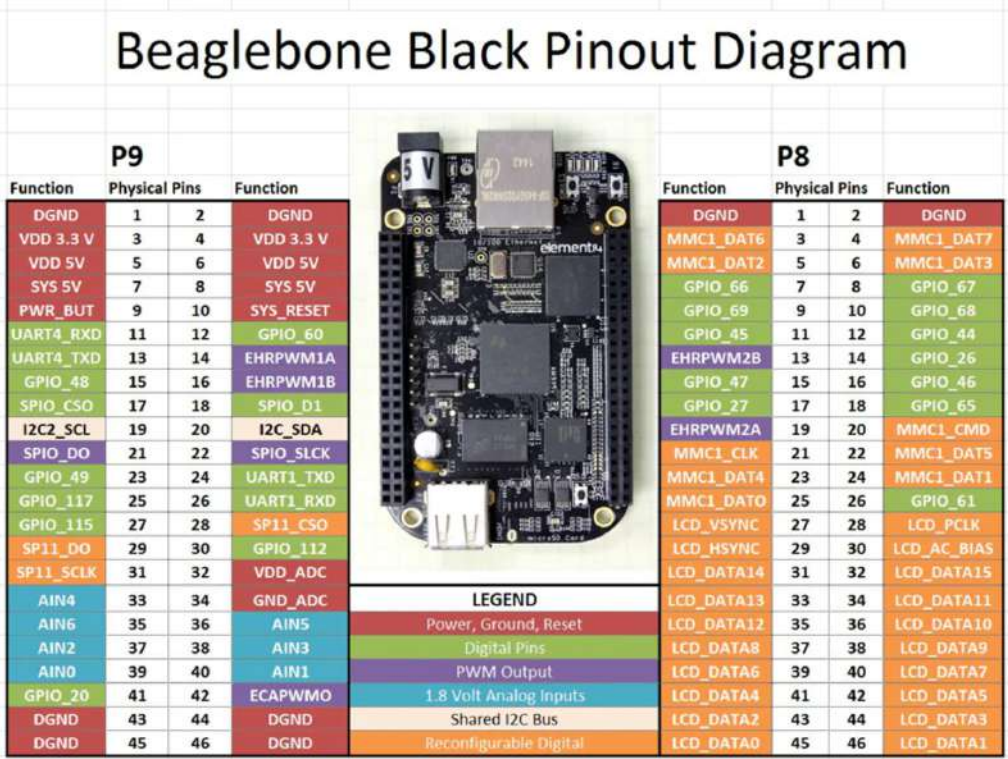


Figura B.1: Diagrama de pines de la tarjeta BBB.

## B.2. Motor WEG 3 Hp

Para los cuatro niveles de eficiencia los motores W22 exceden los valores mínimos exigidos por la norma. Ellos aún son totalmente probados y tienen sus eficiencias declaradas de acuerdo con la norma IEC 60034-2-1 con las pérdidas suplementares siendo determinadas directamente por medición.

Otra característica del proyecto eléctrico de la línea W22 es que fue concebido de manera que las eficiencias se mantengan prácticamente constantes en el rango de 75% hasta 100% de carga. De esta manera, mismo que el motor no opere en carga nominal su eficiencia no sufre cambios considerables (ver figura 2), lo que garantiza elevados niveles de eficiencia energética.

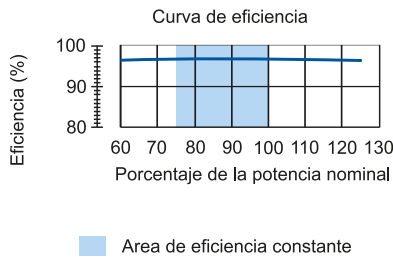


Figura 2 - Curva de eficiencia típica de la línea W22

## 2. Normas

Los motores W22 cumplen con los requisitos y reglamentos de las versiones vigentes de las siguientes normas:

Estándar	Descriptivo	Parte
IEC 60034-1	Rotating electrical machines	Part 1: Rating and performance.
IEC 60034-2-1		Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).
IEC 60034-5		Part 5: Degrees of protection provided by the integral design of rotating electrical machines (IP code) - classification.
IEC 60034-6		Part 6: Methods of cooling (IC code).
IEC 60034-7		Part 7: Classification of types of enclosures and mounting arrangements (IM code).
IEC 60034-8		Part 8: Terminal markings and direction of rotation.
IEC 60034-9		Part 9: Noise limits.
IEC 60034-11-1		Part 11-1: Thermal protection.
IEC 60034-12		Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors.
IEC 60034-14		Part 14: Mechanical vibration of certain machines - Limits of vibration.
IEC 60034-30		Part 30: Efficiency classes for single-speed three-phase cage induction motors.
IEC 60072-1		Dimensions and output series for rotating electrical machines

## 3. Detalles Constructivos

Las informaciones contenidas en este material refiérense a las características constructivas estándar y sus variantes más comunes de la línea W22 en el rango de carcasas desde 63 hasta 355A/B.

Motores para aplicaciones especiales y/o dedicados también están disponibles bajo consulta. Contacta a la oficina WEG o distribuidor más cerca.

### 3.1 Carcasa

La carcasa de los motores W22 es producida en hierro gris FC-200 para proveer altos niveles de robustez mecánica y resistir a las aplicaciones más críticas. Las aletas de refrigeración han sido diseñadas para evitar la acumulación de líquidos y polvo sobre el motor.

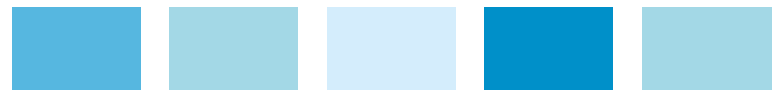


Figura 3 - Carcasa W22

Las patas son enterizas para una mejor rigidez mecánica y sólidas para facilitar el alineamiento e instalación.



