

**EVALUACIÓN DEL MOTOR Y DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL TÚNEL DE
VIENTO DE LA I. U. PASCUAL BRAVO**

JUAN PABLO MAZO ALZATE

**INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2022**

**EVALUACIÓN DEL MOTOR Y DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL TÚNEL DE
VIENTO DE LA I. U. PASCUAL BRAVO**

JUAN PABLO MAZO ALZATE

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Electricidad

Asesor Técnico

Jortin de Jesús Vargas Ortega

Msc en Gestión de la Tecnología Educativa

Asesor Metodológico

William Orozco Murillo

Msc en Gestión Energética Industrial

INSTITUCIÓN UNIVERSIARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECNOLOGÍA ELÉCTRICA

MEDELLÍN

2022

Contenido

1.	Planteamiento del problema	3
1.1	Descripción	3
1.2	Formulación	4
2.	Justificación	5
3.	Objetivos	7
3.1	Objetivo general	7
3.2	Objetivos específicos	7
4.	Referentes teóricos	8
4.1	Túnel de viento	8
4.2	Partes de un túnel de viento	8
4.2.1	Zona de admisión.	9
4.2.2	Zona de estabilización.	9
4.2.3	Zona de contracción.	9
4.2.4	Zona de prueba o de ensayo.	9
4.2.5	Difusor.	9
4.2.6	Ventilador y unidad de potencia.	9
4.3	Tipos de túneles de viento	10
4.3.1	Según su velocidad.	10
4.3.3	Túnel de viento de tipo cerrado.	11
4.4	Motores eléctricos	12
4.4.1	Motores de corriente continua.	13
4.4.2	Motores de corriente alterna.	13
4.4.3	Motor síncrono.	13
4.4.4	Motores de inducción.	13

4.5	Motor trifásico de inducción	13
4.5.1	Estatador.	14
4.5.2	Carcasa.	14
4.5.3	Núcleo de chapas del estator.	14
4.5.4	Devanado trifásico.	14
4.5.5	Rotor.	15
4.5.6	Eje.	15
4.5.7	Núcleo de chapas del rotor.	15
4.5.8	Barras y anillos de cortocircuito.	15
4.6	Principio de funcionamiento del motor	15
4.7	Circuito equivalente del motor de inducción	16
4.8	Variador de frecuencia	16
4.9	Resistencia de aislamiento eléctrico	17
5.	Metodología	18
5.1	Tipo de proyecto	18
5.2	Método	18
5.3	Instrumentos de recolección de información.	18
6.	Resultados	19
6.1	Caracterización del motor del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo.	19
6.1.1	Potencia eléctrica P_e	20
6.1.2.	Potencia de pérdidas P_p	20
6.1.3.	Eficiencia del motor en porcentaje η	21
6.1.4.	Corriente de arranque I_a	21
6.1.5.	Potencia reactiva a corriente nominal Q expresada en Voltamperios Reactivos VAR	21

6.1.6. Potencia aparente a corriente nominal S expresada en kilovoltamperios KVA	22
6.1.7. Potencia aparente en el arranque Sa expresada en voltamperios VA	22
6.1.8. Par útil en el eje T_{un} expresada en Newton metro Nm	22
6.1.9. Par de arranque T_a expresado en Newton metro Nm	23
6.1.10. Número de polos Ndp	23
6.1.11. Velocidad sincrónica Ns	23
6.1.12. Velocidad del deslizamiento Sd	24
6.1.13. Deslizamiento en por unidad Spu y porcentaje y %Spu.	24
6.1.14. Factor de potencia $\cos\phi$ o fp	24
6.1.15. Cálculo de conductores y protecciones	25
6.2 Ensayo de la resistencia de aislamiento	26
6.3 Circuito equivalente	27
6.2.1. Ensayo medición resistencia del devanado R1	28
6.2.2. Bobina 1	29
6.2.3 Bobina 2	30
6.2.4 Bobina 3	31
6.2.5 Bobinas 4-5 y 5-6	32
6.2.6 Corrección por temperatura	34
6.4 Ensayo de vacío	34
6.3.1 Resistencia de pérdidas en el núcleo (R_M) y la reactancia de magnetización (X_M)	37
6.5 Ensayo de rotor bloqueado	38
6.4.1 Resistencia del rotor (R_2)	38
6.4.2 Reactancia de magnetización del primario (X_1) y Reactancia de magnetización del secundario (X_2).	39
6.6 Configuración de la conexión del motor.	40

6.7	Diagrama del sistema eléctrico del motor	41
7.	Resultados	43
8.	Conclusiones	44
9.	Recomendaciones	45
10.	Referencias bibliográficas	46
11.	Anexos	48

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo.	5
Figura 2. Ref motor en trabajo “Diseño, construcción e implementación de un túnel de viento de bajas velocidad para la I. U. Pascual Bravo”. Fuente: Sebastián Montoya Velásquez.	6
Figura 3. Esquema general de las partes de un túnel de viento.	8
Figura 4. Tipos de túneles de viento según el rango de operación.	10
Figura 5. Esquema de túnel de viento de ciclo abierto.	11
Figura 6. Esquema de un túnel de viento de ciclo cerrado.	12
Figura 7. Motor trifásico de inducción.	14
Figura 8. Circuito equivalente del motor de inducción.	16
Figura 9. Placa motor de inducción trifásico del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo	19
Figura 10. Configuración de alto voltaje (440V). Conexión estrella serie.	19
Figura 11. Datos técnicos de conductores encauchetados marca Centelsa.	26
Figura 12. Valores de resistencia de aislamiento según IEEE 40132	27
Figura 13. Datos obtenidos en la medición de la resistencia de los devanados.	27
Figura 14. Gráfica de la tendencia de la tensión DC y la corriente DC de la bobina 1.	29
Figura 15. Gráfica de la tendencia de la tensión DC y de la corriente DC de la bobina 2.	31
Figura 16. Gráfica de la tendencia de la tensión DC y de la corriente DC de la bobina 3.	32
Figura 17. Gráfica de tendencia de tensión DC y de corriente DC de bobina 4-5 y 5-6.	33
Figura 18. Curva de magnetización del motor trifásico de inducción.	36
Figura 19. Datos obtenidos del ensayo de rotor bloqueado.	38
Figura 20. Circuito equivalente del motor del túnel de viento.	40
Figura 21. Esquema de conexión del motor del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo.	41
Figura 22. Diagrama eléctrico del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo.	42

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Datos obtenidos para la bobina 1	29
Tabla 2. Tendencia para la bobina 1	30
Tabla 3. Datos obtenidos para la bobina 2	30
Tabla 4. Tendencia para la bobina 2	31
Tabla 5. Datos para la bobina 3	31
Tabla 6. Tendencia para la bobina 3	32
Tabla 7. Datos obtenidos para la bobina 4-5 y 5-6	32
Tabla 8. Tendencia para la bobina 4-5 y 5-6	33
Tabla 9. Datos consolidados del ensayo de resistencia de devanados	34
Tabla 10. Datos medidos del ensayo de vacío	34
Tabla 11. Datos calculados para el ensayo de vacío	35
Tabla 12. Resultados del proyecto	43

Lista de anexos

	Pág.
Anexo A. Tabla de comportamiento del motor a diferentes velocidades	47

Resumen

EVALUACIÓN DEL MOTOR Y DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL TÚNEL DE VIENTO DE LA I. U. PASCUAL BRAVO

JUAN PABLO MAZO ALZATE

El constante cambio de las necesidades y requerimientos de la industria acarrea la evolución y correcto funcionamiento de las herramientas utilizadas por el ser humano, de forma que lo conlleven a comprender mejor el comportamiento de un fenómeno estudiado. Éste trabajo es la descripción de una serie de ensayos y cálculos realizados al túnel de viento de la Institución Universitaria Pascual Bravo, específicamente a su motor eléctrico, buscando saber si su estado es óptimo para su operación. Por un lado, se detalla la caracterización del motor desde su placa de características. Por otra parte, se detallan los ensayos de resistencia de aislamiento, de vacío, de cortocircuito y de resistencia del devanado con la intención de obtener el circuito equivalente y así poder determinar el comportamiento del motor a diferentes velocidades. También se realiza una prueba de funcionamiento al variador de frecuencia. Los resultados obtenidos de los ensayos y los cálculos permiten poner el motor en operación.

Palabras claves: Túnel de viento, circuito equivalente, motor eléctrico.

Abstract

The constant change of the needs and requirements of the industry entails the evolution and correct functioning of the tools used by the human being, so that they involve him to better understand the behavior of a phenomenon studied. This work is the description of a series of tests and calculations made to the wind tunnel of the University Pascual Bravo, specifically to its electric motor, seeking to know if its condition is optimal for its operation. On the one hand, it details the characterization of the engine from its plate of characteristics. Furthermore, the insulation resistance, vacuum resistance, short circuit resistance and winding resistance tests are detailed in order to obtain the equivalent circuit and thus be able to determine the motor behavior at different speeds. An operating test is also performed on the frequency inverter. The test results and calculations allow the engine to be put into operation.

Keywords: Wind tunnel, equivalent circuit, electric motor.

Glosario

Aerodinámica: Parte de la mecánica que estudia el movimiento de los gases sobre los cuerpos estacionados y el comportamiento de los cuerpos que se mueven en el aire.

Bobina: Componente de un circuito eléctrico formado por un hilo conductor aislado y arrollado repetidamente, en forma variable según su uso.

Cortocircuito: Aumento brusco de intensidad en la corriente eléctrica de una instalación por la unión directa de dos conductores de distinta fase.

Devanado: Componente de un circuito eléctrico formado por un hilo conductor aislado y devanado repetidamente, en forma variable según su uso.

Flujo: Movimiento de un fluido.

Introducción

Desde la fecha de nacimiento del Semillero de Investigación en Mantenimiento Aeronáutico (SIMA), en febrero de 2020, éste ha pretendido fortalecer las competencias investigativas de los estudiantes. En su que hacer no solo confluyen estudiantes de la Tecnología en Gestión del Mantenimiento Aeronáutico, sino que también se convocan a estudiantes de las demás carreras de la universidad para que, en un esfuerzo conjunto, se realicen proyectos que contribuyan al crecimiento personal, profesional, y que sus resultados sean de utilidad para la comunidad estudiantil pascualina. Este proyecto nace del esfuerzo y del interés de estudiantes de distintas carreras y del director del Semillero, el profesor Óscar David Henao Merchán, en recuperar el túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo.

La realización del trabajo busca entregar a la comunidad estudiantil una herramienta pedagógica, que pueda contribuir en investigaciones en el área de la mecánica, mecánica automotriz, gestión del mantenimiento aeronáutico, materiales, y demás necesidades que puedan surgir con el pasar de los semestres.

Para este trabajo se va a evaluar el sistema generador de flujo aerodinámico del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo. El sistema generador consta de un motor eléctrico y un variador de frecuencia de los cuales no se conocen sus estados ya que, el túnel lleva mucho tiempo sin ser utilizado, y no existe un plan de mantenimiento en el que se pueda evidenciar que estas partes han sido revisadas periódicamente y que garanticen su estado óptimo.

