



Diseño y simulación de banco de pruebas para medir la eficiencia de un motor eléctrico

Farid Sinisterra Rengifo

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Guadalajara de Buga, Colombia

2020

Diseño y simulación de banco de pruebas para medir la eficiencia de un motor eléctrico

Farid Sinisterra Rengifo

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director (a):

Ph.D Rafael María Hurtado Barrera

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Guadalajara de Buga, Colombia

2020

Dedicatoria

La presente tesis está dedicada a Dios, ya que gracias a él he logrado concluir mi carrera.

A mis padres, porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona.

A mis hermanos, abuelos y tías por impulsarme y acompañarme en mi proceso de aprendizaje, a mi hijo por ser mi mayor motivación para no rendirme.

A la mujer de mi vida por sus palabras y confianza, por su amor y brindarme el tiempo necesario para realizarme profesionalmente, a mis amigos, compañeros y a todas aquellas personas que de una u otra manera ha contribuido para el logro de mis objetivos

Agradecimientos

Gracias a mi universidad por haberme permitido formarme y en ella, gracias a todas las personas que fueron participes de este proceso, ya sea de manera o indirecta gracias a todos ustedes.

Gracias a la ingeniería Adriana López Vargas por brindarme sus conocimientos y acompañamiento en mi formación como ingeniero.

No ha sido fácil llegar hasta aquí, pero gracias a sus aportes y apoyo, lo difícil de lograr este objetivo ha sido menos notorio. Agradezco y hago presente mi gran afecto hacia ustedes.

Resumen

En la actualidad se le da mucho valor al desarrollo de proyectos en tecnologías limpias con el fin de mitigar el impacto ambiental y es aquí donde radica la importancia del término eficiencia. Para medir la eficiencia de un motor eléctrico es posible siguiendo muchas metodologías, pero se requiere que la línea de producción se detenga. La eficiencia al ser una medición indirecta se requiere la adquisición de algunas variables como la potencia de entrada y la potencia de salida, por lo tanto, también se requiere toda la información necesaria para la comprensión de las variables implicadas en dichas mediciones.

En el presente trabajo de grado se describe el diseño y simulación de un banco para la medición de eficiencia de motores eléctricos según metodologías poco invasivas en la línea de producción con el fin de contribuir a la formación de los estudiantes. Para ello se determinan las condiciones, limitaciones y requerimientos de diseño, antes del cálculo y selección de los elementos. También se presenta el desarrollo del software empleado, la guía de uso y las especificaciones de operación. Este proyecto busca beneficiar a los estudiantes de ingeniería y tecnología de la FIMEB sede Buga y visitantes del laboratorio, donde se pueda tener una visión diferente sobre la importancia de tener motores eficientes.

PALABRAS CLAVE: Banco de pruebas, eficiencia en motores, motores de inducción, método de deslizamiento.

Abstract

Currently, a lot of value is placed on the development of projects in clean technologies in order to mitigate the environmental impact and this is where the importance of the term efficiency lies. To measure the efficiency of an electric motor it is possible by following many methodologies, but it requires that the production line be stopped. efficiency, being an indirect measurement, requires the acquisition of some variables such as input power and output power, therefore, all the necessary information is also required to understand the variables involved in said measurements.

This degree work describes the design and simulation of a bench for measuring the efficiency of electric motors according to minimally invasive methodologies in the production line in order to contribute to the training of students. For this, the conditions, needs and design requirements are determined, before the calculation and selection of the elements. The development of the software used, the user guide and the operation specifications are also presented. This project seeks beneficiaries to the engineering and technology students of the Buga headquarters FIMEB and visitors to the laboratory, where they can have a different vision on the importance of having efficient engines.

Keywords: Test bench, efficiency in motors, induction motors, slip method.

Contenido

Resumen	5
Abstract	6
Contenido	7
Lista de figuras	9
Lista de tablas	12
Lista de Símbolos y abreviaturas	13
Símbolos con letras latinas	13
Introducción	14
1. Marco conceptual	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivos	16
1.3 Justificación	17
1.4 Motores eléctricos	17
1.5 Principio de funcionamiento	20
1.6 Motores asíncronos trifásicos. Tipos y sistemas de arranque	21
1.6.1 Motores trifásicos	21
1.6.2 Tensiones e intensidades en el estátor de los motores trifásicos	22
1.6.3 Puesta en marcha de un motor eléctrico	23
1.7 Motores monofásicos	29
1.7.1 Tipos de conexión	30
1.7.2 Principio de funcionamiento	32
1.8 Eficiencia de un motor eléctrico	36
1.8.1 Cómo medir la eficiencia eléctrica.	37
1.9 Pérdidas en un motor eléctrico	37
1.10 Plan Energético Nacional (PEN	39

1.11	Metodologías para la determinación de la eficiencia	41
1.11.1	Método de deslizamiento para cálculo de carga.	42
1.11.2	Método estándar de placa del motor.	42
1.11.3	Método estándar de corrientes.	42
1.11.4	Método del deslizamiento.	43
1.11.5	Método de pérdida segregada	44
1.11.6	Comparación las cifras de eficiencia entre el antiguo y nuevo estándar	45
1.12	Banco de pruebas para medir la eficiencia de un motor eléctrico	45
1.14	Bancos de pruebas como trabajos de Grado	47
2.	Metodología	51
2.1	Diseño del software	51
2.2	Condiciones y requerimientos de diseño	52
3.	Pruebas y resultados	65
3.1	Prueba 1	65
3.2	Prueba 2	68
3.3	Manual de usuario	72
3.3.1	Instalación del software	72
3.3.2	Iniciar aplicación	77
3.3.3	Ingreso de parámetros	78
3.3.4	Iniciar simulación y visualización de resultados	79
3.4	Diagrama y componentes sugeridos para la implementación física del banco de pruebas	83
4.	Conclusiones y recomendaciones	84
4.1	Conclusiones	84
4.2	Recomendaciones	84
	Bibliografía	85

Lista de figuras

Figura 1-1. Motor eléctrico.	19
Figura 1-2. Componentes de un motor eléctrico.	20
Figura 1-3. Motor trifásico de inducción de jaula de ardilla	21
Figura 1-4. Conexiones en los bobinados trifásicos: a) conexión estrella y b) conexión triángulo	23
Figura 1-5. Arranque directo de un motor trifásico de forma manual.	25
Figura 1-6. Interruptores trifásicos para distintas intensidades	25
Figura 1-7. Arranque estrella triángulo de un motor trifásico mediante arrancador manual	27
Figura 1-8. Arrancador estrella triángulo manual	27
Figura 1-9. Arranque de un motor trifásico mediante autotransformador	29
Figura 1-10. Arranque de un motor trifásico mediante resistencias en serie con el estator	30
Figura 1-11. Motor monofásico	31
Figura 1-12. Primer tipo de conexión en estrella.	32
Figura 1-13. conexión en paralelo de bobinas en estrella	32
Figura 1-14. Conexión tipo triángulo	33
Figura 1-15. Curva de torque en función de deslizamiento.	35
Figura 1-16. Ejemplo de placa de un motor.	36
Figura 1-17. Eficiencia en un motor eléctrico.	37
Figura 1-18. Pérdidas en un motor eléctrico.	39
Figura 1-19. Distribución de pérdidas en motor eléctrico.	40
Figura 1-20. Comparación del consumo energético a nivel industrial.	41
Figura 1-21. Medición de potencia en la entrada de un motor.	42
Figura 1-22. Requerimientos de medición de eficiencia según métodos	45

Figura 1-23. Banco de pruebas de Schabmuller	47
Figura 1-24. Software del banco de pruebas de la universidad javeriana	49
Figura 1-25. Banco de pruebas de la Universidad Javeriana de Cali.	49
Figura 1-26. Ventana del software del Fluke 438-II	51
Figura 2-1. Presentación de Labview.	52
Figura 2-2. Modelo de red neuronal	54
Figura 2-3. Ejecución de la red con los primeros 100 datos	56
Figura 2-4. Diagrama de la red a 100 iteraciones en Matlab.	56
Figura 2-5. Resultado de la red entrenada	57
Figura 2-7. Diagrama de bloques de la ejecución de la red neuronal.	59
Figura 2-8. Bloques de iteraciones de la red neuronal.	59
Figura 2-9. Diagrama de bloques del entrenamiento de la red.	60
Figura 2-10. Ventana de software	60
Figura 2-11. Parámetros del motor	61
Figura 2-12. Parámetros estimados	61
Figura 2-13. Bloque de eficiencia energética	62
Figura 2-14. Gráfica de la velocidad del motor (RPM)	63
Figura 2-15. gráfica del voltaje suministrado al motor	63
Figura 2-16. Indicador de la velocidad del motor	64
Figura 3-1. Parámetros del motor.	66
Figura 3-2. Parámetros estimados.	66
Figura 3-3. Gráfica de la velocidad (línea roja) del motor ideal vs la estimada (línea azul).	67
Figura 3-4. Gráfica de la señal de voltaje ideal vs la estimada	67
Figura 3-5. Eficiencias calculadas.	68
Figura 3-6. Parámetros del motor.	69
Figura 3-7. Parámetros estimados.	69
Figura 3-8. Gráfica de la velocidad (línea roja) del motor ideal vs la estimada (línea azul).	70
Figura 3-9. Gráfica de la señal de voltaje ideal vs la estimada.	70
Figura 3-10. Eficiencias calculadas.	71

Figura 3-19. Aplicación ejecutable	77
Figura 3-20. Ventana de software.	77
Figura 3-21. Sector para ingresar parámetros	78
Figura 3-22. Ingresar valor del voltaje de la placa del motor	78
Figura 3-23. Ingresar valor de la corriente de la placa del motor	79
Figura 3-26. Inicio de simulación	80
Figura 3-27. Visualización de los cálculos realizados por el software	80
Figura 3-28. Valores de las eficiencias calculadas por el software	81
Figura 3-29. Grafica de la velocidad alcanzada por el motor	81
Figura 3-30. Señal de voltaje estimada vs la ingresada	82

Lista de tablas

Tabla 1. Relación de intensidades de arranque y plena carga admisibles en los motores de corriente alterna para su puesta en marcha según el REBT	24
Tabla 2. Comparación las cifras de eficiencia entre el antiguo y nuevo estándar	47
Tabla 3. Muestra de los datos experimentales	55
Tabla 4. Eficiencia obtenida para dos simulaciones con los mismos parámetros de entrada	74

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
V	Voltaje	V (voltios)
V_L	Voltaje de línea	V (voltios)
V_f	Voltaje de fase	V (voltios)
I	Corriente de fase	A (Amperios)
I_f	Corriente de fase	A (Amperios)
I_L	Corriente de línea	A (Amperios)
L_n	Línea de voltaje	V (voltios)
f	Frecuencia	Hz (Hertz)
n	Velocidad sincrónica	RPM
V_s	Velocidad sincrónica	RPM
V_r	Velocidad del rotor	Rad/seg
P	Potencia	W (Vatios)
R	Resistencia	Ohmios

Introducción

En la actualidad se vive una problemática global que involucra al sector industrial y energético, como lo es el cambio climático. Por esta razón se proyecta buscar el desarrollo de tecnologías limpias basadas en energías renovables tales como la eólica, solar, hidroeléctrica, geotérmica, entre otras. La eficiencia energética en los equipos que se manipulan en la vida cotidiana hace parte de estas tecnologías.

Los motores eléctricos son de los equipos más importantes y utilizados en el área industria, aproximadamente entre el 60 y 70% de la demanda de energía eléctrica en una industria proviene de los motores eléctricos (Galindo, 2010). Por esta razón conocer que tan eficiente es este equipo servirá para definir mejoras con el fin de mitigar ese impacto ambiental.

Teniendo en cuenta esto, se desarrolló un software con la capacidad de simular los resultados posibles de la eficiencia de motores eléctricos, partiendo de un cálculo anticipado de las variables a captar, las estimadas y las correlacionadas, todo esto a partir de los datos experimentales recolectados. Se detalló el procedimiento de los datos obtenidos a partir de los procesados y las herramientas analíticas necesarias para estimación de resultados lo más acertados posibles basados en las posibilidades calculadas para cada caso.

1. Marco conceptual

1.1 Planteamiento del problema

Los motores eléctricos presentan un fuerte impacto de consumo de energía en el sector industrial, por ello, es importante identificar y evaluar oportunidades que permitan el ahorro de energía de los mismos. Existen métodos y estrategias estándares para analizar y medir la eficiencia en un motor eléctrico. Dos de ellos han sido establecidos por instituciones como la IEC (en inglés, International Electrotechnical Commission) y la IEEE (en inglés, Institute of Electrical and Electronics Engineers) que requieren de un procedimiento que no es conveniente en todos los casos, ya que es necesario que el motor este desmontado del proceso en el cual está involucrado. Como consecuencia, esto puede generar pérdidas en la producción, representadas en tiempo y dinero.

Se estima que entre el 41% y el 43% de energía eléctrica a nivel mundial es consumida por el sector industrial, generando el 41% de total de emisiones de CO₂ en el mundo. Es por este motivo que la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en Colombia desarrolló un plan energético nacional donde se establece como objetivo central maximizar la contribución del sector energético al desarrollo sostenible del país. Con ello se promueve la utilización de máquinas más eficientes en consumo de energía con el fin de disminuir la emisión de gases y la reducción del impacto ambiental (Galindo, 2010).

Por esta razón, es necesario que el consumo de energía por motores eléctricos sea racional. Son los profesionales los encargados de velar por su buen funcionamiento, por lo que deben estar en capacidad de determinar su eficiencia de forma confiable. Además, es conveniente que pueda plantear soluciones cuando esa eficiencia no sea la esperada, ayudando a la industria a cumplir con las metas de eficiencia energética. En este proyecto, se propone el diseño y la implementación de un banco de pruebas que permitirá estudiar con profundidad suficiente las metodologías para la determinación de esa eficiencia según la norma IEEE. Con ello se demostrará la confiabilidad y rigurosidad necesaria en las mediciones.

1.2 Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Diseñar software que pueda simular un banco de pruebas para medir la eficiencia de un motor eléctrico según la Norma IEEE 112.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones y requerimientos de diseño del software.
- Simular el banco y verificar su funcionalidad respecto a las especificaciones de los motores.
- Estimar y sugerir los elementos que puedan integrar un banco de pruebas a partir de los resultados obtenidos del software.

1.3 Justificación

En la actualidad, Colombia continúa avanzando en su proceso de transformación energética, en la que busca la utilización de más recursos renovables. Para 2050, Colombia tiene como objetivo generar el 100% de su electricidad a partir de energías renovables. Para ello, debe aprovechar sus recursos naturales, representados principalmente en energías solar, eólica y de biomasa (Galindo, 2010). No obstante, también se trata de hacer un uso racional de toda la energía, tanto la actual como la futura. Así, la eficiencia energética hace las veces de una fuente adicional de energía.

El contar con un banco de pruebas de este tipo en la sede Buga permitirá a los estudiantes de la facultad de ingeniería, comprender y ejecutar efectivamente las metodologías de diagnóstico y medición de la eficiencia eléctrica en motores eléctricos. Esto debido a que es una situación a la que podrá enfrentarse con mayor confianza en su carrera profesional en la industria y en otros sectores. Cada vez más, se requiere de personal esté capacitado en eficiencia energética, en la cual se busca aprovechar mejor la energía y buscar ahorro económico en pro del medio ambiente.

1.4 Motores eléctricos

Un motor eléctrico (figura 1-1) es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en mecánica, de manera que puede impulsar el funcionamiento de una máquina. Los motores eléctricos se categorizan dependiendo el tipo de corriente (corriente alterna o corriente continua), velocidad de giro (síncronos y asíncronos), su número de fases (monofásicos, bifásicos y trifásicos) y el tipo de rotor (anillos rozantes, con colector, y jaula de ardilla). En la industria el tipo de motor más común es el trifásico de inducción de jaula de ardilla (Figura 1-2) debido a su sólida construcción y funcionamiento confiable.

Figura 1-1. Motor eléctrico.



Fuente: DE, E., ENERGÉTICA, E., ELÉCTRICOS, M., EL SALVADOR, I. N., DE, P. D. L., NO, E. R., & DE, C. T. F. (2018). Motores eléctricos.

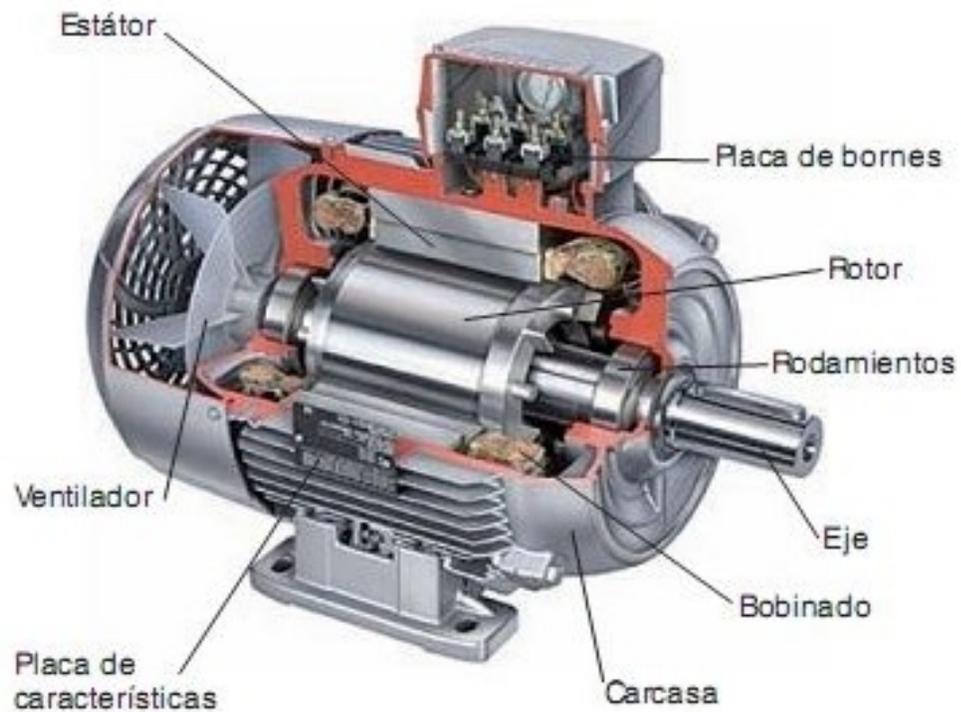
Los motores eléctricos de corriente alterna asíncronos, monofásicos, bifásicos y/o trifásicos, tienen una aplicación más generalizada debido a su facilidad de utilización, pocos mantenimientos y bajo costos de fabricación. [1]

A continuación, se describen los componentes principales de un motor eléctrico (Keljik, 2009).

- **Rotor.** Es la pieza giratoria del motor que consiste en ranuras o laminaciones de acero dispuestas en un núcleo cilíndrico.
- **Estator.** Un estator cuenta con un arrollamiento trifásico montado en las ranuras de un núcleo laminado en acero. Es aquella parte fija que se encuentra alrededor del rotor.
- **Cojinetes.** Su función principal es reducir la fricción que se produce entre el eje y las piezas que están montadas sobre este.

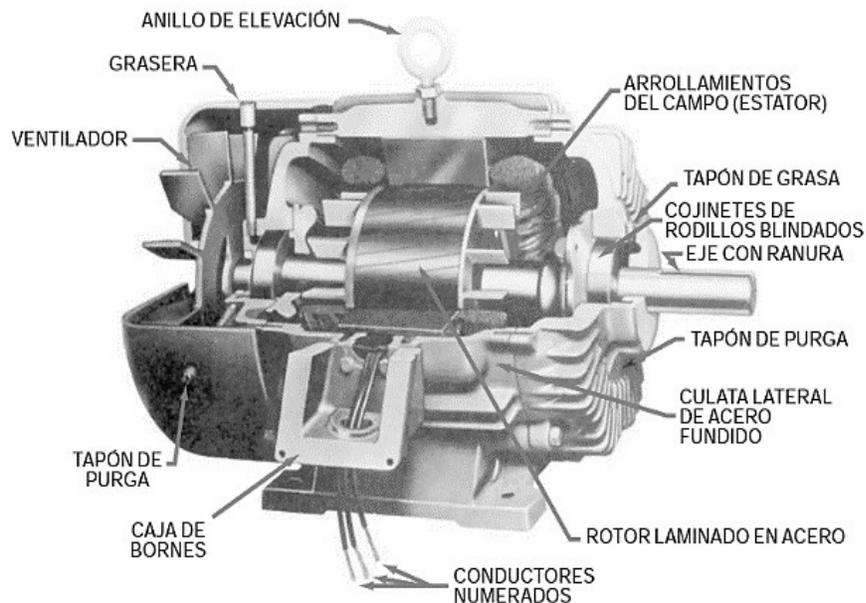
- **Carcasa.** Es la parte que cubre y protege tanto al rotor como al estator, el material empleado para su fabricación depende del tipo de motor, diseño y su aplicación.

Figura 1-2. Componentes de un motor eléctrico.



Fuente: DE, E., ENERGÉTICA, E., ELÉCTRICOS, M., EL SALVADOR, I. N., DE, P. D. L., NO, E. R., & DE, C. T. F. (2018). Motores eléctricos.