Figura 4 - Patas sólidas



212E	Para ambiente marítimo agresivo o industrial marítimo, resguardado, pudiendo contener alta humedad y salpicaduras de álcalis y solventes. Indicado para aplicación en industrias de papel y celulosa, minería, química y petroquímica
212P	Para ambiente marítimo agresivo o industrial marítimo, resguardado o sin resguardo, pudiendo contener alta humedad. Indicado para aplicación en industrias de papel y celulosa, minería, química y petroquímica
213E	Para ambiente marítimo agresivo o industrial marítimo, resguardado o sin resguardo, pudiendo contener alta humedad. Indicado para aplicación plataforma de producción y explotación de Petróleo
214P	Para ambiente industrial en locales resguardados o sin resguardo, vapores, contaminantes sólidos, alta humedad y salpicaduras de álcalis y solventes

### 7.3.1 Pintura Tropicalizada

La integridad del sistema de aislamiento es la consideración primaria cuando determinando el tiempo de vida de un motor eléctrico. Alta humedad puede resultar en deterioración prematura del sistema de aislamiento, por lo tanto para cualquier temperatura ambiente con humedad relativa arriba de 95%, es recomendada la cobertura de todos los componentes internos del motor con una pintura epoxi, también conocida como tropicalización.

## 8. Tensión / Frecuencia

Según la norma IEC 60034-1 las combinaciones de las variaciones de tensión y frecuencia son clasificadas como Zona A o Zona B de acuerdo con la figura 29.

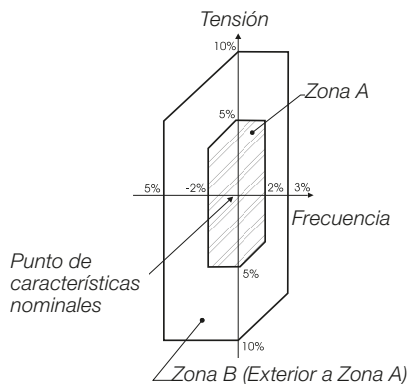


Figura 29 - Límites de tensión y frecuencia nominales para motores eléctricos

De acuerdo con la norma IEC 60034-1 el motor debe ser apto a desempeñar su función principal (suministrar par) continuamente en la Zona A, pero puede no atender completamente sus características de desempeño debido a la variación en la tensión y frecuencia de alimentación, pudiendo inclusive presentar elevación de temperatura superior a la nominal.

El motor también debe ser apto a desempeñar su función principal (suministrar par) en la Zona B, pero los desvíos en sus características de desempeño serán superiores aquellos operando en la Zona A. Su elevación de temperatura también será superior a aquella tensión y frecuencia nominales y a aquella operando en la Zona A. La operación en la periferia de la Zona B no es recomendada.

## 9. Capacidad de Sobrecarga

Según la norma IEC 60034-1, los motores con potencia nominal inferior a 315 kW y tensión nominal inferior a 1 kV deben ser capaces de soportar una corriente igual a 1,5 veces la corriente nominal por no menos de 2 minutos.

## 10. Ambiente x Aislación

La potencia nominal indicada en las tablas eléctricas, salvo cuando se especifique lo contrario, se refieren a la operación en régimen de servicio continuo S1 según IEC 60034-1 y en las siguientes condiciones de ambiente:

- Con temperatura variando entre -30°C y +40°C
- Con altitudes máximas de 1.000 metros sobre el nivel del mar

Para temperaturas y altitudes diferentes de las indicadas arriba, se debe utilizar la tabla 13 para encontrar el factor que será utilizado para definir la potencia útil disponible (Pmax).

$$P_{max} = P_{nom} \times \text{Factor de corrección}$$

T (°C)	Altitud (m)								
	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000	3.500	4.000	4.500	5.000
10							0,97	0,92	0,88
15						0,98	0,94	0,90	0,86
20					1,00	0,95	0,91	0,87	0,83
25				1,00	0,95	0,93	0,89	0,85	0,81
30			1,00	0,96	0,92	0,90	0,86	0,82	0,78
35		1,00	0,95	0,93	0,90	0,88	0,84	0,80	0,75
40	1,00	0,97	0,94	0,90	0,86	0,82	0,80	0,76	0,71
45	0,95	0,92	0,90	0,88	0,85	0,81	0,78	0,74	0,69
50	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77	0,72	0,67
55	0,88	0,85	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73	0,70	0,65
60	0,83	0,82	0,80	0,77	0,75	0,73	0,70	0,67	0,62
65	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,62	0,58
70	0,74	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,62	0,58	0,53
75	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,53	0,49
80	0,65	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,55	0,48	0,44

Tabla 13 - Factores de corrección para altitud y temperatura ambiente

Los motores W22 son suministrados con clase de aislamiento F y poseen elevación de temperatura de clase B (80 K) en condiciones nominales de operación (excepto cuando esté indicado diferente).

La diferencia entre la elevación de temperatura de la clase de aislamiento F (105 K) y la elevación de temperatura de diseño (80 K) significa que, en términos prácticos, los motores W22 pueden suministrar potencias arriba de los valores nominales hasta un límite donde la elevación de temperatura atinja el valor de la elevación de temperatura de la clase de aislamiento.

La relación entre la elevación de temperatura y el factor de servicio es dada por la ecuación abajo:

$$\Delta T_{FINAL} \cong (F.S.)^2 \times \Delta T_{INICIAL}$$

Calculándose el factor de servicio tendremos que es de aproximadamente 1,15. Esta reserva de temperatura también permite que los motores W22 con elevación de temperatura de clase B (80 K) puedan operar suministrando continuamente:

- Hasta 15% arriba de su potencia nominal, considerándose 40°C de temperatura ambiente y 1.000 m.s.n.m. o;
- Hasta 55°C de temperatura ambiente, manteniéndose la potencia nominal o;
- Hasta 3.000 m.s.n.m., manteniéndose la potencia nominal.

**Nota:**

Favor tener en cuenta que para estas condiciones de ambiente y aumento de temperatura el límite de clase F puede ser alcanzado. Los intervalos de lubricación de los rodamientos sufrirán cambios en condiciones de operación diferentes de 40°C de temperatura ambiente máxima y 1.000 metros arriba del nivel del mar. Contacte a WEG para más informaciones.

Todos los motores W22 son bobinados con el sistema de aislamiento WISE® que consiste de alambres esmaltados de cobre atendiendo a temperaturas hasta 200°C e impregnación con resina libre de solventes. El sistema WISE® también permite la operación con convertidores de frecuencia (ver sección 12).

**10.1 Resistencia de Calefacción**

La utilización de resistencias de calefacción es recomendada en dos situaciones:

- Motores instalados en ambientes con humedad relativa del aire hasta 95%, en situaciones en que el motor pueda permanecer inactivo por periodos superiores a 24 horas;
- Motores instalados en ambientes con humedad relativa del aire superior a 95%, independientemente de su cronograma de operación. Se debe destacar que en esta situación es fuertemente recomendado que una pintura epoxi conocida como pintura tropicalizada sea aplicada a los componentes internos del motor. Más informaciones pueden ser obtenidas en la sección 7.3.