La intervención al motor constará de un conjunto de ensayos, como ensayo de resistencia de aislamiento, con el cual se procura saber el estado de las bobinas del motor. También los ensayos de cortocircuito, de vacío, y de resistencia del devanado, para poder realizar el circuito equivalente del motor y saber su comportamiento a distintas características, como carga y frecuencia. También se realizará la caracterización del motor con la información obtenida de la placa de identificación, esto con el fin de realizar los cálculos de los conductores a utilizar.

Al momento de la redacción de este documento se desconoce la evolución que seguirá presentando la pandemia por covid-19 en la ciudad de Medellín, por lo que no se sabe si se podrá asistir con regularidad a los laboratorios de la universidad para poder realizar los ensayos mencionados anteriormente. Esto constituye la mayor limitación para del desarrollo normal del proyecto.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

La importancia del buen estado de los motores eléctricos radica en diferentes puntos. Por ejemplo, una falla en un motor utilizado para un proceso de producción industrial se traduce en pérdidas económicas por el tiempo de inoperatividad (Fluke Corporation, 2014). Esa misma falla no implicaría tanta importancia en un motor utilizado para fines pedagógicos, como lo es el motor empleado para el funcionamiento del túnel de viento. Sin embargo, al momento de hablar de seguridad de las personas, no importa el sector en el cual sea usado el motor, este debe ser 100% seguro de operar.

Al no tener información más allá de los datos de la placa del motor, no se puede saber cuáles son algunos parámetros de funcionamiento a diferentes valores, por ejemplo, de frecuencia, que es lo que nos dará distintos valores de flujo aerodinámico.

Uno de los problemas más comunes en las averías de motores es la ruptura del aislamiento del bobinado (Fluke Corporation, 2014), que causa un cortocircuito en el devanado estático del motor, éste cortocircuito “usualmente se inicia con una indetectable falla en el aislamiento entre dos espiras adyacentes y progresivamente la falla crece hasta producir un cortocircuito involucrando un mayor número espiras” (Quiroga, 2009). Por su parte, los variadores pueden verse afectados “como resultado de la humedad, suciedad, aceite o grasa, corrosión, rayos, mal manejo y cualquier otra condición para la que fue diseñado el equipo” (ABB, s.f.) Del ensayo de la resistencia de aislamiento, que se cataloga como una prueba no destructiva, podemos obtener valores que nos permiten deducir si las bobinas del estator se encuentran en buen estado, y por lo tanto saber si el motor es óptimo para su funcionamiento, o, por el contrario, la prueba dirá si el motor se debe volver a bobinar, o en el caso más extremo hacer el cambio del motor.

Otros datos importantes que nos puede entregar el motor se obtienen desde la solución del circuito equivalente, y para poder solucionarlo se requieren otra serie de ensayos aplicables al motor para poder conocer el funcionamiento del motor en diferentes parámetros, como RPM, corrientes, potencias y pérdidas.

1.2 Formulación

¿El motor que actualmente posee el túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo cuenta con las condiciones óptimas para su funcionamiento y con un plan de mantenimiento que permita garantizar la seguridad de las personas y operatividad del sistema?

2. Justificación

Aunque los túneles de viento normalmente se han asociado a la industria del transporte (aviación, automovilismo y ciclismo), sus aplicaciones han variado con el paso del tiempo. En Colombia se han utilizado estos túneles para el estudio de los fluidos en válvulas cardiacas mecánicas, ya que estos túneles permiten observar la “sensibilidad a los cambios geométricos de la válvula (objeto estudiado), diferencias de presión y turbulencias en el flujo, y además permite una fácil visualización” (Bustamante Osorno, y otros, 2008).

La variedad de aplicaciones en las que se puede investigar permite que el túnel de viento se convierta en una herramienta pedagógica trascendental porque desde la experimentación directa se pueden obtener importantes desarrollos para diferentes tipos de industrias.

La I. U. Pascual Bravo tiene un prototipo de túnel de viento en sus instalaciones, sin embargo, esta herramienta se encuentra actualmente en desuso.



Figura 1. Túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo.
Fuente: Oscar David Henao Merchán.

Este modelo fue el resultado de un trabajo de grado llamado “diseño, construcción e implementación de un túnel de viento de bajas velocidad para la I.U. Pascual Bravo”, y fue presentado en el año 2012. Dada su inoperatividad, y su inexistente mantenimiento, se desconoce el estado de las piezas que componen el túnel del viento.

En la figura 1 se puede apreciar que el túnel de viento posee un motor y un sistema de control de arranque del mismo y de variación de la frecuencia. Si bien en el trabajo de grado que evidenció la construcción del túnel se hizo referencia al motor eléctrico utilizado para la generación de flujo aerodinámico, no se hizo una labor de caracterización del motor, de modo que permitiera conocer más a fondo su funcionamiento, su comportamiento a diferentes niveles de frecuencia, sus datos para el cálculo de protecciones, y de conductores. Del variador de frecuencia no se encontraron datos.

6.10 Motor

El túnel cuenta con un motor eléctrico el cual es el encargado de la fuerza y propulsión del ventilador. Con los cálculos obtenidos anteriormente, se establece por usar un motor de 3HP ya que este es capaz de vencer la fuerza que genera el aire dentro del túnel, donde está anclado en la parte inferior del túnel y hace la propulsión de la hélice por medio de poleas el cual se estableció una relación de 1.3:1 para que la hélice gire más rápido y se genere mayor velocidad dentro del túnel.

Tabla 13 Especificaciones técnicas del motor

Nombre Motor	Tipo Motor	Voltaje	Caballaje	Revoluciones
Westinghouse	Trifásico	220-440 Voltios	3 HP	1700 Rpm

Figura 2. Ref motor en trabajo “Diseño, construcción e implementación de un túnel de viento de bajas velocidad para la I. U. Pascual Bravo”.

Fuente: Sebastián Montoya Velásquez.

En el presente trabajo se pretende desarrollar toda la caracterización del motor para obtener información que permita mantener el túnel de viento tanto en niveles seguros para estudiantes y docentes, como en niveles operativos para la red eléctrica de la universidad.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar el motor del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo para la definición de su correcto funcionamiento.

3.2 Objetivos específicos

Comprobar el estado del aislamiento de las bobinas del motor.

Caracterizar el motor a través de los datos de la placa.

Realizar ensayos que permitan la puesta a punto del motor.

4. Referentes teóricos

4.1 Túnel de viento

“Un túnel de viento o túnel aerodinámico es una herramienta experimental para estudiar los efectos del flujo de aire sobre objetos o cuerpos sólidos. Con él se simulan las condiciones experimentales por el objeto en la situación real”. (Mejía, 2012).

Su principal ventaja es la facilidad de repetición de los ensayos, lo que implica un ahorro en tiempo al momento de realizar una investigación. Por ejemplo, “en la fórmula 1 se pueden ensayar en el túnel alrededor del orden de 14.000 modificaciones en la aerodinámica al año”. (Prada y Nogueira, 2006).

Aunque sus aplicaciones más conocidas son en la industria del automovilismo, como lo vimos anteriormente, y la aeronáutica, estas herramientas también se hacen importantes en sectores como la salud, el entretenimiento y la academia.

4.2 Partes de un túnel de viento

Aunque los tipos de esta herramienta pueden ser varios, entre ellos se conservan partes en común.

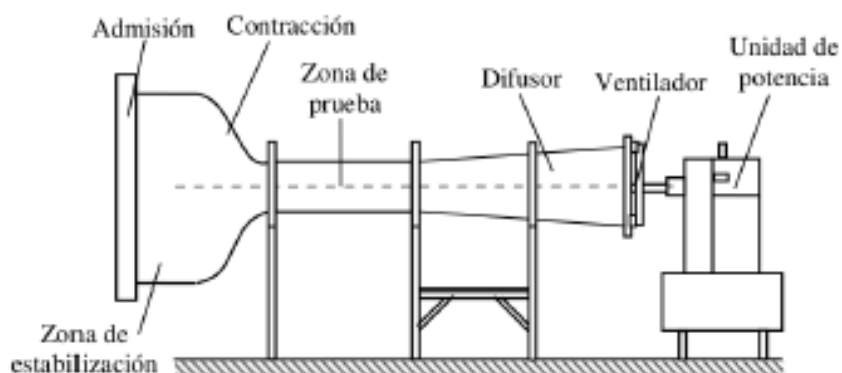


Figura 3. Esquema general de las partes de un túnel de viento.

Fuente: Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades.

4.2.1 Zona de admisión. Se comprende como “la entrada al conducto principal del túnel y su función es evitar la desestabilización de las corrientes de aire y la formación y propagación de turbulencias que se deben a cambios abruptos de la velocidad del viento”. (Quispe González, Urchuhuaranga Esteban, & Chiroque Baldera, 2014).

4.2.2 Zona de estabilización. Como su nombre lo indica, en esta zona del túnel se hace la estabilización del flujo del aire. Para ello, se cuentan con dos accesorios adicionales al interior de esta zona, que son el corrector de flujo y la rejilla de estabilización. Estos dos “permiten que el flujo entrante pueda pasar a la zona de contracción con un flujo uniforme y de poca turbulencia”. (Quispe González, Urchuhuaranga Esteban, & Chiroque Baldera, 2014).

4.2.3 Zona de contracción. Esta “es una zona donde ocurre la disminución del área del paso del túnel y su función es acelerar el fluido y disminuir las variaciones de velocidad”. (Quispe González, Urchuhuaranga Esteban, & Chiroque Baldera, 2014).

4.2.4 Zona de prueba o de ensayo. En esta zona se ubica el objeto a estudiar. En esta sección “la velocidad de flujo alcanza su régimen de prueba, siendo las líneas de corriente uniformes y paralelas” (Quispe González, Urchuhuaranga Esteban, & Chiroque Baldera, 2014).

4.2.5 Difusor. Su función se basa en “disminuir la velocidad de salida del flujo, gracias a un incremento del área de paso. Con esto, se aumenta paulatinamente la presión y se disminuye la velocidad del flujo, lo cual hace disminuir las pérdidas por fricción”. (Quispe González, Urchuhuaranga Esteban, & Chiroque Baldera, 2014).

4.2.6 Ventilador y unidad de potencia. Elementos que “proporcionan la fuerza necesaria para mover el aire a través del túnel de viento”. (Quispe González, Urchuhuaranga Esteban, & Chiroque Baldera, 2014).

4.3 Tipos de túneles de viento

Los diferentes tipos de esta herramienta se catalogan con respecto a la velocidad que pueden generar o con respecto al diseño de su construcción.

4.3.1 Según su velocidad. Para este criterio de selección se tiene en cuenta la velocidad del flujo que el aire alcanza en la cámara de prueba. Pueden ser:

TIPO	VELOCIDAD ÓPTIMA
De baja velocidad	$M < 0.6$
Subsónicos	$0.6 < M < 0.85$
Transónicos	$0.85 < M < 1.2$
Supersónicos	$1.2 < M < 5$
Hipersónicos	$5 < M$

Figura 4. Tipos de túneles de viento según el rango de operación.