Figura 1-3. Motor trifásico de inducción de jaula de ardilla.



Fuente: DE, E., ENERGÉTICA, E., ELÉCTRICOS, M., EL SALVADOR, I. N., DE, P. D. L., NO, E. R., & DE, C. T. F. (2018). Motores eléctricos.

1.5 Principio de funcionamiento

El funcionamiento del motor asíncrono de inducción está basado en la acción del flujo giratorio generado en el circuito estatórico sobre las corrientes que son inducidas por dicho flujo en el circuito del rotor. El flujo giratorio generado por el bobinado del estator corta los conductores del rotor, por ello se generan fuerzas electromotrices inducidas. Suponiendo que está cerrado el bobinado rotórico, es de entender que sus conductores serán recorridos por corrientes eléctricas. La acción mutua del flujo giratorio y las corrientes existentes en los conductores del rotor originan fuerzas electrodinámicas sobre los propios conductores que arrastra al rotor haciéndolo girar (Ley de Lenz). [2]

La velocidad de rotación del rotor en los motores eléctricos asíncronos de inducción siempre es inferior a la velocidad del flujo giratorio, para que se logre generar la fuerza electromotriz en los conductores del rotor debe existir un movimiento relativo entre los conductores y el flujo giratorio. La diferencia entre la velocidad del flujo giratorio y del rotor se le llama deslizamiento.

1.6 Motores asíncronos trifásicos. Tipos y sistemas de arranque

En los motores asíncronos de inducción la velocidad de giro del rotor es mucho menor a la velocidad que hay en el sincronismo. Estos pueden ser monofásicos como trifásicos.

1.6.1 Motores trifásicos

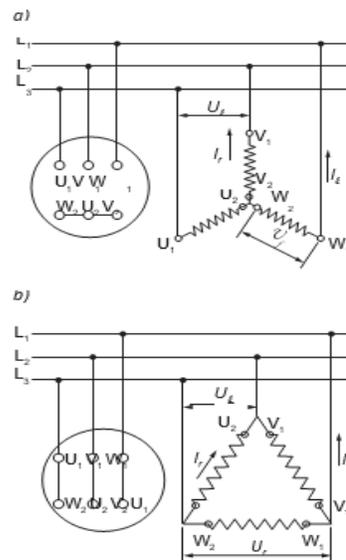
Son motores donde el bobinado inductor colocado en el estator está formado por tres bobinados independientes desplazados 120° eléctricos entre sí y alimentados por un sistema trifásico de corriente alterna. Se pueden encontrar de dos tipos:

- Rotor en cortocircuito (jaula de ardilla).
- Rotor bobinado.

1.6.2 Tensiones e intensidades en el estátor de los motores trifásicos

Todos los tipos de bobinado trifásico se pueden conectar en estrella (todos los finales conectados en un punto común, energizando el sistema por los otros extremos libres) o bien en triángulo (conectando el final de cada fase al principio de la fase siguiente, energizando el sistema por los puntos de unión), como se puede apreciar en la Figura 1-4. En el instante del arranque este motor acoplado directamente a la red presenta un momento de rotación de 1,8 a 2 veces el de régimen, pero la corriente absorbida en el arranque toma valores de 5 a 7 veces la nominal.

Figura 1-4. Conexiones en los bobinados trifásicos: a) conexión estrella y b) conexión triángulo



Fuente: Cembranos Nistal, F. J. (1999). Automatismos eléctricos, neumáticos e hidráulicos. Editorial Paraninfo, Madrid.

- En la conexión estrella, la corriente que recorre cada fase concuerda con la corriente de línea, mientras que la tensión que se suministra a cada fase es $\sqrt{3}$ menor que la tensión de línea.
- En la conexión triángulo la corriente que recorre cada fase es $\sqrt{3}$ menor que la corriente de línea, mientras que la tensión a la que queda sometida cada fase coincide con la tensión de línea.

Conexión estrella: $V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$, $I_f = I_L$

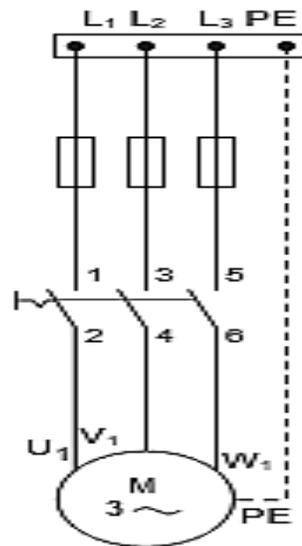
Conexión triángulo: $V_f = V_L$, $I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$

Para estas condiciones, el motor se puede considerar como bitensión, debido que los voltajes nominales son de 230 o 400 V. Si un motor está diseñado para funcionar una tensión de 230 V cada fase, se podría conectar a la red de 230 V en triángulo y a la red de 400 V en estrella. Para ambos casos, el voltaje aplicado a cada fase sería de 230 V. En una y otra conexión, permanecen invariables los parámetros de potencia, par motor y velocidad.

1.6.3 Puesta en marcha de un motor eléctrico

La puesta en marcha se realiza de forma simple sencilla mediante un interruptor manual tripolar (Figura 1-5). Estos interruptores han de estar diseñados para la corriente del motor (véase la Figura 1-6). El Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (REBT) en su instrucción ITC-BT-47 regula la relación que debe existir entre las corrientes eléctricas de arranque y plena carga de los motores alimentados desde una red pública en función de su potencia. Esta relación de proporcionalidad se desprende que los motores de potencias superiores a 0,75 kW que no cumplan la relación de intensidades expuesta en la tabla 1, han de disponer de un sistema de arranque que disminuya esa relación. [3]

Figura 1-5. Arranque directo de un motor trifásico de forma manual.



Fuente: Cembranos Nistal, F. J. (1999). Automatismos eléctricos, neumáticos e hidráulicos. Editorial Paraninfo, Madrid.

Figura 1-6. Interruptores trifásicos para distintas intensidades



Fuente: Murillo, W. (2016). Mantenimiento predictivo para motores eléctricos. Obtenido de <https://docplayer.es/4601174-Mantenimiento-predictivopara-motores-electricos-ing-william-murillo.html>.

Tabla 1. Relación de intensidades de arranque y plena carga admisibles en los motores de corriente alterna para su puesta en marcha según el REBT

Potencia nominal del motor de corriente alterna	Constante máxima de proporcionalidad entre la intensidad de arranque y plena carga
De 0,75 a 1,5 kW	4,5
De 1,5 a 5,0 kW	3,0
De 5,0 a 15,0 kW	2,0
De más de 15,0 kW	1,5

Fuente: Arocas Maiquez, D. (2018). Instalación, puesta en marcha y desarrollo de un sistema de adquisición de datos de un nuevo diseño de torre de refrigeración de tiro mecánico.

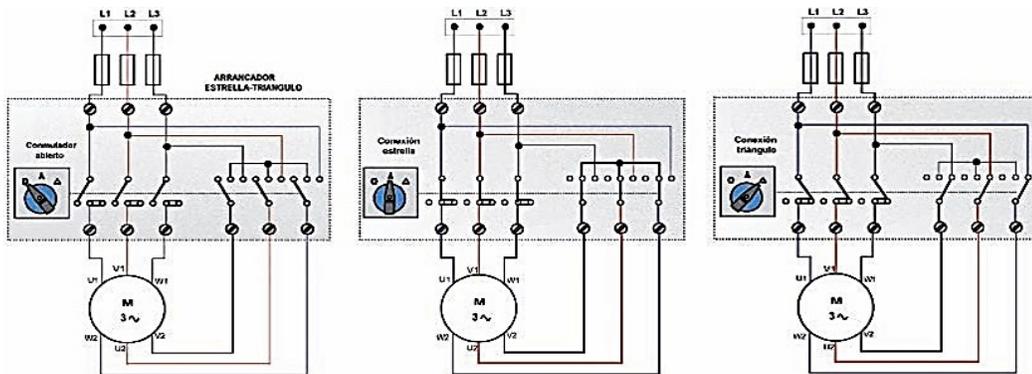
La corriente inicial en el momento del arranque del motor que no cumpla esta relación puede generar que salten las protecciones o que se perjudiquen las líneas que los energizan. Para evitar estos inconvenientes se disminuye el voltaje en el periodo de arranque con el fin de disminuir la corriente, y una vez alcanzada la velocidad de régimen se conecta el motor a su voltaje nominal, con lo que se logra amortiguar la corriente de arranque. Para conseguir esto se utilizan los siguientes procedimientos:

- Arranque estrella triángulo.
- Arranque mediante autotransformador.
- Arranque mediante resistencias en serie con el bobinado estático.

- **Arranque estrella triángulo**

El procedimiento más utilizado para el arranque de motores trifásicos de rotor en cortocircuito con relaciones superiores a la expuesta en la tabla 1 consiste en conectar el motor en estrella durante el periodo de arranque, en cuanto inicie el estado transitorio conectarlo en triángulo para que quede conectado al voltaje nominal.

Figura 1-7. Arranque estrella triángulo de un motor trifásico mediante arrancador manual.



Fuente: Sobrevila, M. A., & Farina, A. L. (1975). Instalaciones eléctricas. TECNIBOOK EDICIONES.

Figura 1-8. Arrancador estrella triángulo manual.



Fuente: Murillo, W. (2016). Mantenimiento predictivo para motores eléctricos. Obtenido de. <https://docplayer.es/4601174-Mantenimiento-predictivopara-motores-electricos-ing-william-murillo.html>.

Este conmutador posee tres posiciones: la inicial de desconexión, la siguiente que conecta los bobinados del motor en estrella y la tercera que conecta los bobinados en triángulo. La parada se hace de forma inversa, como se puede ver en el esquema de la Figura 1-7.

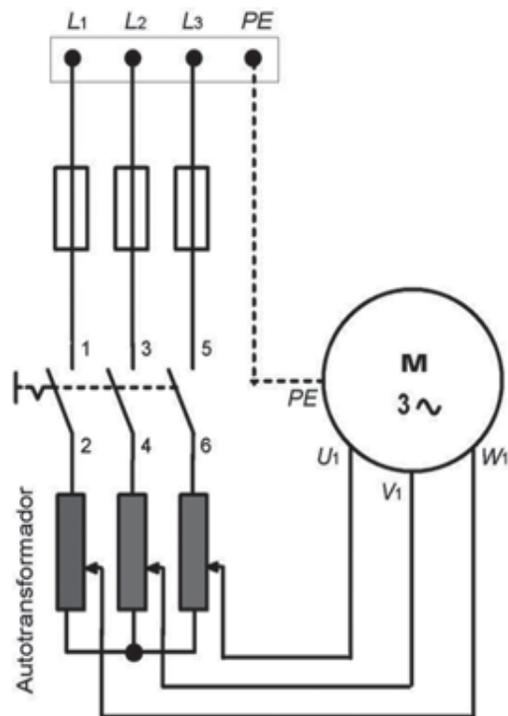
En el mercado se pueden encontrar distintos modelos de conmutadores para distintas intensidades. En la Figura 1-8 vemos un arrancador estrella triángulo denominado de paquete. Para poder utilizar este método, es necesario que el motor pueda funcionar en conexión triángulo a la tensión de la red. En consecuencia, cuando en el arranque se conecta en estrella, cada fase queda sometida a una tensión $\sqrt{3}$ menor que la de línea y, por lo tanto, la corriente que circula por ella es también $\sqrt{3}$ menor que si estuviese conectado en triángulo. [4].

Teniendo en cuenta que si se conecta en triángulo la corriente en la línea es $\sqrt{3}$ mayor que la de fase, mientras que en estrella son iguales, resulta que el mismo motor arrancado en estrella consume una corriente 3 veces menor que si se conecta en triángulo. Por esta misma razón, el momento de rotación también se reduce en un tercio.

- **Arranque mediante autotransformador**

Es un procedimiento que se utiliza para motores de gran potencia y consiste en intercalar entre la red de alimentación y el motor un autotransformador, como se ve de forma esquemática en la Figura 1-9 Este tiene distintas tomas de tensión reducida, por lo que, en el momento del arranque, al motor se le aplica la tensión menor disminuyendo la corriente y se va elevando de forma progresiva hasta dejarlo conectado al voltaje de la red.

Figura 1-9. Arranque de un motor trifásico mediante autotransformador.

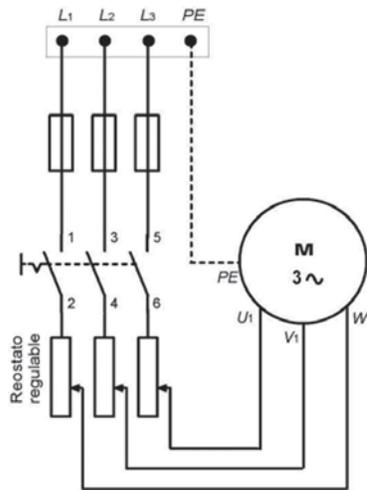


Fuente: Torrens, P. C. (2005). Máquinas eléctricas: Aplicaciones de ingeniería eléctrica a instalaciones navales y marinas. Prácticas (Vol. 94). Universidad Politécnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica.

- **Arranque con resistencias en serie con el bobinado del estator**

Es un procedimiento poco empleado que consiste en disponer un reóstato variable en serie con el bobinado estatórico. La puesta en marcha se hace con el reóstato al máximo de resistencia y se va disminuyendo hasta que el motor queda conectado a la tensión de red. Su representación de forma esquemática se puede apreciar en la Figura 1-10.

Figura 1-10. Arranque de un motor trifásico mediante resistencias en serie con el estator



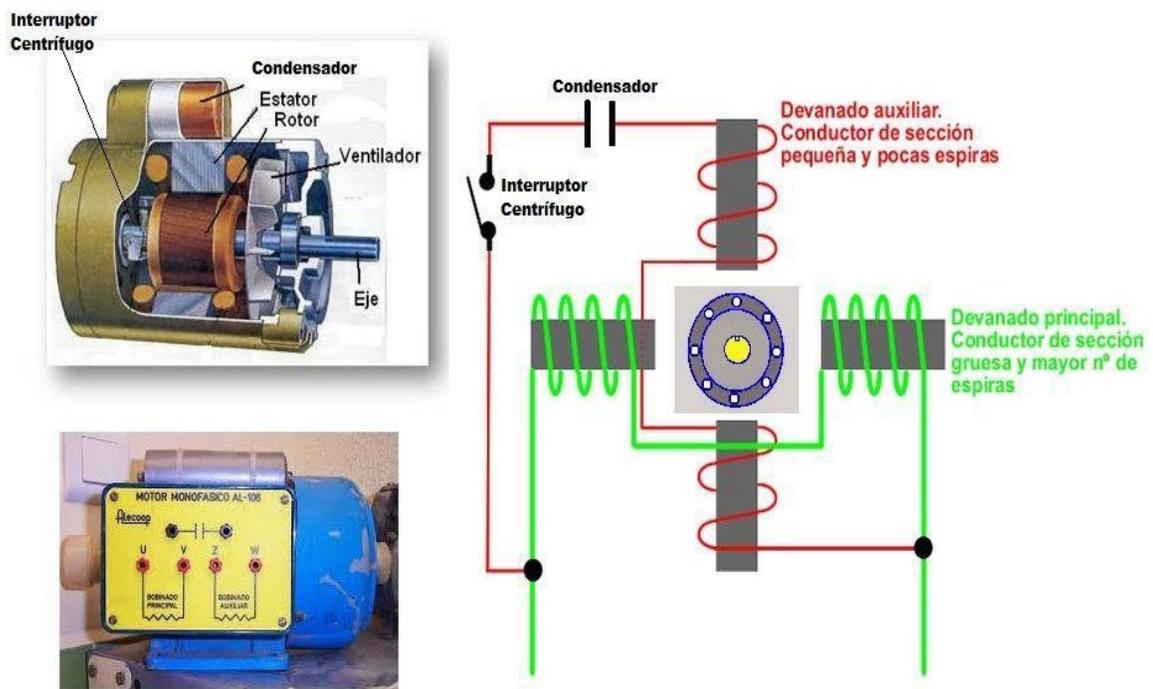
Fuente: Torrens, P. C. (2005). Máquinas eléctricas: Aplicaciones de ingeniería eléctrica a instalaciones navales y marinas. Prácticas (Vol. 94). Universidad Politécnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica.

1.7 Motores monofásicos

Un motor monofásico es una máquina rotativa alimentada eléctricamente, capaz de transformar la energía eléctrica en mecánica. Funciona a través de una fuente de potencia monofásica. En el cableado se puede encontrar dos tipos de cables: uno caliente y otro neutro. Poseen una potencia de hasta 3 Kw y los voltajes de alimentación varían al unísono. Dispone únicamente de una tensión alterna. El circuito funciona con dos hilos y la corriente que circula por ellos es siempre la misma. En la mayoría de los casos se trata de motores de reducido tamaño con un par de potencia pequeño. Sin embargo, existen motores monofásicos, con una potencia de hasta 10 hp que pueden llegar a funcionar con conexión de hasta 440V. En la figura 1-11 se ilustran los componentes de un motor monofásicos, No producen un campo magnético rotatorio, solo pueden crear un campo alterno, por lo que necesita de un condensador para el arranque.

Este tipo de motores son utilizados principalmente en hogares, oficinas, tiendas y empresas pequeñas no industriales. Entre sus usos más comunes destacan electrodomésticos, refrigeración comercial y doméstica, ventilación, calefacción, y otros utensilios como taladros, máquinas de aire acondicionado y sistemas de apertura y cierre de puertas de parking. [5].

Figura 1-11. Motor monofásico



Fuente: Prado Iratchet, S., Pinzón, A., & Massa, P. A. (2011). Análisis del Motor Monofásico de Polos Impresos para aplicaciones Industriales.

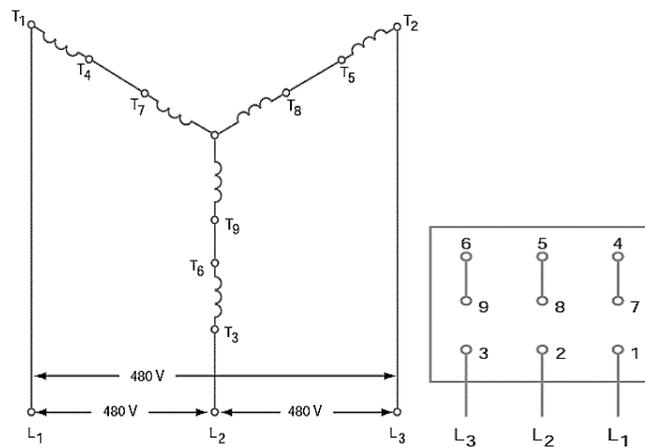
1.7.1 Tipos de conexión

Existen diferentes tipos de conexión para la puesta en marcha de los motores monofásicos.

- **Conexión tipo estrella**

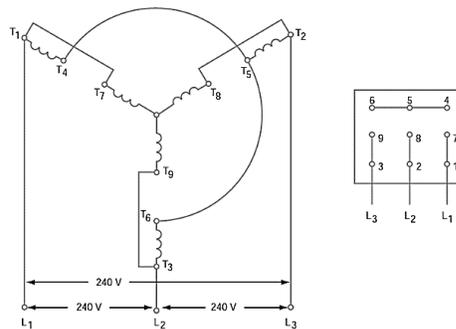
Un motor conectado en estrella puede ser utilizado para los motores trifásicos de 240 voltios como para los de 480 voltios. Por ejemplo, las siguientes figuras muestran varios tipos de conexión en estrella. La Figura 1-12 muestra una conexión en estrella de 480 voltios donde las bobinas se conectan en serie. Otro ejemplo es la conexión en estrella de 240 voltios donde las bobinas se conectan en paralelo (Figura 1-13).

Figura 1-12. Primer tipo de conexión en estrella.



Fuente: Prado Iratchet, S., Pinzón, A., & Massa, P. A. (2011). Análisis del Motor Monofásico de Polos Impresos para aplicaciones Industriales.

Figura 1-13. conexión en paralelo de bobinas en estrella

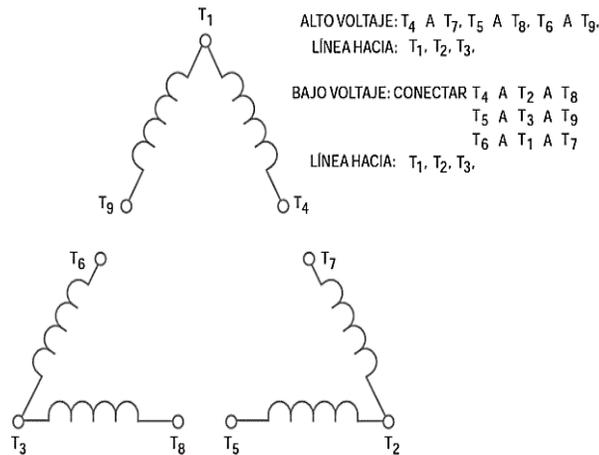


Fuente: Prado Iratchet, S., Pinzón, A., & Massa, P. A. (2011). Análisis del Motor Monofásico de Polos Impresos para aplicaciones Industriales.