La tensión de alimentación de la resistencia de calefacción debe ser definida por el cliente. Para todos tamaños de carcasa, los motores W22 pueden ser proveídos con resistencias de calefacción adecuadas a 110-127 V, 220-240 V y 380-480 V. Como una opción, resistencias de calefacción de doble tensión de 110-127 / 220-240 V puede ser suministradas para motores de tamaño de carcasa 112M a 355A/B. La potencia y el número de resistencias de calefacción instaladas depende del tamaño del motor según lo indicado en la tabla 14:

Carcasa	Cantidad	Potencia (W)
63 a 80	1	7,5
90 y 100	1	11
112	2	11
132 y 160	2	15
180 y 200	2	19
225 y 250	2	28
280 y 315	2	70
355	2	87

Tabla 14 - Potencia y cantidad de resistencia de calefacción

**11. Protecciones del Motor**

Las protecciones disponibles para el motor pueden ser clasificadas en:

- Basadas en la temperatura de operación
- Basadas en la corriente de operación

En la sección 14 - Características constructivas, es posible identificar el tipo de protección de cada línea W22.

**11.1 Protecciones Basadas en la Temperatura de Operación**

Los motores utilizados en régimen continuo deben ser protegidos contra sobrecargas por un dispositivo puesta en la cabeza de bobina del motor, por un dispositivo de protección independiente, generalmente un relé térmico de corriente nominal o de ajuste. El valor ajustable es obtenido multiplicándose a la corriente nominal de operación ( $I_n$ ), según la tabla 15.

Factor de servicio	Ajuste de la corriente del relé
1,0 hasta 1,15	$I_n \times F.S.$
$\geq 1,15$	$(I_n \times F.S.) - 5\%$

Tabla 15 - Ajuste de la corriente del relé en relación al factor de servicio

**Pt-100**

Figura 30 - Pt-100

Son sensores de temperatura con principio de operación basado en la propiedad que algunos materiales presentan de variar la resistencia eléctrica con la variación de temperatura (generalmente platina, níquel o cobre). Poseen resistencia calibrada que varía de manera lineal según la temperatura, posibilitando un monitoreo continuo del proceso de calentamiento del motor por la pantalla del controlador, con alto grado de precisión y sensibilidad de respuesta. Un mismo sensor puede servir para alarma (operación arriba de la temperatura normal de trabajo) y desconexión (generalmente ajustado para la máxima temperatura de la clase de aislamiento).

**Termistor (PTC)**

Figura 31 - Termistor (PTC)

Son protectores térmicos compuestos por sensores semiconductores que varían su resistencia bruscamente al atingir una determinada temperatura.

El tipo PTC es un termistor cuya resistencia aumenta bruscamente para un valor bien definido de temperatura. Esta variación brusca en la resistencia interrumpe la corriente en el PTC, accionando un relé de salida, lo cual desconecta el circuito principal.

Los termistores poseen tamaños reducidos, no sufren desgastes mecánicos y tienen una respuesta más rápida en relación a los otros protectores, pero no permiten un acompañamiento continuo del proceso de calentamiento del motor. Los termistores con sus respectivos circuitos electrónicos de control ofrecen protección completa contra sobrecalentamiento producido por falta de fase, sobrecarga, sub o sobretensión o frecuentes operaciones de reversión. Los termistores pueden ser utilizados para alarma y desconexión. En este caso, son necesarios dos conjuntos de termistores, cada uno conectado en serie, totalizando dos termistores por fase.

WEG Automatización cuenta con un producto llamado RPW que es un relé electrónico con la función específica de leer la señal del PTC y actuar su relé de salida. Consulta más informaciones en el web sitio [www.weg.net](http://www.weg.net).



### Protectores Térmicos del Tipo Bimetálico

Son protectores térmicos con contactos de plata, normalmente cerrados, que se abren cuando ocurre determinada elevación de temperatura. Cuando la temperatura de actuación del bimetálico baja, este vuelve a su forma original instantáneamente, permitiendo el cierre de los contactos nuevamente.

Los protectores térmicos del tipo bimetálico son instalados en serie con la bobina del contactor, pudiendo ser utilizados como alarma y desconexión.

Hay todavía otros tipos de protectores térmicos, tales como Pt-100, KTY y termopares. Contacte la oficina de WEG o distribuidor más cercanos para más informaciones.

### 11.2 Protecciones Basadas en la Corriente de Operación

Sobrecargas generalmente son procesos que hacen con que la temperatura se eleve gradualmente. Para este tipo de evento los protectores descritos en el ítem 11.1 son adecuados. Pero, la única manera para proteger el motor contra corrientes de cortocircuito es por la utilización de fusibles. Este tipo de protección es directamente dependiente de la corriente es mucho eficaz el caso de rotor trabado.

**WEG Automatización produce fusible de los tipos D y NH. Acceda al web sitio [www.weg.net](http://www.weg.net) para más informaciones.**

- 2 - La frecuencia máxima de conmutación recomendada para el convertidor es 5 kHz. Frecuencias de conmutación arriba de este valor pueden acelerar la degradación del sistema aislante del motor y causar daños a los rodamientos.
- 3 - La humedad es un agente agresivo y debe ser evitada para preservar la vida útil del motor. Para motores en inventario, o fuera de operación por largos períodos, deben ser usadas resistencias calefactoras para mantener los devanados sin humedad.
- 4 - Motores para uso general con tensión nominal arriba de 460 V, que en el momento de la compra no tengan sido indicados para operación con convertidor de frecuencia, son aptos a soportar los esfuerzos eléctricos definidos por la tabla arriba para tensión nominal hasta 575 V. Caso tales condiciones no sean integralmente atendidas, filtros deben ser instalados en la salida del convertidor
- 5 - Motores para uso general del tipo doble tensión (ej. 380/660 V y 400/690 V), que, en el momento de la compra no tengan sido indicados para operación con convertidores de frecuencia, están aptos a la operación con convertidor de frecuencia en la tensión más grande solamente si los límites definidos en la tabla arriba para tensión nominal hasta 460 V sean plenamente satisfechos en la aplicación. De lo contrario, filtros de salida deben ser usados.

