



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

**“DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS EN LOS MOTORES TRIFÁSICOS
DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA CON LÍNEAS
DESEQUILIBRADAS, MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA”**

CASICANA APUPALO DIEGO EFRAÍN

FREIRE UBILLUZ PATRICIO IVÁN

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

RIOBAMBA – ECUADOR

2015

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2013-12-23

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

CASICANA APUPALO DIEGO EFRAÍN

FREIRE UBILLUZ PATRICIO IVÁN

Titulada:

**“DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS EN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN JAULA DE
ARDILLA CON LÍNEAS DESEQUILIBRADAS, MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el título de:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

Ing. Marco Santillán Gallegos

DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. César Astudillo

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Fernando Gonzáles

ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: CASICANA APUPALO DIEGO EFRAÍN

TÍTULO DE LA TESIS: “DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS EN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA CON LÍNEAS DESEQUILIBRADAS, MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA”

Fecha de Examinación:2015-06-03

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Mario Pástor R. PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. César Astudillo DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Fernando Gonzáles ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Mario Pástor R.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: FREIRE UBILLUZ PATRICIO IVÁN

TÍTULO DE LA TESIS: “DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS EN LOS MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN JAULA DE ARDILLA CON LÍNEAS DESEQUILIBRADAS, MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA”

Fecha de Examinación:2015-06-03

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Mario Pástor R. PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. César Astudillo DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Fernando Gonzáles ASESOR			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Mario Pástor R.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Diego Efraín Casicana Apupalo

Patricio Iván Freire Ubilluz

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico primeramente a Dios quien supo guiarme por el buen camino, darme sabiduría y fuerza para salir adelante todos los días de mi vida.

Con todo el amor y cariño del mundo va dedicado a toda mi familia, que hicieron todo en la vida para que yo pudiera conseguir este sueño, por motivarme y apoyarme en los momentos más difíciles de manera especial a mis padres Isabel y Luis , también quiero dedicar a mis hermanos por ser un pilar fundamental de mi vida, que confiaron en mí y me ayudaron a hacer posible la culminación de este trabajo Luis y Dianita, a mi esposa Alexandra por comprenderme, acompañarme y apoyarme todo este tiempo, por saber aconsejarme, ahora puedo decir que este trabajo lleva una parte de ti, gracias por estar siempre a mi lado.

Patricio Iván Freire Ubilluz

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres Josefa y Carlos, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A mis hermanos Carlos Darío y Verónica, por estar conmigo y apoyarme siempre y lo más importante ser mi guía y ejemplo a seguir, los quiero mucho.

A mi esposa Liliana y mi hija Zahira, por ser una razón más para no rendirme y cumplir este objetivo, por ser ese apoyo e inspiración las amo.

Diego Efraín Casicana Apupalo

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de investigación se lo agradecemos a Dios por bendecirnos e iluminarnos para llegar hasta donde hemos llegado y haber cumplido con cabalidad este trabajo.

Deseamos hacer público nuestro más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial al personal docente de la facultad de Mecánica escuela de Ingeniería de Mantenimiento ya que ellos nos enseñaron a valorar nuestra profesión y nos encaminaron en el sendero del conocimiento, otorgándonos experiencias en beneficio de nuestra formación profesional, en especial al Ing. César Astudillo y al Ing. Fernando González quienes con profunda vocación profesional guiaron el presente trabajo investigativo.

A todos los amigos que han formado parte de nuestra vida en el transcurso de esta gran etapa y personas que nos apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito este trabajo.

Diego Efraín Casicana Apupalo

Patricio Iván Freire Ubilluz

CONTENIDO

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación	1
1.3	Objetivos	2
1.3.1	<i>Objetivo general.</i>	2
1.3.2	<i>Objetivos específicos:</i>	2
2.	MARCO TEÓRICO	
2.1	Energía	3
2.2	Tipos de energía	3
2.3	Energía Eléctrica	4
2.4	Motores de inducción jaula de ardilla	4
2.5	Elementos que constituyen a un motor de inducción.....	5
2.5.1	<i>Estator.</i>	5
2.5.2	<i>Rotor.</i>	6
2.5.3	<i>Carcasa y partes auxiliares.</i>	8
2.6	Principios de operación del motor de inducción.....	8
2.7	Deslizamiento.....	10
2.7.1	<i>Velocidad en el rotor.</i>	11
2.7.2	<i>Frecuencia del rotor.</i>	12
2.7.3	<i>Potencia desarrollada por el rotor.</i>	12
2.8	Par del motor.....	13
2.9	Factor de carga	15
2.10	Factor de potencia.....	16
2.11	Flicker.....	18
2.12	Desequilibrio de tensiones o líneas desequilibradas	18
2.13	Desequilibrio de tensiones y su influencia con los efectos en la operación de motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.....	18
2.14	Eficiencia Energética	19
2.15	Eficiencias del motor de inducción.....	19
2.16	Las pérdidas del motor.....	20
2.17	Clases de pérdidas de energía en un motor.....	21
2.18	Las pérdidas en el motor por variación en el voltaje.....	22
2.19	Norma para la medición de la eficiencia energética en motores de inducción... ..	23
2.20	Medición de la eficiencia energética en motores trifásicos jaula de ardilla.....	24
2.21	Características de operación del equipo Fluke 435 II.....	24
2.21.1	<i>Características de Entrada de Tensión</i>	25
3.	MEDICIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN MOTORES	
3.1	Medición de pérdidas de energía en motores trifásicos de inducción jaula de ardilla con líneas desequilibradas.	27
3.2	Causas de las pérdidas de energía en motores de inducción jaula de ardilla con líneas desequilibradas.	29
3.3	Procedimiento para registro de mediciones	29
3.3.1	<i>Características que definen un motor.</i>	29
3.3.2	<i>Identificación del ciclo de carga del motor.</i>	29
3.3.3	<i>Parámetros de la medición.</i>	29
3.3.4	<i>Registro de mediciones.</i>	30
3.4	Conexiones realizadas para la medición.....	30
3.4.1	<i>Conexión de entrada.</i>	31

3.5	Configuración del analizador	32
3.5.1	<i>Configuración del cableado.</i>	32
3.6	Ejecución de mediciones de desequilibrio de tensiones	34
3.7	Descarga de datos obtenidos del analizador al PC.....	38
3.8	Punto de medición de desequilibrio de tensiones en motores de inducción tipo jaula de ardilla.	39
3.9	Diagrama para realizar las mediciones de eficiencia en motores de inducción..	39
3.10	Informe de resultados de la medición de eficiencia energética.....	40
3.10.1	<i>Partes del informe</i>	40

4. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA Y FACTOR DE CARGA

4.1	Componentes utilizados para el cálculo de la eficiencia con líneas desequilibradas.....	44
4.1.1	<i>Potencia activa (P).</i>	46
4.1.2	<i>Potencia activa fundamental.</i>	46
4.1.3	<i>Potencia aparente (S).</i>	47
4.1.4	<i>Potencia aparente fundamental (S).</i>	47
4.1.5	<i>Potencia reactiva fundamental (Q).</i>	48
4.1.6	<i>Potencia de armónicos (Dh).</i>	48
4.1.7	<i>VA - Potencia de desequilibrio (Du).</i>	49
4.1.8	<i>Factor de potencia (PF).</i>	49
4.1.9	<i>Factor (DPF) de potencia de desplazamiento y Cos ϕ.</i>	49
4.2	Pérdidas en los motores de inducción	50
4.2.1	<i>Pérdidas de potencia y energía.</i>	50
4.3	Cálculo de la eficiencia de los motores de inducción.	51
4.4	La Interpolación De LaGrange	56

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MEDICIÓN

5.1	Análisis de resultados.....	58
5.2	Ajuste en la eficiencia por desbalance en el voltaje.....	62
5.3	Recomendaciones para el uso correcto de motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.....	63
5.4	Beneficios del análisis de eficiencia energética.	65

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1	Conclusiones	67
6.2	Recomendaciones.....	67

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1	Coordenadas del motor de inducción 4
2	Diagrama fasorial de las FEM en el motor..... 4
3	Arreglo de los embobinados de un estator trifásico 5
4	Rotor devanado trifásico 6
5	Rotor jaula de ardilla 7
6	Fuerzas ejercidas por el campo magnético rotatorio en el rotor de un motor 9
7	Curva típica par - velocidad 14
8	Curvas típicas Par-Velocidad para motores clase A.B.C y D 15
9	Diagrama vectorial de potencias 16
10	Comportamiento típico del factor de potencia en un motor de inducción 17
11	Eficiencia de un motor de inducción..... 20
12	Pérdidas en los motores 20
13	Clases de pérdidas 21
14	Equipo Fluke 435 Serie II 25
15	Motor M1 27
16	Motor M2 28
17	Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico 31
18	Diagrama de vectores correspondiente al analizador 31
19	Configuración activa 32
20	Configuración del parámetro 32
21	Configuración del cableado para motores trifásicos 33
22	Conexión de sondas..... 34
23	Parámetros de medición 34
24	Parámetro desequilibrio..... 35
25	Fasor de desequilibrio 35
26	Pantalla HOLD y RUN..... 36
27	Pantalla de multímetro..... 36
28	Pantalla de tendencia de desequilibrio 37
29	Menú de eventos..... 37
30	Descarga de datos 38
31	Punto de medición de desequilibrio de tensiones..... 39
32	Diagrama para realizar mediciones de eficiencia en motores de inducción..... 39
33	Motor M3 41
34	Tabla de resumen..... 43
35	Puntos para la interpolación de segundo orden con el polinomio de LaGrange. .. 57
36	Desequilibrio de tensión vs desequilibrio de corriente 61
37	Aumento de temperatura debido al desequilibrio de tensión 61
38	Disminución de la eficiencia del motor M3 62
39	Ahorro de energía en los sistemas de accionamiento..... 64
40	Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la potencia nominal del motor..... 65

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1	Tipos de pérdidas y sus características 22
2	Características de entrada de tensión..... 25
3	Características de entrada de corriente 25
4	Datos de placa del motor M1 28
5	Datos de placa del motor M2 28
6	Datos de placa de motor M3..... 41
7	Datos de medición del motor M3 51
8	Valores de eficiencia nominal a plena carga para motores eléctricos. 53
9	Norma ANSI C84.1 58
10	Norma IEEE519-2014, armónicos de voltaje..... 59
11	Norma IEEE519-2014, armónicos de corriente 59
12	Análisis de resultados de voltaje y corriente motor M3..... 60
13	Análisis de resultados de armónicos voltaje y corriente 60
14	Análisis de resultados de desequilibrio de tensiones..... 60

LISTA DE ABREVIACIONES

W	Potencia activa
W fund	Potencia activa fundamental
VA	Potencia Aparente
BNC	Conector tipo C
VAR	Potencia reactiva fundamental
CV	Caballos de vapor
EE	Eficiencia Energética
FEM	Fuerza Electromotriz (voltios)
Du	Potencia de desequilibrio
GEI	Gases de Efecto Invernadero
n_M	Eficiencia del motor
HP	Caballo de fuerza (lbf·ft/min)
Pe	Potencia de entrada del motor
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Ps	Potencia de salida del motor
$N_{s_{AVF}}$	Velocidad síncrona ajustada a la frecuencia
Nr	Velocidad del motor
kVAR (i)	Kilo voltio amperio inductivo.
kVAR (c)	Kilo voltio amperio capacitivo.
$N_{s_{60Hz}}$	Velocidad síncrona a 60 Hz.
mV/A	Mili voltio amperio
MΩ	Mega Ohmios
PCC	Punto de acoplamiento Común
a	Pérdidas Variables
b	Pérdidas Fijas
rpm	Revoluciones por minuto
L(100%)	Porcentaje de pérdidas.
Vrms	Voltaje eficaz

RESUMEN

El proyecto de investigación tiene por objetivo orientar acerca de la importancia de la pérdida de energía en motores trifásicos dentro del campo de mantenimiento basado en análisis de eficiencia energética, este proyecto se fundamenta en el diagnóstico y determinación de problemas en los motores de inducción jaula de ardilla. Se desarrolla con el propósito de alcanzar un mayor rendimiento en los motores, optimizar los recursos de mantenimiento, determinar y monitorear la condición del estado de los motores con componentes rotativos en tiempo real.

El estudio preliminar abarca, conceptos teóricos básicos sobre los motores trifásicos jaula de ardilla, breve descripción de los parámetros que el equipo de medición utiliza, proceso que se ha realizado para la medición, levantamiento de datos técnicos y evaluación de los motores y sus componentes rotativos, revisión de los resultados obtenidos cuya información es esencial para determinar la pérdida energética en los mismos, además se indican las fórmulas que son utilizadas dentro del campo de medición de eficiencia energético.

El monitoreo del sistema se lo realiza con el equipo de medición de la calidad de energía FLUKE 435 II, para posteriormente realizar la transferencia de datos al equipo Power Log 4.0.2 para la recolección de datos y su análisis respectivo.

Con el análisis realizado se detallan cuáles fueron los factores que ocasionaron las diferentes fallas en los motores, además este trabajo sirve como guía práctica para el personal técnico y así podrán evitar calentamiento de los motores, paros imprevistos y lograr reducir el consumo energético en las diferentes empresas.

ABSTRACT

The objective of this research project is to provide guidance on the importance of the importance of the loss of power in three-phase motors in the field of maintenance based on analysis of energy efficiency, this project is based on the diagnosis and problem determination in induction motors squirrel cage. It develops with the purpose of achieving higher performance engines, optimize maintenance resources, determine and monitor the status of the engines with rotating components in real time.

The preliminary study includes, basic theoretical concepts on the three phase motors squirrel cage, a brief description of the parameters that the measuring equipment used, a process that has been done to the measurement, lifting of theoretical data and evaluation of the engines and their rotating components, review of the results obtained such information is essential to determine the energy loss in the same, also indicated the formulas that are used within the energy efficiency measurement field.

The monitoring system is done with the measuring equipment for the quality of energy FLUKE 435 II, then to transfer data to the computer Power Log 4.0.2 for data collection and their respective analysis.