- **Conexión tipo triángulo**

Otra forma de conexión para este tipo de motores es la conexión en triángulo. Esta designación proviene de que el esquema se parece al símbolo griego delta. Para realizar conexión ya sea a 480 o 240 voltios se modifica la conexión de sus puntos (Figura 1-14).

Figura 1-14. Conexión tipo triángulo



Fuente: Prado Iratchet, S., Pinzón, A., & Massa, P. A. (2011). Análisis del Motor Monofásico de Polos Impresos para aplicaciones Industriales.

1.7.2 Principio de funcionamiento

Las ranuras del núcleo del estator contienen tres arrollamientos monofásicos separados. Cuando las tres corrientes separadas 120 grados eléctricos atraviesan estos enrollamientos, el resultado es un campo magnético giratorio. Este campo se desplaza alrededor del interior del núcleo del motor. La velocidad del campo magnético giratorio se denomina velocidad sincrónica y se determina así:

$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (1)$$

Donde n es la velocidad sincrónica en rpm, f es la frecuencia en Hertz y P es el número de polos del estator por fase. Mientras el campo magnético gira a velocidad sincrónica, induce voltajes en las barras del arrollamiento de jaula de ardilla. Estos voltajes inducidos establecen corrientes en las barras del rotor, las cuales a su vez crean un campo en el núcleo del rotor. El campo del rotor reacciona con el campo del estator para generar un efecto de torsión, o torque que hace girar al rotor (Keljik, 2011). [6].

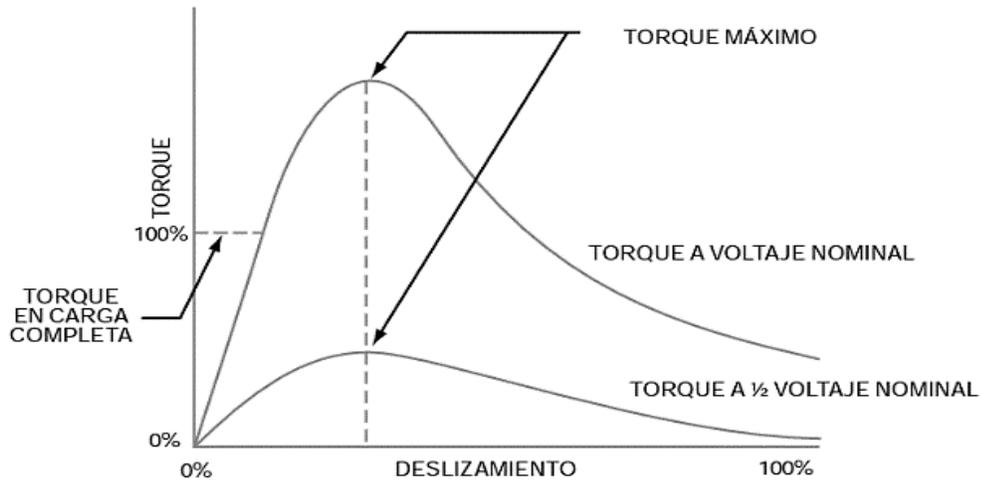
- **Porcentaje de deslizamiento**

El desempeño de la velocidad se mide en términos del porcentaje de deslizamiento (%D). La velocidad del rotor a carga completa se deduce de la velocidad sincrónica del campo del estator, la diferencia es el número de revoluciones por minuto en que el rotor se desliza detrás del campo magnético del estator.

$$\%D = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100 \quad (2)$$

Donde V_s es la velocidad sincrónica y V_r es la velocidad del rotor. El rango promedio de deslizamiento de un motor de inducción de jaula de ardilla está comprendido entre 2 al 6 por ciento.

Figura 1-15. Curva de torque en función de deslizamiento.



Fuente: Quispe, E. C., & Mantilla, L. F. (2004). Motores eléctricos de alta eficiencia: características electromecánicas, ventajas y aplicabilidad. *Energía y Computación*, 12(1).

- **Corriente de arranque**

La mayoría de los motores de inducción de jaula de ardilla se arrancan con voltaje máximo. El transitorio de la corriente de arranque alcanza momentáneamente un 400 a 1000 por ciento o más de la corriente nominal con carga máxima.

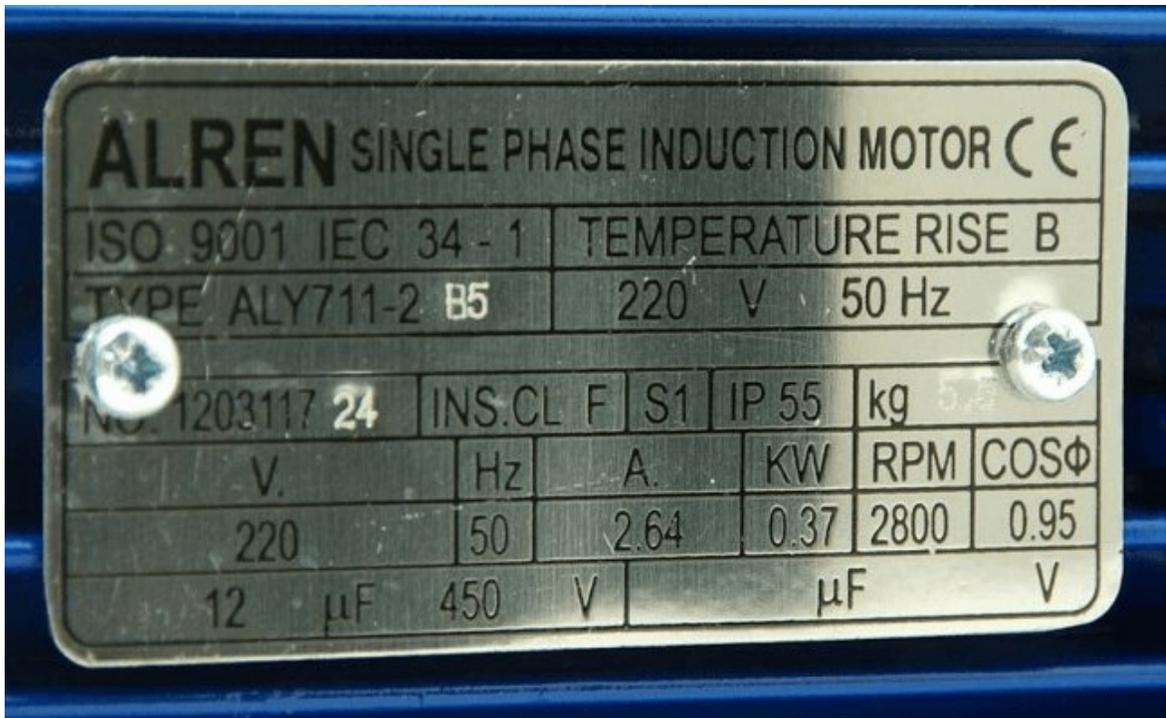
- **Factor de Potencia**

El factor de potencia de un motor de inducción de jaula de ardilla sin carga y bajo condiciones de cargas pequeñas es de un 15 por ciento en atraso. Con carga nominal, el factor de potencia es elevado, como 85 a 90 por ciento en atraso.

- **Placa de un motor eléctrico**

Las placas de identificación de un motor brindan información vital para la selección e instalación adecuada de un motor. Describe el nombre del fabricante, el tipo de motor, número de serie (similar a cedula de una persona), el número de modelo, el tamaño de la culata, factor de servicio, voltaje para los cuales se diseñó el motor, corriente entregada cuando funciona a la potencia máxima, la clase de aislamiento, las rpm, la frecuencia en Hertz, la temperatura ambiente a la cual el motor puede funcionar para transmitir potencia nominal, número de fases, kVA, eficacia, las notas del fabricante (protección térmica y/o tipo de cojinetes) y la letra de diseño.[7]

Figura 1-16. Ejemplo de placa de un motor.

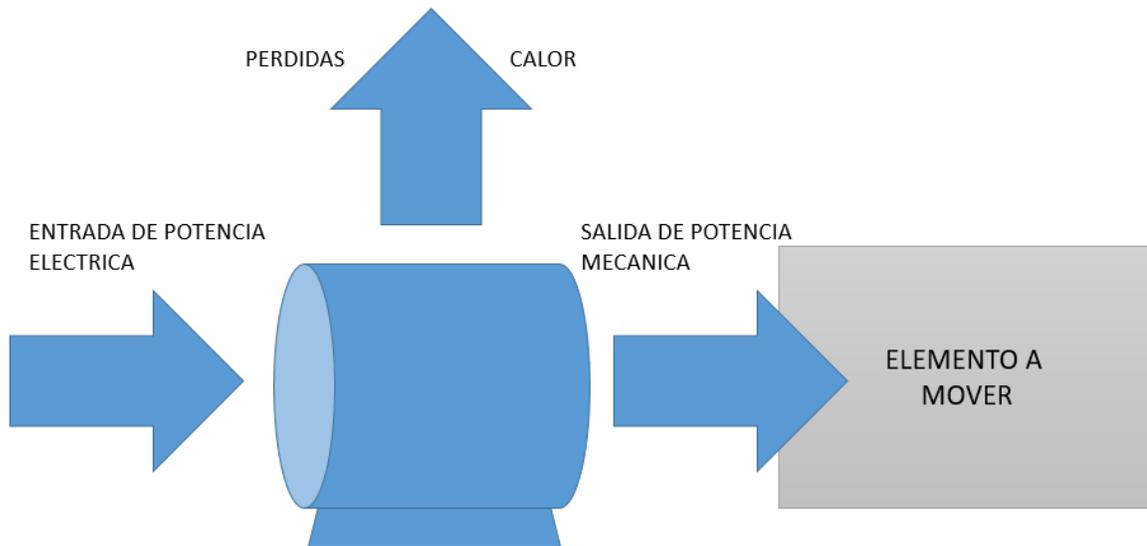


Fuente: Zuendo.com. 2020. Qué Es Un Motor Eléctrico Monofásico Y Sus Funciones.

1.8 Eficiencia de un motor eléctrico

La eficiencia de un motor eléctrico es esa relación que existe entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica). La mayoría de los motores eléctricos están diseñados para funcionar entre el 50 y el 100 por ciento de su carga nominal. La eficiencia máxima suele estar cerca del 75 por ciento de la carga nominal. [7]

Figura 1-17. Eficiencia en un motor eléctrico.



Fuente: Autor

La ecuación (3) describe cómo hallar la eficiencia en un motor eléctrico trifásico de corriente alterna, donde HP es la potencia mecánica, V es el voltaje de conexión entre las líneas, I es la corriente y F_p es el factor de potencia.

$$\eta = \frac{HP \cdot 746}{\sqrt{3} V_{L-L} I F_p} \quad (3)$$

El régimen de clasificación europeo de eficiencia para motores de corriente alterna de Baja Tensión fue introducido en 1998 y estableció tres clases: EFF1, EFF2 y EFF3, siendo EFF1 la de más alta eficiencia. Este régimen especifica que la eficiencia debe medirse de acuerdo con el estándar EN/IEC 60034-2: 1996. Este fue sustituido por el nuevo estándar IEC, IEC 60034-2-1, que entró en funcionamiento en septiembre de 2007, y que también fue ratificado y publicado como EN 60034-2-1 en el nivel CENELEC. Este nuevo estándar introduce nuevas reglas concernientes a métodos de medición que deben ser utilizados para determinar pérdidas y eficiencia. [8]

1.8.1 Cómo medir la eficiencia eléctrica.

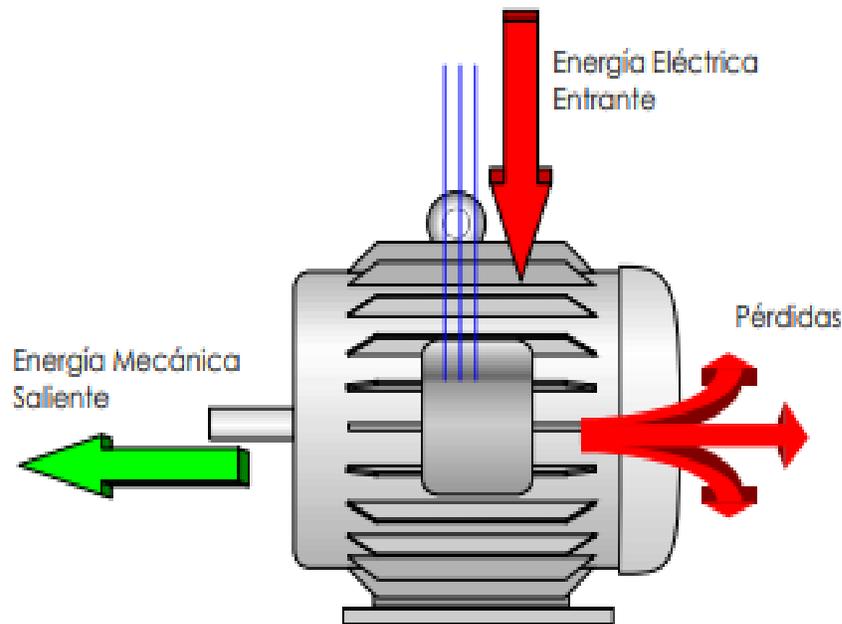
Existen dos formas para medir la eficiencia eléctrica de un motor:

- La medición directa implica el cálculo de la potencia eléctrica de entrada en función del voltaje y de las corrientes suministradas, y de la potencia mecánica de salida en función de la velocidad rotacional y el torque disponible en el eje.
- La medición indirecta consiste en medir la potencia de entrada y calcular la potencia mecánica de salida considerando todas las pérdidas en el motor.

1.9 Pérdidas en un motor eléctrico

Una máquina que transforma energía de una forma a otra siempre va a tener pérdidas. La pérdida provoca un incremento en la temperatura y una reducción de la eficiencia. El motor eléctrico al ser una máquina rotatoria sufre pérdidas eléctricas y mecánicas. (Wildi, 2007).

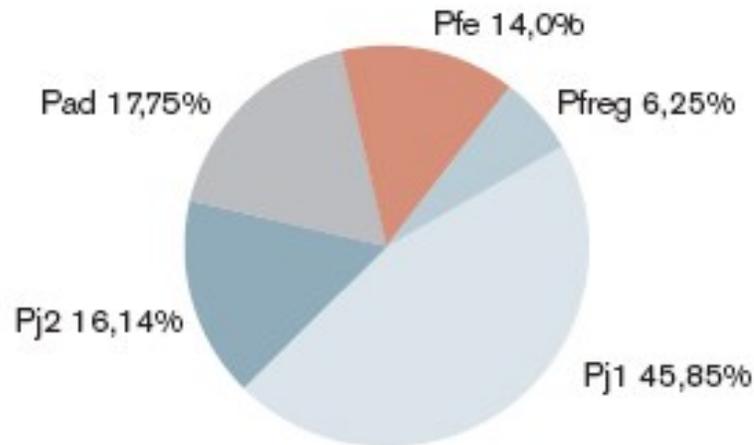
Figura 1-18. Pérdidas en un motor eléctrico.



Fuente: Lobosco, O. S., da Costa Dias, J. L. P., & Oliver, D. (1990). *Selección y aplicación de motores eléctricos*. Siemens.

- **Pérdidas mecánicas.** Este tipo de pérdidas son causadas por la fricción en los cojinetes, rodamientos o en el aire. Casi todos los motores eléctricos tienen un ventilador montado en su eje con el fin de enfriar estas partes del motor.
- **Pérdidas eléctricas.** También llamadas pérdidas por efecto joule I^2R , son causadas por la resistencia eléctrica de los bobinados del estator y de las barras conductoras del rotor.
- **Pérdidas magnéticas.** Son las pérdidas que se producen en los núcleos de chapa magnética del estator y del rotor, causadas por la histéresis y las corrientes parásitas.
- **Pérdidas adicionales en la carga.** Estas pérdidas están relacionadas con la carga y por lo regular varían con el cuadrado de par de salida.

Figura 1-19. Distribución de pérdidas en motor eléctrico.



Fuente: Benito, A. B. (2002). Máquinas eléctricas.

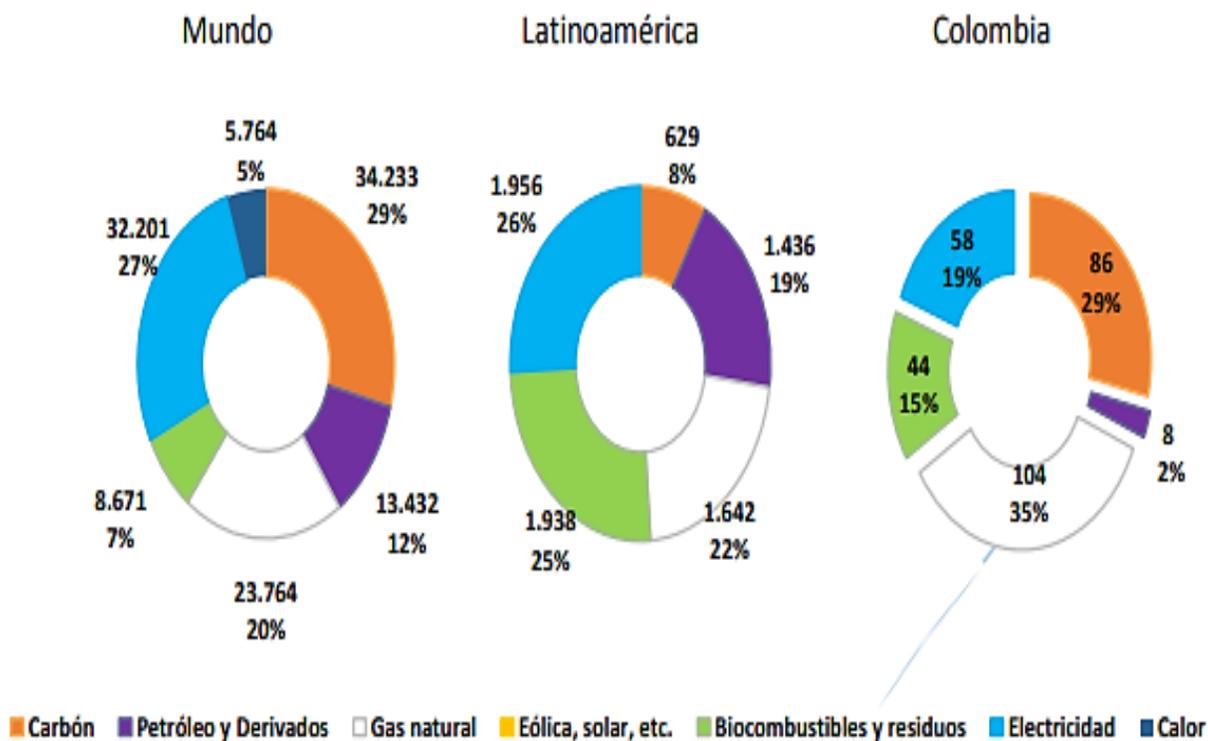
La figura 1-19 muestra la distribución de las pérdidas en porcentajes de un motor eléctrico de inducción de 1,5 kW bajo condiciones nominales, donde Pj1 representa las pérdidas por la resistencia de bobinados del estator, Pj2 pérdidas por resistencia en las barras del rotor, Pfe pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, Pfreg pérdidas mecánicas y Pad pérdidas adicionales en la carga. (Blog técnica industrial, 2009)

1.10 Plan Energético Nacional (PEN)

El PEN es un documento elaborado en el año 2019 por la Unidad de Planeación Minero – Energética (UPME), este plan tiene como principal objetivo satisfacer los requerimientos energéticos de Colombia entre 2020 y 2050, está basado en la necesidad de una transformación energética global ante el evidente cambio climático, con el fin de suministrar la suficiente energía para garantizar un desarrollo económico y bienestar social.

El PEN ha desarrollado cinco escenarios de demanda energética total en Colombia, en esta sección se hablará del escenario de eficiencia energética donde se supone un aumento de la eficiencia en procesos agrícolas e industriales (25% a 2030 y 30% a 2050), también en procesos de cocción y calentamiento de agua en el sector residencial. Implementación de energía solar (0,6%) y eólica (2%) para generación eléctrica. En transporte, penetración de vehículos eléctricos. (Ministerio de Minas y Energías,2015). [9].

Figura 1-20. Comparación del consumo energético a nivel industrial.

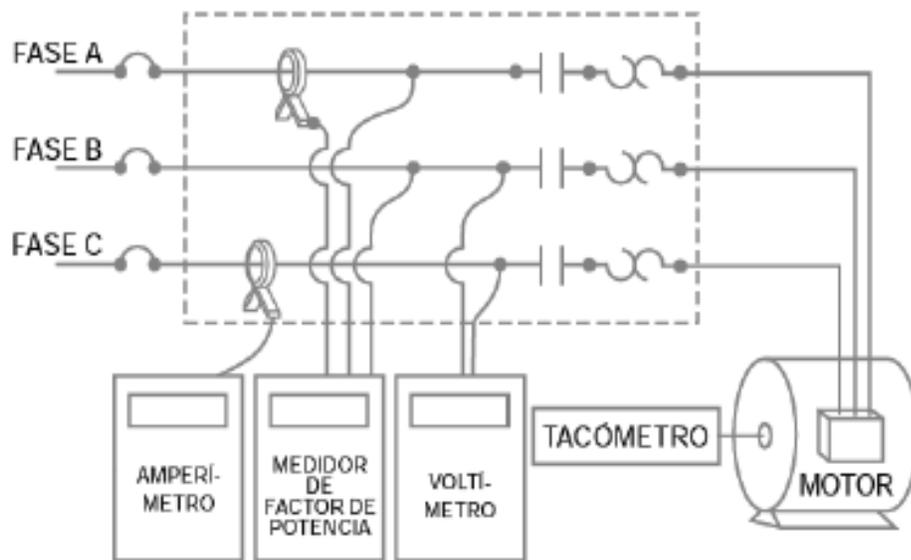


Fuente: Benito, A. B. (2002). Máquinas eléctricas.