Fuente: Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad.

Nota: M = Número de Mach.

Según su diseño de construcción los túneles de viento pueden ser:

4.3.2 Túnel de viento de tipo abierto. En esta configuración, un ventilador ubicado en uno de los extremos del túnel succiona el aire que ingresa por el extremo opuesto al ventilador. Este flujo atraviesa todo el túnel y es expulsado al exterior.

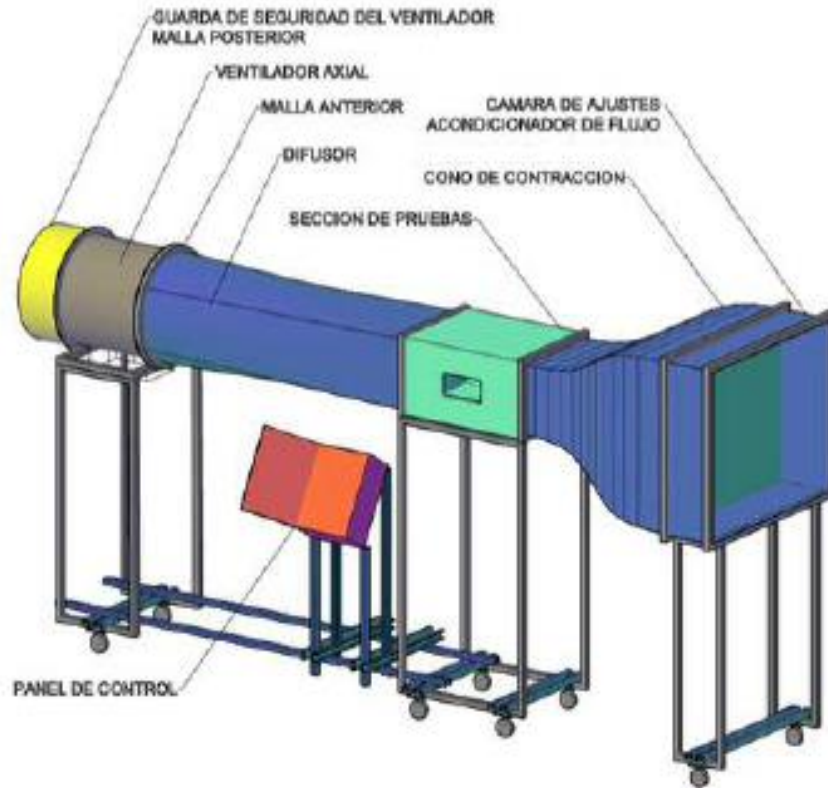


Figura 5. Esquema de túnel de viento de ciclo abierto.

Fuente: Diseño y manufactura de túnel de viento subsónico de circuito abierto.

4.3.3 Túnel de viento de tipo cerrado. En este tipo de configuración el aire succionado por el ventilador recircula a través de todo el túnel. Este tipo de diseño suele ser más costoso, ya que requiere más material para su fabricación y herramientas, como sistemas de enfriamiento debido a que la fricción generada entre el aire y las paredes del túnel calientan el fluido.

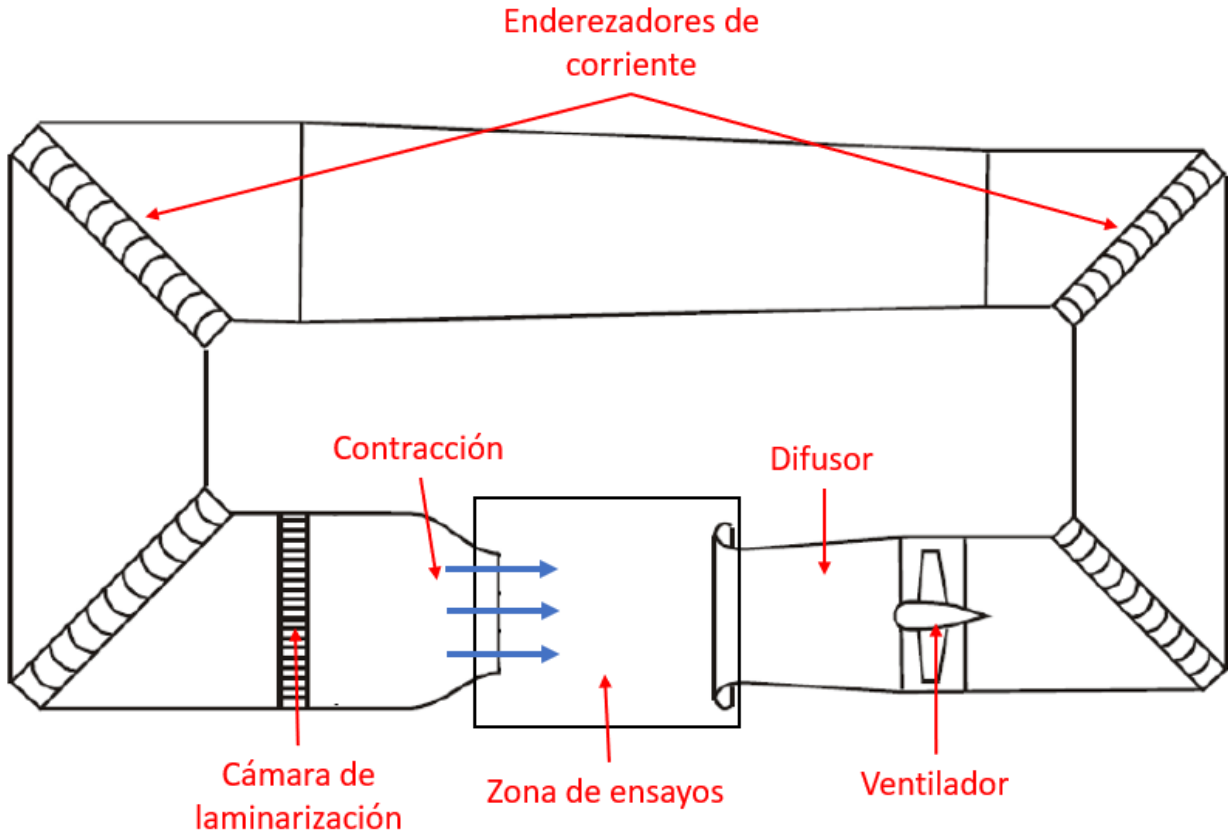


Figura 6. Esquema de un túnel de viento de ciclo cerrado.

Fuente: Tomado de <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/11/el-tunel-de-viento-en-la-formula-1/>

4.4 Motores eléctricos

El motor eléctrico es una máquina que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. El que se encuentra más comúnmente es el motor de inducción, porque “combina las ventajas de la utilización de la energía eléctrica –bajo costo, facilidad de transporte, limpieza, simplicidad de comando – con su construcción simple y su gran versatilidad de adaptación a las cargas de los más diversos tipos y mejores rendimientos” (WEG, 2016). Los más reconocidos son:

4.4.1 Motores de corriente continua. Son motores de costo más elevado y, además de eso, precisan una fuente de corriente continua, o un dispositivo que convierta la corriente alterna común en continua. Pueden funcionar con velocidad ajustable, entre amplios límites y se prestan a controles de gran flexibilidad y precisión. Por eso, su uso es restricto a casos especiales en que estas exigencias compensan el costo mucho más alto de la instalación y del mantenimiento. (WEG, 2016).

4.4.2 Motores de corriente alterna. Son los más utilizados, porque la distribución de energía eléctrica es hecha normalmente en corriente alterna. Los principales tipos son:

4.4.3 Motor síncrono. “Funciona con velocidad fija, o sea, sin interferencia del deslizamiento, utilizado normalmente para grandes potencias debido a su alto costo en tamaños menores” (WEG, 2016).

4.4.4 Motores de inducción. Funciona normalmente con una velocidad constante, que varía ligeramente con la carga mecánica aplicada al eje. Debido a su gran simplicidad, robustez y bajo costo, es el motor más utilizado de todos, siendo adecuado para casi todos los tipos de máquinas accionadas, encontradas en la práctica. Actualmente es posible el control de velocidad de los motores de inducción con el auxilio de convertidores de frecuencia. (WEG, 2016).

4.5 Motor trifásico de inducción

Esta máquina está compuesta, básicamente, por dos partes: el estator y el rotor.

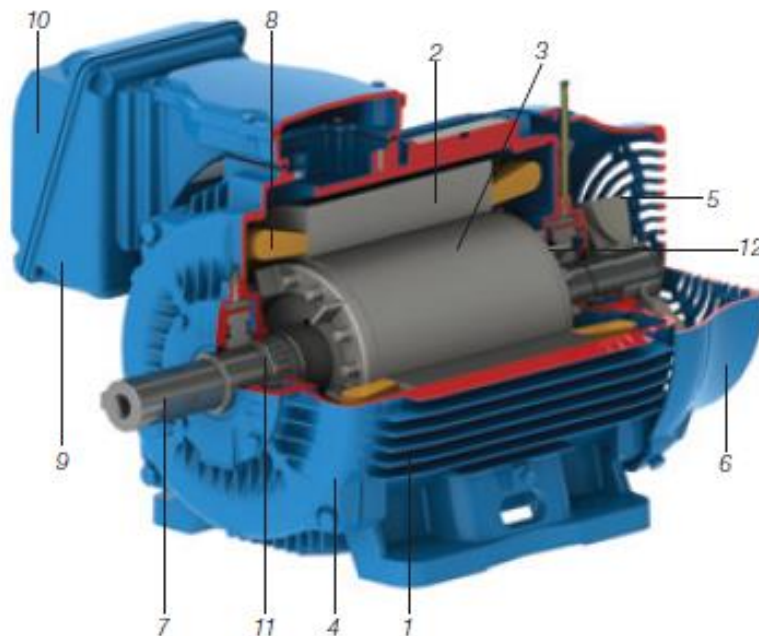


Figura 7. Motor trifásico de inducción.

Fuente: Motores eléctricos guía de especificación, WEG.

Nota: 1. Carcasa; 2. Núcleo de chapas del estator; 3. Núcleo de chapas del rotor; 4. Tapa; 5. Ventilador; 6. Tapa deflectora; 7. Eje; 8. Devanado trifásico; 9. Caja de conexión; 10. Terminales; 11. Rodamientos; 12. Barras y anillos de cortocircuito.

4.5.1 Estator. En esta parte del motor no hay un movimiento mecánico, pero sí magnético.

Cumple la función de generar un campo magnético. Dentro del estator encontramos varias partes del motor, entre ellas:

4.5.2 Carcasa. “Es la estructura de soporte del conjunto de construcción robusta en hierro fundido, acero o aluminio inyectado, resistente a la corrosión y normalmente con aletas” (WEG, 2016)

4.5.3 Núcleo de chapas del estator. Esta parte del motor se construye en acero magnético.

4.5.4 Devanado trifásico. “Tres conjuntos iguales de bobinas, una para cada fase, formando un sistema trifásico equilibrado ligado a la red eléctrica trifásica” (WEG, 2016).