With the analysis details which were the factors that caused different failures in engines, in addition this work serves as a practical guide for the technical staff so will be able to avoid heating of the engines, unforeseen stoppages and reduce energy consumption in different companies.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La industria lleva años trabajando con motores de inducción jaula de ardilla siendo el más común y prácticamente realizando todas las aplicaciones industriales, su uso es tan general que olvidamos algunos aspectos en el momento de aplicar y seleccionar el mismo.

Los motores eléctricos son máquinas que transforman la energía eléctrica recibida de la red de suministro en energía mecánica rotacional en el eje. De este modo se puede manipular cualquier tipo de carga mecánica, siempre que se pueda disponer de una red eléctrica y que está sea de calidad; en los últimos años se ha determinado que la calidad de energía es un parámetro imprescindible en el rendimiento del motor, ya que si está es mala causara pérdidas de potencia en las diferentes partes del motor.

Empresas dedicadas al estudio de calidad y eficiencia energética han visto la necesidad de implementar en el mercado equipos de alta tecnología que puedan descubrir una pérdida de energía o corregirla; para solucionar el problema energético que se tiene en la mayoría de las instalaciones de la industrias de todo el mundo.

1.2 Justificación

Los motores eléctricos de inducción jaula de ardilla se utilizan en diferentes industrias, y en algunas es vital garantizar su adecuado funcionamiento. Esto da la necesidad de una herramienta que permita conocer la condición del motor sin intervenir en la operación del equipo.

Uno de los problemas en la calidad de suministro energético es ocasionado por líneas desequilibradas; para ello con la ayuda del analizador de la energía FLUKE 435 II se obtendrá datos que proporcionan información del estado de funcionamiento del motor.

Mediante el presente trabajo de investigación se pretende colaborar en el conocimiento científico, tecnológico a los estudiantes que utilizan los laboratorios de la Facultad de Mecánica, en la determinación de pérdidas energéticas en motores trifásicos de inducción jaula de ardilla con líneas desequilibradas, a través de un equipo de medición de calidad energética (Analizador de la energía y de la calidad eléctrica FLUKE 435 serie II), contribuyendo además con el desarrollo integral y sustentable del país, en consideración a las políticas del Plan Nacional del Buen Vivir.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general. Determinar las pérdidas energéticas en motores trifásicos de inducción jaula de ardilla con líneas desequilibradas, mediante la medición de la eficiencia energética.

1.3.2 Objetivos específicos:

Analizar las causas de pérdidas de energía en los motores trifásicos asincrónicos con líneas desequilibradas.

Realizar mediciones en motores trifásicos jaula de ardilla con el equipo FLUKE 435 II aplicando diferentes cargas.

Elaborar un informe técnico de resultados basado en los datos obtenidos.

Proponer soluciones factibles tanto técnicas como económicas para mitigar efectos negativos del resultado de la medición.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Energía

El término energía (del griego *enérgeia*, 'actividad', 'operación'; de *energós*, 'fuerza de acción' o 'fuerza trabajando') tiene diversos significados y definiciones, relacionadas con la idea de una capacidad para obrar, transformar o poner en movimiento (ALONSO, 1976).

En física, energía se define como la capacidad para realizar un trabajo. En tecnología y economía, energía se refiere a un recurso natural (incluyendo a su tecnología asociada) para extraerla, transformarla y darle un uso industrial o económico (ALONSO, 1976).

2.2 Tipos de energía

En general la energía se describe a la capacidad para forjar o poner en movimiento, puede hacer referencia a (KLEPPNER, 1973):

- La energía potencial.
- La energía cinética.
- La energía mecánica.
- La energía electromagnética.

La energía en sí misma nunca es un bien para el consumo final sino un bien intermedio para satisfacer otras necesidades. También se describe a la energía como recurso natural que permite realizar trabajo o servir de subsidiario a actividades económicas independientes de la producción de energía (KLEPPNER, 1973).

- La energía eléctrica.
- La energía eólica.
- La energía nuclear.
- La energía térmica.

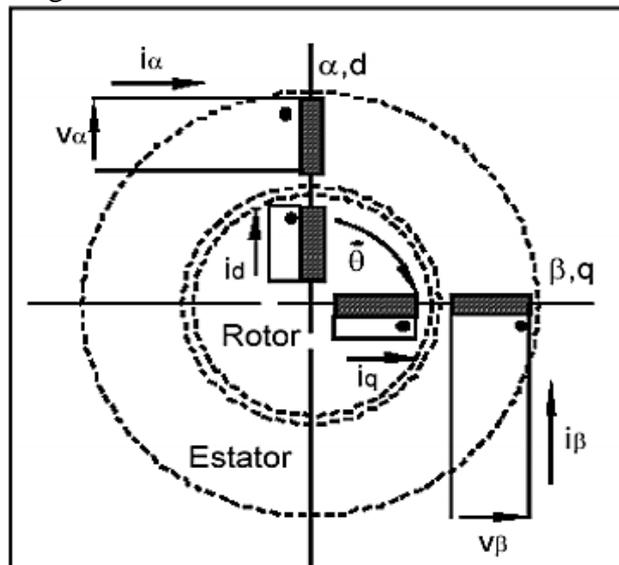
2.3 Energía Eléctrica

La energía eléctrica se obtiene por el movimiento de cargas eléctricas (electrones positivos y negativos) que se produce en el interior de materiales conductores (por ejemplo, cables metálicos como el cobre) es una fuente de energía renovable.

2.4 Motores de inducción jaula de ardilla

Toda la energía eléctrica emanada en el motor de inducción convencional es desde el estator. Las corrientes del estator mediante los flujos producidos originan campos magnéticos rotatorios cortando a los conductores del rotor obteniendo sobre ellos la FEM inducida empleada para imponer corrientes en los ejes "d" y "q" del rotor como se muestra en la figura 1. El torque eléctrico se ocasiona cuando el campo magnético rotatorio del estator se encuentra interactuando con el campo magnético rotatorio originado por las corrientes que circulan en el rotor, accediendo a construir un motor de gran difusión industrial.

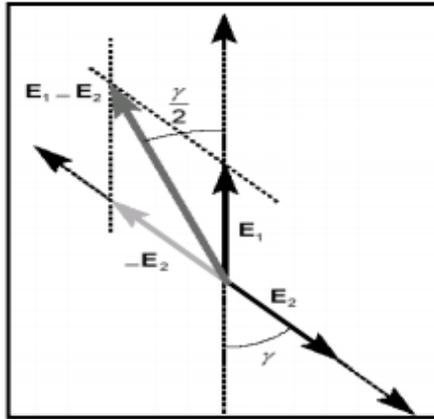
Figura 1. Coordenadas del motor de inducción



Fuente: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>

El campo magnético rotatorio se produce cuando el motor de inducción se excita con una corriente alterna del estator, se conserva constante en el tiempo, pero varía en el espacio como se muestra en la figura 2. La frecuencia de las corrientes inyectadas en el estator le da la velocidad de giro al campo magnético rotatorio.

Figura 2. Diagrama fasorial de las FEM en el motor



Fuente: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448173104.pdf>

2.5 Elementos que constituyen a un motor de inducción

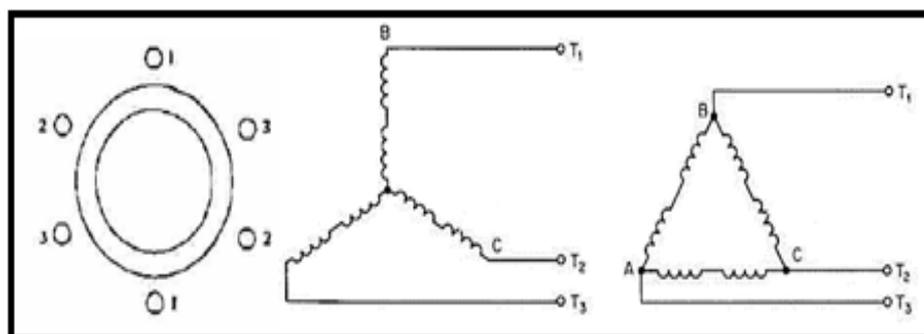
El motor de inducción está formado por los siguientes componentes.

- Estator.
- Rotor.
- Carcasa y partes auxiliares.

2.5.1 Estator. El estator es la parte fija del motor de inducción, está constituido de láminas de acero circulares, con diferentes ranuras al borde del motor, los extremos de las bobinas se acentúan en las ranuras, estas cambian de forma con el tamaño y tipo de motor.

Los tres embobinados del estator se encuentran entre ellos desfasados a 120° eléctricos. La figura 3 muestra el arreglo de un embobinado del estator.

Figura 3. Arreglo de los embobinados de un estator trifásico



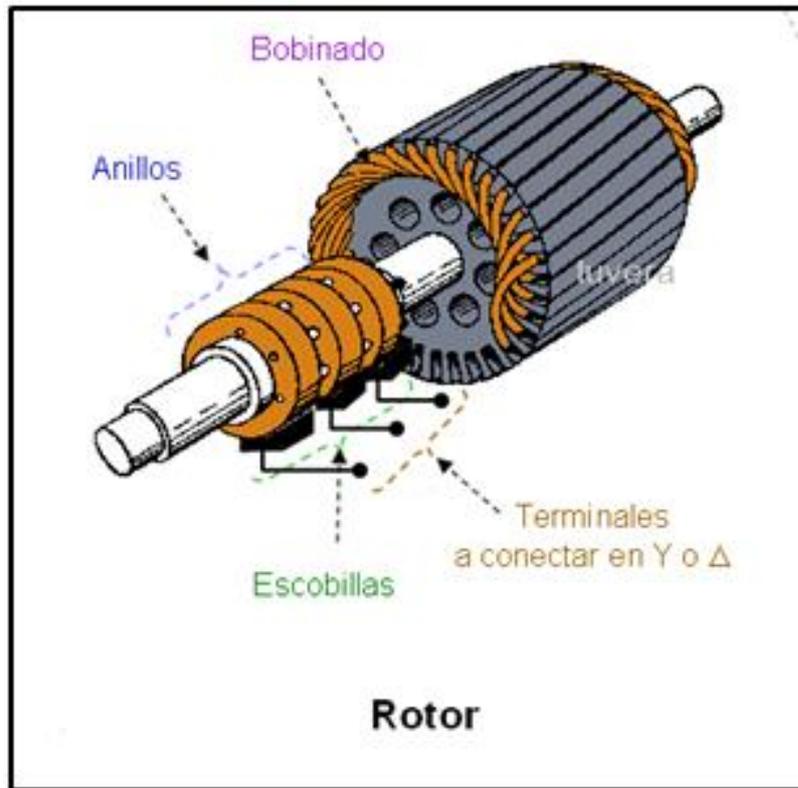
Fuente: <http://www.mailxmail.com/curso-motor-jaula-ardilla-corriente-alterna-trifasico-problemas-soluciones/como-localizar-bobinas-estator-abiertas>

2.5.2 Rotor. El rotor es la parte móvil de una máquina de inducción, está constituido por un eje de bobinas que gira en un campo magnético, construida con láminas de acero eléctrico disminuyendo las pérdidas de los campos magnéticos. Los rotores pueden ser devanado o rotor jaula de ardilla.

2.5.2.1 Rotor devanado. Este rotor posee bobinas que se unen a unos anillos deslizantes ubicados en el eje, mediante escobillas se conectan a resistencias del rotor para crear corto circuito en el rotor.

Tiene embobinados análogos al estator con el cual está asociado, el rotor tiene que embobinarse con idéntico número de polos que el estator, las fases en el rotor no necesitan ser las mismas que el estator, generalmente es igual. El embobinado del rotor está acoplado a anillos deslizantes ensamblados en la flecha. Las escobillas estacionarias provocan contacto continuo con los anillos deslizantes y hacen posible elementos externos, como resistencias o fuentes de voltaje para su conexión al rotor, obteniendo un elevado par de arranque a bajas corrientes o a su vez controlando la velocidad. En la figura 4 se muestra un rotor devanado trifásico.

Figura 4. Rotor devanado trifásico

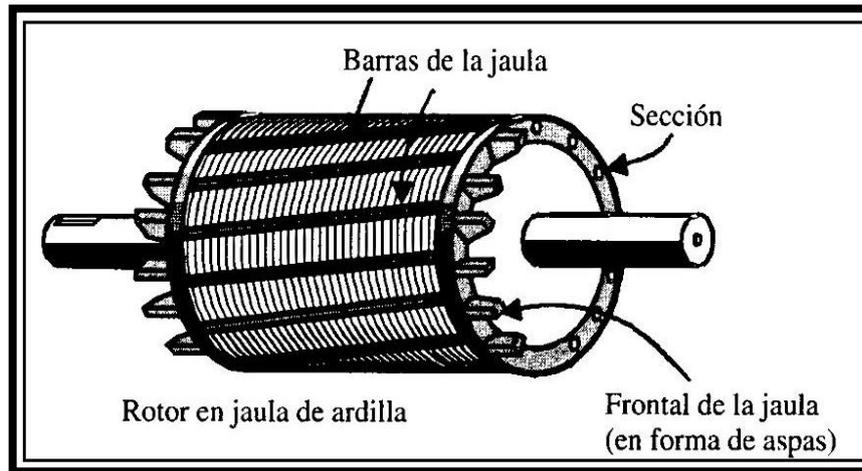


Fuente: <http://tecelectronicalfa.blogspot.com/p/tipos-de-motores-electricos.html>

2.5.2.2 Rotor jaula de ardilla. Se destaca por la similitud a una jaula y difiere por sus distintas formas de ranuras, sus conductores de aluminio o cobre están distribuidos en sus ranuras alrededor del rotor, los extremos de los conductores al tener contacto con los anillos metálicos terminales producen cortocircuito.