1.11 Metodologías para la determinación de la eficiencia

La eficiencia de un motor eléctrico se puede determinar a partir de mediciones de corriente, voltaje y factor de potencia en dos fases distintas.

Figura 1-21. Medición de potencia en la entrada de un motor.



Fuente: Harper, G. E. (2005). El Libro Practico De Los Generadores, Transformadores Y Motores Eléctricos/The Practical Book of Generators, Transformers and Electical Motors. Editorial Limusa.

Existen muchos métodos para la determinación de la eficiencia en motores eléctricos según la norma IEEE 112 escritos en el artículo a **survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors** y el **programa Motor Challenge** de EE. UU.

1.11.1 Método de deslizamiento para cálculo de carga.

Se recomienda utilizar este método cuando se conoce el valor de velocidad a la que está girando el eje del motor. La carga del motor se calcula con la siguiente ecuación:

$$Carga = \frac{n_{des}}{(n_{sinc} - n_r) \cdot \left(\frac{v_r}{v}\right)^2} \cdot 100\% \quad (4)$$

Donde n_r es la velocidad a plena carga establecida en la placa del motor, n_{des} es la velocidad de deslizamiento, n_{sinc} es la velocidad del campo magnético trifásico en el entrehierro, v_r es el voltaje a plena carga que aparece en la placa y v es el voltaje promedio medido en los terminales del motor. (IEEE 112 ,2018). [10].

1.11.2 Método estándar de placa del motor.

Este método toma los datos de la placa del motor, asumiendo que este nunca ha sido rebobinado, tomando el valor de la eficiencia en la placa sin tener en cuenta que el motor opera en otras condiciones. (Agredo,2018)

1.11.3 Método estándar de corrientes.

Este método se basa en proponer que el estado de carga es proporcional a la relación entre la corriente que demanda el motor y la corriente nominal. La potencia de salida puede ser calculada con la ecuación (5):

$$P_{sal} = \frac{I}{I_{nom}} \cdot P_{nom} \quad (5)$$

Donde I es la corriente promedio que se mide entre fases, I_{nom} es la corriente nominal que aparece en la placa del motor, P_{nom} es la potencia nominal descrita en la placa del motor y P_{sal} es la potencia de salida en el eje del motor. Con el valor de la corriente del motor trabajando en vacío la ecuación para hallar la eficiencia es:

$$\eta = \frac{2I - I_{vac}}{2I_{nom} - I_{vac}} \cdot \frac{P_{nom}}{P_{ent}} \quad (6)$$

Donde I_{vac} es la corriente del motor trabajando en vacío y P_{ent} es la potencia de entrada del motor. Para esto es necesario medir voltajes y corrientes de entrada antes de acoplar el motor al sistema. [11].

1.11.4 Método del deslizamiento.

En este método se asume que el estado de carga es proporcional a la relación del deslizamiento medido y el deslizamiento a plena carga. Teniendo en cuenta esta condición se puede hallar la potencia de salida en el eje con la siguiente ecuación:

$$P_{eje} = \frac{Des_{medido}}{Des_{nominal}} \cdot P_{nom} \quad (7)$$

La velocidad del motor se puede medir por medio de un tacómetro óptico, el cual es un instrumento que usualmente se encuentran en empresas a nivel industrial. La eficiencia se calcula como la relación por cociente entre la potencia de salida de calculada y la de entrada medida.

1.11.5 Método de pérdida segregada

Este método es más invasivo que los métodos anteriores porque es necesario medir algunas variables y confiar en valores empíricos para estimar las pérdidas totales. Las pérdidas de cobre del estator se presentan en la ecuación (8), donde I es la corriente eficaz medida por línea a la carga especificada, y R es la resistencia de CC promedio entre dos terminales de línea corregidos a la temperatura especificada.

$$Per_{esta} = 1.5 \cdot I^2 \cdot R \quad (8)$$

Las pérdidas de cobre del rotor se calculan multiplicando el deslizamiento del motor por la potencia del entrehierro por la ecuación (9):

$$Per_{rotor} = s \cdot Pot_{entrehierro} \quad (9)$$

Conociendo estas pérdidas se puede calcular la eficiencia del motor eléctrico.

Figura 1-22. Requerimientos de medición de eficiencia según métodos.

Metodos	Prueba Sin Carga	Prueba Carga Plena	Prueba con Volt/Frec. Variable	Medicion Maxlma	Medicion Torque	Info. De Placa	Medicion Resistencia Estator	Nivel Invasivo	Error%
De Placa						X		BAJO	10
Estandar de Deslizam	X		X	X		X	X	BAJO	7
Deslizam Con Limite Superior	X		X			X	X	MEDIO	8
Estandar de Corrientes	X			X		X	X	MEDIO	6
IEEE 112 F1	X		X	X		X	X	ALTO	5
IEEE 112 E1	X	X		X		X	X	ALTO	3
OHME	X			X		X	X	MEDIO	2-mar
NAGT				X	Calculado	X	X	BAJO	1.7
Medicion Torque				X	X			ALTO	0.5

Fuente: de la Morena Cancela, J. (2012, October). Eficiencia energética en motores eléctricos. Normativa IEC 60034-30. In II Congreso de Eficiencia Energética.

1.11.6 Comparación las cifras de eficiencia entre el antiguo y nuevo estándar

La tabla 2 muestra ejemplos de comparación de cifras de eficiencia entre el antiguo y el nuevo estándar para tres tipos diferentes de motor. Notar que los valores de eficiencia bajo el nuevo estándar no son comparables si no se ocupan los mismos criterios de medición.

Tabla 2. Comparación las cifras de eficiencia entre el antiguo y nuevo estándar

Rated Output power	Old efficiency testing EN/IEC 60034-2: 1996	New efficiency testing IEC 60034-2-1: 2007-09
7.5 kW, 2-pole motor	88.4%	87.9%
11 kW, 4-pole motor	90.9%	90.3%
160 kW, 4-pole motor	96.0%	95.4%

Fuente: Cardona, H., Martínez, M., & Posada, J. (2015). Sistema de información para la elaboración automática del informe de la prueba de eficiencia en motores de inducción de hasta 10 HP, según la norma IEC 60034. *El Hombre y la Máquina*, (47), 19-26.

El nuevo método basado en la medición real SLL ha sido utilizado en Norteamérica y Canadá, donde ha sido requerido bajo los estándares IEEE 112-B (2004) y CSA 390. Es probable que este método sea uno de los más utilizados pues es el que establece menor grado de incertidumbre y por ende es el más preciso. [12]

1.12 Banco de pruebas para medir la eficiencia de un motor eléctrico

Los bancos de pruebas están compuestos por un conjunto de equipos electrónicos, eléctricos y mecánicos, redes de sensores y sistemas para adquisición y procesamiento de datos necesarios para el realizar el cálculo y determinar la eficiencia de un motor eléctrico.

1.13 Bancos de pruebas comercial

En Berching, Alemania la empresa independiente Schabmuller fabrica motores eléctricos, produce más de 300 mil unidades por año y tiene ventas anuales de más de 90 millones de euros. La razón de su éxito es que no desarrollan motores estándar, sino que desarrollan motores para el cliente y personalizados para aplicaciones específicas. Esta empresa cuenta con su banco de pruebas que utilizan para diversas tareas de medición con el fin de determinar de manera confiable la eficiencia de conversión de energía.

Figura 1-23. Banco de pruebas de Schabmuller



Fuente: Schabmueller.de. 2020. Schabmüller – Entwicklung Und Fertigung Modernster Antriebssysteme Und Elektrischer Maschinen.

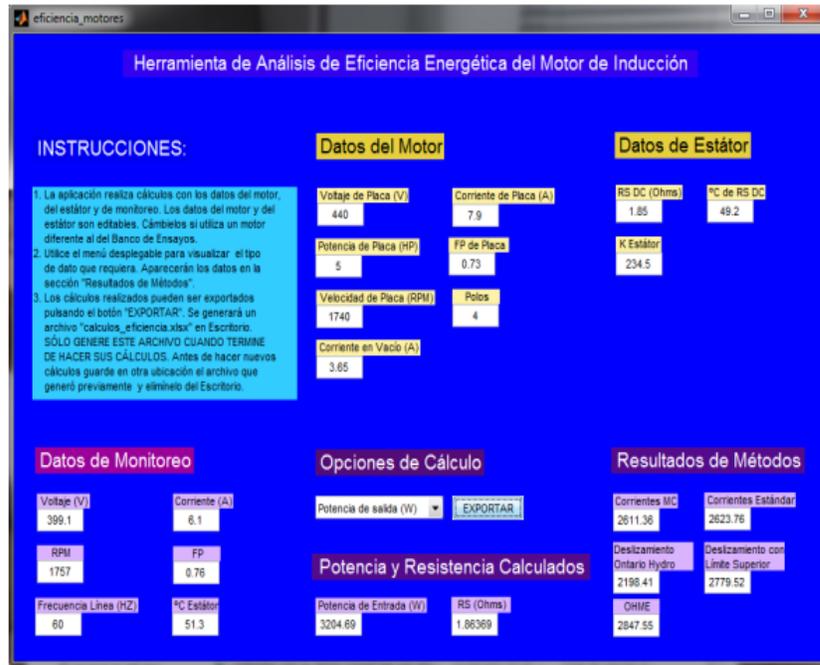
Los expertos de esta empresa miden la velocidad de rotación y el par, generan mapas de eficiencia y, en base a los datos medidos, determinan inductancias longitudinales y transversales. Esto lo miden mediante sensores que adquieren señales de voltaje, corriente, temperatura y torque luego las envían a un sistema de adquisición de datos (génesis highSpeed GENT7A) junto con tarjetas de adquisición GN610B. Los DSP, los procesadores de señales calculan los resultados en tiempo real. [13].

1.14 Bancos de pruebas como trabajos de Grado

En Colombia uno de los proyectos realizados fue realizado en la Universidad Javeriana de Cali (Agredo, 2018). Se realizó un diseño e implementación de un banco de ensayos para medir la eficiencia energética en un motor eléctrico de inducción con tres sistemas de arranque: directo, arranque suave, variador de velocidad, esto sin desacoplar de la línea de producción, con el fin de que los estudiantes de dicha universidad aprendieran los métodos para estimar la eficiencia energética.

Este banco cuenta con un transformador de relación 1:2 y potencia de 5 kVA, un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla Siemens 1LA7 112-4YC60, un tablero compuesto por contactores, dispositivos de arranque suave SMC Flex, variador de velocidad Power Flex 755, estación de mando start-stop, PLC, selector de tres posiciones, monitor de potencia, conductor de potencia cable 12 AWG, conductor de control cable 18 AWG, switch industrial, guarda motores, porta fusibles, interruptores, piloto luminoso y tomacorriente trifásico, tacómetro marca Baldor, la carga es un motor DC shunt Baldor CD6203 que actuará como generador. [14].

Figura 1-24. Software del banco de pruebas de la universidad javeriana



Fuente: AGREDO, A., 2018. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE BANCO DE ENSAYOS PARA ESTUDIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES ELÉCTRICOS EN EL LABORATORIO DE POTENCIA DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI. 1st ed. Cali.

Figura 1-25. Banco de pruebas de la Universidad Javeriana de Cali.



Fuente: AGREDO, A., 2018. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE BANCO DE ENSAYOS PARA ESTUDIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES ELÉCTRICOS EN EL LABORATORIO DE POTENCIA DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI. 1st ed. Cali.

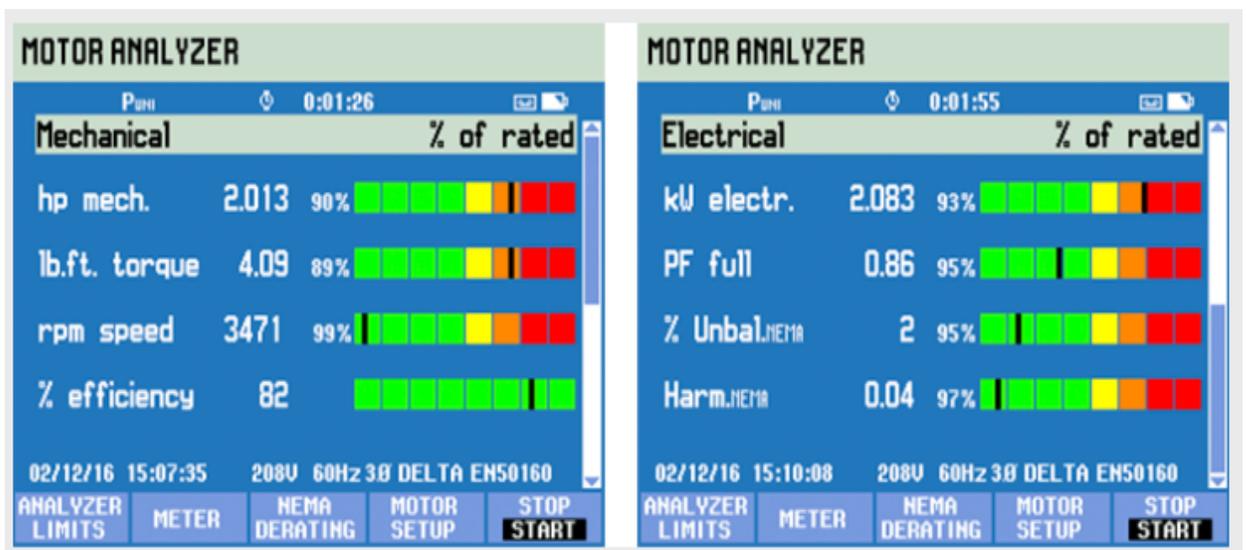
En el Politécnico de Torino (Italia) se realizó un proyecto que consistía en medir la eficiencia en cuatro motores eléctricos de inducción de la misma serie de acuerdo con las normas internacionales IEEE 112-B, IEC 34-2 y JEC 37. Este banco cuenta con motores que manejan potencias nominales de 4, 7, 5, 11 y 15 kW, 380 voltios y 4 polos, equipados por cuatro sensores térmicos, dos están montados en la conexión del devanado final, otro en la ranura del estator y el último en el núcleo del estator. La potencia eléctrica del motor ha sido medida con un vatímetro digital, un transductor de torque que garantiza el 0,2% mejor que el valor del torque nominal. Se concluyó que el estándar más adecuado para medir la eficiencia de un motor es el de la norma IEEE 112-B. [15].

A nivel internacional FLUKE es una de las empresas más populares al prestar sus servicios de calibración y pruebas de equipos mecánicos, eléctricos y/o electrónicos, dicha empresa cuenta con el equipo Fluke 438-II, el cual posee los elementos necesarios para la verificación de funcionamiento de motores y generadores, además de poder determinar la eficiencia de los mismos.

El Fluke 438-II proporciona medidas mecánicas (velocidad de giro, carga, par y eficiencia del motor) mediante la aplicación de algoritmos propios a señales eléctricas. Los algoritmos combinan modelos basados en la física y obtenidos a partir de datos de un motor de inducción sin necesidad de realizar medidas previamente, como suele ocurrir para calcular parámetros del modelo de motor, como la resistencia del estator. La velocidad del motor se puede calcular a partir de los armónicos de la ranura del rotor presentes en las formas de onda de la corriente. El par del eje del motor puede relacionarse con las tensiones, corrientes y deslizamiento del motor de inducción mediante relaciones físicas complejas, pero bien conocidas. La potencia eléctrica se mide mediante las formas de onda de la corriente y el voltaje de entrada.

Tras obtener las estimaciones de par y velocidad se calcula la potencia mecánica (o carga) multiplicando el par por la velocidad. La eficiencia del motor se calcula dividiendo la potencia mecánica estimada entre la potencia eléctrica medida. Fluke ha realizado pruebas exhaustivas con motores instrumentados conectados a dinamómetros. Se midieron los valores reales de la potencia eléctrica, el par del eje del motor y la velocidad del motor y se compararon con los valores obtenidos con el 438-II para determinar los niveles de precisión. En la figura 1-26 se muestra la ventana gráfica del software. [16].

Figura 1-26. Ventana del software del Fluke 438-II



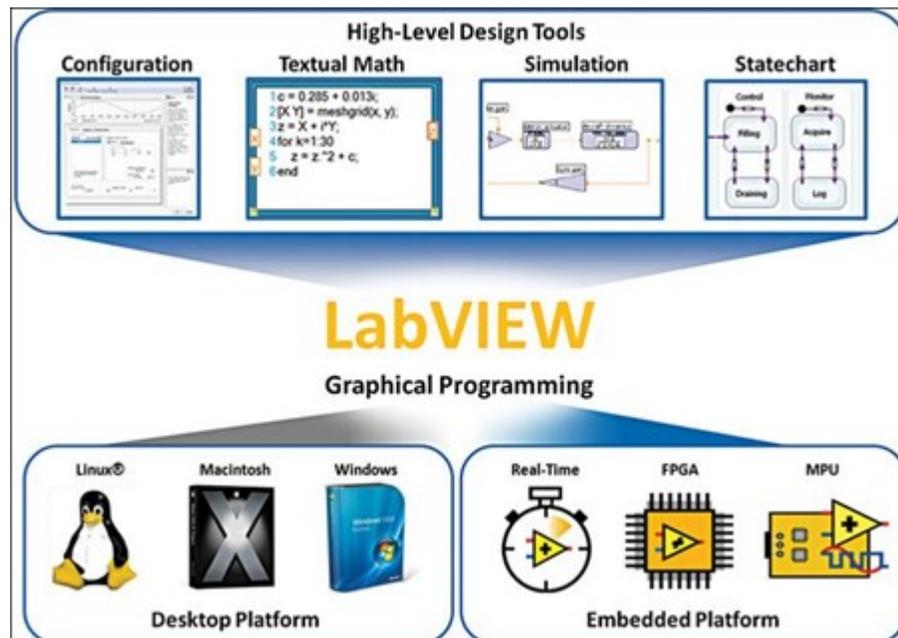
Fuente: principal, P., eléctrica, C., eléctrica, C., 438-II, A. and 438-II, A., 2020. *Analizador De Calidad Eléctrica Y Motores Fluke 438-II*.Fluke.com.

2. Metodología

2.1 Diseño del software

Para diseñar el software de simulación se usó la herramienta LabVIEW (acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar aplicaciones, con un lenguaje de programación visual gráfico pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido. Esta plataforma le pertenece a National instruments, la descarga es gratuita, la empresa brinda las licencias para el software dependiendo del uso que se le desee dar al mismo, las licencias para desarrollo comercial e industrial son pagas, las de uso básico, escolar y de índole académica son totalmente gratis.

Figura 2-1. Presentación de Labview.



Fuente: Ni.com. 2020. ¿Qué Es Labview?[online]

2.2 Condiciones y requerimientos de diseño

Como lo deseado es realizar una simulación que entregue los valores más acertados posibles a la realidad, se requieren de mediciones reales experimentales, sobre estas se podrán programar las acciones necesarias para el cálculo y estimación de los valores deseados, para ello, se tomaron datos experimentales de voltaje, frecuencia, voltaje, corriente y potencia de un motor sincrónico 208-240 voltios 60Hz, marca **SOK MOTOR**, se realizaron 20 mediciones de cada uno de los ítems mencionados, a partir de esta información se crearon tablas para calcular las probabilidades de los resultados. En la tabla 3 se muestra una fracción de los datos tomados.