4.5.5 Rotor. Se llama así a la parte giratoria de la máquina. De acá depende la conversión de energía eléctrica en energía mecánica. Hay dos tipos de rotores, denominados rotor de Jaula de ardilla y rotor devanado. El primero “consiste en una serie de barras conductoras dispuestas entre ranuras labradas en la cara del rotor y cortocircuitado en cada extremo por anillos de cortocircuitado” (Chapman). En cuanto al rotor devanado Chapman dice lo siguiente:

Tiene un grupo completo de devanados trifásicos que son las imágenes especulares de los devanados del estator. Las fases de los devanados del rotor están usualmente conectadas en Y, y los extremos de los tres alambres del rotor están unidos a anillos rozantes dispuestos sobre el eje del rotor. (Chapman).

Dentro del rotor encontramos varias partes del motor, entre ellas:

4.5.6 Eje. “Transmite la potencia mecánica desarrollada por el motor” (WEG, 2016).

4.5.7 Núcleo de chapas del rotor. De iguales características a las que se encuentran en el estator.

4.5.8 Barras y anillos de cortocircuito. Son de aluminio inyectado sobre presión en una única pieza.

4.6 Principio de funcionamiento del motor

En una forma muy sintética, el funcionamiento se basa en lo siguiente: en la parte interna del estator se agrupan chapas de acero especial formando un bloque. Estas chapas tienen ranuras en donde se alojan las bobinas, las cuales se conectan a la instalación eléctrica. Cuando circula la corriente eléctrica, se generan campos electromagnéticos del tipo rotante, los cuales interaccionan con el rotor y generan la cupla motora que lo hace girar. (Farina, 2018).

4.7 Circuito equivalente del motor de inducción

El circuito equivalente es la representación de una máquina eléctrica a través de un circuito eléctrico en el que su equivalencia se realiza a base de bobinas y resistencias. (Pineda Sánchez, 2012). La intención es modelar las principales imperfecciones de la máquina eléctrica y sus efectos se incluyen en el circuito modelado. (Chapman).

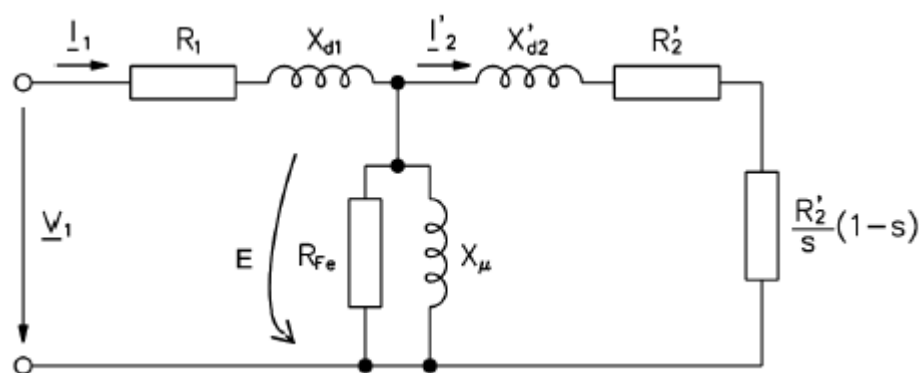


Figura 8. Circuito equivalente del motor de inducción.

Fuente: Caracterización de motores de inducción para tracción ferroviaria a partir del circuito equivalente

De la representación del circuito equivalente de la figura 8 tenemos los siguientes datos:

- R_1 . Corresponde a las bobinas por fase que se encuentran en el estator o en el devanado del estator.
- I_1 . Correspondiente a la corriente que circula por el devanado del estator del motor.
- X_{d1} . Reactancia por fase del devanado del estator.
- I'_2 . Corriente que circula por el rotor del motor.
- R'_2 . Resistencia del rotor del motor.
- X'_{d2} . Reactancia por fase del rotor del motor.
- $(R'_2/s)1-s$. Representa la carga acoplada al motor.

4.8 Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia es un elemento que regula la velocidad de los motores eléctricos para que la electricidad que llega al motor se ajuste a la demanda real de la aplicación, reduciendo el consumo energético del motor entre un 20% y un 70%. (ABB, s.f.).

4.9 Resistencia de aislamiento eléctrico

La resistencia eléctrica es la oposición de un material al paso de la corriente eléctrica, su unidad de medida es el ohm, simbolizado con la letra griega omega Ω . La resistencia de aislamiento se define como la resistencia que ofrece un aislamiento al aplicarle un voltaje de corriente directa durante un tiempo dado. (Flores, 2016).

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

Experimental

Siguiendo los lineamientos del autor Roberto Hernández-Sampieri en su libro Metodología de la investigación, debido a que se va a tratar de mejorar un diseño existente, del cual se desconoce su estado, se trata de un proyecto de desarrollo experimental.

5.2 Método

Deductivo

Verificar el estado del aislamiento de las bobinas del motor. Solicitud de espacio al laboratorio de máquinas eléctricas y solicitud de acompañamiento al laboratorista del laboratorio de máquinas eléctricas.

Caracterizar el motor a través de los datos de placa.

Realizar los ensayos de vacío, de resistencia de aislamiento y de cortocircuito.

Desarrollar el circuito equivalente del motor.

5.3 Instrumentos de recolección de información.

5.3.1. Fuentes primarias. Observación experimental de los datos obtenidos en los ensayos realizados, asesorías con docentes y con director de Semillero SIMA.

5.3.2. Fuentes secundarias. Material bibliográfico como libros y revistas digitales, manuales de uso y mantenimiento de fabricantes, catálogos, hemerotecas.

6. Resultados

6.1 Caracterización del motor del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo.



Figura 9. Placa motor de inducción trifásico del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo

El siguiente diagrama es para la conexión a 440V, con una corriente nominal I de 4.3A.

Dada la conexión entregada por la placa del motor se tiene una estrella serie.

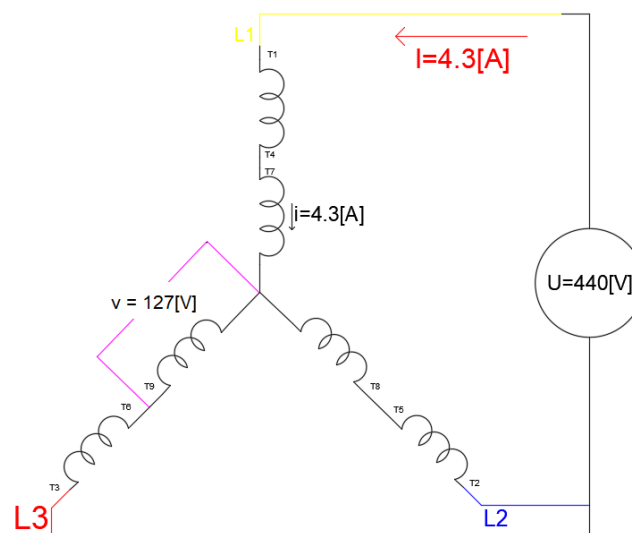


Figura 10. Configuración de alto voltaje (440V). Conexión estrella serie.

6.1.1 Potencia eléctrica P_e

$$P_e = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\phi \quad (1)$$

$$P_e = \sqrt{3} \times 440 \times 4.3 \times 0.8$$

$$P_e = 2261.632102$$

De la ecuación 1 se tiene que U es tensión de línea expresada en voltios V; I es corriente de línea expresada en amperios A; $\cos\phi$ es factor de potencia y P_e es potencia eléctrica expresada en vatios W.

6.1.2. Potencia de pérdidas P_p

$$P_p = P_e - P_u \quad (2)$$

Donde P_p es la potencia de pérdidas expresada en vatios W; P_e es la potencia eléctrica expresada en vatios W; P_u es la potencia útil expresada en vatios W.

La potencia útil P_u , es la que encontramos en la placa del motor. En algunos motores se relaciona en caballos de fuerza Hp. Para el motor del túnel de viento esta potencia es de 3 Hp. 1 Hp equivale a 745,7 W

Se convierten Hp a vatios W:

$$P_u = 3 \times 745,7$$

$$P_u = 2237,1$$

Se halla la potencia de pérdidas.

$$P_p = 2261,632102 - 2237,1$$

$$P_p = 384,5321023$$

6.1.3. Eficiencia del motor en porcentaje η

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \times 100 \quad (3)$$

$$\eta = \frac{2.2}{2.6} \times 100$$

$$\eta = 84.61\%$$

Pu y Pe en esta fórmula se expresaron en kilovatios kW

El motor tiene una eficiencia del 84.61 %

6.1.4. Corriente de arranque Ia

Letra código del motor: J

La cantidad de KVA por caballo con el rotor bloqueado en este tipo de motores está en el rango 7.1 – 7.99

$$I_a = \frac{\left(\frac{\text{KVA}}{\text{Hp}}\right) \times \text{Hp} \times 1000}{\sqrt{3} \times U} \quad (4)$$

$$I_a = \frac{7.99 \left[\frac{\text{KVA}}{\text{Hp}}\right] \times 3 \times 1000}{\sqrt{3} \times 440}$$

$$I_a = 31.45246807$$

Donde Hp son caballos de fuerza y U es tensión de línea expresada en voltios V.

6.1.5. Potencia reactiva a corriente nominal Q expresada en Voltamperios Reactivos VAR

$$Q = \sqrt{3} \times U \times I \times \text{Sen}(\phi) \quad (5)$$

$$\phi = \cos^{-1}(0.8)$$

$$\phi = 36.8698$$

$$Q = \sqrt{3} \times 440 \times 4.3 \times \text{Sen}(36.8698)$$

$$Q = 1966.224$$

Donde U es tensión de línea expresada en voltios V, I es corriente de línea expresada en amperios A.

6.1.6. Potencia aparente a corriente nominal S expresada en kilovoltamperios KVA

$$S = \sqrt{P_e^2 + Q^2} \quad (6)$$

$$S = \sqrt{(2621.632102)^2 + (1966.224077)^2}$$

$$S = 3277.040128 = 3.2$$

Donde Pe es potencia eléctrica expresada en vatios W y Q es potencia reactiva expresada en voltamperios reactivos VAR

6.1.7. Potencia aparente en el arranque Sa expresada en voltamperios VA

$$S_a = \sqrt{3} \times U \times I_a \quad (7)$$

$$S_a = \sqrt{3} \times 440 \times 31.45246807$$

$$S_a = 23970 \text{ VA} = 23.9 \text{ KVA}$$

Donde U es tensión de línea expresada en voltios V y Ia es corriente de arranque expresada en amperios A.