Una de las ventajas del rotor de jaula de ardilla es que debido a su gran tamaño el número de polos del rotor es siempre igual al número de polos del estator con el cual está asociado, el mismo rotor se puede usar con un estator de una de dos o de tres fases. Y una de las desventajas es que las conexiones externas al rotor no son posibles, por lo que el control del motor se realizará externamente en el estator. En la figura 5 se muestra un rotor jaula de ardilla.

Figura 5. Rotor Jaula de Ardilla



Fuente: http://ramonmar.mex.tl/844572_ROTOR-JAULA-DE-ARDILLA.html

2.5.3 Carcasa y partes auxiliares. La carcasa es el soporte que sostiene al estator y los elementos auxiliares del motor, los elementos auxiliares son: tapas exterior y posterior, chumaceras, tornillos de sujeción, caja de conexiones, base o soporte, estos elementos dependen de la función y del tipo del motor.

2.6 Principios de operación del motor de inducción.

La inducción en el motor se da cuando el flujo alterno generado por cada bobina se combina con las aportaciones de los flujos de las tres bobinas superpuestas, estas transportan las corrientes en los ángulos de las fases apropiadas originando un flujo rotatorio de dos polos, en el flujo rotatorio (TESLA, 1888).

Analizando el modo de operación del motor de inducción, supongamos que se aplica un voltaje trifásico equilibrado a un estator este genera un campo magnético rotatorio, si los voltajes oscilan en dirección inversa a las manecillas del reloj con una velocidad angular de ω radianes por segundo entonces el campo magnético girará en dirección de las manecillas del reloj a una velocidad angular de ω_m radianes por segundo. La correlación entre ω y ω_m se da mediante la siguiente expresión(TESLA, 1888).

$$\omega_m = \frac{2\omega}{p} \quad (1)$$

$$N_s = \frac{\omega}{p} \quad (2)$$

Dónde:

$\omega =$ velocidad angular [rad/s] = $2\pi f$

$\omega_m =$ Velocidad angular radianes mecánicos por segundo

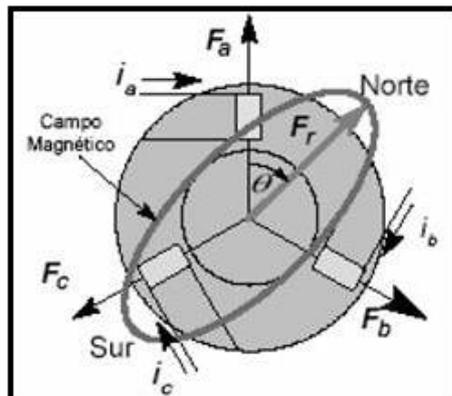
P = Número de polos del motor de inducción.

f = frecuencia en ciclos por segundo.

Ns = Velocidad síncrona del campo magnético rotatorio.

El campo magnético rotatorio se representa mediante un sistema de polos con dirección norte y sur girando a través del centro del estator, en un rotor tipo jaula de ardilla se puede apreciar las fuerzas ejercidas por el campo magnético rotatorio en el rotor de un motor por una sola bobina del embobinado del rotor como de muestra en la figura 6.

Figura 6. Fuerzas ejercidas por el campo magnético rotatorio en el rotor de un motor



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos82/motores-asincronicos/motores-asincronicos.shtml>

Al inicio el rotor se encuentra en estado estacionario. El campo magnético rotatorio fluye entre los conductores del rotor a ω_s radianes por segundo, y se induce en la bobina del rotor una fuerza electromotriz aplicando la ley de Faraday de inducción electromagnética.

En la figura antes mencionada se muestra que la trayectoria es cerrada circulando una corriente en la bobina del rotor debido a las direcciones del flujo de corriente, la polaridad y la dirección de rotación del campo magnético supuesto, estos componentes se establecen mediante la ley de Lenz (LENZ, 1890), la cual expresa que la dirección de las corrientes

inducidas disminuye en la parte delantera de los conductores al campo magnético rotatorio y aumenta en la parte de atrás, las direcciones del flujo de la corriente una vez expuestos provocan una corriente y cuando está circula por los conductores experimentan una fuerza, la magnitud de la fuerza varía directamente con la intensidad del campo magnético y la magnitud de la corriente que circula en el conductor se determina mediante la ecuación 3.

$$F = IlB(3)$$

Dónde:

F = Fuerza (N).

B = Densidad de Flujo (Wb/m²).

l = Longitud del conductor (m).

I = Corriente (A).

En consecuencia de estas fuerzas expuestas y empleando la regla de la mano derecha, se puede observar que el rotor y el campo magnético rotatorio giran en la misma dirección y originan el par del motor. Para un evento ideal el rotor no tiene inercia o pérdidas, entonces alcanzará finalmente una velocidad de ω_s radianes por segundo. En ésta condición tendrá un estado estacionario en relación al campo magnético rotatorio y posteriormente no se inducirá una fuerza electromotriz en la bobina del rotor por lo cual no circulará ninguna corriente entonces el par desarrollado vale cero. Pero en la práctica el rotor tiene al menos alguna inercia y pérdidas entonces tiene que recibir energía para poder vencer a la inercia y a las pérdidas obtenidas.

2.7 Deslizamiento

El deslizamiento es el movimiento relativo, donde N_s es la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio y N_r es la velocidad actual del rotor, entonces la diferencia entre las dos se define como deslizamiento, éste se le expresa como una fracción de la velocidad síncrona, mediante la ecuación 4.

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_r} \quad (4)$$

Dónde:

s = Deslizamiento (%).

N_s = Velocidad sincrónica

N_r = Velocidad del rotor

Cuando el rotor sufre un deslizamiento es afectado por la inercia y las pérdidas que debe vencer, lo cual produce que la velocidad del rotor disminuya en relación a la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio.

La velocidad del rotor no llegará a ser mayor a la velocidad síncrona, y si sucede en alguna ocasión se dirá que el rotor posee un deslizamiento negativo, por lo tanto la máquina está operando como un generador.

2.7.1 Velocidad en el rotor. La velocidad del rotor depende del deslizamiento mediante la ecuación 4 y se despeja la velocidad del rotor N_r ; se obtiene la ecuación 5.

$$N_r = N_s (1 - s) \quad (5)$$

Dónde:

N_r = Velocidad del rotor

N_s = Velocidad sincrónica

s = Deslizamiento

Si se tiene menor deslizamiento, el rotor estará trabajando más cerca a la velocidad síncrona del campo magnético rotatorio, por lo tanto la carga de trabajo del motor será menor; si el rotor posee un deslizamiento alto indicará que el motor está sobrecargado, entonces la velocidad del rotor será menor a su velocidad nominal.

En el trabajo, la velocidad del rotor de un motor de inducción de ningún modo podrá ser mayor a la velocidad síncrona, es aconsejable que el motor ninguna vez trabaje por debajo de su velocidad de rotación nominal o más conocida como la velocidad del rotor la misma que debe entregar su máximo rendimiento.

2.7.2 Frecuencia del rotor. El estator induce un voltaje en el rotor, pero la frecuencia del rotor no es necesariamente la misma que el estator, la frecuencia del voltaje en el estator puede ser la misma que la del voltaje en el rotor si el deslizamiento es unitario, en ciertas condiciones de marcha la frecuencia del rotor depende del comportamiento del deslizamiento. Se utiliza la ecuación 6.

$$f_r = s \cdot f \quad (6)$$

Dónde:

s = Deslizamiento.

f_r = Frecuencia del rotor (Hz).

f = Frecuencia del estator (Hz).

En los motores de rotor devanado por sus conexiones al rotor se puede medir el deslizamiento mediante las frecuencias del rotor y el estator, para los rotores de tipo jaula de ardilla no se puede medir la frecuencia en el rotor, pero se puede medir el comportamiento de la frecuencia del rotor.

2.7.3 Potencia desarrollada por el rotor. La potencia desarrollada por el motor es igual a la potencia que se trasmite al rotor pero menos las pérdidas que se pueden expresar en el funcionamiento del motor. Como se indica en la ecuación 7.

$$P_{er} = P_d + P_r \quad (7)$$

Dónde:

P_{er} = Potencia de entrada al rotor transferida por el estator.

P_d = Potencia desarrollada por el rotor.

P_r = Pérdidas del devanado del rotor.

Despejando P_d de la ecuación 7.

$$P_d = P_{er} - P_r \quad (8)$$

$$P_{er} = q_1 I_r^2 * R_r / S \quad (9)$$

$$P_r = q_1 R_r * I_r^2 \quad (10)$$

Dónde:

q_1 = Número de fases del estator.

R_r = Resistencia del rotor.

Sustituyendo en la ecuación 8 las ecuaciones 9 y 10

$$P_d = q_1 I_r^2 * \frac{R_r}{S} - q_1 R_r * I_r^2 \quad (11)$$

Factorizando la ecuación 11 se obtendrá:

$$P_d = q_1 I_r^2 R_r (1 - s) / s \quad (12)$$

Por lo tanto P_d quedará de la siguiente forma.

$$P_d = P_{er} (1 - s) \quad (13)$$

2.8 Par del motor

La potencia mecánica se expresa en hp como en w, contribuye a cuantificar la cantidad de trabajo ejercido en un motor para desarrollar en un lapso de tiempo. La potencia de salida del motor se define como P_s y se define mediante la ecuación 14.

$$P_s = T * N_r \quad (14)$$

Dónde:

N_r = La velocidad del rotor.

T = El par del motor. (lb/pie)

El par del motor es la fuerza que origina la rotación, donde se interrelacionan las variables de potencia, par y velocidad de acuerdo al trabajo ejercido por el motor.

Se sabe que un HP (746 w) es equivalente a 33,000 ft-lb por min., y el par que se obtiene en 1 revolución de 360° es de $2\pi T$ ft-lb entonces la relación de potencia, par y velocidad se muestra en la ecuación 15.

$$P_s(\text{hp}) = \frac{2\pi \cdot N r T}{33000} = \frac{N r \cdot T}{5,252} \quad (15)$$

Si la potencia de salida P_s fuera expresada en kW su ecuación será la siguiente:

$$P_s(\text{kW}) = \frac{N r \cdot T}{7040} \quad (16)$$

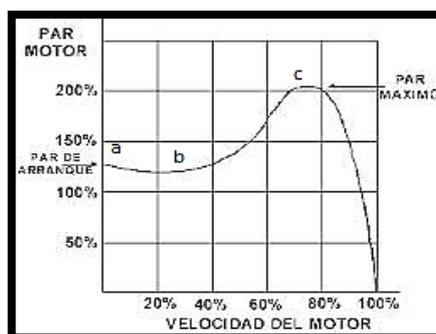
Ahora, despejando el par T de la ecuación 16 se obtendrá la ecuación 17. Como se produce el par en un motor de inducción.

$$T = 7040 \frac{P_s}{N r} \quad (17)$$

Los motores de baja velocidad para soportar un par grande necesitan componentes más resistentes, que aquellos motores de alta velocidad para una misma potencia nominal. La cantidad del par producido por un motor depende de la velocidad; las particularidades par - velocidad están dadas de acuerdo al tipo y diseño del motor, estas característica se identifican mediante una gráfica como se muestra en la figura 7.

La no-linealidad del par-velocidad de la figura 7, se encarga de medir la eficiencia del motor en condiciones de operación normal, determinándose que un par representa una linealidad entre el 100 % y 110 % de la velocidad nominal a la que ejerce, otros componentes importantes indicados en la gráfica son:

Figura 7. Curva típica par - velocidad

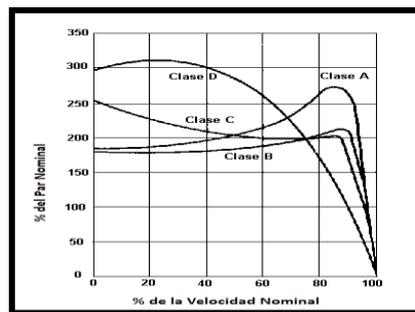


Fuente: <http://www.tecnicsuport.com/elec/taulesconsulta/arrancadors/power222.gif>

- (a) Par de Arranque.** Es el par producido a una velocidad de cero.
- (b) Par de levantamiento.** Es el mínimo par producido durante la aceleración del reposo a la velocidad de operación.
- (c) Par de ruptura.** Es el máximo par que se puede producir en el motor antes de la caída.

Para los motores de jaula de ardilla de acuerdo a las curvas características de Par Velocidad, se identifican los tipos A, B, C y D, como se muestran en la figura 8. Donde se puede observar que la velocidad está expresada en porcentaje siendo el 100 % la velocidad nominal del motor; el par vale cero cuando la velocidad del motor de inducción tiende a ser una velocidad síncrona.

Figura 8. Curvas Típicas Par-Velocidad para motores clase A.B.C y D



Fuente: <http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/Libros%202007/libros/cme/vol-03/1capit5/caramoto/cma05-13.gif>

El diseño tipo B es el más común y cubre la mayoría de las aplicaciones de los motores.

2.9 Factor de carga

A la salida mecánica del motor se conoce como la carga, ésta se expresa en hp o w, el hp en la potencia nominal demuestra la potencia máxima de salida que por lo general debe producirse, entonces el factor de carga se define como un indicador de la capacidad de trabajo que ejerce el motor.

El factor de carga se determina para tener un buen dimensionamiento en forma correcta de acuerdo a las aplicaciones que debe realizar en el motor, ayuda a prevenir problemas potenciales por ejemplo cuando los motores están sobrecargados. Para determinar el factor de carga en un motor se aplica la ecuación 18.

$$\% Fc = \frac{\text{Potencia de Entrada}}{\text{Potencia Nom./Effnom}} * 100 \quad (18)$$

Para obtener una mayor eficiencia en los motores de inducción es necesario que trabajen cerca de su potencia nominal, si el motor se encuentra sobrecargado tiene grandes pérdidas y un gran deterioro acelerado en su aislamiento y si no se toman medidas preventivas el motor puede fallar.