## 12. Operación con Convertidores de Frecuencia

### 12.1 Consideraciones Relativas al Sistema Aislante del Motor

El estator bobinado de los motores W22 es suministrado con aislación térmica clase F y está apto tanto para el arranque directo de la red cuanto para accionamiento por convertidor de frecuencia. Opcionalmente, los motores pueden ser suministrados con aislación térmica de la clase H. Los motores son suministrados con la tecnología exclusiva de aislamiento WISE® (WEG Insulation System Evolution), que asegura características superiores de aislamiento eléctrico. Los motores son fabricados de acuerdo con la tensión estándar para cada mercado, según lo mostrado abajo, y están aptos para el accionamiento por convertidor de frecuencia, considerando los criterios indicados en la Tabla 16.

Tensión nominal				
380/660 V (50 Hz)				
230/460 V (60 Hz)				

Tensión nominal del motor	Tensión de pico en los terminales del motor (fase-fase)	dV/dt en los terminales del motor (fase-fase)	Rise time	Tiempo entre pulsos
Vn < 460 V	≤ 1.600 V	≤ 5.200 V/μs	≥ 0,1 μs	≥ 6 μs
460 V ≤ Vn < 575 V	≤ 2.000 V	≤ 6.500 V/μs		
575 V ≤ Vn ≤ 1000 V	≤ 2.400 V	≤ 7.800 V/μs		

Tabla 16 - Criterios de soportabilidad del sistema aislante de motores de baja tensión

#### Notas:

- 1 - Si una o más de las condiciones arriba no sea debidamente observada (incluyendo la frecuencia de conmutación), un filtro de salida (reactor de carga) debe ser instalado en la salida del convertidor de frecuencia.

### 12.2 Influencia del Convertidor en la Elevación de Temperatura del Motor

El motor de inducción puede tener un aumento de la temperatura mayor, cuando es alimentado por convertidor de frecuencia, que cuando es alimentado con tensión sinusoidal. Esta sobrelevación de temperatura es decurrente de la combinación de dos factores: el aumento de pérdidas ocurrido en el motor, en función de las componentes armónicas de la tensión PWM suministrada por el convertidor, y la reducción de la eficacia del sistema de resfriamiento, cuando de la operación del motor autoventilado en bajas frecuencias. Basicamente existen las siguientes soluciones para evitar el sobrecalentamiento del motor:

- Reducción del par nominal (sobredimensionamiento del motor autoventilado);
- Utilización de un sistema de resfriamiento independiente (ventilación forzada);
- Utilización del "flujo óptimo" (solución exclusiva WEG).

### Criterios de Reducción de Par (Torque Derating)

Para mantener la temperatura de los motores de inducción WEG adentro de niveles aceptables, cuando de la operación con convertidores de frecuencia, deben ser obedecidos los límites de carga presentados en las figuras 32 (para operación en la condición de flujo constante) o 33 (para operación en la condición de flujo óptimo).

#### Notas:

- 1 - Motores para aplicaciones en atmosferas explosivas deben ser evaluados caso a caso y WEG debe ser consultada.
- 2 - Las curvas de derating presentadas a seguir están relacionadas con la elevación de temperatura en el devanado de los motores y no con su clase térmica. Estas curvas determinan solamente limitaciones de par para motores accionados por convertidores de frecuencia, pero no establecen factores de huelga térmica.

## 16. Datos Eléctricos

### W22 - IE4 Super Premium Efficiency - 50 Hz

Potencia		Carcasa	Full Load Torque (kgfm)	Corriente con rotor trabado II/In	Par con rotor trabado TI/Tn	Break-down Torque Tb/Tn	Momento de Inercia J (kgm²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	400 V						Corriente nominal In (A)	
								Caliente	Frio			RPM	% de la potencia nominal			Factor de potencia			
													50	75	100	50	75		100
kW	HP																		
<b>II Polos</b>																			
5,5	7,5	132S	1,82	7,9	2,6	3,4	0,0250	27	59	69,0	67	2940	89,0	90,6	90,9	0,71	0,81	0,86	10,2
7,5	10	L132S	2,48	8,3	2,7	3,4	0,0285	16	35	73,0	67	2940	90,3	91,5	91,7	0,69	0,80	0,86	13,7
9,2	12,5	L132M/L	3,05	8,7	2,7	3,4	0,0356	16	35	79,0	67	2935	91,0	91,9	92,1	0,72	0,82	0,87	16,6
11	15	160M	3,63	7,9	2,9	3,5	0,0588	14	31	120	67	2955	91,1	92,3	92,6	0,69	0,80	0,86	19,9
15	20	160M	4,94	8,2	2,9	3,5	0,0698	11	24	126	67	2955	92,1	93,0	93,3	0,70	0,81	0,86	27,0
18,5	25	160L	6,11	8,2	3,1	3,5	0,0841	10	22	144	67	2950	92,8	93,4	93,7	0,71	0,82	0,87	32,8
22	30	180M	7,25	8,2	2,7	3,4	0,1183	8	18	176	67	2955	93,3	93,8	94,0	0,73	0,82	0,87	38,8
30	40	200L	9,84	8,2	3,4	3,1	0,2119	16	35	265	69	2970	93,0	94,1	94,5	0,70	0,80	0,85	53,9
37	50	200L	12,1	8,1	3,4	3	0,2373	14	31	275	69	2970	93,6	94,5	94,8	0,72	0,82	0,86	65,5
45	60	225S/M	14,8	7,4	2,3	2,9	0,3641	17	37	425	74	2965	94,8	95,2	95,0	0,82	0,88	0,91	75,1
55	75	250S/M	18,0	8,2	3	3,1	0,6068	28	62	520	74	2970	94,6	95,3	95,3	0,81	0,88	0,90	92,6
75	100	280S/M	24,5	7,9	2,4	3,1	1,47	50	110	800	76	2980	95,1	96,0	96,3	0,80	0,87	0,90	125
90	125	280S/M	29,4	7,8	2,4	2,9	1,64	45	99	890	76	2980	95,5	96,2	96,5	0,82	0,88	0,90	150
110	150	315S/M	36,0	7,8	2,3	3	2,32	42	92	992	76	2980	94,9	95,9	96,5	0,79	0,86	0,89	185
132	180	315S/M	43,1	7,4	2,3	2,8	2,77	36	79	1095	76	2980	95,6	96,2	96,6	0,83	0,89	0,91	217
150	200	315S/M	49,0	7,6	2,4	2,9	3,20	42	92	1197	76	2980	96,0	96,6	96,8	0,82	0,88	0,90	249
160	220	315S/M	52,3	7,6	2,4	2,9	3,20	42	92	1197	76	2980	96,0	96,6	96,8	0,82	0,88	0,90	265
185	250	315L	60,5	7,9	2,6	2,8	3,50	29	64	1315	77	2980	95,9	96,5	96,8	0,84	0,89	0,91	303
200	270	315L	65,4	8,2	2,7	2,9	3,72	32	70	1345	77	2980	96,3	96,8	97,0	0,83	0,89	0,91	327
220	300	315L	71,9	8,1	2,7	2,7	3,95	25	55	1390	77	2980	96,3	96,7	96,9	0,85	0,90	0,92	356
250	340	315L	81,8	7,5	2,6	2,6	4,15	20	44	1434	77	2975	96,7	96,9	96,9	0,85	0,90	0,92	405
260	350	315L	85,1	7,5	2,6	2,6	4,15	20	44	1434	77	2975	96,7	96,9	96,9	0,85	0,90	0,92	421
280	380	355M/L	91,4	8,4	2,1	2,9	5,36	32	70	1664	80	2985	96,2	96,8	97,0	0,83	0,89	0,91	458
300	400	355M/L	97,9	7,5	2	2,6	5,68	32	70	1751	80	2985	96,5	96,9	97,0	0,86	0,91	0,92	485
315	430	355M/L	103	8,2	2,4	2,7	6,01	23	51	1838	80	2985	96,5	96,9	97,0	0,86	0,91	0,92	509
330	450	355A/B <sup>1</sup>	108	8,2	2,4	2,6	6,33	24	53	2000	82	2985	96,7	97,0	97,1	0,89	0,92	0,93	527
355	482	355A/B <sup>1</sup>	116	8,2	2,3	2,6	6,76	20	44	2043	82	2985	96,8	97,1	97,1	0,89	0,92	0,93	567