6.1.8. Par útil en el eje T_{un} expresada en Newton metro Nm

$$T_{un} = \frac{P_u}{\omega} \quad (8)$$

$$\omega = 2\pi \times \frac{N_r}{60} \quad (9)$$

$$\omega = 2\pi \times \frac{1740}{60}$$

$$\omega = 182.2123739$$

$$\tau_{un} = \frac{2237.1}{182.2123739}$$

$$\tau_{un} = 12.277$$

Donde P_u es potencia útil expresada en vatios W y ω es velocidad angular expresada en Radianes por segundo Rad/s; y N_r es la velocidad rotórica expresada en revoluciones por minuto RPM.

6.1.9. Par de arranque τ_a expresado en Newton metro Nm

El motor del túnel de viento es de diseño tipo B, por lo que su par de arranque es entre 1.4 y 1.6 veces su par útil. Entonces se tiene:

$$\tau_a = 1.6 \times \tau_{un} \tag{10}$$

$$\tau_a = 1.6 \times 12.277$$

$$\tau_a = 19.643$$

Donde τ_{un} es el par útil en el eje expresado en Newton metro Nm.

6.1.10. Número de polos N_{dp}

$$N_{dp} = \frac{120 \times f}{\text{RPM}} \tag{11}$$

$$N_{dp} = \frac{120 \times 60}{1740}$$

$$N_{dp} = 4.137 \text{ (4 polos por fase)}$$

6.1.11. Velocidad sincrónica N_s

$$N_s = \frac{120 \times f}{N_{dp}} \tag{12}$$

$$N_s = \frac{120 \times 60}{4}$$

$$N_s = 1800$$

Donde N_s es la velocidad sincrónica expresada en revoluciones por minuto RPM.

6.1.12. Velocidad del deslizamiento S_d

$$S_d = N_s - N_r \quad (13)$$

$$S_d = 1800 - 1740$$

$$S_d = 60$$

De la ecuación se tiene que S_d , N_s y N_r están expresada en RPM.

6.1.13. Deslizamiento en por unidad S_{pu} y porcentaje y $\%S_{pu}$.

$$S_{pu} = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (14)$$

$$S_{pu} = \frac{1800 - 1740}{1800}$$

$$S_{pu} = 0.0333$$

$$\%S_{pu} = S_{pu} \times 100$$

$$\%S_{pu} = 0.0333 \times 100$$

$$\%S_{pu} = 3.3 \%$$

6.1.14. Factor de potencia $\cos\phi$ o fp

$$\cos\phi = \frac{P_u}{\sqrt{3} \times U \times I \times \eta} \quad (15)$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{2.2}{2.6}$$

$$\eta = 0.8$$

$$\cos\phi = \frac{2237.1}{\sqrt{3} \times 440 \times 4.3 \times 0.8}$$

$$\cos\phi = 0.8$$

Donde P es potencia útil expresada en vatios W, U es tensión de línea expresada en voltios V, I es corriente de línea expresada en amperios A y η la eficiencia del motor.

6.1.15. Cálculo de conductores y protecciones

Para el cálculo de los conductores se utilizarán los siguientes datos de placa:

$$U = 220$$

$$Hp = 3 = 2231.7 = Pu$$

$$fp = 0.8$$

Donde U es voltaje de línea expresado en voltios V, Hp son caballos de fuerza convertidos a vatios W que es lo mismo que la potencia útil Pu.

Procedemos con el cálculo de la corriente operativa Iop, que se determina como el 125 % de la corriente de línea Il.

$$I_{op} = 1.25 \times I_l \tag{17}$$

$$I_l = \frac{Pu}{\sqrt{3} \times V \times fp} \tag{18}$$

$$V = \frac{U}{\sqrt{3}} \tag{19}$$

$$V = \frac{220}{\sqrt{3}}$$

$$V = 127$$

$$I_l = \frac{2237.1}{\sqrt{3} \times 127 \times 0.8}$$

$$I_l = 12.712$$

$$I_{op} = 1.25 \times I_l \tag{17}$$

$$I_{op} = 1.25 \times 12.712$$

$$I_{op} = 15.89$$

Donde P_u es la potencia útil expresada en vatios W, V es voltaje de fase expresado en voltios V, y fp es factor de potencia.

Por lo tanto, el conductor sugerido es calibre 14, dado que, según los datos del fabricante, son aptos para trabajar a capacidades de más de 15,89 amperios.

1. Conductor		Número de Conductores	Diámetro del Núcleo	Diámetro Exterior	Peso Total Aproximado	Resistencia DC a 20°C	Capacidad de Corriente (A)	
Calibre	Diámetro						(*)	(**)
AWG	mm	No	mm	mm	kg/km	Ohm/Km		
18		2	2,34	6,66	62	21,42	10	7
	1,17	3	2,52	7,05	74			
		4	2,82	7,71	90			
16		2	2,96	7,28	79	13,45	13	10
	1,48	3	3,19	7,72	96			
		4	3,57	8,46	117			
14		2	3,78	8,10	105	8,44	25	20
	1,89	3	4,07	8,60	130			
		4	4,56	9,45	160			

Figura 11. Datos técnicos de conductores encauchetados marca Centelsa.

Fuente: tomado de <https://www.centelsa.com/pdf/Cables-Flexibles.pdf>

La protección que usará será un taco tipo riel de tres polos de 20 amperios.

6.2 Ensayo de la resistencia de aislamiento

Este ensayo se realiza para verificar que el aislamiento de las bobinas se encuentre en buen estado. Consiste en inyectar tensión DC a cada una de las bobinas del motor y por ley de ohm realizar la medición de la resistencia con respecto a tierra. El valor de la resistencia obtenida está normalizado en la IEEE 43-2013.

Nominal Rating of Equipment (Volts)	Minimum Test Voltage (DC)	Recommended Minimum Insulation Resistance (Megohms)
250	500	25
600	1,000	100
1,000	1,000	100
2,500	1,000	500
5,000	2,500	1,500
8,000	2,500	2,500
15,000	2,500	5,000
25,000	5,000	10,000
34,000	5,000	100,000
46,000 and above	5,000	100,000

Figura 12. Valores de resistencia de aislamiento según IEEE 40132

Fuente: Tomado de <https://electrotec.pe/blog/MegohmetroNEW>

Según los datos de la figura 12, el voltaje a inyectar en el motor es de 500V, ya que se asume 250V como la capacidad nominal del equipo. Para garantizar que el estado de las bobinas sea óptimo la resistencia debe estar por debajo de los 25 megohmios. Los datos medidos por el equipo son los siguientes:

Configuración para 220V		
Bobinas	Voltaje DC inyectado [V]	Datos obtenidos [MΩ]
1	500	7
2	500	7
3	500	7

Figura 13. Datos obtenidos en la medición de la resistencia de los devanados.

Fuente: Diseño propio.

Dados los resultados que entregó el ensayo se deduce que el motor se encuentra en óptimo estado y, por lo tanto, puede ser utilizado.

6.3 Circuito equivalente

Para obtener el circuito equivalente se aplicaron tres ensayos en el laboratorio de la I.U. Pascual Bravo. Los ensayos llevados a cabo fueron: medición de la resistencia del devanado, ensayo de vacío y ensayo de rotor bloqueado.

6.2.1. Ensayo medición resistencia del devanado R1

Este método consiste en aplicar diferentes niveles de tensión DC a cada uno de los devanados del motor. En cada punto de tensión aplicada se mide la corriente obtenida. El límite de tensión a aplicar es el que entregue la corriente nominal. Una vez se obtiene la corriente nominal con el valor de tensión con que se obtuvo, se procede a calcular la resistencia a través de ley de ohm. Este procedimiento se aplicó a cada una de las bobinas. Con los datos de las resistencias de cada una de las bobinas se obtiene una única resistencia DC promedio, y con esta última se obtiene la resistencia AC, aplicando la corrección por efecto piel. La fórmula es:

$$R_{AC} = 1.1 \times R_{DCprom} \quad (20)$$

Donde R_{AC} es resistencia en corriente alterna expresada en ohmios Ω , R_{DCprom} es resistencia promedio con corriente directa expresada en ohmios Ω .

Por último, dada la variación en la resistencia que presenta el cobre por efecto de la temperatura, se aplica a R_{AC} la corrección por temperatura, y así se obtiene R_1 . La fórmula para la corrección por temperatura es la siguiente:

$$R_1 = R_{AC}[1 + 0.0039(T_F - T_A)] \quad (21)$$

Donde R_1 es la resistencia del primario expresada en ohmios Ω , R_{AC} es la resistencia sin corrección expresada en ohmios Ω , 0.0039 es el coeficiente de temperatura del cobre, T_F es la temperatura final en grados centígrados C y T_A es la temperatura ambiente en grados centígrados.

Se utiliza una fuente de tensión variable DC comenzando desde 0 voltios. La fuente de tensión utilizada en este ensayo solo inyectaba 3 voltios, y en este nivel de tensión no se llegaba al nivel de corriente nominal. Para llegar al nivel de corriente requerido se aplicó la opción tendencia de Excel a los datos que se lograron obtener con la fuente utilizada.

6.2.2. Bobina 1

Tabla 1.

Datos obtenidos en la bobina 1.

Tensión DC [V]	Corrientes obtenidas [A]
0,5	0,325
1	0,589
1,5	0,9
2	1,15
2,5	1,47
3	1,7

Fuente: diseño propio.

Para obtener la tensión que nos llevaría a la corriente nominal se tomaron todos los datos de la tabla 1 y a través de la función tendencia de Excel se realizó el cálculo.

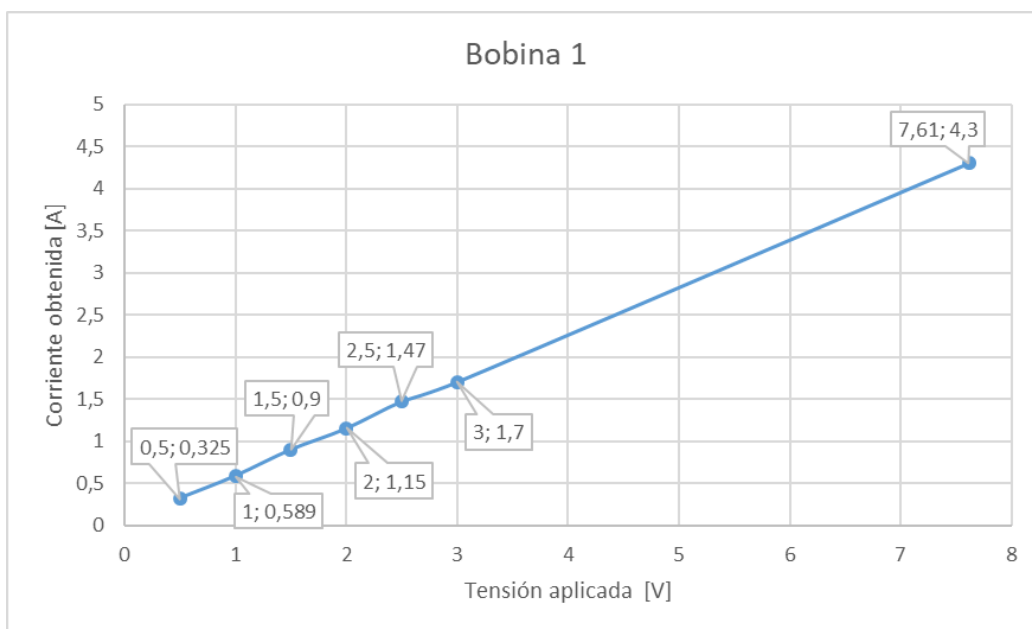


Figura 14. Gráfica de la tendencia de la tensión DC y la corriente DC de la bobina 1.