2.10 Factor de potencia.

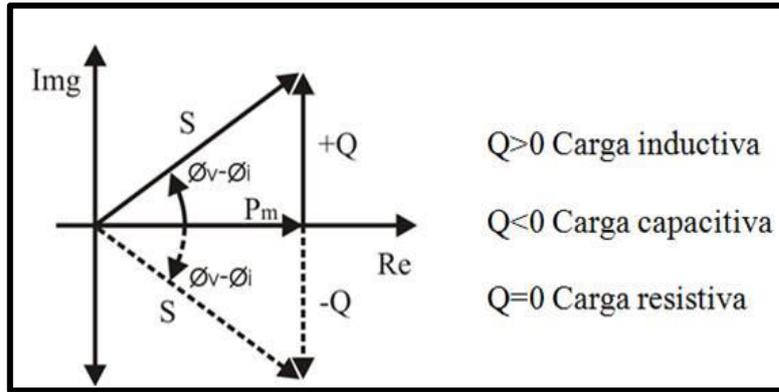
El factor de potencia, calcula la relación del porcentaje de la potencia aparente transformada en potencia real. Como se muestra en la ecuación 19:

$$\% Fp = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}} * 100 \quad (19)$$

La carga es la forma en como la energía eléctrica se consume y ésta se divide en tres tipos; resistiva, inductiva y capacitiva. En un diagrama de potencias se aprecia la relación que existe entre las cargas como se muestra en la figura 9,

Las potencias que se indican en el diagrama vectorial de potencias son equivalentes a una suma vectorial, las potencias reactivas poseen un ángulo de 180° entre sí, entonces su suma vectorial corresponde a una resta escalar, la potencia reactiva total y la potencia activa tienen una suma vectorial (entre ellas existirá un ángulo de 90°).

Figura 9. Diagrama vectorial de potencias

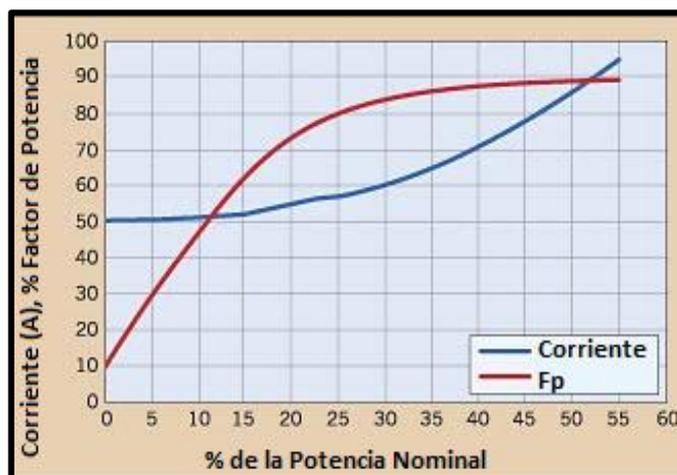


Fuente: http://fidelsmc.blogspot.com/2009_07_01_archive.html

En el motor de inducción el factor de potencia es un indicador de cuanta potencia aparente se transforma en potencia activa. Este varía conforme al factor de carga de acuerdo a las condiciones de vacío, en el motor la potencia reactiva tiene mayor consumo que la potencia activa, provocando que el factor de potencia reduzca. Cuando el motor empieza a tomar carga su potencia reactiva disminuye y la potencia activa aumentará, posteriormente se mejorará el factor de potencia.

En la figura 10, se muestra el comportamiento del factor de potencia de acuerdo al incremento de la carga del motor. Donde se indica que cuando se incrementa la carga del motor el factor de potencia mejora.

Figura 10. Comportamiento típico del factor de potencia en un motor de inducción



Fuente: <http://jfbingenieria.blogspot.com/2010/08/el-factor-de-potencia-fp-en.html>

2.11 Flicker

Es un cambio visible en el brillo de una lámpara debido a fluctuaciones rápidas en el voltaje de la fuente de alimentación. La caída de tensión se genera sobre la fuente de impedancia de la red por la corriente de carga cambio de un equipo o instalación. Estas fluctuaciones en el tiempo generan parpadeo. Los efectos pueden ir desde molestias a los ataques epilépticos de fotosensibles personas. También puede afectar a los equipos electrónicos sensibles tales como televisión receptores o procesos industriales que dependen de la energía eléctrica constante(IEEE, 2003).

Los requisitos de un equipo de medición de parpadeo se definen en la norma.(IEC 61000-4-15, 2003). El medidor de parpadeo se subdivide en varios bloques de función que simulan un 230 V / 60 W lámpara incandescente (lámpara de referencia) y el sistema de la percepción humana(IEE 61000-3-3, 2008).

2.12 Desequilibrio de tensiones o líneas desequilibradas

Es definido como la razón entre la componente de secuencia negativa y la componente de secuencia positiva, La tensión de secuencia negativa en los sistemas de potencia es el resultado del desequilibrio de carga lo cual causa un flujo de corriente de secuencia negativo, un desequilibrio de tensión puede ser estimado como un máximo desvío de la medida de las tensiones de las tres fases dividido por la media de las tensiones, expresado en forma de porcentaje. La principal fuente de desequilibrio de tensiones es la conexión de cargas monofásica en circuitos trifásicos, anomalías en bancos de capacitores (BANERJEE, 2001). El valor máximo permitido por la norma IEEE 1159 es de 2%.

2.13 Desequilibrio de tensiones y su influencia con los efectos en la operación de motores trifásicos de inducción jaula de ardilla

Los motores trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla son los motores de mayor uso industrial debido a su robustez, bajo costo relativo de compra y bajo costo de mantenimiento. Estos motores son diseñados y fabricados para operar en condiciones nominales especificadas en la placa de características y deben ser alimentados con un sistema trifásico de tensiones de forma sinusoidal, voltajes de fase de la misma magnitud y desfasados 120 ° entre sí. Sin embargo, la experiencia muestra que en los sistemas eléctricos industriales, la tensión en los terminales del motor puede ser mayor que la tensión nominal en sistemas poco cargados

mientras la tensión puede ser menor a la nominal cuando el sistema eléctrico está muy cargado. Cuando un motor trifásico de inducción es alimentado por un sistema trifásico desequilibrado de tensiones, muchas de sus características son afectadas, tales como: eficiencia, factor de potencia, pérdidas, elevación de temperatura, potencia nominal de salida y par(LEE, 1999).

2.14 Eficiencia Energética

La eficiencia energética es la obtención de los mismos bienes y servicios energéticos, pero con mucha menos energía, con la misma o mayor calidad de vida, con menos contaminación, a un precio inferior al actual, alargando la vida de los recursos y con menos conflicto.(SANTAMARTA, 2000)

La eficiencia energética atendería a la definición física referente a un proceso o a un dispositivo, correspondiéndose está a la relación entre la energía útil y la energía empleada. Esta se relaciona con la eficiencia energética a micro escala, entendida como la reducción del consumo para el mismo servicio, bien sea por avances tecnológicos o mejoras en la gestión (ALONSO, 1976).

2.15 Eficiencias del motor de inducción.

Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en potencia mecánica, pero este proceso de transformación no es tan exacto, ya que una porción de la energía de entrada se transforma en calor.

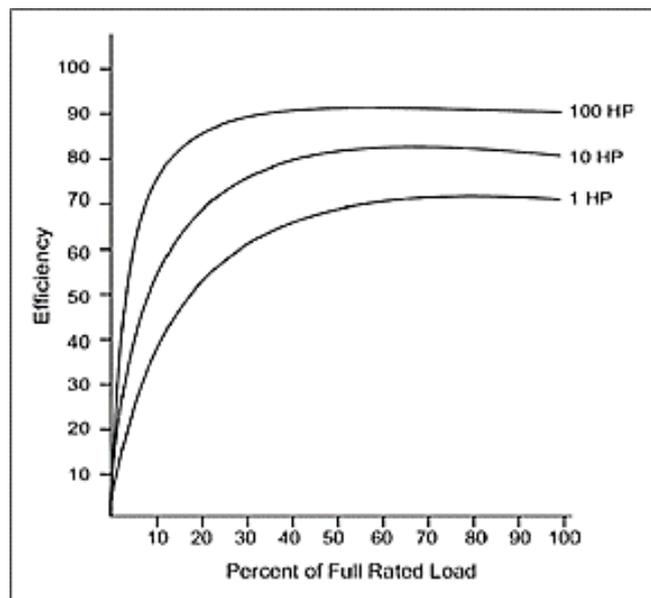
La eficiencia se da por la relación entre la energía mecánica de salida dividida para la energía eléctrica de entrada, el incremento de la eficiencia en un motor se presenta cuando se da una cantidad de potencia eléctrica de entrada ésta disminuye, y la potencia mecánica de salida no presenta cambios, para determinar la eficiencia de los motores se emplea la ecuación 20(CHAPMAN, 1991). La eficiencia determina cuanta cantidad de energía eléctrica se transforma en energía mecánica y cuanta energía se disipa en calor.

$$\text{Eficiencia} = \frac{P.\text{salida}}{P.\text{entrada}} = \frac{P.\text{entrada}-\text{pérdidas}}{P.\text{entrada}} \quad (20)$$

Si los motores poseen mayor eficiencia las pérdidas serán menores, esto se diferencia en un menor consumo. El comportamiento no es constante en la eficiencia de los motores, ya que ésta varía de acuerdo al factor de carga del motor.

En la figura 11, se muestra el desempeño del motor de inducción, donde se puede identificar el comportamiento de la eficiencia en un motor acorde a la velocidad del rotor, y la velocidad del rotor varía acorde a la carga del mismo.

Figura 11. Eficiencia de un motor de inducción.



Fuente: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar10/HTML/articulo04.htm>

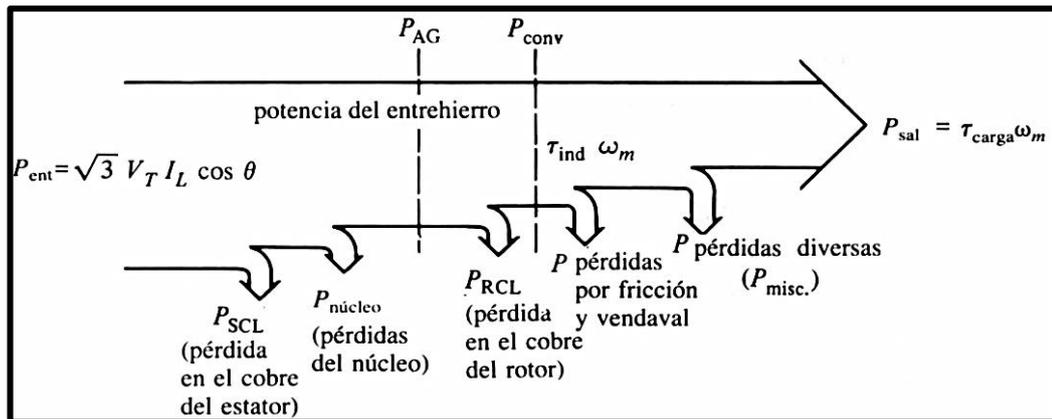
2.16 Las pérdidas del motor.

En los motores de inducción se presentan básicamente dos tipos de pérdidas. Las cuales pueden ser fijas o variables. Las pérdidas fijas no varían en función de la carga del motor.

Para las pérdidas variables que son de origen eléctrico dependen de la carga aplicada al motor, están presentes en los conductores del rotor y estator y varían en función del cuadrado de la corriente, y con resistencia constante (RI^2).

En la figura 12, se observa las cinco clases de pérdidas que se pueden generar en el motor.

Figura 12. Pérdidas en los motores



Fuente: <http://html.rincondelvago.com/maquinas-sincronicas.html>

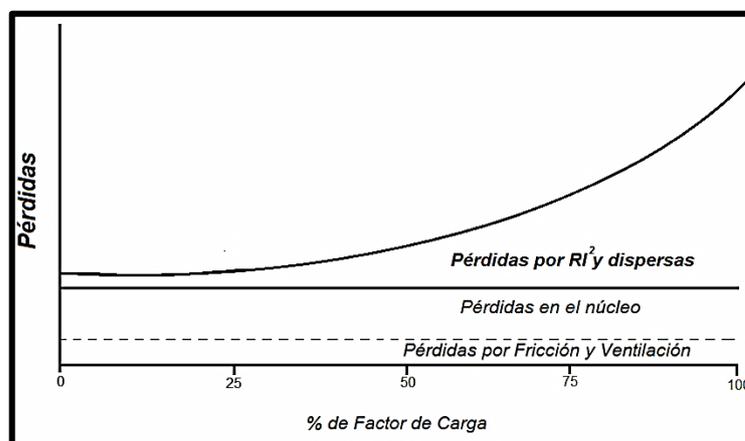
2.17 Clases de pérdidas de energía en un motor.

Las pérdidas se pueden agrupar de la siguiente manera ya que solo consumen una fracción de la potencia de entrada.

- Pérdidas eléctricas en los devanados
- Pérdidas magnéticas o en el núcleo
- Pérdidas por fricción y ventilación
- Pérdidas dispersas

Las pérdidas variables obtienen la máxima eficiencia, la figura 13, muestra la conducta de las pérdidas con respecto al factor de carga del motor.

Figura 13. Clases de pérdidas



Fuente: <http://www.tecnologia-informatica.es/tecnologia/principio-de-maquinas-electricas.php>

En la tabla 1, se indica las pérdidas en términos de sus características.