Tabla 3. Muestra de los datos experimentales

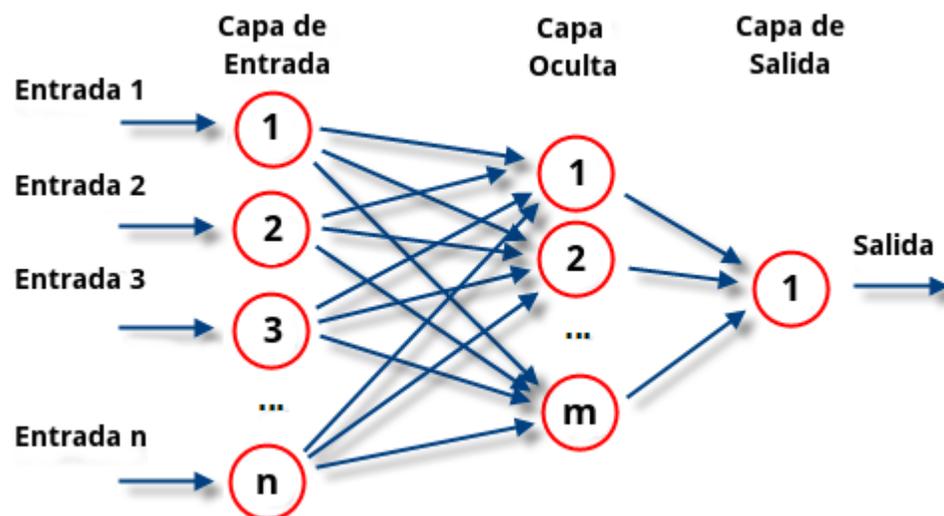
voltaje de la red(VAC)	voltaje entre líneas(A)	corriente medida(A)	potencia(W)	potencia placa(W)	Eficiencia(<i>ideal</i>) %
238	232,0716705	6,634071263	1539,58	1650	93,30787882
238	228,7137102	6,777983851	1550,21783	1650	93,95259599
238	233,2721824	6,582620752	1535,54231	1650	93,06317025
238	235,2792259	6,496604602	1528,5161	1650	92,63733952
238	237,898254	6,384360542	1518,82823	1650	92,05019551
238	222,6793636	7,036598703	1566,90532	1650	94,96395885
238	226,7175821	6,863532197	1556,08342	1650	94,30808631
238	237,1306789	6,417256616	1521,72842	1650	92,22596475
238	224,9196728	6,94058545	1561,07421	1650	94,6105581
238	227,881022	6,813670485	1552,70619	1650	94,10340568
238	229,7721114	6,732623796	1546,96919	1650	93,75570818
238	228,8013729	6,774226878	1549,95241	1650	93,93650967
238	228,84122	6,772519142	1549,83154	1650	93,92918443
238	216,6426981	7,295312941	1580,47628	1650	95,78644113
238	216,3777311	7,306668665	1581,00039	1650	95,81820533
238	230,3170741	6,709268252	1545,25903	1650	93,65206262
238	210,6422157	7,552476471	1590,87038	1650	96,41638653
238	225,0171084	6,936409641	1560,81084	1650	94,59459636
238	229,3459828	6,750886451	1548,28869	1650	93,83567806
238	230,4038424	6,70554961	1544,9844	1650	93,63541793

Fuente: autor

Los datos obtenidos por medio del cálculo de probabilidades posibles a partir de las 20 muestras tomadas son bastante extensos, por ello para realizar los cálculos de forma más precisa, se decide aplicar una red neuronal artificial.

Las redes neuronales artificiales son un modelo inspirado en el funcionamiento del cerebro humano. Está formado por un conjunto de nodos conocidos como neuronas artificiales que están conectadas y transmiten señales entre sí. Estas señales se transmiten desde la entrada hasta generar una salida. Gracias a esto se puede estimar los valores de forma más acertada y precisa posible. Esto permitirá realizar 100 cálculos (según se le especifique en su programación) en el mismo tiempo que demoraría una línea de código realizar 1 calculo con valores decimales.

Figura 2-2. Modelo de red neuronal



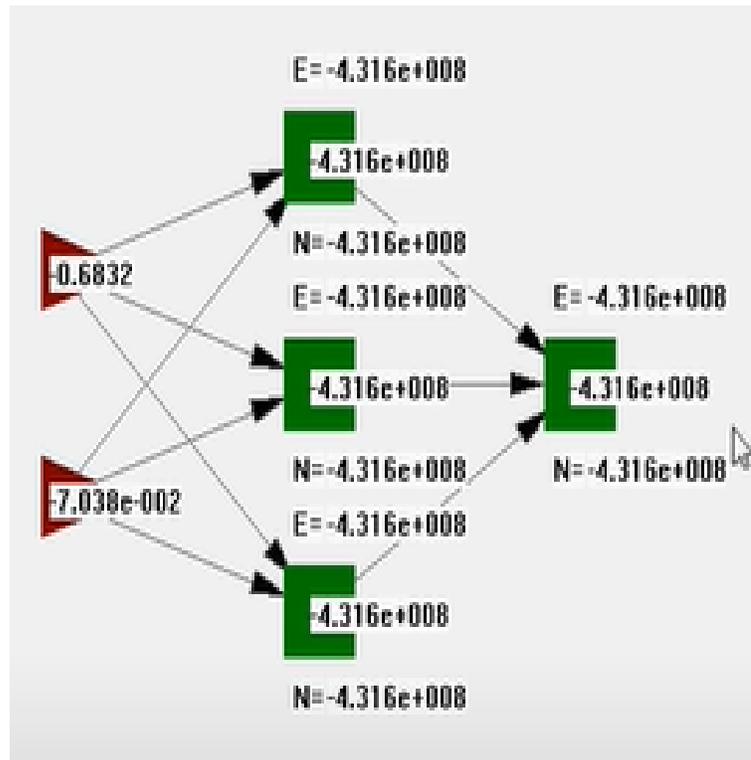
Fuente: Matich, D. J. (2001). Redes Neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones. Universidad Tecnológica Nacional, México.

El funcionamiento de las redes es similar al del cerebro humano. Las redes requieren una serie de valores de entrada y cada una de ellas llega a un nodo llamado neurona. Las neuronas de la red se encuentran agrupadas en capas que forman la red neuronal. Cada una de las neuronas de la red poseen a su vez un peso, un valor numérico, con el que modifica la entrada recibida. Los nuevos valores se obtienen de las neuronas y continúan su camino por la red. Este funcionamiento puede observarse de forma esquemática en la figura 2-2.

Para conseguir que una red neuronal realice las funciones deseadas, requiere de entrenamiento. El entrenamiento de una red neuronal se realiza modificando los pesos de sus neuronas para que consiga extraer los resultados deseados. Para ello lo que se hace es introducir datos de entrenamiento en la red, en función del resultado que se obtenga, se modifican los pesos de las neuronas según el error obtenido y en función de cuánto haya contribuido cada neurona a dicho resultado. Este método es conocido como Backpropagation o propagación hacia atrás. Con este método se consigue que la red aprenda, consiguiendo un modelo capaz de obtener resultados muy acertados incluso con datos muy diferentes a los que han sido utilizados durante su entrenamiento.

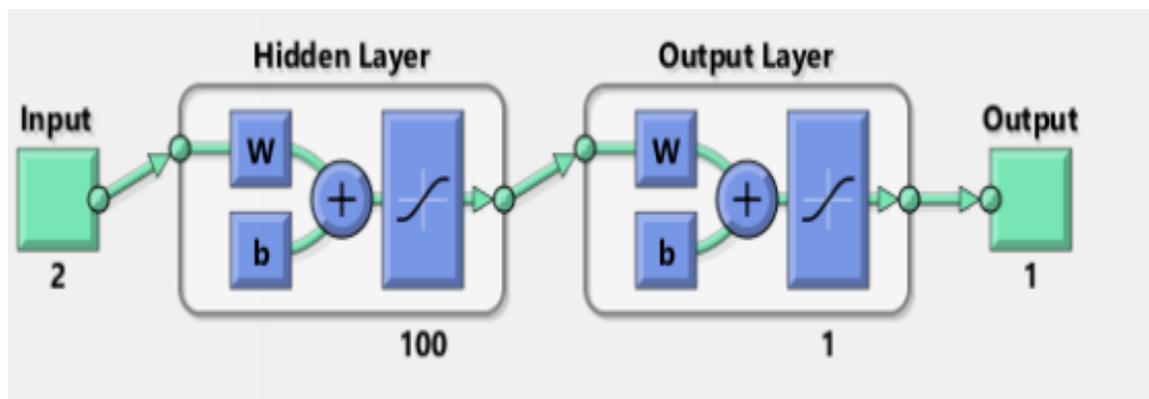
Los datos obtenidos a partir del cálculo de las probabilidades de los valores correspondientes a potencia, corriente, voltaje y demás, fueron agrupados en Excel, una vez instalado Labview se ejecuta la herramienta de redes neuronales donde se deben cargar los archivos, determinar las entradas, pesos y salidas con el fin de entrenar la red. en la figura 2-3 se muestra los bloques correspondientes a la ejecución de la red neuronal con los primeros 100 datos, la figura 2-4 se presenta el bloque de la red neuronal en Matlab y en la figura 2-5 se puede ver el resultado del crecimiento de la red luego de las 100 primeras iteraciones.

Figura 2-3. Ejecución de la red con los primeros 100 datos



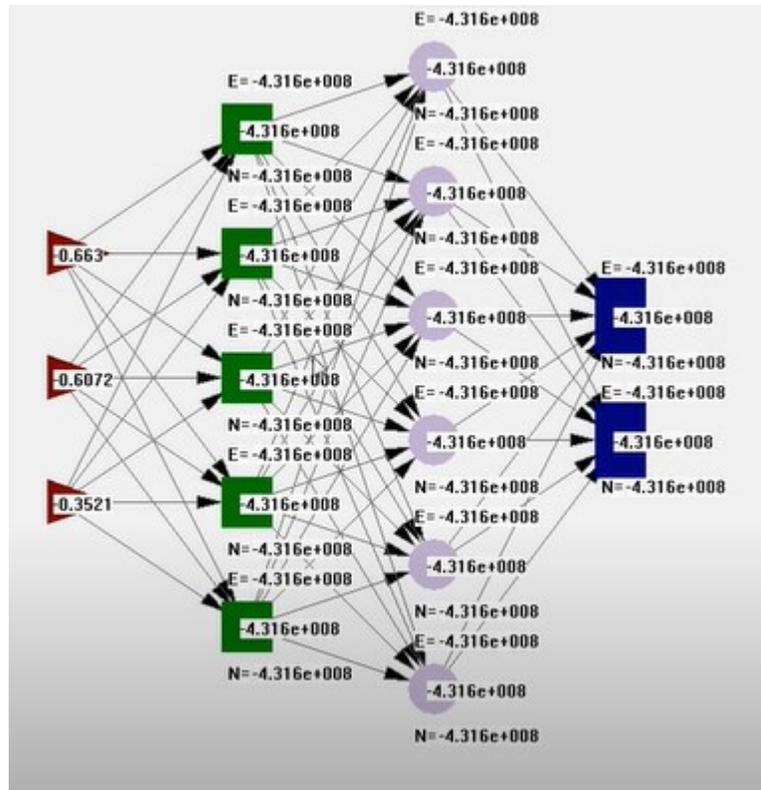
Fuente. Autor

Figura 2-4. Diagrama de la red a 100 iteraciones en Matlab.



Fuente. Autor

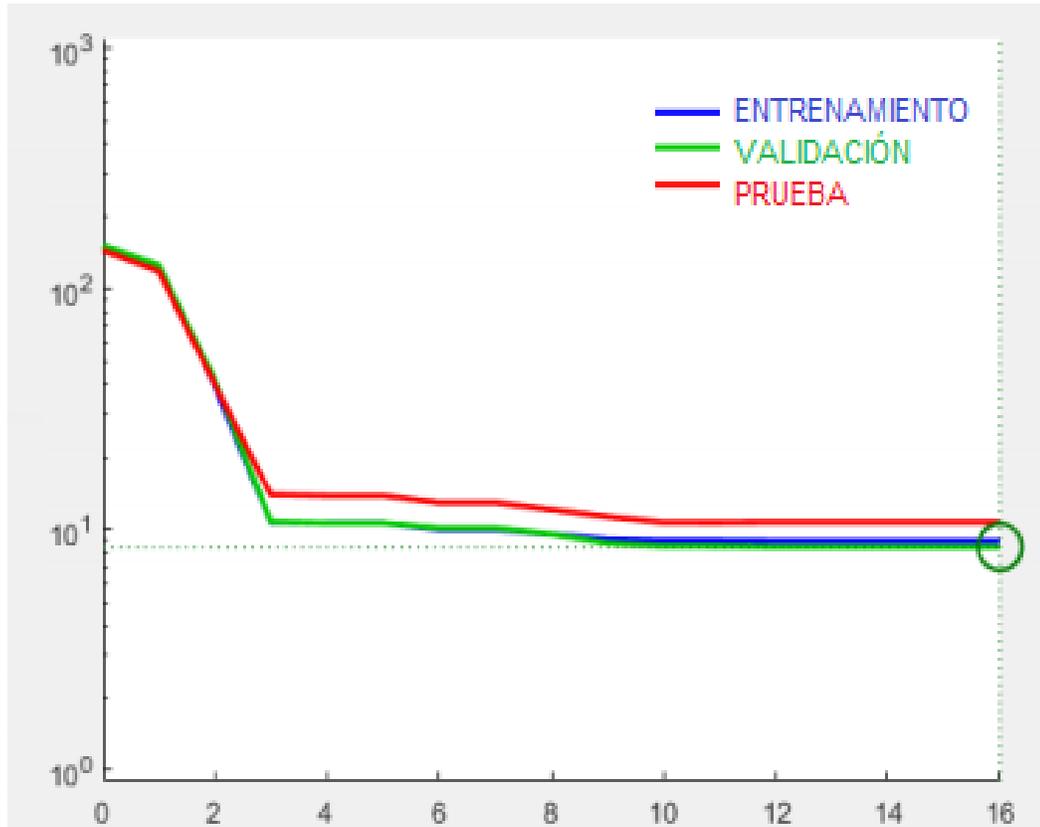
Figura 2-5. Resultado de la red entrenada



Fuente. Autor.

A partir de los resultados obtenidos se realizó la verificación de los resultados obtenidos de la red, en la figura 2-5 se puede observar la gráfica que resulta de los datos procesados por la red, los resultados esperados y los resultados luego del entrenamiento. En la figura 2-6, se ilustra la curva de resultado de la red neuronal, donde, entrenamiento: corresponde a una serie de datos aproximados por la misma, prueba: son los datos ingresados al sistema y validación: son los valores finales arrojados por el sistema a partir de los valores de prueba, es decir; una vez ingresados un conjunto de datos experimentales, la red los graba y permite estimar a partir de los datos ingresados los resultados esperados, su finalidad es predecir los valores de salidas muy cercanos a los reales.

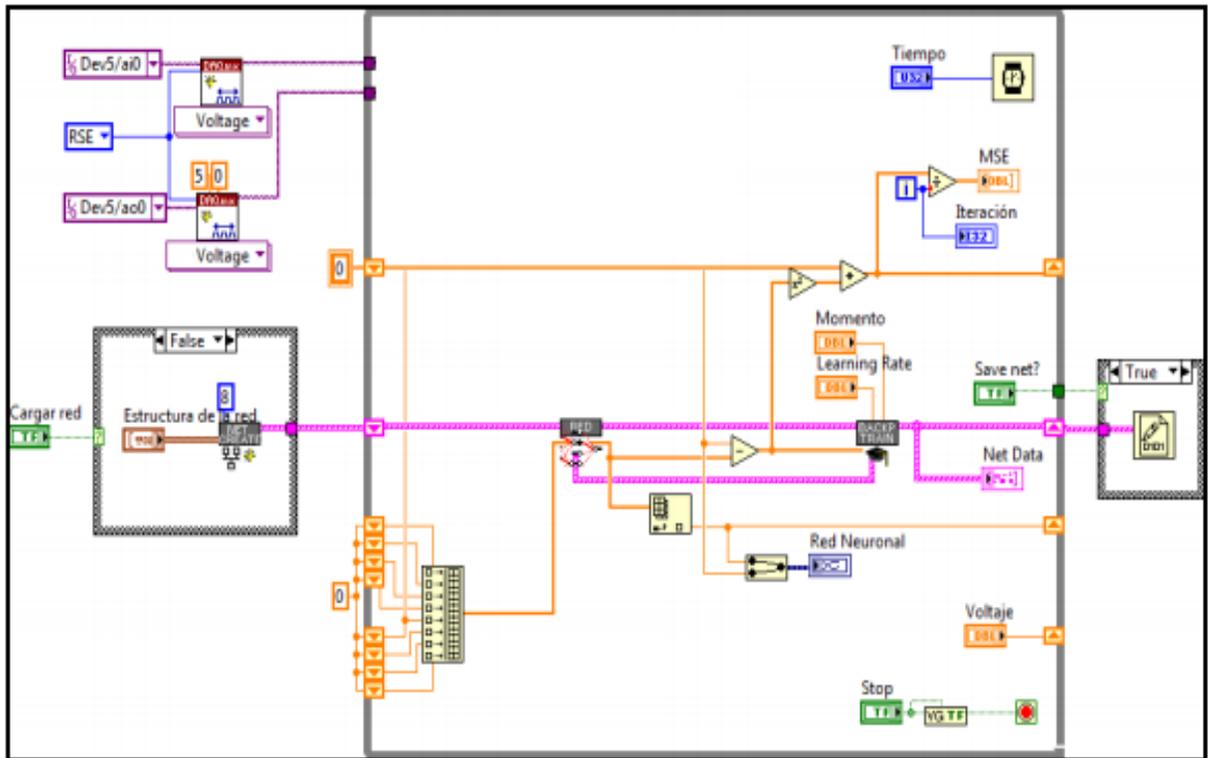
Figura 2-6. Gráfica de los resultados de la red.



Fuente. Autor.

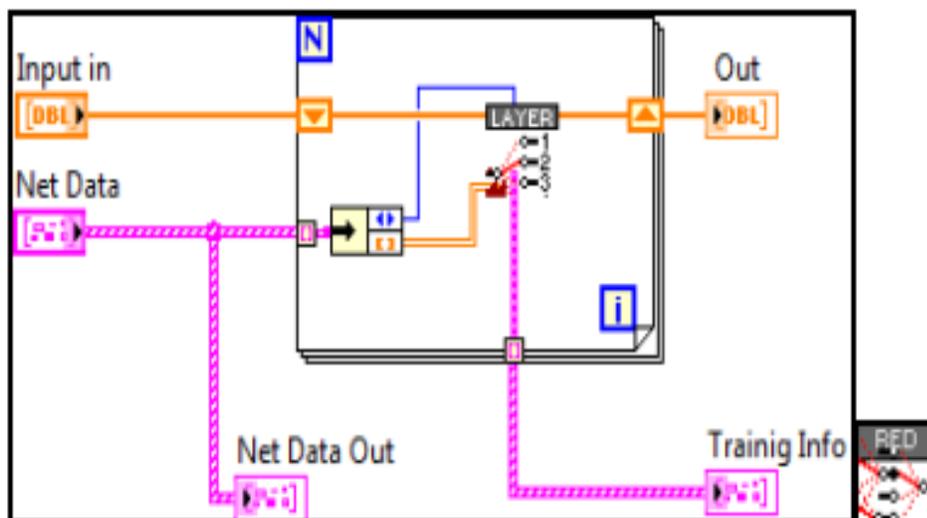
Una vez entrenada la red neuronal se realiza la programación de bloques para dar solidez al software, se ejecuta la red neuronal creada y entrenada, por defecto por cada dato en la entrada de la red ella realizara 100 iteraciones, es decir, mientras se ejecute el software por un determinado tiempo la red evaluará los posibles resultados a partir de los valores establecidos.

Figura 2-7. Diagrama de bloques de la ejecución de la red neuronal.



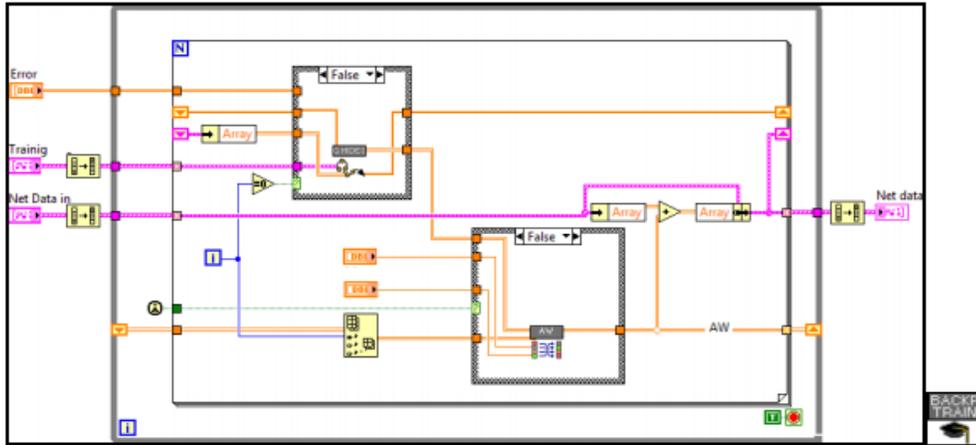
Fuente. Autor.

Figura 2-8. Bloques de iteraciones de la red neuronal.



Fuente. Autor.