Fuente: Diseño propio.

Tabla 2.
Tendencia para la bobina 1

Tensión DC [V]	Corrientes obtenidas [A]
0,5	0,325
1	0,589
1,5	0,9
2	1,15
2,5	1,47
3	1,7
7,6	4,3

Fuente: Diseño propio.

6.2.3 Bobina 2

Tabla 3.
Datos obtenidos para la bobina 2.

Tensión DC [V]	Corrientes obtenidas [A]
0,5	0,31
1	0,55
1,5	0,835
2	1,18
2,5	1,45
3	1,75

Fuente: Diseño propio.

Para obtener la tensión que nos llevaría a la corriente nominal se tomaron todos los datos de la tabla 3 y a través de la función tendencia de Excel se realizó el cálculo.

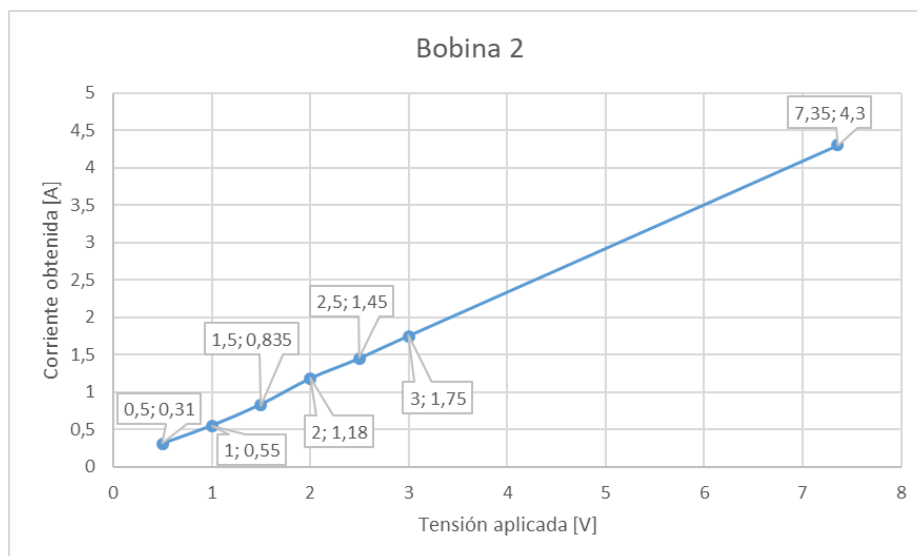


Figura 15. Gráfica de la tendencia de la tensión DC y de la corriente DC de la bobina 2.
Fuente: diseño propio

Tabla 4:

Tendencia para la bobina 2.

Tensión DC [V]	Corrientes obtenidas [A]
0,5	0,31
1	0,55
1,5	0,835
2	1,18
2,5	1,45
3	1,75
7,35	4,3

Fuente: Diseño propio.

6.2.4 Bobina 3

Tabla 5:

Datos obtenidos para la bobina 3.

Tensión DC [V]	Corrientes obtenidas [A]
0,5	0,331
1	0,59
1,5	0,885
2	1,2
2,5	1,526
3	1,82

Fuente: Diseño propio.

Para obtener la tensión que nos llevaría a la corriente nominal se tomaron todos los datos de la tabla 5 y a través de la función tendencia de Excel se realizó el cálculo.

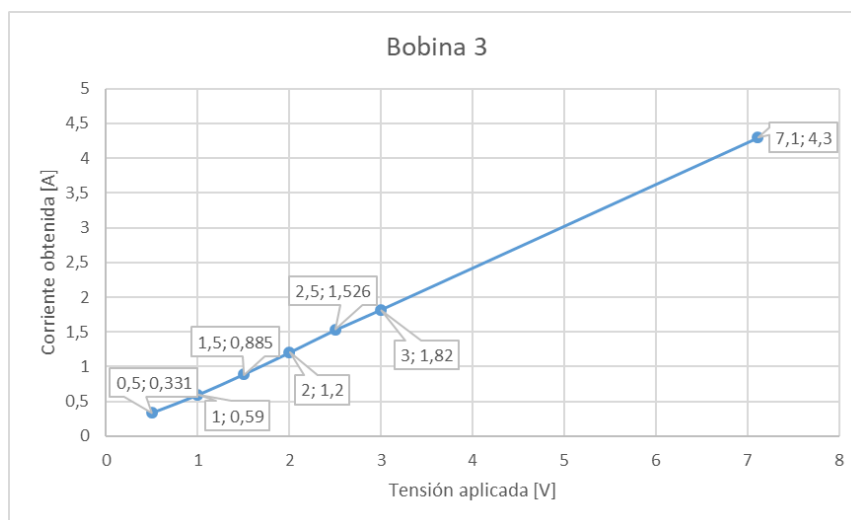


Figura 16. Gráfica de la tendencia de la tensión DC y de la corriente DC de la bobina 3.
Fuente: diseño propio

Tabla 6:

Tendencia para la bobina 3.

Tensión DC [V]	Corrientes obtenidas [A]
0,5	0,331
1	0,59
1,5	0,885
2	1,2
2,5	1,526
3	1,82
7,1	4,3

Fuente: diseño propio

6.2.5 Bobinas 4-5 y 5-6

Tabla 7:

Datos obtenidos para las bobinas 4-5 y 5-6

Tensión DC [V]	Corrientes obtenidas [A]
0,5	0,17
1	0,34
1,5	0,521
2	0,709
2,5	0,834

3 1,039

Fuente: Diseño propio.

Para obtener la tensión que nos llevaría a la corriente nominal se tomaron todos los datos de la tabla 7 y a través de la función tendencia de Excel se realizó el cálculo.

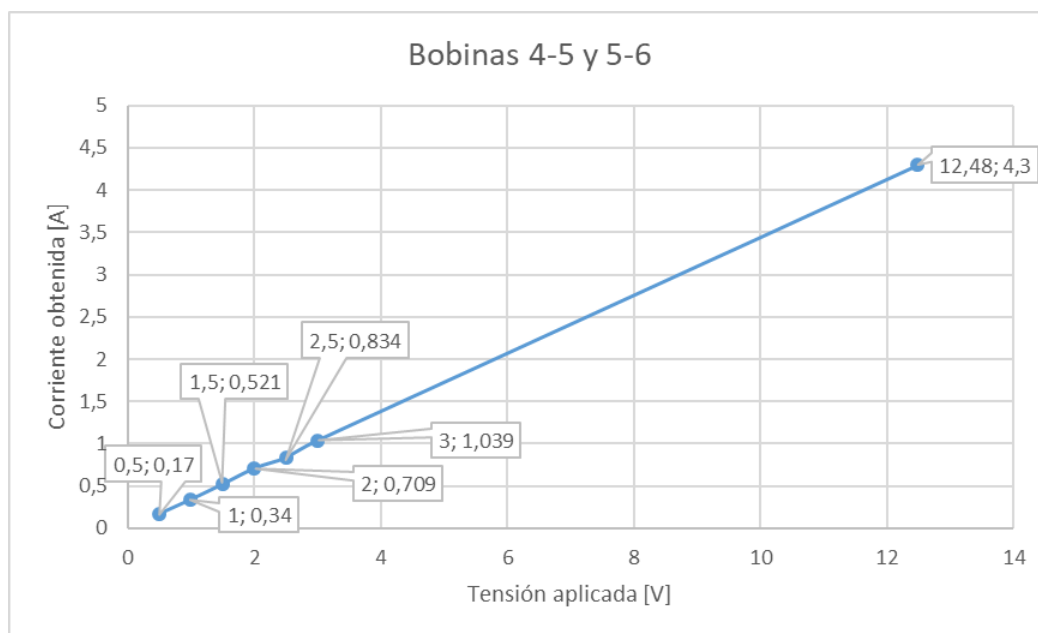


Figura 17. Gráfica de tendencia de tensión DC y de corriente DC de bobina 4-5 y 5-6.

Fuente: diseño propio

Tabla 8:

Datos calculados para las bobinas 4-5 y 5-6

Tensión DC [V]	Corrientes obtenidas [A]
0,5	0,17
1	0,34
1,5	0,521
2	0,709
2,5	0,834
3	1,039
12,48	4,3

Fuente: Diseño propio.

Se toman los resultados a corriente nominal para obtener la resistencia DC, la resistencia promedio entre todas las bobinas, y luego se halla R1.

Tabla 9:

Datos consolidados del ensayo de resistencia de devanados

	VDC [V]	IDC [A]	RDC [Ω]	R prom DC [Ω]	R1 [Ω]
Bobina 1	7,6	4,3	1,767		
Bobina 2	7,35	4,3	1,709		
Bobina 3	7,1	4,3	1,651	2,187	2,405
Bobina 4-5	12,48	4,3	2,902		
Bobina 5-6	12,48	4,3	2,902		

Fuente: Diseño propio

6.2.6 Corrección por temperatura

Este procedimiento se realiza porque la resistencia del cobre se ve afectada por la temperatura.

$$R1 = R_{AC} \times [1 + 0.0039(T_F - T_A)] \quad (20)$$

$$R1 = 2.405 \times [1 + 0.0039(40 - 25)]$$

$$R1 = 2.545$$

6.4 Ensayo de vacío

La aplicación de este ensayo es con la intención de encontrar las potencias de pérdidas en el cobre, en el hierro y por el efecto de la magnetización. Este ensayo se realiza sin ninguna carga aplicada al eje del motor, de allí su nombre. La máquina se energiza a tensión nominal y se miden los parámetros que entrega el motor bajo esta condición: Potencia absorbida en vacío P_0 , tensión de vacío V_0 , intensidad de corriente en vacío I_0 y el factor de potencia en vacío $\cos\phi_0$.