Tabla 1. Tipos de pérdidas y sus características

Nombre	Total de pérdidas [%]	Descripción	Fijas o variables	Como reducirlas
Pérdidas en el núcleo	15 – 25	Energía requerida para magnetizar el núcleo	Fijas	Mejorando la permeabilidad del acero usando laminaciones más delgadas, modificándola longitud del núcleo
Fricción y ventilación	5 –15	Pérdidas debidas a la fricción de las chumaceras y a la resistencia del aire, las cuales se producen en primer lugar por el ventilador	Fijas	Usando chumaceras de baja fricción y mejorando el diseño de los ventiladores
Pérdidas en el devanado del estator	25 – 40	Calentamiento debido al flujo de corriente (I) a través de la resistencia (R) del devanado del estator. También se conoce como RI^2	Variable	Aumentando el volumen del cobre en el devanado del estator, mejorando el diseño de las ranuras y usando un aislamiento más delgado
Pérdidas en el rotor	15 – 25	Calentamiento debido a las pérdidas RI^2 en la barra del rotor	Variables	Aumentando el tamaño de las barras del rotor y anillos terminales
Pérdidas dispersas	10 – 20	Flujo disperso inducido por las corrientes de cargas y otras corrientes menores	Variables	Mejorando varios detalles en el diseño y manufactura

Fuente: Curso de transformadores y motores de inducción

2.18 Las pérdidas en el motor por variación en el voltaje

Cuando hay diferencia entre el voltaje nominal del motor y el voltaje de operación del mismo existe variación de voltaje. Esta variación provoca mayores pérdidas debido a que las características de operación de los motores cambian.

El motor no desarrolla la potencia nominal como resultado de los bajos voltajes, en la ecuación 21, se puede observar el incremento de corriente en el motor debido a los bajos voltajes, la potencia de salida se verá levemente reducida por la caída del voltaje, ya que el par del motor es proporcional al cuadrado del voltaje y el deslizamiento es inversamente proporcional al par, las pérdidas en el motor están afectadas por la RI^2 y estas se verán incrementadas.

$$T_n = T_o \cdot \left(\frac{V_n}{V_o}\right)^2 \quad (21)$$

Dónde:

T_n = Nuevo par por la variación de voltaje.

T_o = Par original a voltaje nominal.

V_n = Voltaje de variación.

V_o = Voltaje nominal.

2.19 Norma para la medición de la eficiencia energética en motores de inducción

Una de las normas que rigen los parámetros permisibles de la medición energética es la norma IEC 60034-2-1, esta guía tiene como objetivo determinar las pérdidas y el rendimiento de máquinas de CC, máquinas síncronas y máquinas de inducción.

Esta norma unifica criterios para determinar el rendimiento en máquinas debido a que existen diferentes normas que los fabricantes de motores realizan para sus ensayos y establecen el rendimiento de la máquina.

IEC (Comisión Electrotécnica Internacional). Es una organización líder a nivel mundial en la elaboración y publicación de normas internacionales en el campo de las tecnologías eléctricas, electrónicas y similares.

Parámetros que establece la Norma IEC 60034-2-1

Para realizar las pruebas correctamente la norma requiere ciertas consideraciones.

- El nivel de armónicos de tensión debe ser inferior al 10%.
- La frecuencia no debe tener un error superior al $\pm 0,1\%$.
- El desbalance de tensiones no puede exceder 2%.
- La medida del par no debe tener un error superior al $\pm 0,2\%$.
- La medida de la velocidad no debe tener un error superior a 1 rpm.
- Los equipos para mediciones eléctricos no deben tener un error superior 0,2%.
- En los ensayos no se pueden producir variaciones en la frecuencia superiores al 0,3 %.

Existe otros grupos derivados de la norma IEC 60034 como por ejemplo: IEC 60034-30-1: 2014 determina las clases de eficiencia para motores eléctricos de una velocidad clasificándose según la norma IEC 60034-1 o IEC 60079-0, para manipular una fuente de tensión sinusoidal. Esta norma dispone de un grupo de valores de eficiencia límite fundamentados en la frecuencia, número de polos y la potencia del motor.

2.20 Medición de la eficiencia energética en motores trifásicos jaula de ardilla

Para realizar las mediciones de la eficiencia energética se tomó las bases acerca del tipo de medición, características del motor, y red de alimentación, para definir las limitaciones y restricciones de las mismas.

Las mediciones se efectuaron en motores eléctricos de inducción tipo jaula de ardilla para detectar pérdidas energéticas por líneas desequilibradas en la red de alimentación.

Estas mediciones se realizan mediante el equipo denominado analizador de calidad y energía eléctrica FLUKE 435 II que nos da un conjunto de medidas de eficiencia energética que sirve para verificar los sistemas de distribución eléctrica, este equipo posee un programa diseñado para evaluar la eficiencia y el desempeño de los motores.

2.21 Características de operación del equipo Fluke 435 II.

Fluke posee sus características descifradas en valores numéricos a una tolerancia establecida. Los valores numéricos normales no tienen tolerancia y estos constituyen las características de un instrumento de gama media.

El analizador tiene una precisión específica de 30 minutos y con dos adquisiciones completas tras el encendido.

Este analizador te da un conjunto potente y completo de medidas para verificar sistemas de distribución eléctrica.

Figura 14. Equipo Fluke 435 Serie II



Fuente: Manual Fluke

2.21.1 Características de Entrada de Tensión

Tabla 2. Características de entrada de tensión

Entrada de tensión	
Número de entradas	4 (3 fases + neutro)
Tensión máxima de entrada	1.000 Vrms
Rango de tensión nominal	Se puede seleccionar entre 1V y 1.000 según IEC61000-4-30
Tensión máxima de medida de picos	6 kV (modo de transitorios solamente)
Impedancia de entrada	4 MΩ // 5Pf
Ancho de banda	> 10 kHz, hasta 100 kHz para modo de transitorios
Factor de escala	1:1, 10:1, 100:1, 1.000:1, 10.000:1 y variable

Fuente: Manual Fluke

Tabla 3. Características de entrada de corriente

Entrada de corriente	
Número de entrada	4 (3 fases + neutro) acoplados en CC o CA
Tipo	Pinza en transformador de corriente con salida mV/A
Rango de entrada nominal	0 - ± 3,0 pico de tensión, onda sinusoidal de 0 – 3,97 Vrms (selección x1, acoplamiento CA + CC) 0 - ± 3,0 pico de tensión, onda sinusoidal de 0 – 3,97 Vrms (selección x10, acoplamiento CA)
Rango	0,5 Arms a 600 Arms con i430flex-TF incluido (con sensibilidad 10x) 5 Arms a 6.000 Arms con i430flex-TF incluido (con sensibilidad 1x) 0,1 mV/A a 1 V/A y personalizado para su uso con pinzas de CA o CC opcionales Nota: la posición de sensibilidad x10 ofrece más resolución, pero menos rango. Sólo se admiten señales de CA; los componentes de CC se bloquean.
Impedancia de entrada	1 MΩ

Ancho de banda	> 10 kHz
Factor de escala	1:1, 10:1, 100:1, 1.000:1, 10.000:1 y variable

Fuente: Manual de Fluke

CAPÍTULO III

3. MEDICIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN MOTORES

3.1 Medición de pérdidas de energía en motores trifásicos de inducción jaula de ardilla con líneas desequilibradas.

Las mediciones se realizaron en diferentes motores, para el análisis y facilidad de manejo de datos se tomó la prueba del motor donde mayor pérdida de energía se registró debido a líneas desequilibradas.

Durante el análisis se realizan recomendaciones necesarias para mitigar los efectos de las pérdidas en motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.

Los resultados alcanzados están basados en la apreciación y diagnóstico que arroja el software Power Log 4.0.2, que es el software de comunicación entre el equipo y el PC.

Motor M1

Figura 15. Motor M1



Fuente: Autores

Descripción

Motor ubicado en los talleres de máquinas herramientas de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, su funcionamiento y utilización es para el movimiento de bandas del torno N° 8.

Datos técnicos del motor M1.

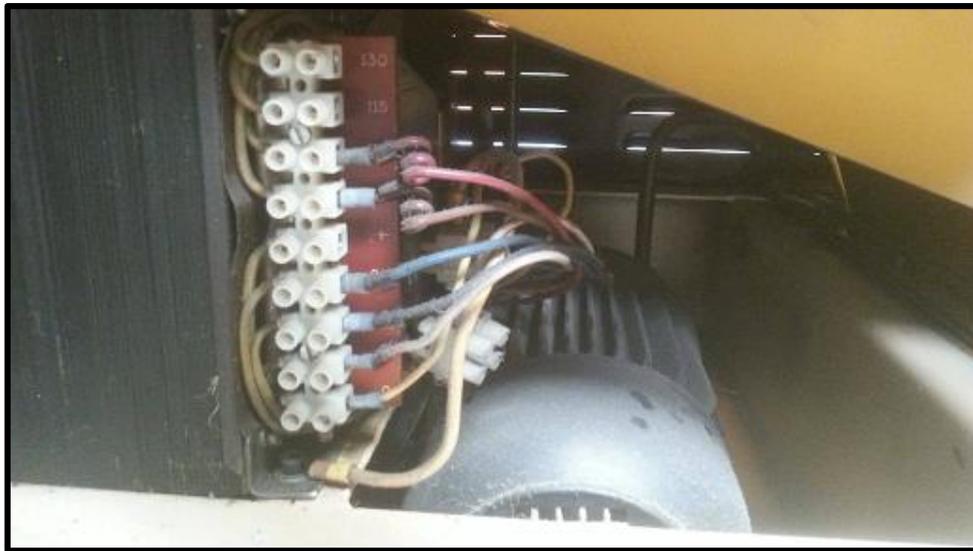
Tabla 4. Datos de placa del motor M1

Datos de la placa del motor M1				
Potencia (HP)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Factor de Potencia Cos ϕ	No. de polos
5,5 /4,5	230	60	0.98	4

Fuente: Autores

Motor M2

Figura 16. Motor M2



Fuente: Autores

Descripción

Motor que funciona para el accionamiento del sistema de armado de punta de zapatos industriales en la fábrica de producción de calzado industrial MOYOLSA de la ciudad de Ambato.

Datos técnicos del motor M2.

Tabla 5. Datos de placa del motor M2

Datos de la placa del motor M2				
Potencia (HP)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Factor de Potencia Cos ϕ	Número de polos
5	240	60	0.98	4

3.2 Causas de las pérdidas de energía en motores de inducción jaula de ardilla con líneas desequilibradas.

Para analizar las causas de pérdidas de energía en motores de inducción jaula de ardilla con líneas desequilibradas se utilizó el equipo analizador de energía y calidad eléctrica Fluke 435 II descrito en el capítulo 2 ítem 2.20, tomando en consideración las recomendaciones de la norma IEC 60034-2-1.

3.3 Procedimiento para registro de mediciones

3.3.1 Características que definen un motor. En las diferentes industrias realizadas las mediciones para identificar el tipo de motor se tomó en cuenta las siguientes características que vienen expuestas en la placa del motor estas son:

La tensión que puede ser monofásica, trifásica o corriente continua, con diferentes valores (220V, 380V, 500V); La potencia del motor viene dada en kW, HP o en CV; La frecuencia que se expresa en Hertz para Europa 50 y en América 60; La velocidad de rotación del eje dado en rpm; El factor de potencia que es el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente ($\cos \varphi$); El tipo de conexión viene dado en estrella (λ) o en triángulo (Δ). Se visualiza los diagramas de par, velocidad y consumo; y el dimensionado del motor y peso.

3.3.2 Identificación del ciclo de carga del motor. Se identificó los diferentes tipos de carga del motor para definir la potencia y velocidad que éste tiene y así se sabrá cuál es el comportamiento dinámico del motor con su respectiva máquina de trabajo y cuáles fueron los tiempos de arranque óptimo para su medición ya que el comportamiento del motor depende de la variación de la carga. Determinándose si la carga es constante o variable.

3.3.3 Parámetros de la medición. Mediante el analizador se pudo determinar las causas que provocan pérdidas energéticas en el motor. Estas son las tensiones de fase, el factor de cresta, los armónicos, las fluctuaciones, el desequilibrio de tensiones, corrientes de arranque.

3.3.4 Registro de mediciones. Con el equipo Fluke 435 II se registró varias lecturas con alta resolución que se observó durante intervalos de tiempo ajustable, almacenando los valores mínimo, máximo y medio de todas las lecturas y sigue con el intervalo de observación.

El procedimiento se inicia desde el menú Start (inicio) que permite elegir entre un intervalo de (0,25 s – 2 h.) seleccionando el tiempo adecuado para el trabajo de investigación, se pondrá la duración máxima de registro que puede ser (1 h. – Máx.), teniendo la opción de inicio inmediato (AHORA) o (PROGRAMADO) para el registro.

Para ajustar el tiempo medio se describe los pasos a realizar en el equipo dentro del manual de usuario.

El tiempo medio se ajusta mediante la secuencia de teclas SETUP, F4 – MANUAL SETUP, F3 – FUNCTION PREF, se utiliza las teclas de flecha para seleccionar el tiempo medio deseado, también ajustándose la duración total de la medida y el retardo de inicio. Cuando la medida se detiene mediante la tecla de función F5 – HOLD, los datos se registran y se guardan en la tarjeta SD como Medida (XXX). Los datos de medida se encuentran disponibles mediante la tecla MEMORY y la tecla de función F1 RECALL DELETE con las teclas de flecha arriba/abajo seleccionar la medida deseada y abrir con la tecla de función F5 - RECALL.

Los valores registrados se pueden ver en F3 – TREND, emplear el cursor y zoom para ampliar detalles de la señal, para reanudar la medida se lo hace mediante la secuencia de teclas F5 – RUN, F3 – TIMED, ingresara en un menú que permite ajustar el tiempo medio, la duración y el momento de inicio de esa medida.

3.4 Conexiones realizadas para la medición.

Para realizar adecuadamente las mediciones se explica cómo ejecutar las conexiones al sistema de distribución eléctrica en prueba y cómo ajustar los valores del analizador, antes de tomar la medición se debe comprobar que la configuración cumple con las características del sistema en prueba y los accesorios a utilizar como son:

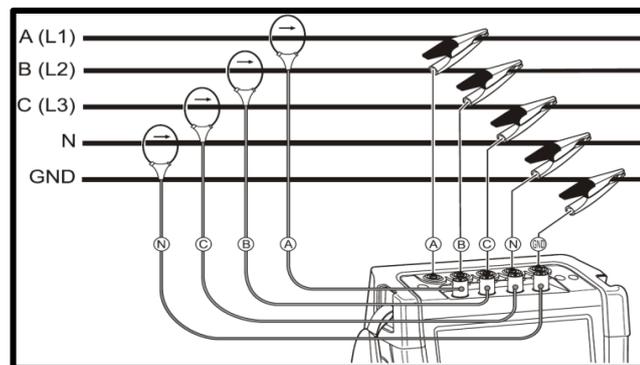
- Configuración del cableado
- Frecuencia nominal

- Tensión nominal
- Límites utilizados para la supervisión de la calidad de la energía eléctrica y la detección de eventos
- Propiedades de los cables de tensión y las pinzas amperimétricas.