Potencia		Carcasa	Full Load Torque (kgfm)	Corriente con rotor trabado II/In	Par con rotor trabado TI/Tn	Break-down Torque Tb/Tn	Momento de Inercia J (kgm²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)		Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	400 V						Corriente nominal In (A)	
								Caliente	Frio			RPM	% de la potencia nominal			Factor de potencia			
													50	75	100	50	75		100
kW	HP																		
<b>IV Polos</b>																			
5,5	7,5	L132S	3,64	8,4	2,3	3,5	0,0640	16	35	78,0	56	1470	90,8	91,8	91,9	0,63	0,75	0,82	10,5
7,5	10	L132M/L	4,97	8,8	2,3	3,6	0,0791	14	31	84,0	56	1470	91,4	92,3	92,6	0,62	0,74	0,81	14,4
9,2	12,5	160M	6,05	8,6	3	3,3	0,1398	16	35	115	61	1480	91,9	92,9	93,0	0,61	0,74	0,81	17,6
11	15	160M	7,26	8,2	3	3,5	0,1537	14	31	125	61	1475	92,0	93,0	93,3	0,61	0,73	0,81	21,0
15	20	160L	9,91	7,2	3	3,2	0,1813	28	62	150	61	1475	92,7	93,6	93,9	0,63	0,75	0,81	28,5
18,5	25	L180M	12,2	7,9	2,5	3,4	0,2291	16	35	185	61	1480	93,6	94,2	94,2	0,64	0,76	0,83	34,2
22	30	L180L	14,5	8,2	2,7	3,5	0,2594	14	31	200	61	1480	93,7	94,3	94,5	0,63	0,75	0,82	41,0
30	40	200L	19,7	7,4	2,8	3,2	0,3979	18	40	284	63	1485	93,9	94,7	94,9	0,60	0,73	0,81	56,3
37	50	225S/M	24,3	7,9	2,8	3,2	0,7346	21	46	430	63	1485	94,6	95,1	95,2	0,67	0,78	0,84	66,8
45	60	225S/M	29,5	8,3	2,9	3,3	0,7346	15	33	440	63	1485	94,2	95,0	95,4	0,62	0,74	0,82	83,0
55	75	250S/M	36,1	8,3	3	3,4	1,21	17	37	531	64	1485	94,9	95,4	95,7	0,66	0,78	0,83	100
75	100	280S/M	49,0	7,9	2,4	2,9	2,78	40	88	830	69	1490	95,5	96,1	96,2	0,72	0,81	0,85	132
90	125	280S/M	59,0	7,9	2,4	2,9	3,40	40	88	895	69	1485	95,9	96,3	96,4	0,73	0,82	0,86	157
110	150	315S/M	71,9	7,4	2,7	2,7	4,42	54	119	1150	71	1490	95,8	96,4	96,8	0,73	0,82	0,86	191
132	175	315S/M	86,3	7,5	2,8	2,7	5,29	50	110	1332	71	1490	96,1	96,7	96,9	0,73	0,82	0,86	229
150	200	315L	98,1	7,7	3	2,6	5,73	40	88	1430	72	1490	96,3	96,8	96,9	0,74	0,83	0,86	260
160	220	315L	105	7,7	3	2,6	5,73	40	88	1430	72	1490	96,3	96,8	96,9	0,74	0,83	0,86	277
185	250	315L	121	7,7	3	2,6	6,17	32	70	1480	72	1490	96,4	96,8	96,9	0,74	0,83	0,86	320
200	270	315L	131	7,9	3	2,7	6,51	31	68	1527	72	1490	96,4	96,9	97,0	0,74	0,83	0,86	346
220	300	355M/L	144	7,9	2,6	2,8	8,95	36	79	1670	74	1490	95,9	96,6	96,9	0,72	0,81	0,85	386
250	340	355M/L	163	8,2	2,7	2,8	10,0	33	73	1730	74	1490	96,1	96,7	97,0	0,72	0,81	0,85	438
260	350	355M/L	170	8,2	2,7	2,8	10,0	33	73	1730	74	1490	96,1	96,7	97,0	0,72	0,81	0,85	455
280	380	355M/L	183	7,9	2,7	2,7	10,5	28	62	1772	74	1490	96,3	96,8	97,0	0,72	0,81	0,85	490
300	400	355M/L	196	7,8	2,7	2,6	11,1	24	53	1825	74	1490	96,4	96,8	97,0	0,73	0,82	0,86	519
315	430	355M/L	206	7,8	2,9	2,6	11,6	27	59	1878	74	1490	96,5	96,9	97,0	0,73	0,82	0,86	545
330	450	355A/B <sup>1</sup>	216	7,3	2,5	2,4	12,5	28	62	2062	76	1490	96,7	97,0	97,0	0,77	0,84	0,87	564
355	480	355A/B <sup>1</sup>	232	7,6	2,8	2,5	13,5	23	51	2089	76	1490	96,7	97,0	97,0	0,75	0,83	0,87	607

Notas:

<sup>1</sup> Fijados con deflector de aire en la tapa delantera.