Tabla 10:

Datos medidos del ensayo de vacío

Vf1 [V]	Vf2 [V]	Vf3 [V]	i1 [A]	i2 [A]	i3 [A]	P1 [W]	P2 [W]	P3 [W]
253,7	225,7	251,8	1,886	2,032	1,883	90,65	76	50,55
228,9	231	226,1	1,662	1,799	1,587	82,21	58,73	39,14
205,9	209,4	204,8	1,445	1,603	1,444	66,05	55,58	30,61
183	186,8	182,3	1,285	1,419	1,287	53,87	46,82	27,51
160,2	162,8	158,7	1,135	1,232	1,109	44,58	37,95	24,94
139,7	139,7	135,6	0,993	1,071	0,947	38,28	29,56	22,41

114,8	115,7	112,2	0,864	0,897	0,782	33,19	21,88	20,47
91,79	92,47	89,27	0,708	0,755	0,656	26,87	19,08	17,11
69,83	68,58	66,85	0,617	0,628	0,52	22,44	15,97	15,44
51,33	47,48	47,9	0,581	0,543	0,477	18,74	13,46	15,46

Fuente: Diseño propio

Tabla 11:

Datos calculados para el ensayo de vacío

Vprom (V0) [V]	iprom (i0) [A]	P0 (P1+P2+P3) [W]	Pcu1 (3*i0²*R1) [W]	Pfe+Pmec (P0-Pcu1) [W]
243,733	1,934	217,2	28,548	188,652
228,667	1,683	180,08	21,617	158,463
206,700	1,497	152,24	17,118	135,122
184,033	1,330	128,2	13,512	114,688
160,567	1,159	107,47	10,250	97,220
138,333	1,004	90,25	7,691	82,559
114,233	0,848	75,54	5,486	70,054
91,177	0,706	63,06	3,809	59,251
68,420	0,588	53,85	2,643	51,207
48,903	0,534	47,66	2,174	45,486

Fuente: Diseño propio

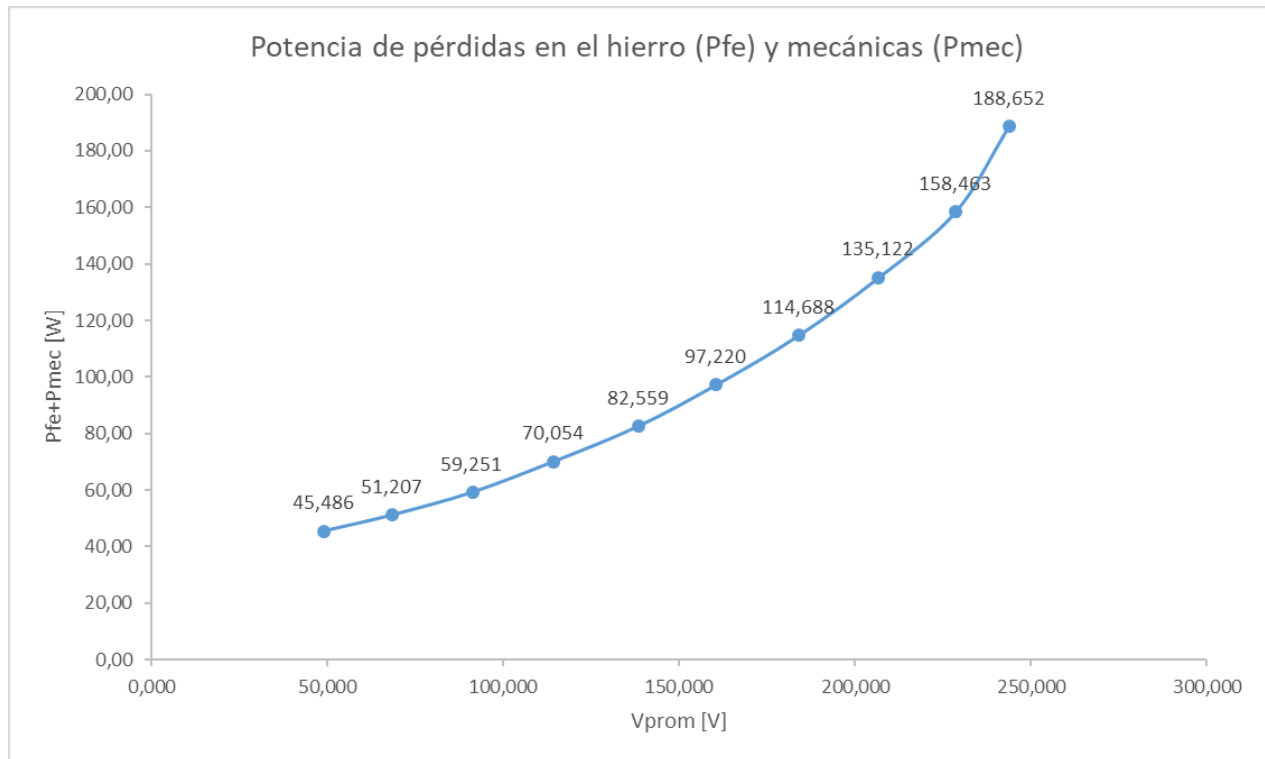


Figura 18. Curva de magnetización del motor trifásico de inducción.

Fuente: diseño propio

La línea visible en la gráfica son las pérdidas del cobre. Si continuáramos la línea desde el punto más bajo (45.486) hasta su intersección con el eje Y, llegaríamos aproximadamente a los 40 vatios. Esos 40 vatios se asumen como las pérdidas mecánicas P_{mec} .

Entonces tenemos:

$$P_{fe} + P_{mec} = 188.652 \quad (21)$$

$$P_{fe} + 40 = 188.652$$

$$P_{fe} = 188.652 - 40$$

$$P_{fe} = 148.652$$

Donde P_{fe} es potencia de pérdidas en el hierro expresada en vatios W y P_{mec} es potencia de pérdidas mecánicas expresada en vatios W

Teniendo la potencia de pérdidas en el hierro podemos obtener los parámetros totales que se buscan con el ensayo de vacío.

6.3.1 Resistencia de pérdidas en el núcleo (R_M) y la reactancia de magnetización (X_M)

$$R_M = \frac{V_0}{i_{0R}} \quad (22)$$

Donde R_M es la resistencia de pérdidas en el núcleo expresada en ohmios Ω , V_0 es el voltaje de vacío expresado en voltios V y i_{0R} es la corriente de vacío disipada en la resistencia del núcleo expresada en amperios A.

$$i_{0R} = i_0 \times \cos(\theta_M) \quad (23)$$

Donde i_0 es corriente de vacío expresada en amperios A.

$$\cos(\theta_M) = \frac{P_{fe}}{3 \times V_0 \times i_0} \quad (24)$$

$$\cos(\theta_M) = \frac{148.652}{3 \times 243.733 \times 1.934}$$

$$\cos(\theta_M) = 0.105$$

$$i_{0R} = 1.934 \times 0.105$$

$$i_{0R} = 0.20307$$

$$R_M = \frac{243.733}{0.20307}$$

$$R_M = 1200.241$$

$$X_M = \frac{V_0}{i_{0X}} \quad (25)$$

Donde X_M es la reactancia de magnetización expresada en ohmios Ω , V_0 es el voltaje de vacío expresado en voltios V y i_{0X} es la corriente de vacío disipada en la reactancia del núcleo expresada en amperios A.

$$i_{0X} = i_0 \times \sen(\theta_M) \quad (26)$$

$$\phi_M = \cos^{-1}(0.105)$$

$$\phi_M = 83.972$$

$$i_{0X} = 1.934 \times \sin(83.972^\circ)$$

$$i_{0X} = 1.923$$

$$X_M = \frac{243.733}{1.923}$$

$$X_M = 126.746$$

6.5 Ensayo de rotor bloqueado

En este ensayo se bloquea el eje del motor, de modo que este no puede estar girando. Una vez cumplida esta condición se energiza el motor desde cero voltios hasta un voltaje que nos entregue la corriente nominal del motor. Una vez en este punto medimos: Potencia monofásica absorbida P_{CC} , tensión de fase en cortocircuito U_{CC} , intensidad de corriente de fase en cortocircuito I_{CC} y el factor de potencia de cortocircuito $\cos\phi_{CC}$. Con estos datos calculamos la impedancia de cortocircuito Z_{CC} , la resistencia de cortocircuito R_{CC} y la reactancia del cortocircuito X_{CC} .

Datos rotor bloqueado	
$P_{CC} \text{ 3}\phi$ [W]	309,1
V_{CC} [V]	51,35
I_{CC} [A]	4,025

Figura 19. Datos obtenidos del ensayo de rotor bloqueado.
Fuente: diseño propio

6.4.1 Resistencia del rotor (R_2)

$$R_2 = R_{CC} - R_1 \tag{27}$$

Donde R_2 es la resistencia del rotor expresada en ohmios Ω , R_{CC} es la resistencia de cortocircuito expresada en ohmios Ω y R_1 es la resistencia el primario expresada en ohmios Ω .

$$R_{CC} = \frac{P_{CC}}{3 \times I_{CC}^2} \tag{28}$$

Donde P_{cc} es la potencia de cortocircuito expresada en vatios W, I_{cc} es la intensidad de corriente expresada en amperios A

$$R_{cc} = \frac{309.1}{3 \times 4.025^2}$$

$$R_{cc} = 6.359$$

$$R_2 = 6.359 - 2.545$$

$$R_2 = 3.814$$

6.4.2 Reactancia de magnetización del primario (X_1) y Reactancia de magnetización del secundario (X_2).

$$X_1 = X_2 = 0.5 \times X_{CC} \quad (29)$$

Donde X_1 es la reactancia de magnetización del primario expresada en ohmios Ω , X_2 es la reactancia de magnetización del secundario expresada en ohmios Ω y X_{CC} es la reactancia de magnetización en cortocircuito expresada en ohmios Ω .

$$X_{CC} = \sqrt{Z_{CC}^2 - R_{CC}^2} \quad (30)$$

Donde Z_{cc} es la impedancia de cortocircuito expresada en ohmios Ω .

$$Z_{CC} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (31)$$

Donde V_{cc} es voltaje de cortocircuito expresado en voltios V.

$$Z_{CC} = \frac{51.35}{4.025}$$

$$Z_{CC} = 12.757$$

$$X_{CC} = \sqrt{12.757^2 - 6.359^2}$$

$$X_{CC} = 11.058$$

$$X_1 = X_2 = 0.5 \times 11.058$$

$$X_1 = X_2 = 5.529$$

Hasta este punto se han obtenido todos los parámetros necesarios para la elaboración del circuito equivalente. Se realiza con los datos obtenidos de los tres ensayos aplicados al motor, ensayo de la resistencia del devanado, ensayo de rotor bloqueado y ensayo de vacío. Por lo tanto, el circuito equivalente queda de la siguiente forma.

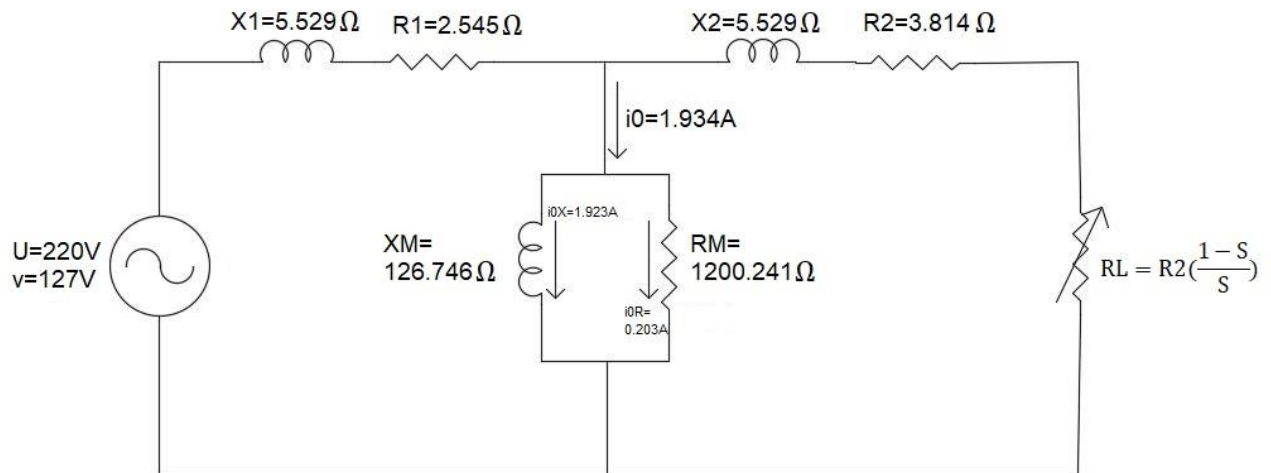


Figura 20. Circuito equivalente del motor del túnel de viento.