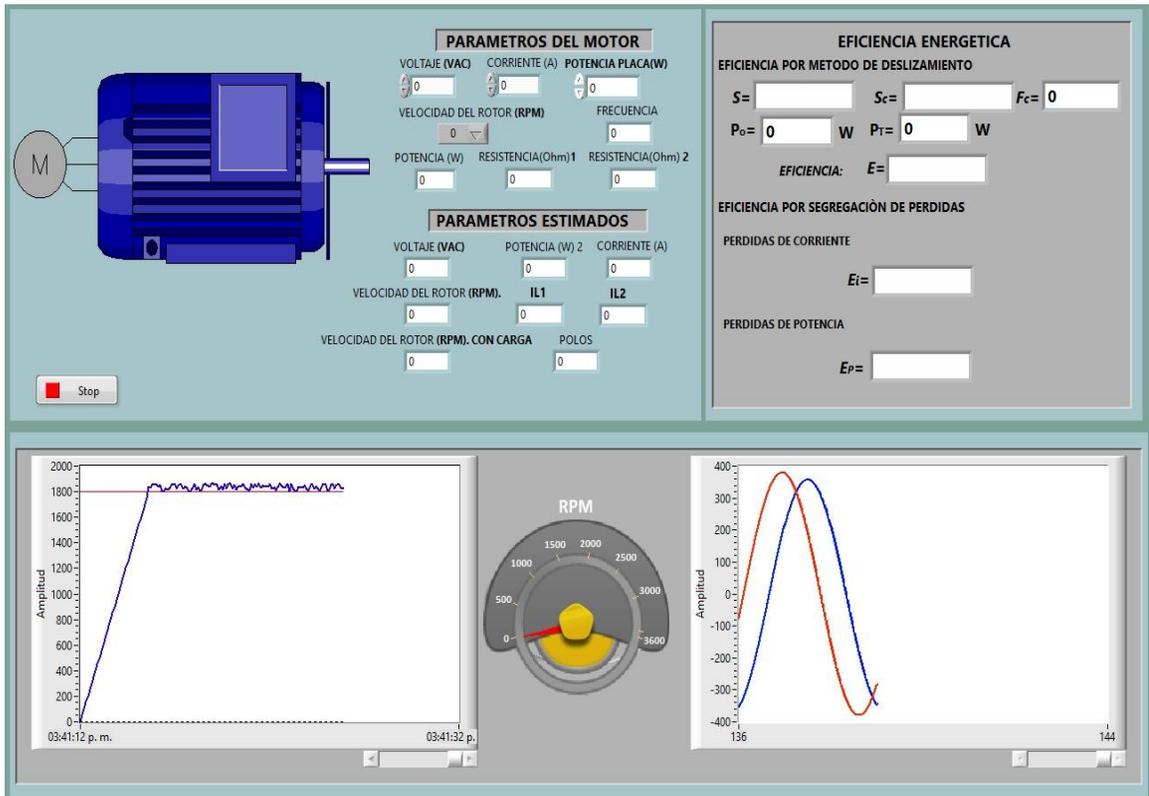
Figura 2-9. Diagrama de bloques del entrenamiento de la red.



Fuente. Autor.

Una vez compilado el software se realiza el diseño del entorno gráfico, en la figura 3-10 se muestra la ventana del software completo

Figura 2-10. Ventana de software



Fuente. Autor.

En la parte superior izquierda se tienen dos secciones, la primera ilustrada en la figura 2-11 pertenece a los parámetros del motor, aquí el usuario debe ingresar el voltaje AC, la corriente, la potencia, y las revoluciones especificadas en la placa del motor. Debajo de dicho sector se encuentran los parámetros estimados mostrados en la figura 2-12, estos corresponden a la estimación de los posibles resultados a partir de los cálculos realizados por la red neuronal, entre ellos está el voltaje, la corriente de línea, la potencia, la velocidad del motor con y sin carga y el número de polos, se debe resaltar que las resistencias de línea también son calculadas a partir de las aproximaciones de los datos presentes en la red neuronal.

Figura 2-11. Parámetros del motor

Fuente. Autor.

Figura 2-12. Parámetros estimados

Fuente. Autor.

Como se puede ver en la figura 2-13, en la parte superior derecha se tiene el bloque de cálculo de las eficiencias según los métodos de deslizamiento y segregación de pérdidas, estos son procesados siguiendo las indicaciones de la norma IEEE 112(método B y E).

Figura 2-13. Bloque de eficiencia energética

EFICIENCIA ENERGETICA

EFICIENCIA POR METODO DE DESLIZAMIENTO

$S =$ $S_c =$ $F_c =$

$P_o =$ W $P_T =$ W

EFICIENCIA: $E =$

EFICIENCIA POR SEGREGACION DE PERDIDAS

PERDIDAS DE CORRIENTE

$E_i =$

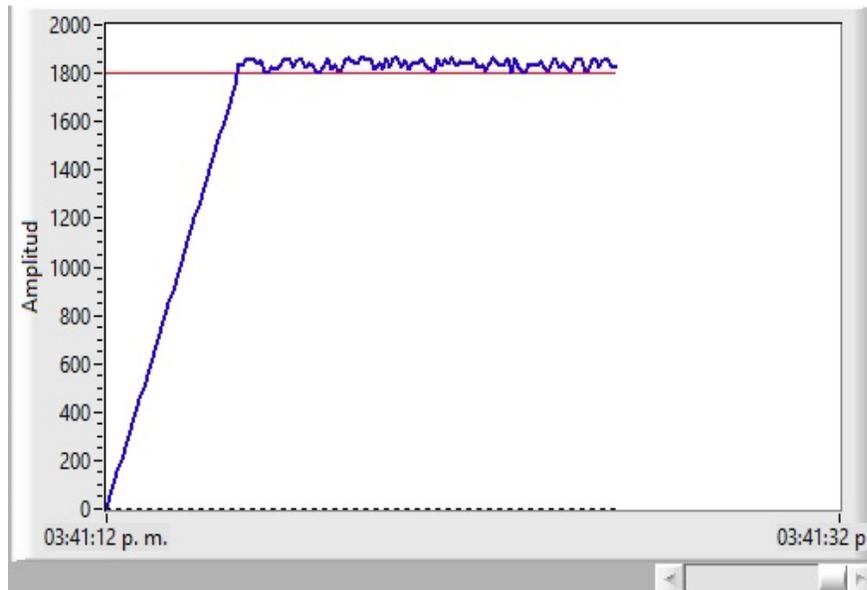
PERDIDAS DE POTENCIA

$E_p =$

Fuente. Autor.

En la parte inferior izquierda se presenta la gráfica correspondiente a la velocidad que alcanza el motor, se puede ver en la figura 2-14, las unidades correspondientes son RMP (revoluciones por minuto), la línea roja representa el valor ideal en el que debería permanecer estable el motor, la línea azul representa la velocidad real calculado, este presentará variaciones acercándose al valor real.

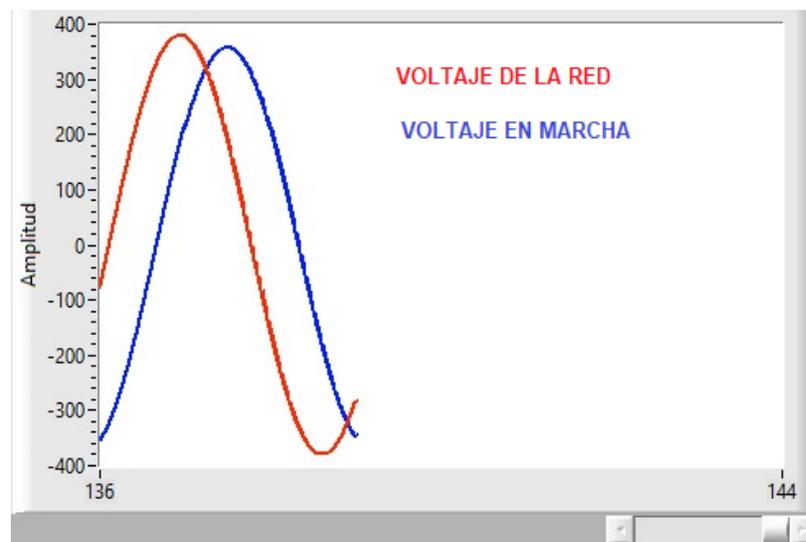
Figura 2-14. Gráfica de la velocidad del motor (RPM)



Fuente. Autor.

En la parte inferior derecha se presenta la gráfica que corresponde a la señal de voltaje ideal vs la señal de voltaje calculada por el software, como se puede ver en la figura 2-15 la línea roja representa el voltaje de la red (ideal) y la línea azul representa el voltaje calculado.

Figura 2-15. gráfica del voltaje suministrado al motor



Fuente. Autor.

En el centro de la parte inferior se añadió un indicador de la velocidad del motor, como se aprecia en la figura 2-16, este es de tipo perilla análoga y se usa con el fin de ilustrar en el objeto animado la variable en mención, este indica desde 0 hasta el máximo para motores de 60 Hz que son 3600 revoluciones por minuto.

Figura 2-16. Indicador de la velocidad del motor



Fuente. Autor.

3.Pruebas y resultados

A continuación, se describen las pruebas realizadas al software.

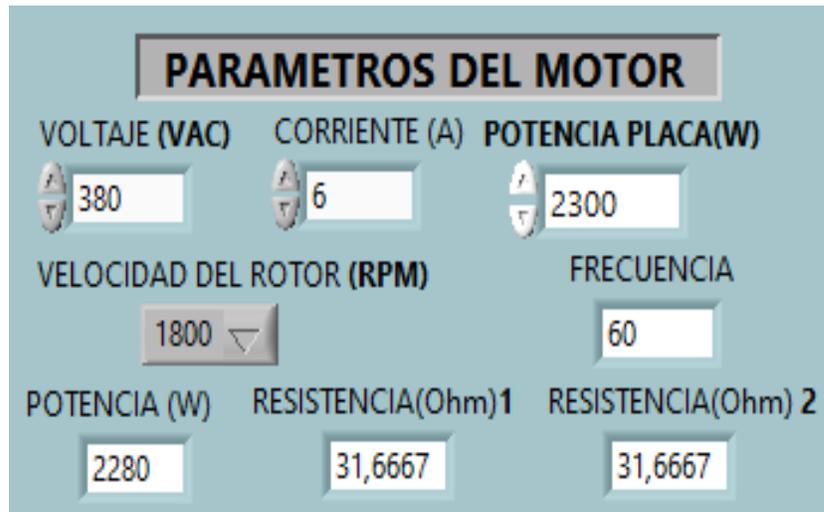
3.1 Prueba 1

Teniendo en cuenta que los valores a ingresar al software deben ser los que se encuentran en la placa del motor, para realizar la prueba se tomaron los siguientes valores que corresponden a un motor **NORD DRIVESYSTEMS**

TIPO	VOLTAJE AC	CORRIENTE	POTENCIA DE PLACA	VELOCIDAD DEL ROTOR
ASÍNCRONO	380V	6A	2300W	1800RPM

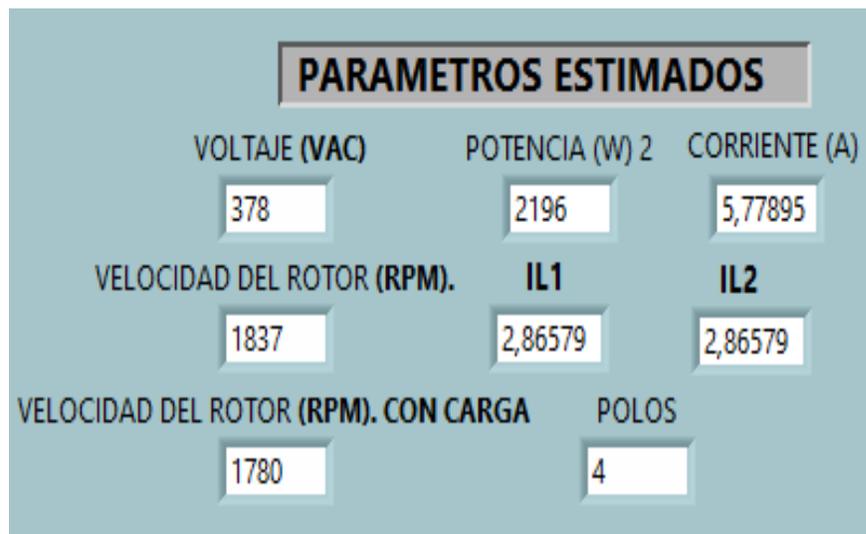
En las siguientes figuras se describen los datos ingresados (los expuestos en la tabla anterior) y los calculados por el software (los calculados a partir de la matemática programada en la aplicación).

Figura 3-1. Parámetros del motor.



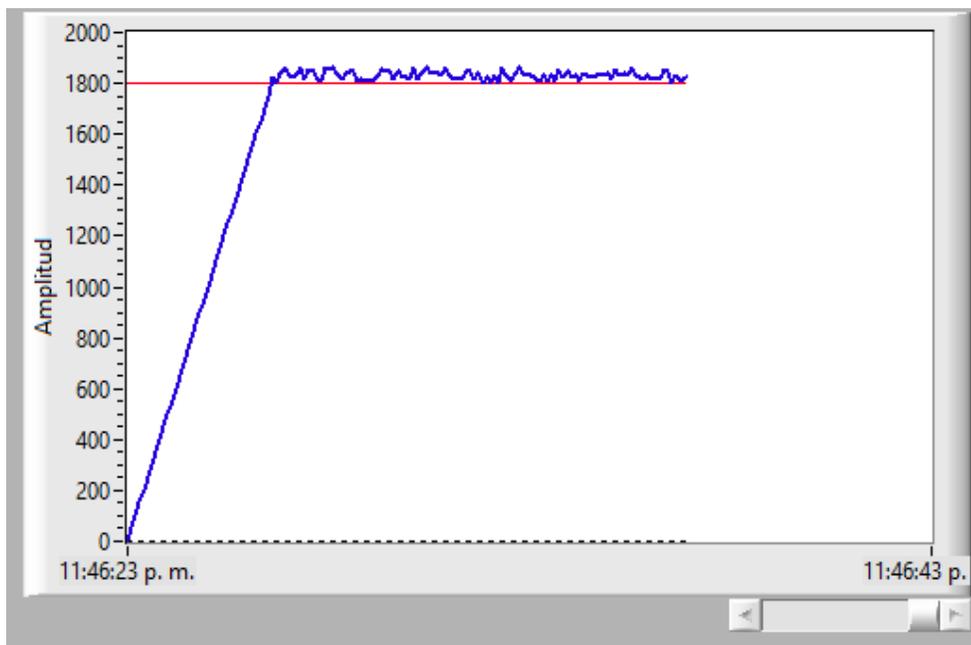
Fuente. Autor.

Figura 3-2. Parámetros estimados.



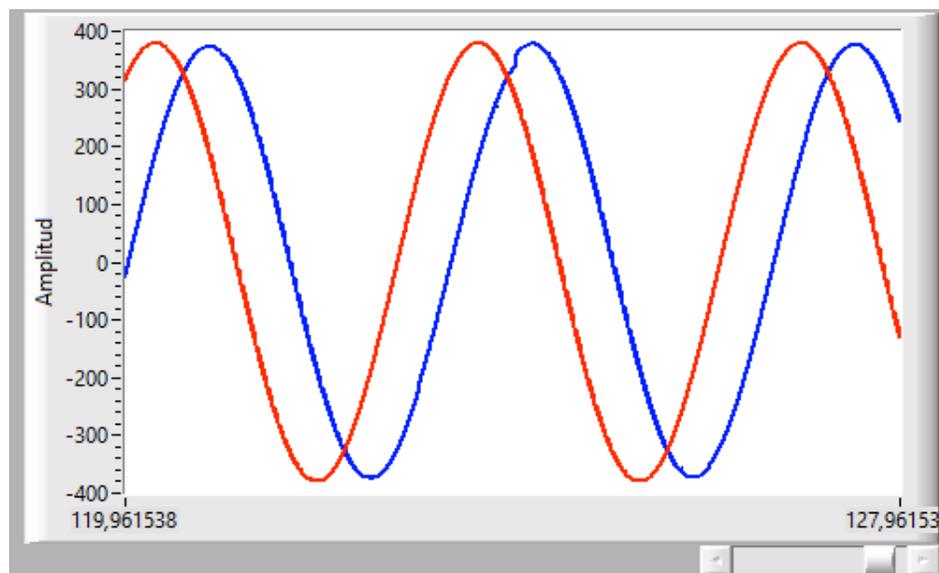
Fuente. Autor.

Figura 3-3. Gráfica de la velocidad (línea roja) del motor ideal vs la estimada (línea azul).



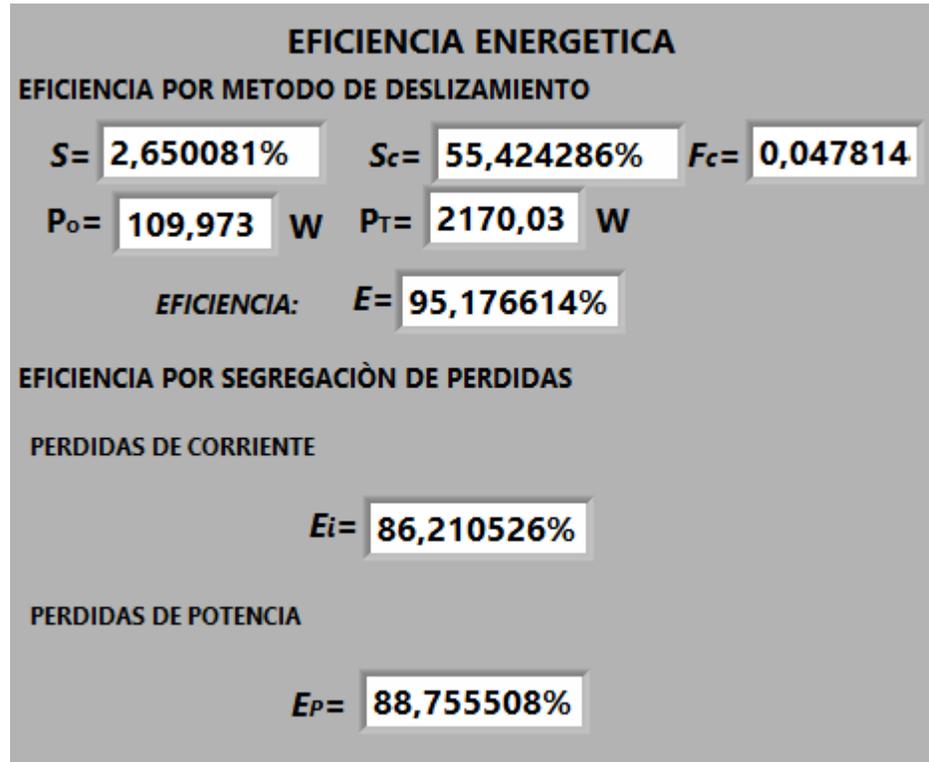
Fuente. Autor.

Figura 3-4. Gráfica de la señal de voltaje ideal vs la estimada.



Fuente. Autor.

Figura 3-5. Eficiencias calculadas.



Fuente. Autor.

3.2 Prueba 2

Para la segunda prueba se dejaron los mismos parámetros iniciales, puesto que, como se había mencionado antes, para cada dato de entrada existen 100 posibles variaciones, ahora bien, para cada uno de ellos también existirán 100 de salidas a partir de lo que pueda estimar la red neuronal, de esta forma los resultados obtenidos presentaran una variación porque corresponden a una posibilidad diferente a la anterior, eso permite afirmar que las iteraciones realizadas por el software permite presentar todas o en su defecto las mayores posibilidades de resultados finales teniendo en cuenta las variaciones ingresadas obtenidas por datos experimentales.

Figura 3-6. Parámetros del motor.

PARAMETROS DEL MOTOR		
VOLTAJE (VAC)	CORRIENTE (A)	POTENCIA PLACA(W)
380	6	2300
VELOCIDAD DEL ROTOR (RPM)	FRECUENCIA	
1800	60	
POTENCIA (W)	RESISTENCIA(Ohm)1	RESISTENCIA(Ohm) 2
2280	31,6667	31,6667

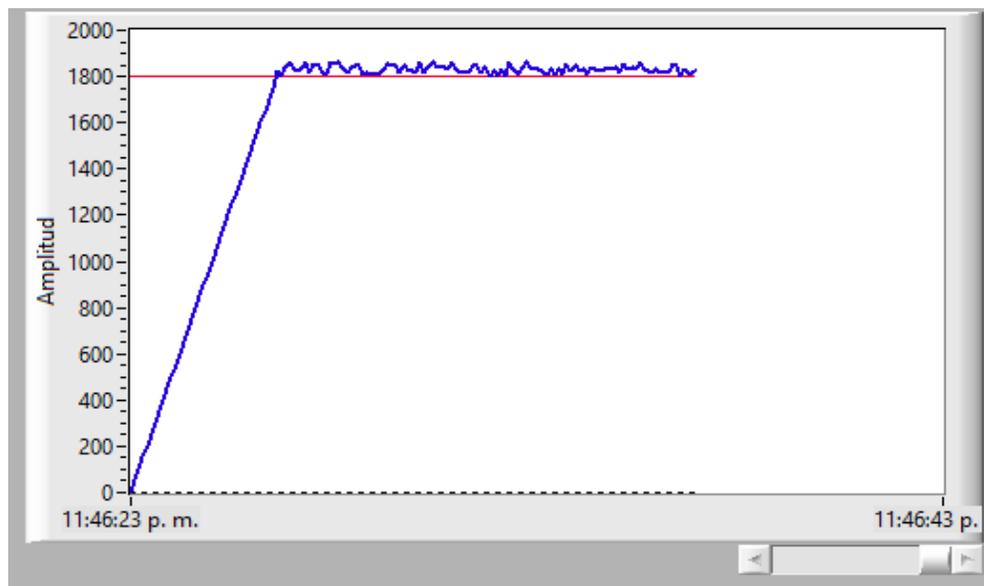
Fuente. Autor.