3.4.1 Conexión de entrada. El analizador cuenta con 4 entradas BNC para pinzas amperimétricas y 5 entradas tipo banana para tensiones estas pinzas tienen un conector BNC de plástico es necesario utilizar conectores BNC aislados para realizar las medidas de forma segura.

En un sistema trifásico, realizar las conexiones como se muestra en la figura 17.

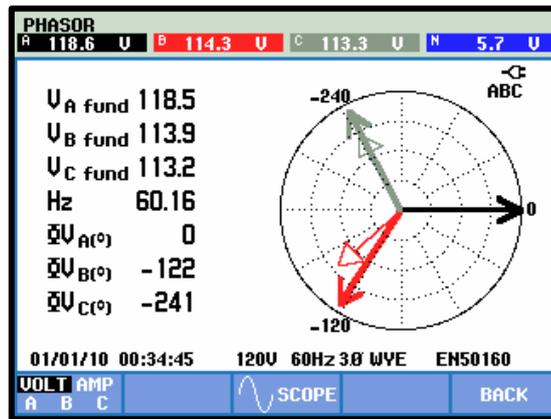
Figura 17. Conexión del analizador a un sistema de distribución trifásico



Fuente: Manual Fluke

La pantalla de osciloscopio y fasor sirven para comprobar si los cables de tensión y las pinzas amperimétricas están conectados correctamente. En el diagrama de vectores, las tensiones de fase y las corrientes A (L1), B (L2) y C (L3) deben aparecer en secuencia al observarlas en el sentido de las agujas del reloj como se muestra la figura 18.

Figura 18. Diagrama de vectores correspondiente al analizador



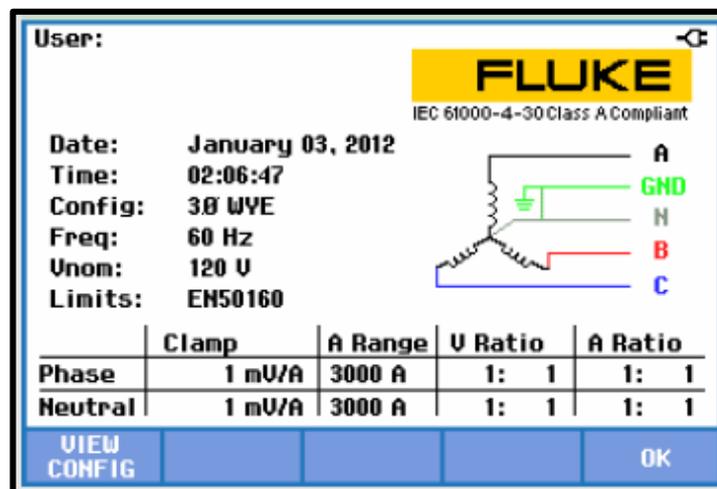
Fuente: Manual Fluke

3.5 Configuración del analizador

3.5.1 Configuración del cableado. Para configurar el cableado se realizó los siguientes pasos.

- 1) Presionar la opción SETUP y aparece en la pantalla la siguiente figura 19.

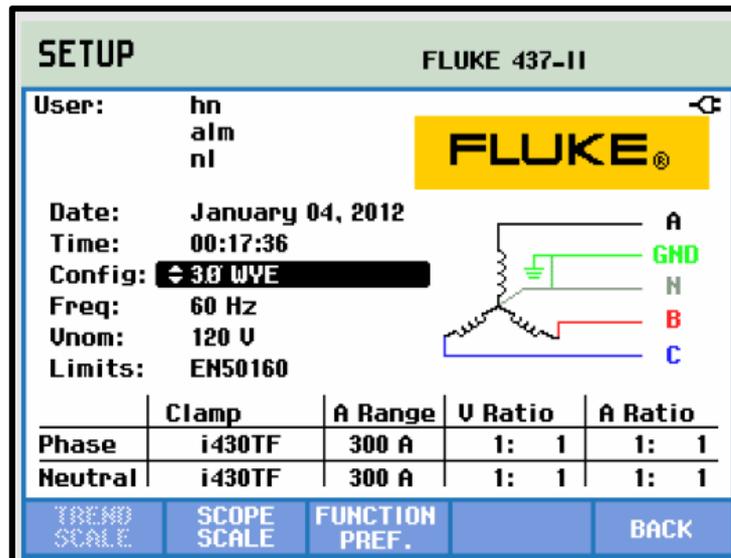
Figura 19. Configuración activa



Fuente: Manual Fluke

- 2) Presionar F4 y se resalta un parámetro de configuración. Mediante las flechas de arriba/abajo elegir el parámetro de configuración que se requiera, como el que se indica en la figura 20.

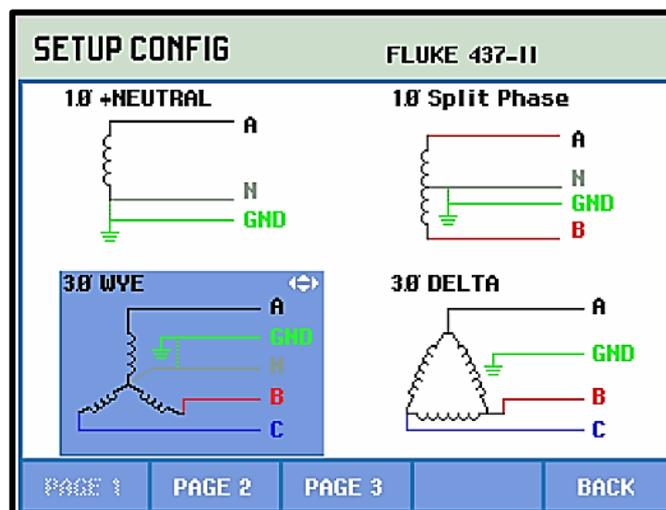
Figura 20. Configuración del parámetro



Fuente: Manual Fluke

3) Pulsar la tecla ENTER y la pantalla se observa 4 diferentes configuraciones de cableado. Si la configuración deseada no se encuentra en la pantalla presionar F2 y otra pantalla se despliega con 4 configuraciones nuevas como se muestra en la figura 21.

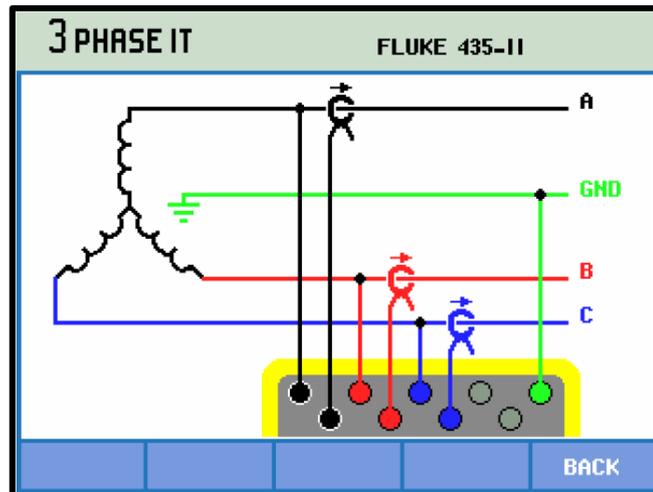
Figura 21. Configuración del cableado para motores trifásicos



Fuente: Manual Fluke

4) Seleccionar dependiendo del tipo de conexión con la que se encuentre el motor a medir y presionar ENTER. Esto permite visualizar en detalle como conectar los cables, una de las conexiones realizadas se muestra en la figura 22.

Figura 22. Conexión de sondas



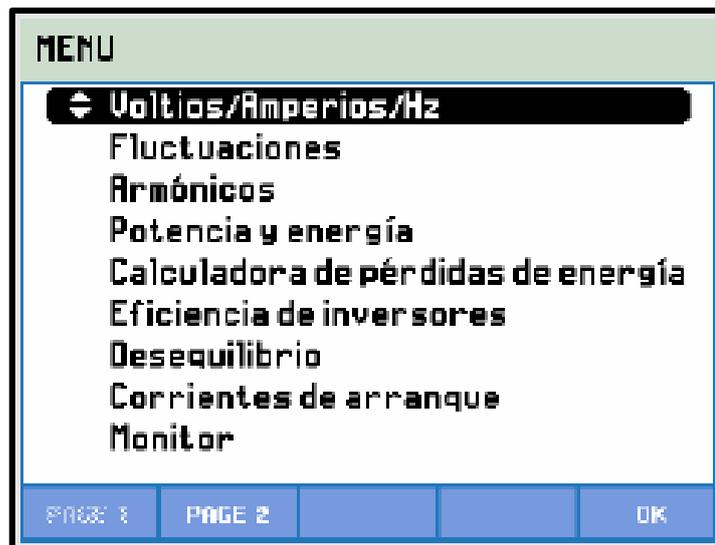
Fuente. Manual Fluke

3.6 Ejecución de mediciones de desequilibrio de tensiones

Para proceder a las mediciones de desequilibrio se realiza los siguientes pasos:

- 1) Se presiona la tecla menú y se despliega la pantalla como se muestra en la figura 23.

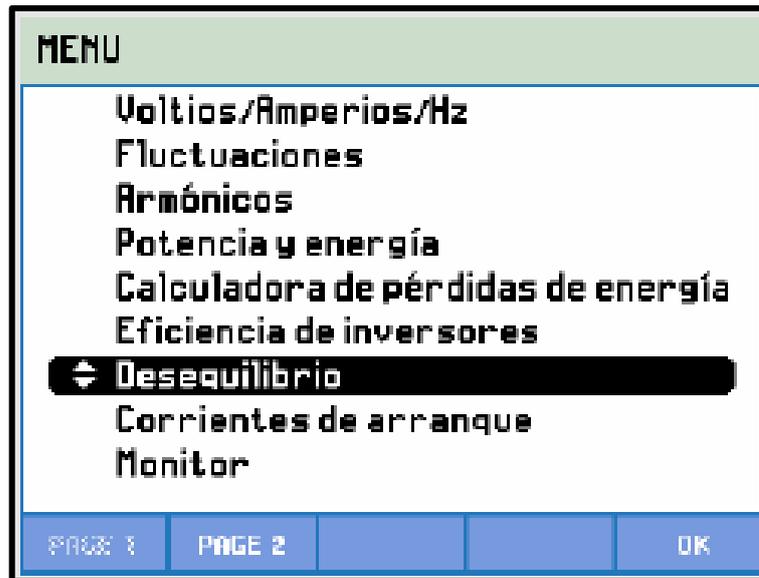
Figura 23. Parámetros de medición



Fuente: Manual Fluke

- 2) Con las flechas de arriba/abajo se selecciona el parámetro desequilibrio como se muestra en la figura 24.

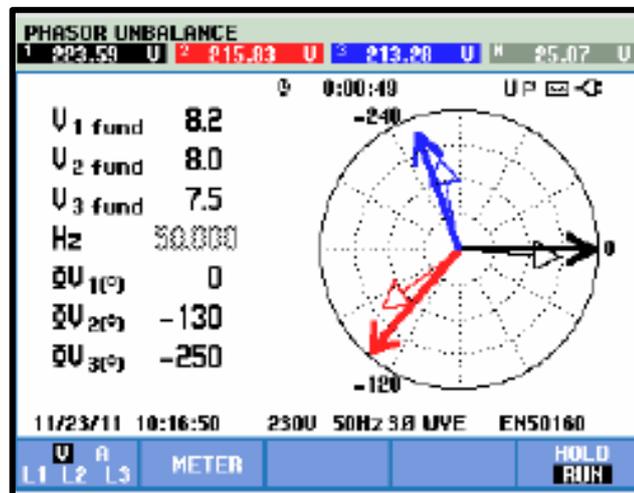
Figura 24. Parámetro desequilibrio



Fuente: Manual Fluke

- 3) Pulsar la tecla Enter y aparecerá la pantalla de fasor de desequilibrio como se muestra en la figura 25.

Figura 25. Fasor de desequilibrio



Fuente: Manual Fluke

La pantalla de fasor muestra la relación de fase entre tensiones y corrientes en un diagrama de vectores dividido en secciones de 30 grados. El vector del canal de referencia A (L1) se orienta en la dirección horizontal positiva.

4) Con la tecla de función F1 se selecciona las señales que se desee observar: V muestra todas las tensiones y A todas las corrientes. A (L1), B (L2), C (L3), N (neutro) ofrecen una presentación simultánea de corriente y tensión de fase.

Con la función F5 se puede cambiar entre los modos de actualización de pantalla HOLD (Retención) y RUN (Ejecución). Al cambiar de HOLD a RUN aparece un menú para seleccionar la hora de inicio inmediato (NOW) o temporizado (TIMED), que permite definir el inicio y la duración de la medida como se muestra en la figura 26.