<sup>2</sup> Motores con elevación de temperatura "F" ΔT 105 K.

---

# Códigos en Matlab

## C.1. Sistema de adquisición de datos

```

close all; clc;
samples = 500;
voltage = AIN0;
current = AIN1;
torque = AIN2;
temp = AIN3;
encoder = P9_12;
counter = 1;
ww = 50;
%% ----- Objeto BBB
bbb = beaglebone_black('192.168.7.2','debian','temppwd');
%% ----- Gráficas
subplot(2,3,1); %Gráfica de voltaje
while counter < samples-ww
    ylim([-0.5 2.5]);           % Fija los límites en el eje Y
    xlim([counter counter+ww]); % Fija los límites en el eje X
    xlabel('Tiempo [segundos]'); % Etiqueta en el eje X
    ylabel('Amplitud [Volts]'); % Etiqueta en el eje Y
    grid on; hold on;         % Activa el grid y mantiene la información
    title('Voltaje')          % Título de la gráfica
    voltage(counter+ww) = readVoltage(bbb,'AIN0'); % Lee la entrada analógica de la BBB
    plot(voltage,'LineWidth',1.5); %Grafica
    drawnow;                  %Grafica
    counter = counter +1;     %Cuenta del tiempo
end
subplot(2,3,2); %Gráfica de corriente
while counter < samples-ww
    ylim([-0.5 2.5]);
    xlim([counter counter+ww]);
    xlabel('Tiempo [segundos]');

```

```

        ylabel('Amplitud [Amper]');
        grid on; hold on;
        title('Corriente')
        current(counter+ww) = readVoltage(bbb,'AIN1');
        plot(current,'LineWidth',1.5);
        drawnow;
        counter = counter +1;
end

subplot(2,3,3); %Gráfica de torque
while counter < samples-ww
    ylim([-0.5 2.5]);
    xlim([counter counter+ww]);
    xlabel('Tiempo [segundos]');
    ylabel('Torque [N*m]');
    grid on; hold on;
    title('Torque')
    torque(counter+ww) = readVoltage(bbb,'AIN2');
    plot(torque,'LineWidth',1.5);
    drawnow;
    counter = counter +1;
end

subplot(2,3,4); %Gráfica de posición
while counter < samples-ww
    ylim([-0.5 2.5]);
    xlim([counter counter+ww]);
    xlabel('Tiempo [segundos]');
    ylabel('Posición [Radianes]');
    grid on; hold on;
    title('Posición')
    encoder = readDigitalPin(bbb,'P9_12');
    plot(encoder,'LineWidth',1.5);
    drawnow;
    counter = counter +1;
end

subplot(2,3,5); %Gráfica de velocidad
while counter < samples-ww
    ylim([-0.5 2.5]);
    xlim([counter counter+ww]);
    xlabel('Tiempo [segundos]');
    ylabel('Velocidad [Rad/segundo]');
    grid on; hold on;
    title('Velocidad')
    encoder = readDigitalPin(bbb,'P9_12');
    plot(encoder,'LineWidth',1.5);

```



```

        drawnow;
        counter = counter +1;
end
subplot(2,3,6); %Gráfica de temperatura
while counter < samples-ww
    ylim([-0.5 2.5]);
    xlim([counter counter+ww]);
    xlabel('Tiempo [segundos]');
    ylabel('Temperatura [°C]');
    grid on; hold on;
    title('Temperatura')
    temp(counter+ww) = readVoltage(bbb,'AIN03');
    plot(temp,'LineWidth',1.5);
    drawnow;
    counter = counter +1;
end
%% -----
clear bbb;

```

# Bloques de Simulink-Matlab

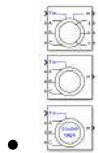
# Asynchronous Machine

---

Model dynamics of three-phase asynchronous machine, also known as induction machine, in SI or pu units

[expand all in page](#)

- **Library:**
- Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Electrical Machines



## Description

The Asynchronous Machine SI Units and Asynchronous Machine pu Units blocks implement a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage, or double squirrel cage) modeled in a selectable  $dq$  reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. The block operates in either generator or motor mode. The mode of operation is dictated by the sign of the mechanical torque:

- If  $T_m$  is positive, the machine acts as a motor.
- If  $T_m$  is negative, the machine acts as a generator.

The electrical part of the machine is represented by a fourth-order (or sixth-order for the double squirrel-cage machine) state-space model, and the mechanical part by a second-order system. All electrical variables and parameters are referred to the stator, which is indicated by the prime signs in the following machine equations. All stator and rotor quantities are in the arbitrary two-axis reference frame ( $dq$  frame). The subscripts used are defined in this table.

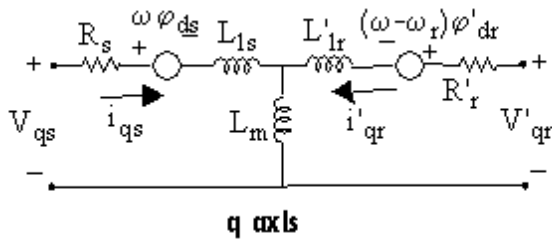
Subscript	Definition
$d$	$d$ -axis quantity
$q$	$q$ -axis quantity
$r$	Rotor quantity (wound-rotor or single-cage)
$r1$	Cage 1 rotor quantity (double-cage)
$r2$	Cage 2 rotor quantity (double-cage)
$s$	Stator quantity
$l$	Leakage inductance