Figura 3-7. Parámetros estimados.

PARAMETROS ESTIMADOS		
VOLTAJE (VAC)	POTENCIA (W) 2	CORRIENTE (A)
373	2232	5,87368
VELOCIDAD DEL ROTOR (RPM).	IL1	IL2
1850	2,84211	2,84211
VELOCIDAD DEL ROTOR (RPM). CON CARGA	POLOS	
1804	4	

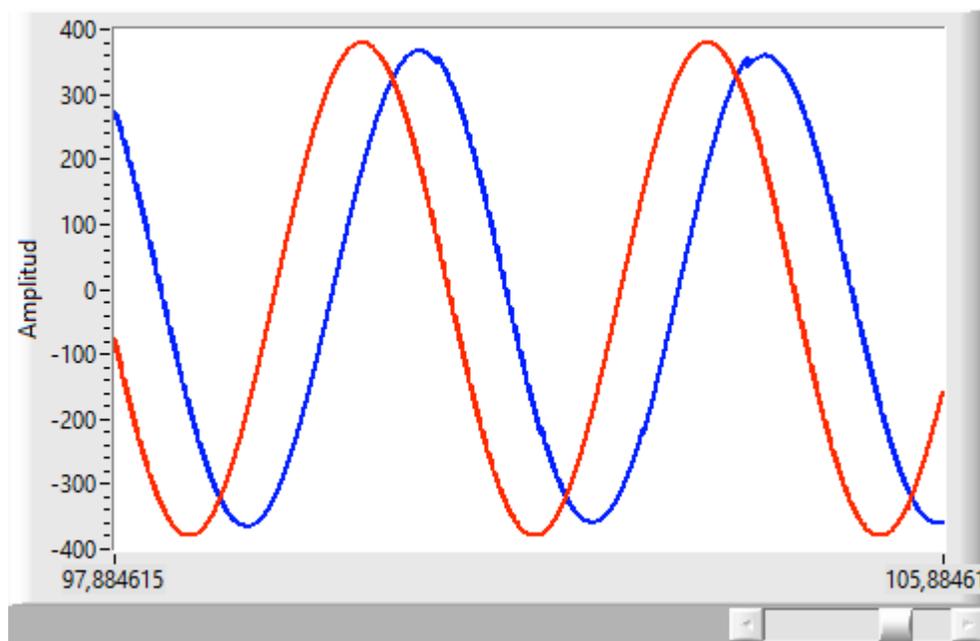
Fuente. Autor.

Figura 3-8. Gráfica de la velocidad (línea roja) del motor ideal vs la estimada (línea azul).



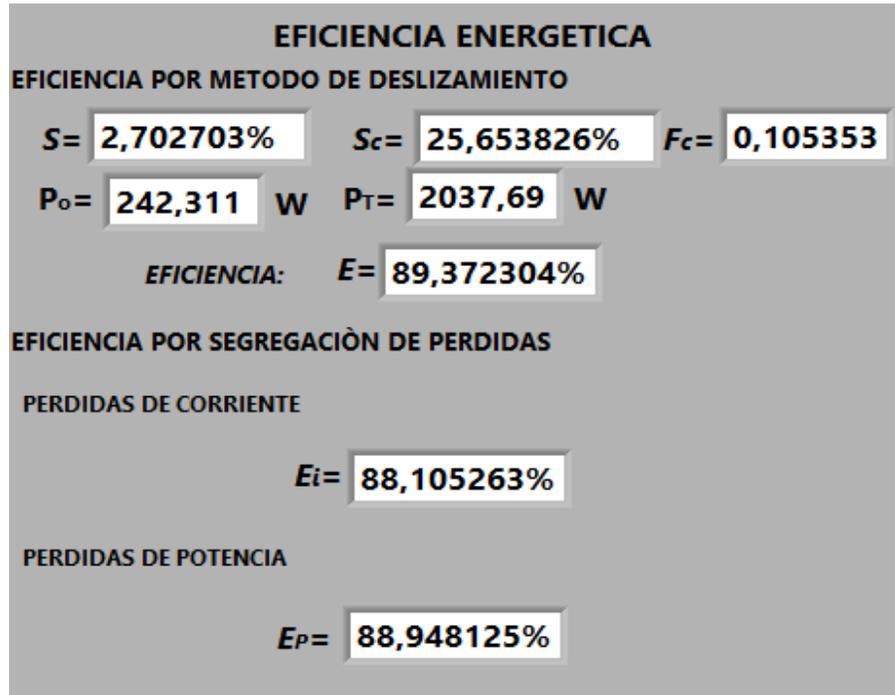
Fuente. Autor.

Figura 3-9. Gráfica de la señal de voltaje ideal vs la estimada.



Fuente. Autor.

Figura 3-10. Eficiencias calculadas.



Fuente. Autor

Tabla 4. Eficiencia obtenida para dos simulaciones con los mismos parámetros de entrada

EFICIENCIAS OBTENIDAS		
MÉTODO	PRUEBA 1	PRUEBA 2
DESLIZAMIENTO	95.176614 %	89.372304 %
PÉRDIDAS DE CORRIENTE	86.210526 %	88.105263 %
PÉRDIDAS DE POTENCIA	88.755508 %	88.948125 %

Fuente: Autor

En la tabla 4 se pueden apreciar los resultados obtenidos, en las pruebas se logran obtener valores diferentes, pero en ambos casos los resultados obtenidos se

acercan por mucho a los esperados, de esto se puede afirmar que el software arrojará las probabilidades acertadas que permitirán a los estudiantes hacerse a la idea de los posibles y múltiples resultados que se podrán obtener.

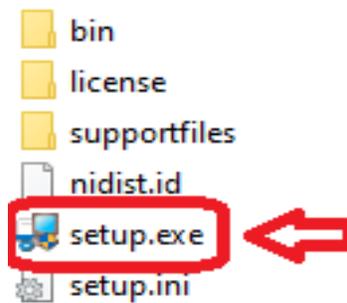
Como ingeniero electromecánico considero la importancia que tiene el conocer la eficiencia de un motor eléctrico, pues un ingeniero en una planta está rodeado de motores y muchos hablan de eficiencia, sí, pero no hay un equipo ni una herramienta para medirla, saben la importancia pero no conocen como medirla, pienso que esta herramienta que se diseñó en este proyecto es una buena solución para estimar un poco el valor de la eficiencia en los motores que se tiene, solo necesitando unos datos básicos y la facilidad de manejar este software puede estimar valores cercanos a un valor real de la eficiencia, sabiendo así que tanto se gana o se pierde con un motor en planta.

3.3 Manual de usuario

3.3.1 Instalación del software

Una vez descomprimida la carpeta que contiene el instalador del software (SIMULADOR DE BANCO DE PRUEBAS PARA MEDIR LA EFICIENCIA DE UN MOTOR ELECTRICO), se debe buscar el archivo de nombre Setup.exe (figura 3-11).

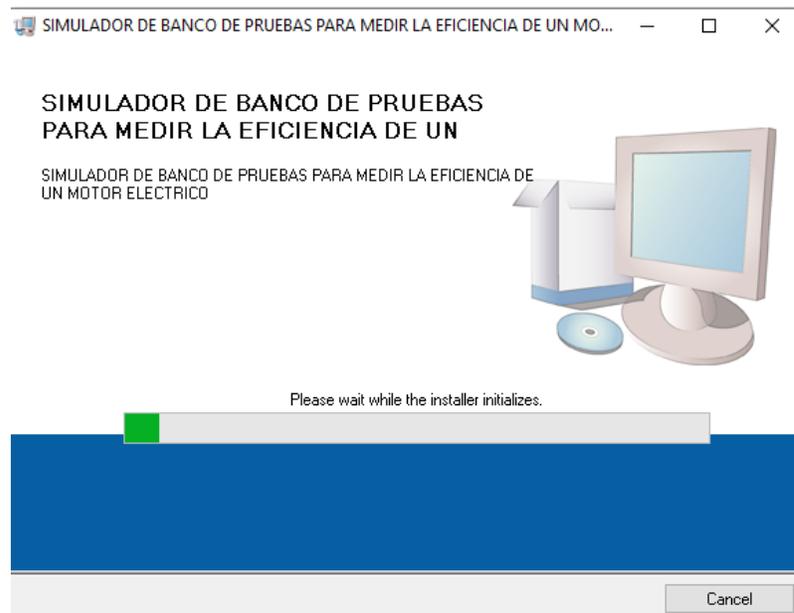
Figura 3-11. Archivo de instalación



Fuente: autor.

Al dar doble click se iniciará el programa de instalación (figura 3-12) donde se debe esperar que se preparen todos los componentes del software.

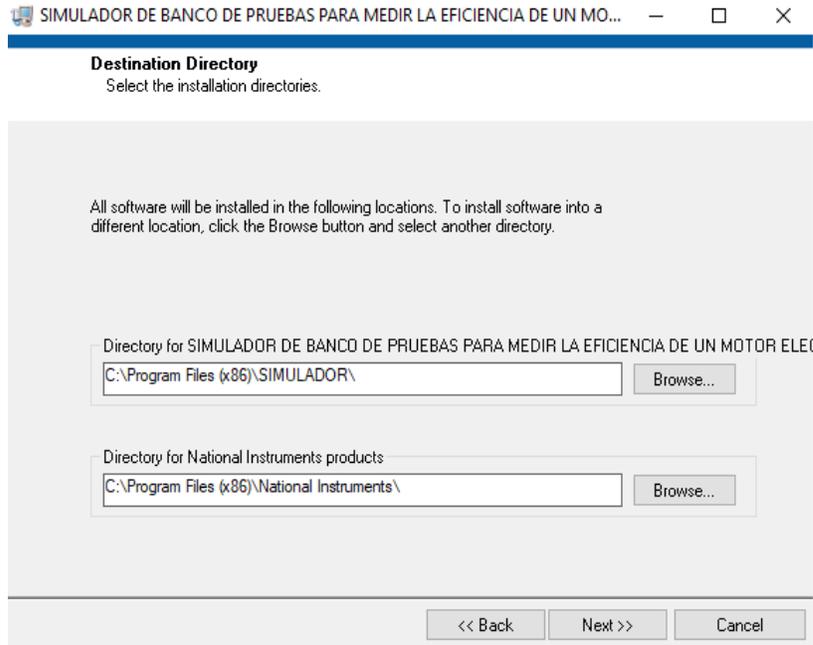
Figura 3-12. Proceso de instalación



Fuente: autor

Una vez preparado los componentes, como se ve en la figura 3-13 se debe escoger la carpeta de destino de la instalación, luego se debe dar click en Next (siguiente).

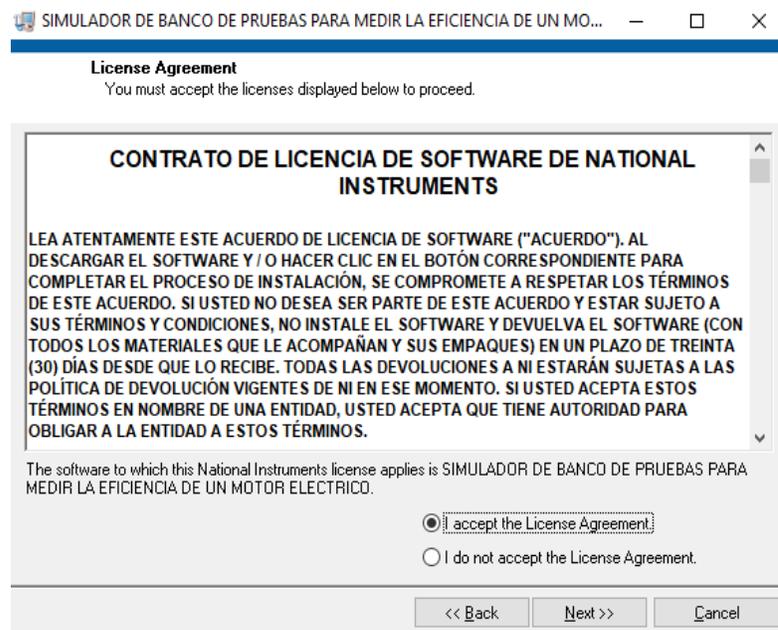
Figura 3-13. Proceso de instalación



Fuente: autor

En el siguiente recuadro (figura 3-14) leer y aceptar los términos de la licencia y clic en Next.

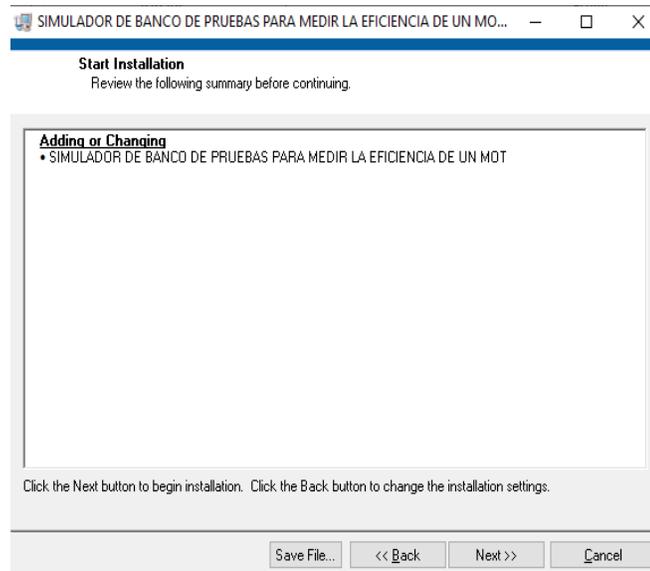
Figura 3-14. Términos de licencia



Fuente: autor

Una vez más se debe presionar en Next. (figura 3-15)

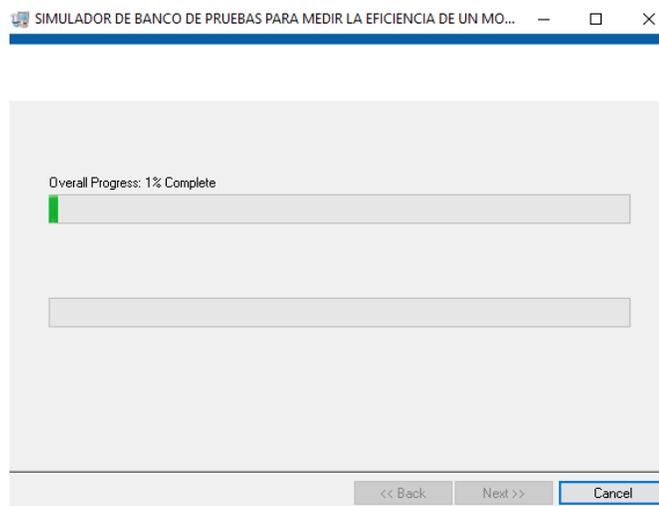
Figura 3-15. Proceso de instalación



Fuente: autor

A continuación (figura 3-16), el software iniciará la instalación, se recomienda que esta no sea interrumpida para que no exista errores en la instalación, se recomienda verificar la carga del equipo o en su defecto garantizar la conexión a la toma de corriente AC.

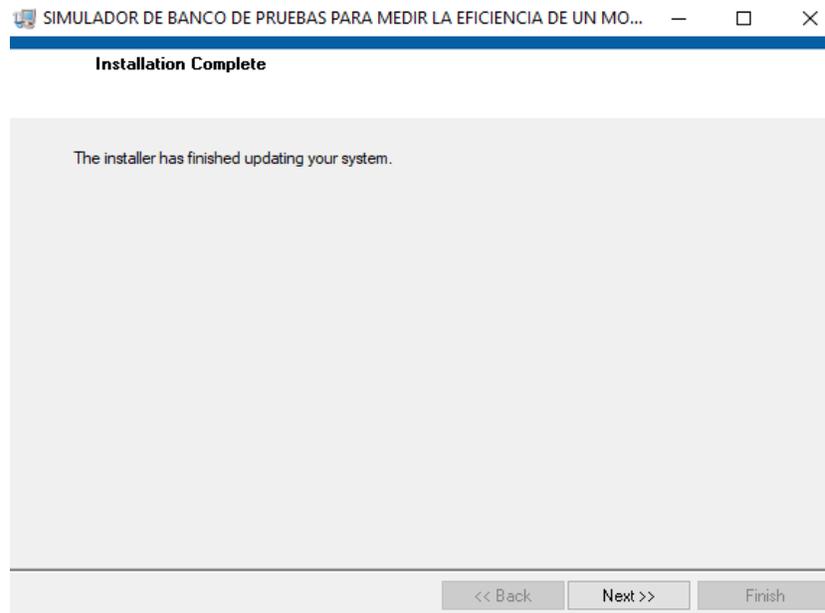
Figura 3-16. Proceso de instalación



Fuente: autor

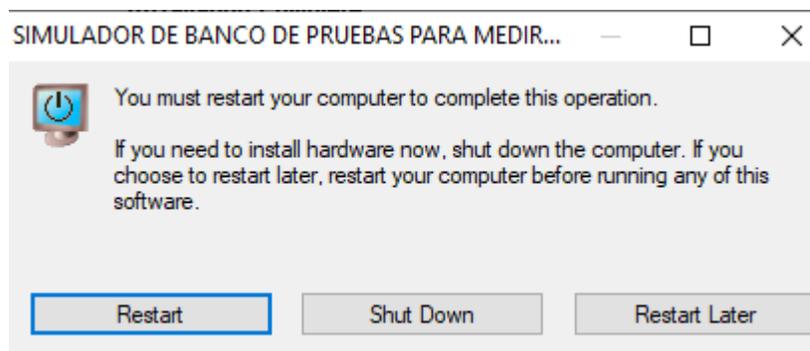
Finalizado la instalación se debe dar click en Next (figura 3-17) y luego saldrá un recuadro (figura 8) donde se debe presionar en “Restart” para reiniciar el equipo.

Figura 3-17. Proceso de instalación



Fuente: autor

Figura 3-18. Notificación para reiniciar pc y aplicar cambios.

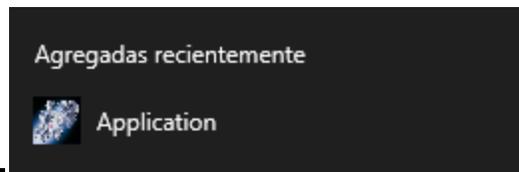


Fuente: autor

3.3.2 Iniciar aplicación

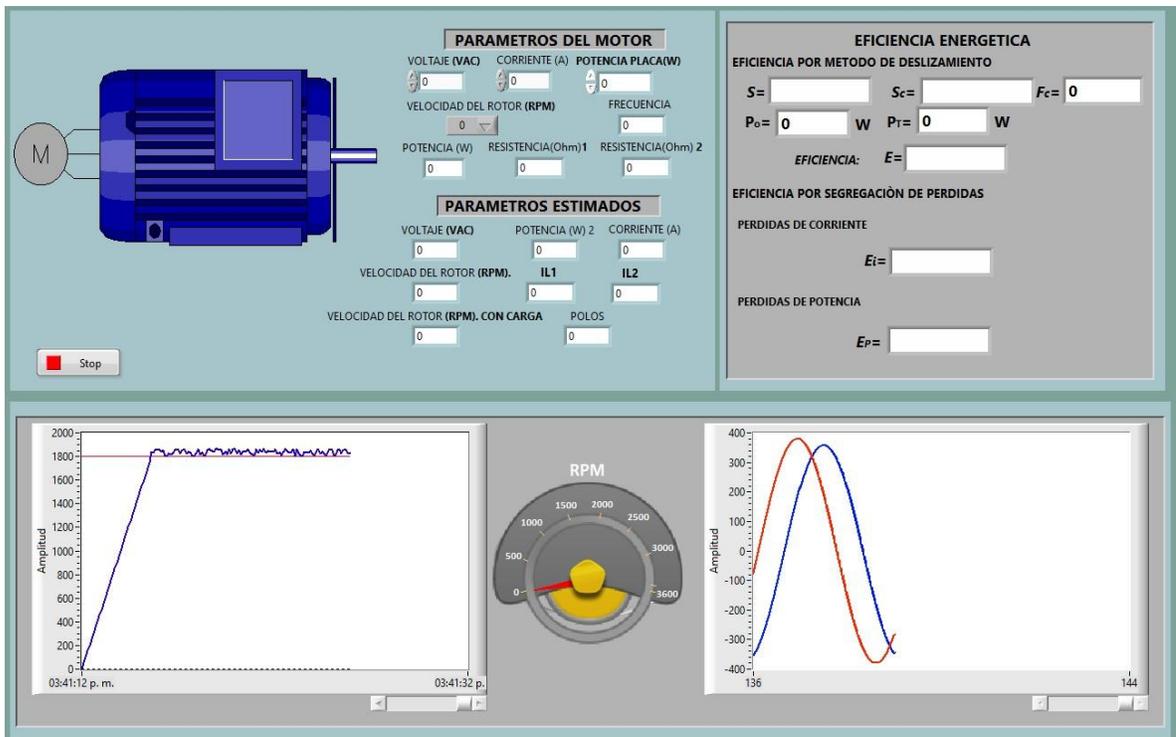
Finalizado la instalación debe dirigirse a la barra de búsqueda donde encontrará la aplicación en la lista de instaladas recientemente o agregadas recientemente (figura 3-19), se debe dar doble click y de inmediato iniciará la aplicación (figura 3-20).