Figura 26. Pantalla HOLD y RUN

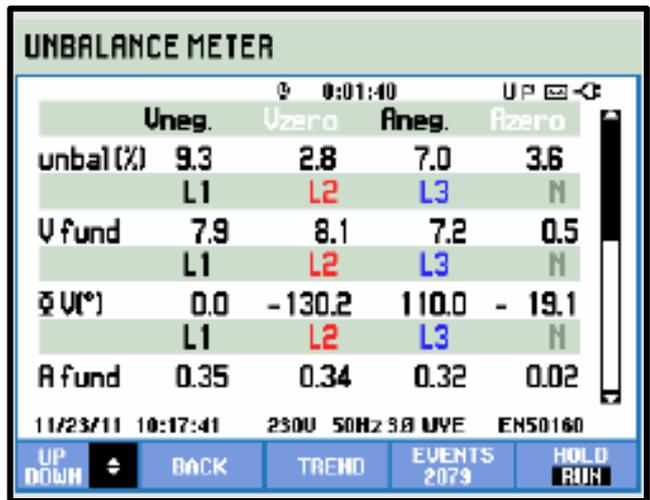


Fuente: Manual Fluke

5) Con la función F2 se accede a la pantalla de multímetro, esta muestra todos los valores numéricos relevantes: porcentaje de desequilibrio de tensión negativa, porcentaje de desequilibrio de tensión de secuencia cero, porcentaje de desequilibrio de corriente negativa, porcentaje de desequilibrio de corriente de secuencia cero, tensión de fase fundamental, frecuencia, corriente de fase fundamental, ángulo entre tensiones fase neutro en relación con la fase de referencia A/L1 y ángulos entre la tensión y la corriente de cada fase. como se muestra en la figura 27.

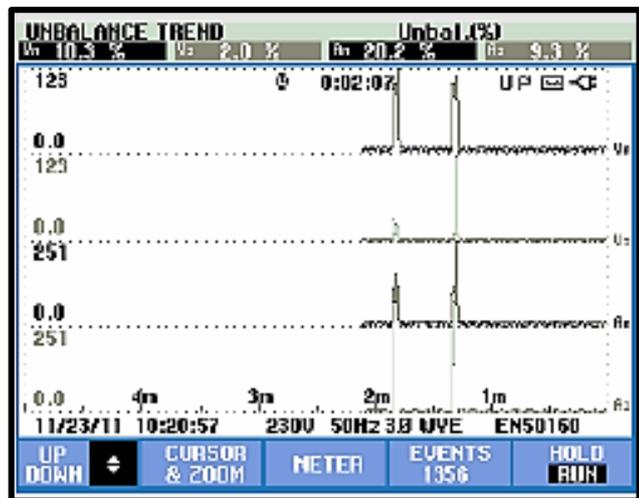
6) Presionando F1 aparecen las flechas arriba/abajo para desplazarse por la pantalla de multímetro, con F2 se retorna a la pantalla de fasor y con F3 se tiene acceso a la pantalla de tendencia como se muestra en la figura 28.

Figura 27. Pantalla de multímetro



Fuente: Manual Fluke

Figura 28. Pantalla de tendencia de desequilibrio



Fuente: Manual Fluke

Las tendencias de cada fila aparecen de una en una.

Figura 29. Menú de eventos

MONITOR EVENTS WRMS				
START 11/28/11 11:01:26		EVENT 21 / 21		
DATE	TIME	TYPE	LEVEL	DURATION
11/28/11	11:01:55:838	A DIP	98.9 U	0:00:00:050
11/28/11	11:01:56:021	A DIP	98.9 U	0:00:00:058
11/28/11	11:01:56:187	A DIP	98.9 U	0:00:00:041
11/28/11	11:01:56:356	A DIP	98.9 U	0:00:00:041
11/28/11	11:01:56:503	A DIP	98.9 U	0:00:00:025
11/28/11	11:01:56:636	A DIP	98.9 U	0:00:00:057
11/28/11	11:01:56:747	A DIP	98.5 U	0:00:00:025
11/28/11	11:01:56:913	A DIP	98.5 U	0:00:00:041
11/28/11	11:01:59:079	A DIP	98.5 U	0:00:00:057
11/28/11	11:01:59:262	A DIP	98.5 U	0:00:00:042
11/28/11	11:01:59:413	A DIP	98.5 U	0:00:00:240
11/28/11 11:03:27 120V 60Hz 30 WVE EN50160				
SAVE	EXIT	DEFAULT	BACK	
EXPORT	EVENT	DETAIL		

Fuente: Manual Fluke

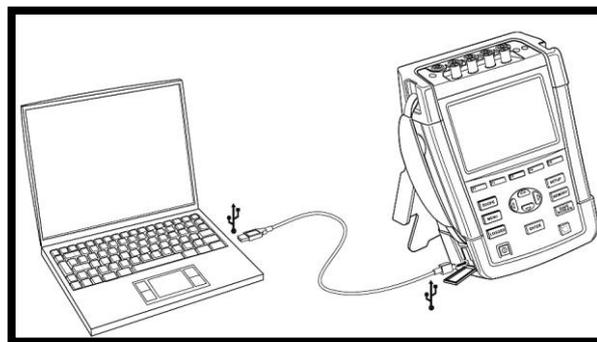
7) Con la función F4 se accede al menú Events como se muestra en la figura 29.

Una vez realizados los parámetros de registro establecidos, las conexiones pertinentes de entrada y configuración del cableado se procede al registro de datos requeridos para el análisis de la eficiencia energética del motor de inducción jaula de ardilla mediante el analizador Fluke 435 II.

3.7 Descarga de datos obtenidos del analizador al PC.

Con la ayuda del software Power Log permite descargar a un PC u ordenador portátil datos de tendencias y de formas de onda, así como capturas de pantalla, en formato de mapa de bits. La conexión de interfaz que se encuentra detrás de una cubierta como se muestra en la figura 30.

Figura 30. Descarga de datos

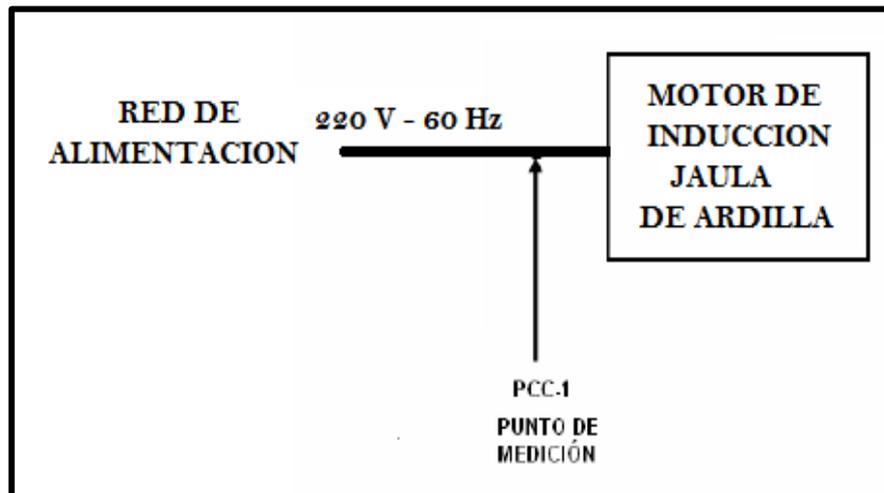


Fuente: Manual Fluke

3.8 Punto de medición de desequilibrio de tensiones en motores de inducción tipo jaula de ardilla.

Para realizar las mediciones de desequilibrio de tensiones en motores jaula de ardilla se establece puntos de medición que se establece como; PCC1 (punto de acoplamiento del motor con la red de alimentación general), como se indica en la figura 31.

Figura 31. Punto de medición de desequilibrio de tensiones



Fuente: Autores

La alimentación entre dos puntos es independiente del camino recorrido por la carga y depende del potencial.

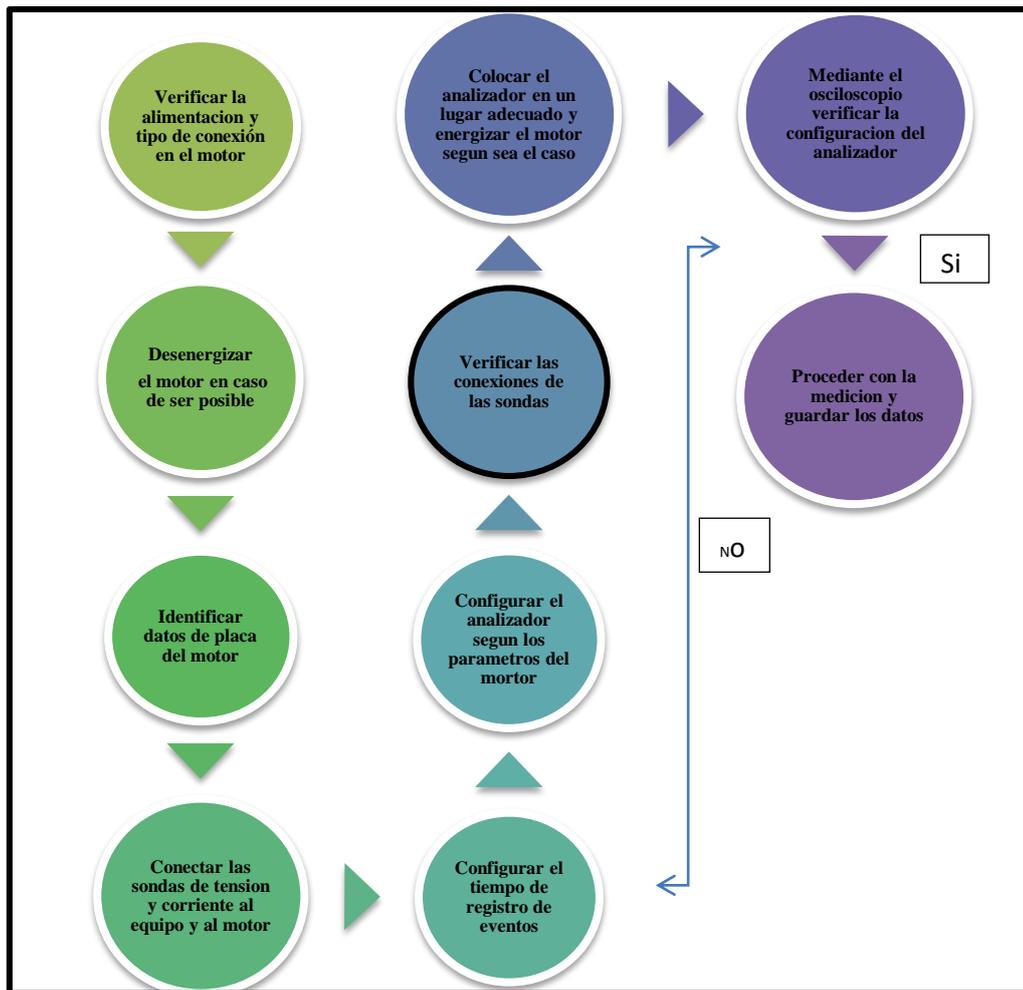
Si se tiene una diferencia de potencial se unen mediante un conductor, lo cual produce un flujo de electrones. Parte de la carga que crea el punto de más alto potencial se trasladará a través del conductor al sector de menor potencial, en ausencia de una fuente externa, esta corriente finalizará cuando ambos puntos igualen su potencial eléctrico.

3.9 Diagrama para realizar las mediciones de eficiencia en motores de inducción.

Para obtener mejores resultados en la medición se realizó un procedimiento con el fin de tener una guía de conexión y verificación de datos como se muestra en la figura 32.

Con esto se colabora para tener éxito en las mediciones necesarias para su posterior análisis de energía en los motores de inducción jaula de ardilla.

Figura 322. Diagrama para realizar mediciones de eficiencia en motores de inducción.



Fuente: Autores

3.10 Informe de resultados de la medición de eficiencia energética.

3.10.1 Partes del informe

- Descripción y nombre del motor
- Datos de placa del motor analizado
- Valores medidos en punto de acoplamiento PCC1

Motor M3 – Descripción

Motor de compresor de aire para el accionamiento de máquinas con sistema mixto (mecánico – neumático) para la producción de calzado industrial de la fábrica MOYOLSA de la ciudad de Ambato.

Figura 33. Motor M3



Fuente: Autores

Datos técnicos del motor M3

Tabla 4. Datos de placa de motor M3

Datos de la placa del motor M3				
Potencia (HP)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Factor de Potencia $\cos \phi$	Número de Polos
20	230	60	0.98	4

Fuente: Autores

Valores medidos en punto de acoplamiento PCC1

A continuación se observa en la figura 34, la tabla de resumen de mediciones realizadas de los diferentes parámetros de calidad de energía como voltaje, corriente, frecuencia, armónicos de voltaje y corriente, flicker, desequilibrio de tensiones, perdidas por desequilibrio, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente, factor de potencia, tomados en el PCC1 del motor

M3, los diferentes espectros obtenidos del software Power Log de las mediciones se las puede observar en el ANEXO A.