Fuente: Diseño propio.

De acuerdo con los valores obtenidos para el circuito equivalente, se adjunta una tabla en la que se alcanza a visualizar el comportamiento del motor a diferentes niveles de velocidad.

6.6 Configuración de la conexión del motor.

Dado que la red eléctrica disponible para la conexión del motor es trifásica 220V se procede a conectar el motor con este tipo de red. De esta forma se debe conectar el motor en configuración de bajo voltaje, según se puede comprobar en la figura 9. El siguiente es el esquema de conexión.

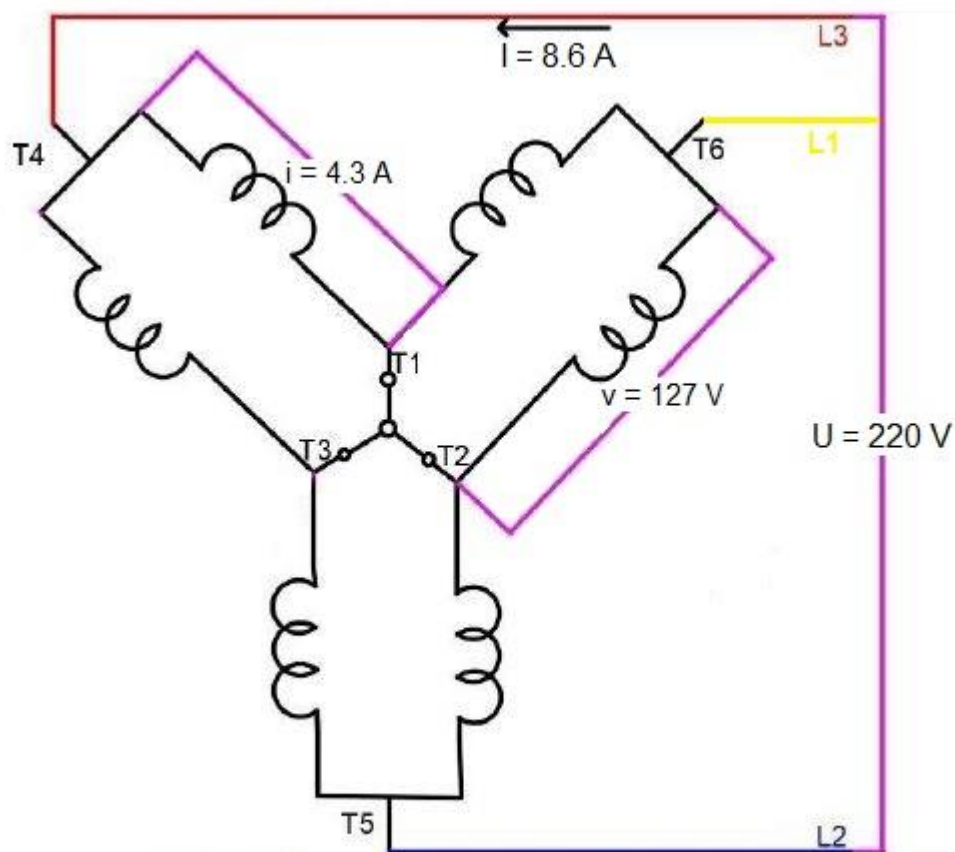


Figura 21. Esquema de conexión del motor del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo.
Fuente: diseño propio.

6.7 Diagrama del sistema eléctrico del motor

El siguiente es el diagrama de conexión que se usará para el motor que posee el túnel de viento.

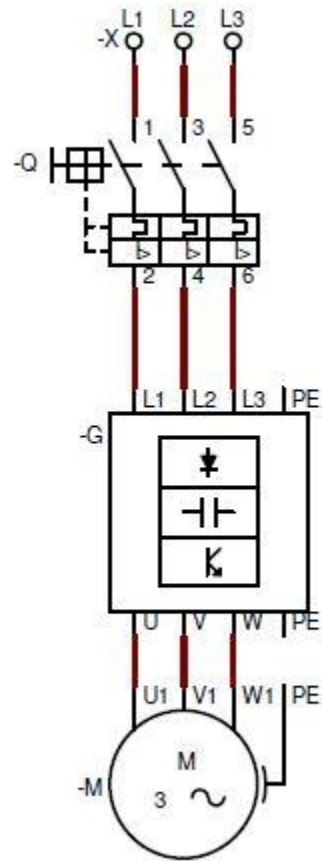


Figura 22. Diagrama eléctrico del túnel de viento de la I. U. Pascual Bravo.
Fuente: diseño propio.

7. Resultados

Tabla 12.

Resultados del proyecto.

Actividad	Semanas	xxxxxxxx
Caracterización del túnel de viento.		xx
Realización ensayo de la resistencia de devanados		xx
Realización ensayo de vacío		xx
Realización ensayo de cortocircuito		xx
Elaboración del circuito equivalente		x
Revisión del variador de frecuencia		x
Ensamble eléctrico del motor		x

Fuente. Diseño propio.

Tabla 2

Otros resultados del proyecto

Actividad	Semana	xxxxxx	xxxxxxx
Tabla Excel con parámetros del motor			xx

Fuente. Diseño propio

8. Conclusiones

La evaluación realizada al motor permite la operación de éste en sus condiciones nominales, no se considera pertinente utilizar el motor en condiciones distintas (conductores de menos calibre, protección inferior a la determinada, nivel de tensión inferior o superior) a las descritas en este trabajo.

Como se desconoce el espacio que se dispondrá para la ubicación del túnel de viento, no se ha podido calcular la caída del voltaje para efectos de cálculos del conductor alimentador. Por ello se instala en el túnel de viento un calibre más grande al que se calculó inicialmente, previniendo que la distancia de la toma de energía hasta la entrada del circuito sea muy larga.

Al motor se ensamblará una única carga y ésta carga estará siempre fija, ya que será la turbina de succión. No se ha trabajado con ésta carga ya que primero se requiere adecuar el motor para poder realizar el cálculo de la turbina a utilizar.

9. Recomendaciones

Realizar periódicamente el ensayo de la resistencia del devanado, de modo que se permita garantizar el buen estado de las bobinas.

Capacitar a las personas que requieran utilizar el túnel de viento antes de ponerlo en operación.

Ubicar el túnel de viento en un espacio óptimo para evitar molestias por ruido que se pueda generar al ensamblar la turbina al eje.

10. Referencias bibliográficas

- ABB. (s.f.). *new.abb.com*. Obtenido de <https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>
- Bustamante Osorno, J., Posada Montoya, A., Escobar Mora, N., Crispin Corzo, A., Restrepo Peláez, M., & Giraldo Álvarez, A. (2008). Caracterización de la funcionalidad de válvulas cardíacas mecánicas por medio de un túnel de viento. *Scientia Et Technica*, 453-458.
- Chapman, S. J. (s.f.). *Máquinas eléctricas tercera edición*. McGraw Hill.
- Farina, A. L. (2018). Motores eléctricos trifásicos: características constructivas y tipos de arranques. *Ingeniería eléctrica*, 82-87.
- Flores, P. A. (Junio de 2016). Diseño y construcción de un probador de resistencia de aislamiento. Ciudad Madero, Tamaulipas, México.
- Fluke Corporation. (2014). *Fluke Corporation*. Obtenido de <https://www.fluke.com/es-co/informacion/blog/motores-sistemas-de-impulsion-bombas-compresores/identificacion-y-solucion-de-problemas-comunes-en-el-variador-y-el-motor#:~:text=Las%20aplicaciones%20del%20motor%20y,que%20fue%20dise%C3%B1ado%20el%20equipo>.
- Mejía, A. M. (26 de Octubre de 2012). *e-archivo.uc3m.es*. Obtenido de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/15901#preview>
- Pineda Sánchez, M. (2012). <http://www.upv.es/es>. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17108/Caracterizaci%C3%B3n%20y%20c%C3%A1lculo%20del%20circuito%20equivalente%20de%20un%20motor%20de%20inducci%C3%B3n%20desde%20la%20placa%20de%20caracter%20c%C3%A1sticas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Prada y Nogueira, I. (2006). El túnel de viento como herramienta de ensayo aerodinámico en la Fórmula 1. *Anales de mecánica y electricidad*, 8-14.
- Quiroga, J. E. (2009). Detección de cortocircuito en el devanado de un motor sincrónico de imanes permanentes usando corriente de secuencia negativa en dominio tiempo. *Ingeniería e investigación*, 48-52.
- Quispe González, C., Urchuhuaranga Esteban, W., & Chiroque Baldera, J. (2014). Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades. *Revista de investigación de física*, 1-12.

WEG. (2016). *www.weg.net*. Obtenido de

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf9/hcf/WEG-WMO-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>

11. Anexos

Anexo A. Tabla de comportamiento del motor a diferentes velocidades.

Nr [RPM]	i1 [A] = I	ϕ i1(grados)	Pcu [W]	i2 [A]
1E-12	13,80518525	-68,28686879	1862,596958	6,517570727
200	13,6677715	-67,9818092	1796,138385	6,362337812
400	13,49348689	-67,67237795	1712,376055	6,157651185
600	13,26986195	-67,39109204	1606,462204	5,881788687
800	12,98130885	-67,20921221	1473,797159	5,501721063
1000	12,61223598	-67,27549534	1313,882023	4,967902888
1200	12,15956349	-67,8794204	1140,607819	4,21033776
1400	11,66670629	-69,49745653	998,1515407	3,146021429
1600	11,27905623	-72,59744445	944,1177115	1,721007495
1740	11,19950284	-75,53642966	954,4267911	0,53614303

Nr [RPM]	Tu [Nm]	Eficiencia [%]
1E-12	2,56320694	1,3794E-14
200	2,751047387	2,951327903
400	2,945944847	6,318184402
600	3,136739707	10,14004068
800	3,294013255	14,40381265
1000	3,3575103	18,94102883
1200	3,214903757	23,15816365
1400	2,690301288	25,33421643
1600	1,604850111	20,92151344
1740	0,510196972	8,722912319

Las celdas en verdes significan que son los datos nominales del motor.