**Subscript**

**Definition**

$m$  Magnetizing inductance

**Electrical System of the Wound-Rotor or Squirrel-Cage Machine**



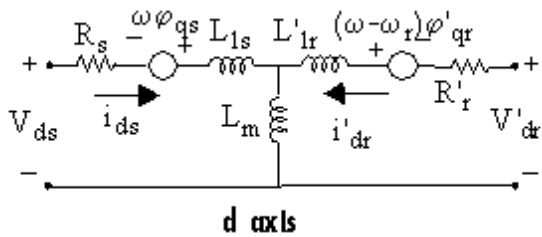
$$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\phi_{qs}/dt + \omega\phi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\phi_{ds}/dt - \omega\phi_{qs}$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + d\phi'_{qr}/dt + (\omega - \omega_r)\phi'_{dr}$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + d\phi'_{dr}/dt - (\omega - \omega_r)\phi'_{qr}$$

$$T_e = 1.5p(\phi_{ds}i_{qs} - \phi_{qs}i_{ds})$$



$\omega$  — Reference frame angular velocity

$\omega_r$  — Electrical angular velocity

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$$

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$$

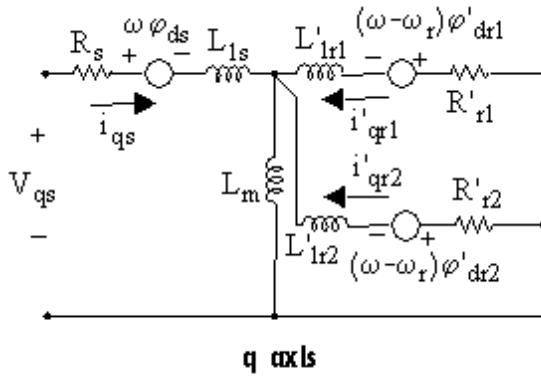
$$\phi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\phi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{1s} + L_m$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m$$

## Electrical System of the Double Squirrel-Cage Machine



$$V_{qs} = R_s i_{qs} + d\phi_{qs}/dt + \omega\phi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + d\phi_{ds}/dt - \omega\phi_{qs}$$

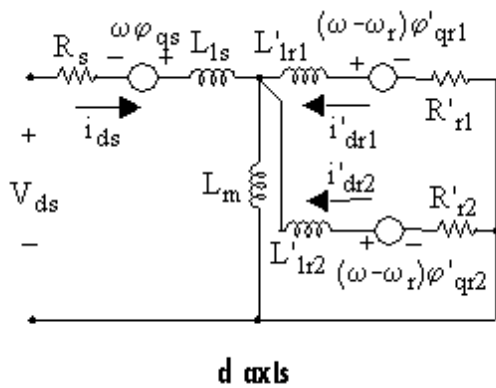
$$0 = R'_{r1} i'_{qr1} + d\phi'_{qr1}/dt + (\omega - \omega_r)\phi'_{dr1}$$

$$0 = R'_{r1} i'_{dr1} + d\phi'_{dr1}/dt - (\omega - \omega_r)\phi'_{qr1}$$

$$0 = R'_{r2} i'_{qr2} + d\phi'_{qr2}/dt + (\omega - \omega_r)\phi'_{dr2}$$

$$0 = R'_{r2} i'_{dr2} + d\phi'_{dr2}/dt - (\omega - \omega_r)\phi'_{qr2}$$

$$T_e = 1.5p(\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds})$$



$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m (i'_{qr1} + i'_{qr2})$$

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m (i'_{dr1} + i'_{dr2})$$

$$\varphi'_{qr1} = L'_{r1}i'_{qr1} + L_m i_{qs}$$

$$\varphi'_{dr1} = L'_{r1}i'_{dr1} + L_m i_{ds}$$

$$\varphi'_{qr2} = L'_{r2}i'_{qr2} + L_m i_{qs}$$

$$\varphi'_{dr2} = L'_{r2}i'_{dr2} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L'_{r1} = L'_{lr1} + L_m$$

$$L'_{r2} = L'_{lr2} + L_m$$

## Mechanical System

$$ddt\omega_m ddt\theta_m = 12H(T_e - F\omega_m - T_m) = \omega_m$$

The Asynchronous Machine block parameters are defined in the table. All quantities are referred to the stator.

Parameters Common to All Models	Definition
$R_s, L_{ls}$	Stator resistance and leakage inductance
$L_m$	Magnetizing inductance
$L_s$	Total stator inductance
$V_{qs}, i_{qs}$	$q$ -axis stator voltage and current
$V_{ds}, i_{ds}$	$d$ -axis stator voltage and current
$\phi_{qs}, \phi_{ds}$	Stator $q$ -axis and $d$ -axis fluxes
$\omega_m$	Angular velocity of the rotor
$\Theta_m$	Rotor angular position
$p$	Number of pole pairs
$\omega_r$	Electrical angular velocity ( $\omega_m \times p$ )
$\Theta_r$	Electrical rotor angular position ( $\Theta_m \times p$ )
$T_e$	Electromagnetic torque
$T_m$	Shaft mechanical torque
$J$	Combined rotor and load inertia coefficient. Set to infinite to simulate locked rotor.
$H$	Combined rotor and load inertia constant. Set to infinite to simulate locked rotor.
$F$	Combined rotor and load viscous friction coefficient
Parameters Specific to Single-Cage or Wound Rotor	Definition

## Parameters Specific to Single-Cage or Wound Rotor

## Definition

$L'_r$	Total rotor inductance
$R'_r, L'_{lr}$	Rotor resistance and leakage inductance
$V'_{qr}, i'_{qr}$	$q$ -axis rotor voltage and current
$V'_{dr}, i'_{dr}$	$d$ -axis rotor voltage and current
$\Phi'_{qr}, \Phi'_{dr}$	Rotor $q$ -axis and $d$ axis fluxes

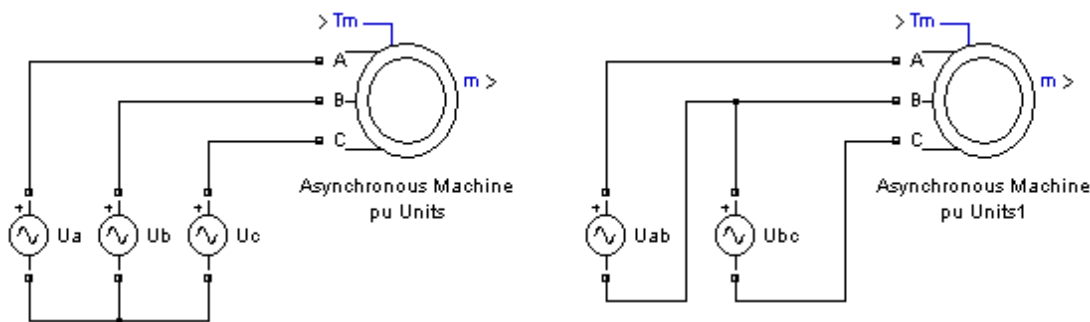
## Parameters Specific to Double-Cage Rotor