Figura 3-19. Aplicación ejecutable



Fuente: autor

Figura 3-20. Ventana de software.

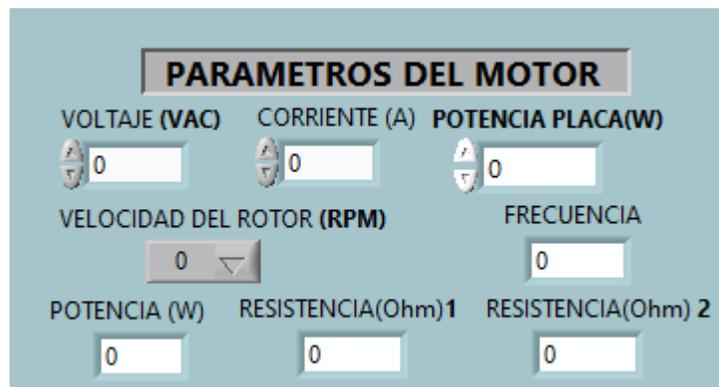


Fuente: autor

3.3.3 Ingreso de parámetros

Una vez ejecutada la aplicación se debe dirigir hasta el bloque de parámetros de motor que se encuentra en la parte superior izquierda (figura 3-21), una vez allí se deben ingresar los valores de voltaje (figura 3-22), corriente (figura 3-23), potencia (figura 3-24), y seleccionar la velocidad del motor, esta información a ingresar es la que se encuentra disponible en la placa de los motores eléctricos. Cuando se dé click en la barra velocidad del rotor se despliega las revoluciones nominales establecidas (450-3600 RPM) para los motores comerciales para frecuencia de 60 hertz (figura 3-25).

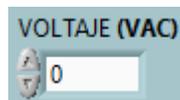
Figura 3-21. Sector para ingresar parámetros



The image shows a software interface titled "PARAMETROS DEL MOTOR". It contains several input fields and a dropdown menu. The fields are arranged in three rows. The first row has three fields: "VOLTAJE (VAC)", "CORRIENTE (A)", and "POTENCIA PLACA(W)", each with a numeric input field containing "0" and a small circular icon with a plus/minus sign. The second row has two fields: "VELOCIDAD DEL ROTOR (RPM)" with a dropdown menu showing "0" and a downward arrow, and "FRECUENCIA" with a numeric input field containing "0". The third row has three fields: "POTENCIA (W)", "RESISTENCIA(Ohm)1", and "RESISTENCIA(Ohm) 2", each with a numeric input field containing "0".

Fuente: autor

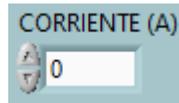
Figura 3-22. Ingresar valor del voltaje de la placa del motor



The image shows a close-up of the "VOLTAJE (VAC)" input field. It consists of a small circular icon with a plus/minus sign and a numeric input field containing the number "0".

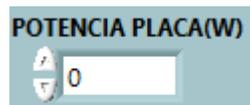
Fuente: autor

Figura 3-23. Ingresar valor de la corriente de la placa del motor



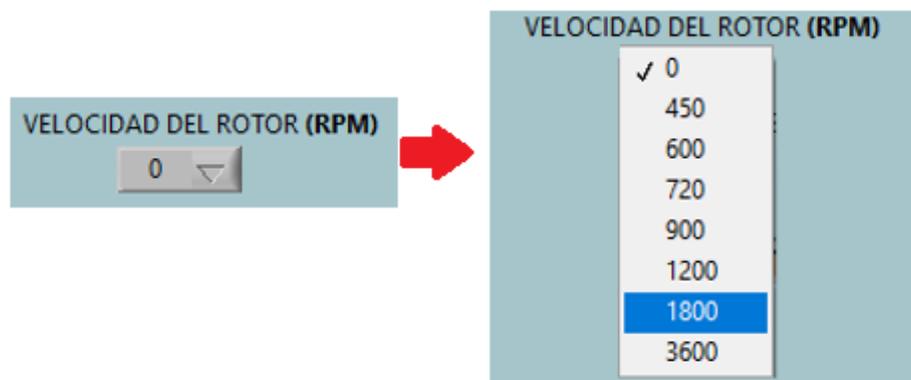
Fuente: autor

Figura 3-24. Ingresar valor de potencia de placa del motor



Fuente: autor

Figura 3-25. Selección de la velocidad del rotor

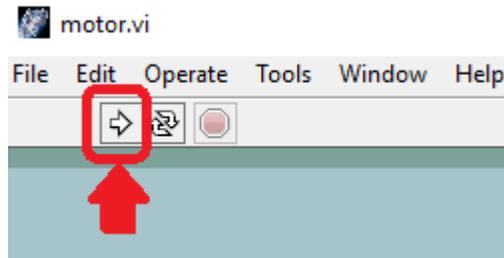


Fuente: autor

3.3.4 Iniciar simulación y visualización de resultados

Cuando se ingresen los valores necesarios para realizar la simulación se debe presionar el botón en forma de flecha que indica run (correr en español) (figura 16), la aplicación ejecuta los cálculos realizados y los presenta donde correspondan.

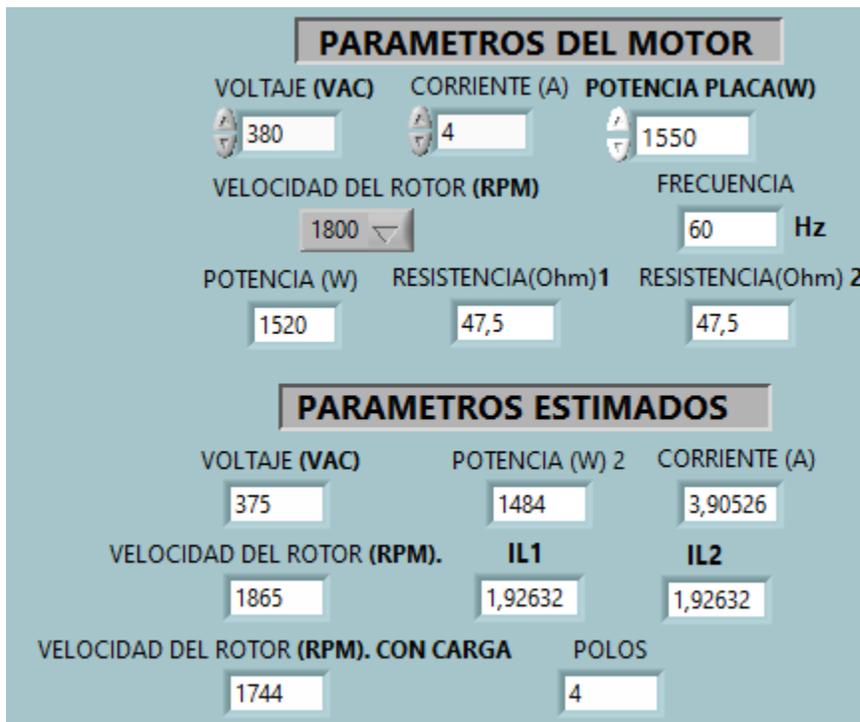
Figura 3-26. Inicio de simulación



Fuente: autor

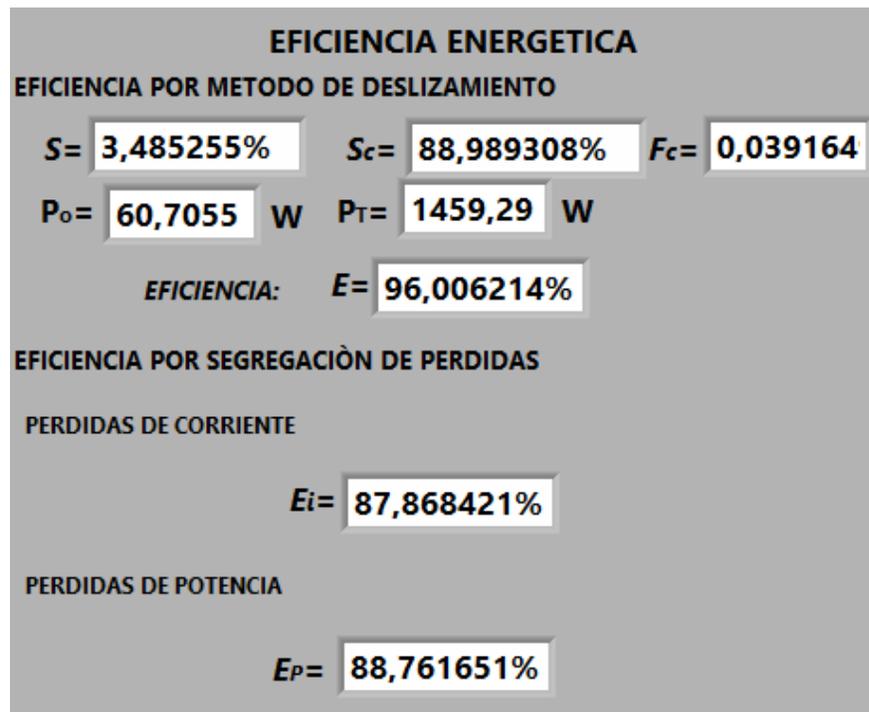
A continuación, se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos una vez cumplidos los pasos anteriores y ejecutada la aplicación con parámetros arbitrario:

Figura 3-27. Visualización de los cálculos realizados por el software



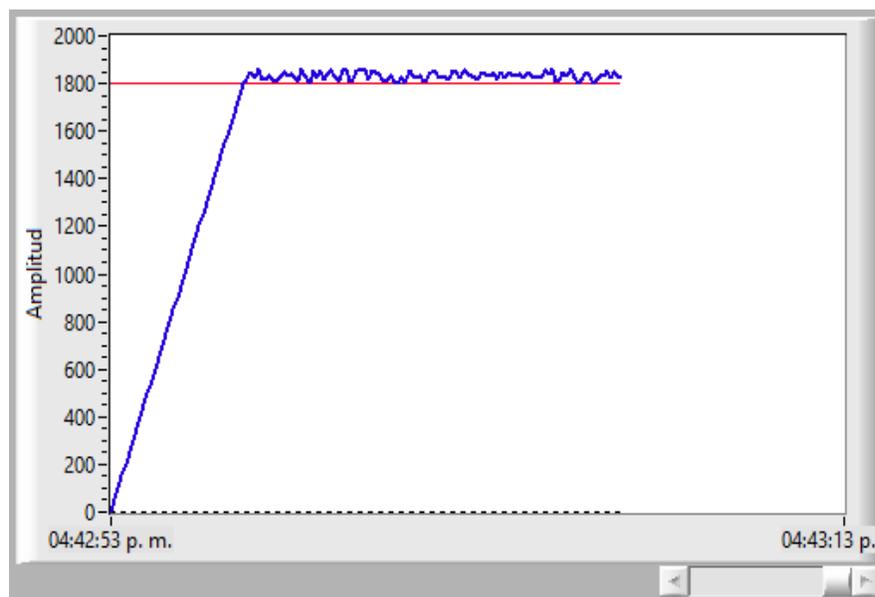
Fuente: autor

Figura 3-28. Valores de las eficiencias calculadas por el software



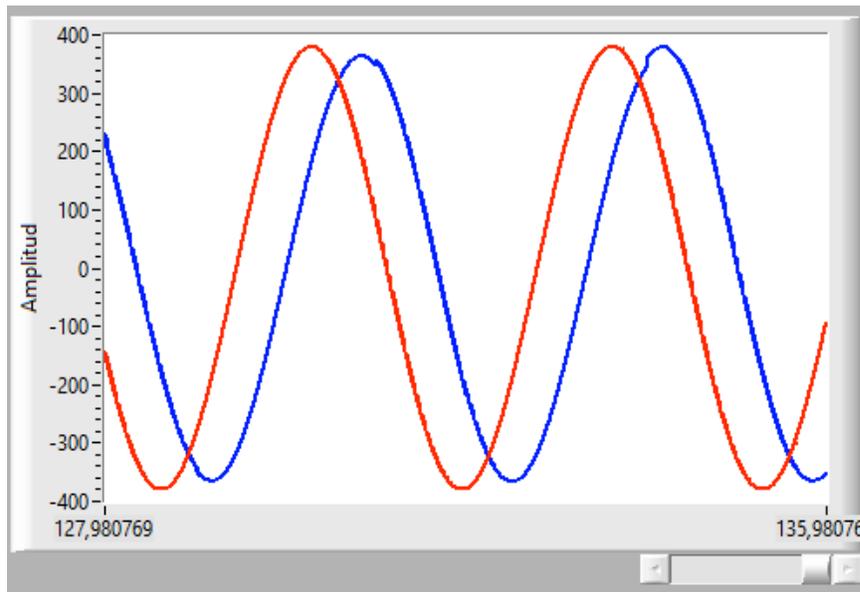
Fuente: autor

Figura 3-29. Grafica de la velocidad alcanzada por el motor



Fuente: autor

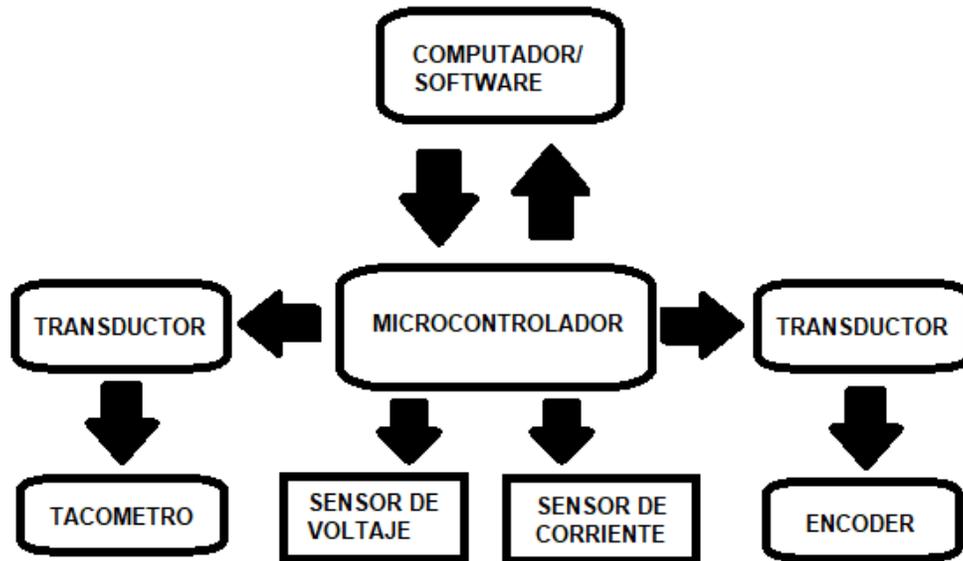
Figura 3-30. Señal de voltaje estimada vs la ingresada



Fuente: autor

NOTA: la aplicación es compatible con sistemas operativo Windows (versión Xp o superiores), requiere mínimo una memoria RAM de 2GB, un procesador con frecuencia mínima de 1.6GHz y almacenamiento de mínimo 1.4GB.

3.4 Diagrama y componentes sugeridos para la implementación física del banco de pruebas



- Microcontrolador de 32 bits.
- Sensor de corriente alterna con salida de voltaje análoga.
- Sensor de voltaje.
- Encoder rotativo.
- Tacómetro digital.
- Transductor o acondicionamiento de señal diseñador para adquirir las señales específicas

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- El software puede estimar los valores de eficiencia más cercanos a los experimentales para motores de 200 a 480v y de 720 a 3600 RPM
- El software permite una predicción muy cercana de los valores de eficiencia, esto teniendo en cuenta los ya establecidos en la norma estándar.
- Luego de la implementación y simulación del software se determinó que este sistema se puede rediseñar y en este caso añadir las adquisiciones de las señales reales con el fin de aplicarle procesamiento y determinar los resultados apoyados del sistema ya terminado. El entorno LabVIEW admite datos procesados por microcontroladores, esto facilitará la implementación física.
- El software logra estimar los valores muy cercanos a las especificadas por el fabricante.
- Las redes neuronales artificiales permiten mejorar el resultado de los cálculos esperados, en este caso permitió el cálculo de más de mil probabilidades por cada variable ingresada y aun así los valores obtenidos se acercan por mucho a los esperados.

4.2 Recomendaciones

En el caso de implementar el banco en medio físico se recomienda utilizar circuitos acondicionadores y estabilizadores de señales, con el fin de disminuir la histéresis de los sensores que deban acoplarse al sistema, esto se sugiere basados en la recolección de datos de los dispositivos pertinentes para dicha tarea.

Bibliografía

- [1] .DE, E., ENERGÉTICA, E., ELÉCTRICOS, M., EL SALVADOR, I. N., DE, P. D. L., NO, E. R., & DE, C. T. F. (2018). Motores eléctricos.
- [2]. Cembranos Nistal, F. J. (1999). Automatismos eléctricos, neumáticos e hidráulicos. Editorial Paraninfo, Madrid.
- [3]. Murillo, W. (2016). Mantenimiento predictivo para motores eléctricos. Obtenido de <https://docplayer.es/4601174-Mantenimiento-predictivopara-motores-electricos-ing-william-murillo.html>.
- [4]. Torrens, P. C. (2005). Máquinas eléctricas: Aplicaciones de ingeniería eléctrica a instalaciones navales y marinas. Prácticas (Vol. 94). Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politecnica.
- [5]. Cardona, H., Martínez, M., & Posada, J. (2015). Sistema de información para la elaboración automática del informe de la prueba de eficiencia en motores de inducción de hasta 10 HP, según la norma IEC 60034. *El Hombre y la Máquina*, (47), 19-26.
- [6]. Concepto Definición. (2019). Motor eléctrico. Marzo 31 de 2020, de Concepto Definición Sitio web: <https://conceptodefinicion.de/motor-electrico/>
- [7]. Keljik, J. (2009). *Electricidad 4*. Buenos Aires: Cengage Learning.
- [8]. Andrés Orlando Agredo Avilez (2018). Diseño e implementación de banco de ensayos para estudio de eficiencia energética en motores eléctricos en el laboratorio de potencia de la pontificia universidad javeriana (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.
- [9]. A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari and A. Pastorelli, "Induction motor efficiency measurements in accordance to IEEE 112-B, IEC 34-2 and JEC 37 international standards," IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03., Madison, WI, USA, 2003, pp. 1599-1605 vol.3, doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210664.

- [10]. Boris Jair Galindo Ramirez (2010). Análisis comparativo de las normas IEC60034-2-1 y IEEE112 para determinar la eficiencia de motores de inducción en el laboratorio (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia.
- [11]. Wildi, T. (2007). Maquinas eléctricas y sistemas de potencia. Distrito Federal: Pearson Education.
- [12]. Eléctrica aplicada. (2020). Eficiencia de un motor eléctrico y los valores más comunes. Abril 01 de 2020, De Eléctrica Aplicada Sitio web <https://www.electricaplicada.com/eficiencia-de-un-motor-electrico-y-los-valores-mas-comunes/>
- [13]. Fuente: Schabmueller.de. 2020. Schabmüller – Entwicklung Und Fertigung Modernster Antriebssysteme Und Elektrischer Maschinen.
- [14]. AGREDO, A., 2018. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE BANCO DE ENSAYOS PARA ESTUDIO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOTORES ELÉCTRICOS EN EL LABORATORIO DE POTENCIA DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI. 1st ed. Cali.
- [15]. Boscaglia, L. (2020). Advanced Transient Thermal Modeling of Traction Motors in Ansys (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- [16]. Principal, P., eléctrica, C., eléctrica, C., 438-II, A. and 438-II, A., 2020. Analizador De Calidad Eléctrica Y Motores Fluke 438-II. [online] Fluke.com. disponible en: <<https://www.fluke.com/es-co/producto/comprobacion-electrica/calidad-electrica/438-ii>>
- [17]. Ni.com. 2020. ¿Qué Es Labview? [online] disponible en: <<https://www.ni.com/es-co/shop/labview.html>>
- [18]. Matich, D. J. (2001). Redes Neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones. Universidad Tecnológica Nacional, México.
- [19]. Arocas Maiquez, D. (2018). Instalación, puesta en marcha y desarrollo de un sistema de adquisición de datos de un nuevo diseño de torre de refrigeración de tiro mecánico.

[20]. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2004). IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. Recuperado de: https://engineering.purdue.edu/~dionysis/EE452/Lab12/IEEEStd_112.pdf

[21]. Ministerio de Minas y Energías. (2015). Plan Energético Nacional Colombia (pp. 109-122). Bogotá, Colombia: Juan Bejarano.

[22]. QUISPE, Ciro Enrique. Una Comparación de Metodologías Prácticas para Determinar la Eficiencia de Motores de Inducción en Sitio. Grupo de Investigación en Energías GIEN - UAO, Departamento de Energética y Mecánica Universidad Autónoma de Occidente