## Definition

$R'_{r1}, L'_{lr1}$	Rotor resistance and leakage inductance of cage 1
$R'_{r2}, L'_{lr2}$	Rotor resistance and leakage inductance of cage 2
$L'_{r1}, L'_{r2}$	Total rotor inductances of cage 1 and 2
$i'_{qr1}, i'_{qr2}$	$q$ -axis rotor current of cage 1 and 2
$i'_{dr1}, i'_{dr2}$	$d$ -axis rotor current of cage 1 and 2
$\Phi'_{qr1}, \Phi'_{dr1}$	$q$ -axis and $d$ -axis rotor fluxes of cage 1
$\Phi'_{qr2}, \Phi'_{dr2}$	$q$ -axis and $d$ -axis rotor fluxes of cage 2

## Assumptions and Limitations

- The Asynchronous Machine blocks do not include a representation of the saturation of leakage fluxes. Be careful when you connect ideal sources to the stator of the machine. If you choose to supply the stator via a three-phase, Y-connected infinite voltage source, you must use three sources connected in Y. However, if you choose to simulate a delta source connection, you must use only two sources connected in series.



- When you use Asynchronous Machine blocks in discrete systems, you might have to connect a small parasitic resistive load at the machine terminals to avoid numerical oscillations. Large sample times require larger loads. The optimum resistive load is proportional to the sample time. With a 25  $\mu s$  time step on a 60 Hz system, the minimum load is approximately 2.5% of the machine nominal power. For example, a 200 MVA asynchronous machine in a power system discretized with a 50  $\mu s$  sample time requires approximately 5% of resistive load or 10 MW. If the sample time is reduced to 20  $\mu s$ , a resistive load of 4 MW is sufficient.

# Ports

The stator terminals of the Asynchronous Machine blocks are identified by the letters **A**, **B**, and **C**. The rotor terminals are identified by the letters **a**, **b**, and **c**. The neutral connections of the stator and rotor windings are not available. Three-wire Y connections are assumed.

## Input

[expand all](#)

### **$T_m$ — Mechanical torque** **scalar**

Mechanical torque at the machine's shaft, specified as a scalar. When the input is positive, the asynchronous machine behaves as a motor. When the input is negative, the asynchronous machine behaves as a generator.

When you use the Asynchronous Machine SI Units block, the input is a signal in N.m. When you use the Asynchronous Machine pu Units block, the input is a signal in pu.

### **Dependencies**

To enable this port, in the **Configuration** tab, set the **Mechanical input** parameter to `Torque  $T_m$` .

### **$\omega$ — Machine speed** **scalar**

Machine speed in rad/s (for the Asynchronous Machine SI Units block) or in pu (for the Asynchronous Machine pu Units block), specified as a scalar.

### **Dependencies**

To enable this port, in the **Configuration** tab, set the **Mechanical input** parameter to `Speed  $\omega$` .

## Output

[expand all](#)

### **$m$ — Measurement signal** **28-element vector**

Measurement signals, returned as a vector. You can demultiplex these signals by using the Bus Selector block. The units are in SI or pu, depending on whether you use the Asynchronous Machine SI Units or Asynchronous Machine pu Units block. The cage 2 rotor signals return a null signal when the **Rotor type** parameter on the **Configuration** tab is set to `Wound` or `Squirrel-cage`.



# Revolute Joint

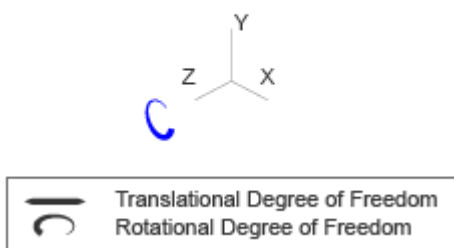
Joint with one revolute primitive

**Library:** Simscape / Multibody / Joints

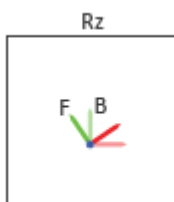


## Description

The Revolute Joint block models a joint that has one rotational degree of freedom.



The joint constrains the motion of two arbitrary frames that connect to the base and follower frames of the joint to pure rotation about a common axis. The axis of rotation is aligned with the z-axis of the joint base frame. The base and follower frames have a common origin and z-axis, and the follower frame rotates about the z-axis, as shown in the image.



To target the initial state of the a joint primitive, use the parameters under **State Targets**. The position and velocity targets are resolved in the base frame. You can also set the priority levels for the targets. If the block cannot simultaneously satisfy the state targets, the priority level determines which targets to satisfy first and how closely to satisfy them. See Guiding Assembly for more information.

To model damping and spring behavior in a joint primitive, use the parameters under **Internal Mechanics**. Specify joint damping coefficients to model energy dissipation and joint spring stiffness to model energy storage. Springs resist attempts to displace the joint primitive from its equilibrium position. Joint dampers act as energy dissipation elements. Springs and dampers are strictly linear.

To specify the limits of a joint primitive, use the parameters under **Limits**. The lower and upper bounds define the width of the free region of a joint primitive. The block applies a force or torque to accelerate the joint position back to the free region when the position exceeds the bounds. The block uses a smoothed spring-damper method to compute the force

or torque. See Description section of the Spatial Contact Force block for more information about the smoothed spring-damper method.

A revolute primitive provides two actuation parameters, **Torque** and **Motion**, that govern the motion of the primitive during a simulation. See Specifying Joint Actuation Inputs for more information. Additionally, the block has ports that output sensing data, such as position, velocity, acceleration, forces, and torques, that enable you to perform analytical tasks on a model. See Sensing and Force and Torque Sensing for more information.

## Ports

---

### Frame

[expand all](#)

> **B – Base frame**  
frame

> **F – Follower frame**  
frame

### Input

[expand all](#)

>  **$\tau$  – Actuation torque**  
physical signal

>  **$q$  – Motion profile**  
physical signal

> **mode – Joint mode control**  
scalar

### Output

[expand all](#)

>  **$q$  – Position of joint primitive**  
physical signal

>  **$w$  – First derivative of position of joint primitive**  
physical signal

>  **$b$  – Second derivative of position of joint primitive**  
physical signal

>  **$\tau$  – Actuator torque acting on joint primitive**  
physical signal