Figura 34. Tabla de resumen

Resumen	Tabla	Tensión y corriente	Estadísticas	Frecuencia / Desequilibrio	Potencia	Desequilibrio de potencia	Energía	Pérdidas de energía	Flicker	Armónicos Potencia	Armónicos
Información del instrumento Número de modelo: FLUKE 430-II Número de serie: 25703107 Revisión de firmware: V04.00			Información general Lugar de medida: CUARTO DE MAQUINAS Cliente: FABRICA DE CALZADO MOYOLSA Notas: Motor de compresor de aire para el accionamiento de máquinas con sistema mixto (mecánico – neumático) para la producción de calzado industrial								
Información de software Versión de Power Log: 4.0.2 Versión FLUKE 345 DLL: 11.20.2006 Versión FLUKE 430 DLL: 1.8.0.0 Versión FLUKE 430-II DLL: 1.0.0.19			Resumen de medición Topología de medición: 3Ø EN TRIÁNGULO Modo de aplicación: Registrador Primera medida: 29/07/2014 12:20:13 Última medida: 30/07/2014 11:30:13 Intervalo de grabación: 0h 5m 0s 0mseg Tensión nominal: 220 V Corriente nominal: 3000 A Frecuencia nominal: 60 Hz Hora de inicio del archivo: 29/07/2014 12:20:13 Hora de fin del archivo: 30/07/2014 11:30:13 Duración: 0d 23h 10m 0s 0mseg Número de eventos: 6 Eventos descargados: No Número de pantallas: 58 Pantallas descargadas: No Método de medición de potencia: Unificado Tipo de cable: Copper Espectro de armónicos: %H1 Modo THD: THD 40 Modo CosPhi / DPF: DPF			Resumen de registros Registros RMS: 279 Registros DC: 0 Registros de frecuencia: 279 Registros de desequilibrios: 279 Registros de armónicos: 279 Registros de armónicos de potencia: 279 Registros de potencia: 279 Registros de desequilibrios de potencia: 279 Registros de energía: 279 Registros de pérdidas de energía: 279 Registros de parpadeos: 279 Registros de señalización de la red principal: 0			Resumen de eventos Caídas de tensión: 0 Subidas de tensión: 0 Transitorios: 6 Interrupciones: 0 Perfiles de tensión: 0 Variaciones rápidas de tensión: 0 Pantallas: 0 Formas de onda: 0 Intervalos sin mediciones: 0 Gráficos de corriente de arranque: 0 Eventos de onda: 0 Eventos RMS: 0		

Fuente: Software Power Log 4.0.2

CAPÍTULO IV

4. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA Y FACTOR DE CARGA

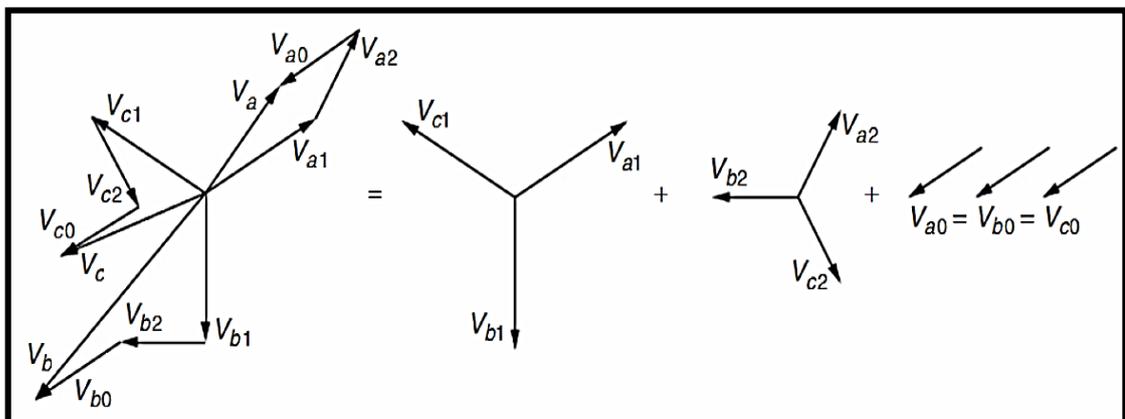
En este capítulo se detallan fórmulas para el cálculo de la potencia y pérdidas de energía por desequilibrio de tensiones que se utilizan en los instrumentos Fluke 435 II, además las ecuaciones con las cuales es posible establecer la eficiencia de los motores de inducción a cualquier factor de carga con una interpolación cuadrática. Asimismo está enfocado en establecer las bases para realizar una metodología de la eficiencia de los motores de inducción tipo jaula de ardilla con mayor rapidez y facilidad de cálculos que nos brinda el analizador de energía Fluke 435 II.

4.1 Componentes utilizados para el cálculo de la eficiencia con líneas desequilibradas

Los algoritmos de medida de la potencia que se utilizan en los instrumentos Fluke 435 II se basan en el método unificado desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia, y se crean según la norma IEEE1459. Estos algoritmos proporcionan resultados correctos en todas las condiciones, incluso con sistemas trifásicos desequilibrados y distorsionados, estos métodos posibilitan calcular la energía que se pierde si la calidad de la energía eléctrica no es óptima, son utilizados para fasores de tensión, corriente y potencia.

En la figura 45, se muestran tres fasores de tensión desequilibrados.

Figura 355. Fasores de tensión desequilibradas



Fuente: Manual Fluke

Dónde:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}, V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}, V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (22)$$

V_a, V_b, V_c son tres fasores que no están en equilibrio, mientras que V_{a1}, V_{b1}, V_{c1} y V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} son dos conjuntos de tres fasores equilibrados con un ángulo de 120° entre los componentes a, b y c.

Los componentes del conjunto de fasores V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} son idénticos en cuanto a amplitud y ángulo.

V_{a1}, V_{b1}, V_{c1} es la secuencia positiva.

V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} es la secuencia negativa.

V_{a0}, V_{b0}, V_{c0} es la secuencia cero.

Los nombres cero, positivo y negativo se refieren a la secuencia de rotación de los fasores.

El conjunto de fasores de secuencia positiva (V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}) es el mismo que las tensiones producidas por un generador síncrono en el sistema de alimentación con secuencia de fase a-b-c.

La secuencia negativa (V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}) tiene secuencia de fase ac - b, por lo que gira en la dirección contraria en comparación con el sistema positivo.

Los fasores de secuencia cero (V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}) tienen desplazamiento de fase cero y son idénticos.

El método de componentes simétricos que utiliza el equipo Fluke 435II sirve para calcular las componentes de energía que son.

- W - Potencia activa (P)
- W fund - Potencia activa fundamental (W)
- VA - Potencia aparente (S)
- VA fund - Potencia aparente fundamental (S)

- VAR - Potencia reactiva fundamental (Q)
- VA - Potencia de armónicos (Dh)
- VA - Potencia de desequilibrio (Du)
- Factor de potencia (PF)
- Factor (DPF) de potencia de desplazamiento y $\text{Cos } \phi$

4.1.1 Potencia activa (P). La potencia activa (todos los componentes de frecuencia) calcula directamente a partir de las muestras medidas en las entradas de tensión y corriente:

Potencia de fase activa:

$$P_X = \frac{1}{N} \sum_{n=K}^{K+N} u_X(n) \cdot i_X(n) \quad (23)$$

Potencia de sistema activa (Y):

$$P_Y = P_A + P_B + P_C \quad (24)$$

La potencia de sistema es la suma de las potencias de fase.

Potencia de sistema activa (Δ):

$$P_{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{n=K}^{K+N} u_{AB}(n) \cdot i_A(n) - u_{BC}(n) \cdot i_C(n) \quad (25)$$

4.1.2 Potencia activa fundamental. Las potencias fundamentales (componente de 50/60 Hz solamente) son calculadas por el equipo según la norma IEC 61000-4-7 en el primer subgrupo de armónicos. Estos valores RMS se denominan U_{1X} para tensión y I_{1X} para corriente.

El ángulo de fase entre la tensión y la corriente es $\phi_{u_{1X}} - \phi_{i_{1X}}$.

Potencia de fase activa fundamental:

$$P_{1X} = U_{1X} * I_{1X} * \cos(\phi_{u_{1X}} - \phi_{i_{1X}}) \quad (26)$$

Potencia Y de sistema activa fundamental:

$$P_1^+ = 3 * U_1^+ * I_1^+ \cos(\varphi_{u_1^+} - \varphi_{i_1^+}) \quad (27)$$

En este caso, la potencia del sistema no es la suma de las potencias de fase. La potencia de sistema calcula a partir de los componentes de secuencia positiva de tensión y corriente, eliminando todos los componentes de desequilibrio. Este componente se denomina también Potencia efectiva al ser la manera más efectiva de transferir potencia (eléctrica en mecánica) si sólo constara del componente de potencia de secuencia positiva.

Potencia Δ de sistema activa fundamental:

$$P_{1\Delta} = U_{1AB} * I_{1A} * \cos(\varphi_{u_{1AB}} - \varphi_{i_{1A}}) - U_{1BC} * I_{1C} * \cos(\varphi_{u_{1BC}} - \varphi_{i_{1C}}) \quad (28)$$

4.1.3 Potencia aparente (S). La potencia aparente (todos los componentes de frecuencia) se calcula a partir de los valores RMS de tensión U_X y corriente I_X .

Potencia de fase aparente:

$$S_X = U_X * I_X \quad (29)$$

Potencia aparente del sistema (conexión Y):

$$S_Y = \sqrt{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) * (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)} \quad (30)$$

La potencia de sistema aparente NO es la suma de las potencias de fase.

Potencia aparente del sistema (conexiónΔ):

$$S_{\Delta} = \sqrt{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2) * (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)} / 3 \quad (3)$$

4.1.4 Potencia aparente fundamental (S). Potencia de fase aparente fundamental:

$$S_{1X} = U_{1X} * I_{1X} \quad (32)$$

Potencia aparente del sistema (conexión Y):

$$S_{1Y}^+ = 3 * U_1^+ * I_1^+ \quad (33)$$

La potencia de sistema aparente no es la suma de las potencias de fase.

Potencia aparente del sistema (conexión Δ):

$$S_{1\Delta}^+ = 3 * U_1^+ * I_1^+ \quad (34)$$

4.1.5 Potencia reactiva fundamental (Q). Para la potencia reactiva, sólo interesa la potencia fundamental.

Potencia de fase reactiva fundamental:

$$Q_{1X} = U_{1X} * I_{1X} * \sin(\varphi_{u_{1X}} - \varphi_{i_{1X}}) \quad (35)$$

Potencia reactiva fundamental del sistema (conexión Y y Δ):

$$Q_1^+ = 3 * U_1^+ * I_1^+ * \sin(\varphi_{u_1^+} - \varphi_{i_1^+}) \quad (36)$$

La potencia reactiva del sistema no es la suma de las potencias de las fases.

4.1.6 Potencia de armónicos (Dh). Las potencias de armónicos se calculan utilizando la potencia aparente total S_X y la potencia aparente fundamental S_{1X} .

Potencia de distorsión por armónicos:

$$Dh_X = \sqrt{S_X^2 - S_{1X}^2} \quad (37)$$

Potencia distorsión por armónicos del sistema (conexión Y y Δ):

$$Dh = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (38)$$

La potencia de sistema de distorsión por armónicos no es la suma de las potencias de fase.

4.1.7 VA - Potencia de desequilibrio (Du). Las potencias de desequilibrio no se pueden medir por fase. El desequilibrio sólo se mide en el nivel de sistema.

El desequilibrio calcula a partir de la potencia aparente del sistema fundamental y el componente de secuencia positiva de la potencia aparente del sistema.

Potencia de desequilibrio del sistema:

$$Du = \sqrt{S_1^2 - S_1^{+2}} \quad (39)$$

4.1.8 Factor de potencia (PF). Indica la efectividad del sistema en el ancho de banda máximo y calcula a partir de la potencia de espectro total y la potencia aparente.

Factor de potencia:

$$PF_X = P_X/S_X \quad (40)$$

Factor de potencia del sistema:

$$PF = P/S \quad (41)$$

4.1.9 Factor (DPF) de potencia de desplazamiento y Cos ϕ . El factor de potencia de desplazamiento calcula a partir de las componentes de potencia fundamental y aparente.

Es idéntico al Cos ϕ del ángulo de fase entre la corriente y la tensión fundamental.

Factor de potencia de desplazamiento:

$$PF_{1X} = P_{1X}/S_{1X} \quad (42)$$

Factor de potencia de desplazamiento del sistema:

$$PF_1 = P_1^+/S_1^+ \quad (43)$$

4.2 Pérdidas en los motores de inducción

4.2.1 Pérdidas de potencia y energía. El equipo Fluke 435 II se enfoca en 2 componentes principales de pérdida de energía:

- Pérdida de potencia de línea, causada por las distintas corrientes que fluyen por la resistencia de línea (pérdidas I^2R)
- Pérdida de potencia residual, causada por armónicos y desequilibrio

Los componentes de corriente del sistema se calculan mediante el método de componentes simétricos.

Corriente de sistema activa:

$$I_{1a}^+ = I_1^+ * \cos(\varphi_{u_1^+} - \varphi_{i_1^+}) \quad (44)$$

Corriente de sistema reactiva:

$$I_{1r}^+ = I_1^+ * \sin(\varphi_{u_1^+} - \varphi_{i_1^+}) \quad (45)$$

Corriente de sistema de armónicos:

$$I_H = \sqrt{I_{HA}^2 + I_{HB}^2 + I_{HC}^2} \quad (46)$$

Corriente de sistema de desequilibrio:

$$I_U = \sqrt{I_1^{-2} + I_1^{02}} \quad (47)$$

Corriente de neutro: Medida directamente al utilizar sistemas de 4 hilos.

En combinación con la resistencia de cableado, es posible calcular las pérdidas de potencia de línea debido a estas corrientes ($P = I^2R$).

La pérdida de potencia residual es la causada por la potencia de armónicos y de desequilibrio.

La potencia reactiva (var) en sí sólo causa pérdidas I^2R en el cableado.

Pérdida de potencia de armónicos residual:

$$P_H = P - P_1 \quad (48)$$

Pérdida de potencia de desequilibrio residual:

$$P_U = P_1 - P_1^+ \quad (49)$$

4.3 Cálculo de la eficiencia de los motores de inducción.

Con el procedimiento que a continuación se detalla procedemos a determinar la eficiencia con una muy aceptable precisión.

El primer paso para determinar la eficiencia, es calcular el factor de carga, en donde se hace una relación de corriente de operación entre la corriente nominal del motor, además se multiplica esta relación con la relación del voltaje.

La fórmula para determinar el factor de carga esta expresada en la siguiente ecuación:

$$FC_{\%} = \left[\frac{I_p}{I_n} * \frac{V_p}{V_n} \right] * 100 \quad (50)$$

Dónde:

I_p =Es la corriente promedio en las tres fases.

I_n =Es la corriente nominal del motor.

V_p =Voltaje promedio en las tres fases.

V_n = Voltaje nominal del motor.

En la siguiente tabla se puede observar los datos obtenidos en la medición, con los cuales realizamos los cálculos para determinar el factor de carga del motor M3.

Tabla 5. Datos de medición del motor M3

Datos de medición del motor M3							
Voltajes entre fases			Corrientes de línea			Potencia	Frecuencia
V_A	V_B	V_C	I_A	I_B	I_C	HP	Hz

211	212	210	55	65	60	20	59,98
-----	-----	-----	----	----	----	----	-------

Fuente: Autores

El voltaje promedio en las tres fases está definido de la siguiente forma.

$$V_p = \frac{V_A + V_B + V_C}{3} \quad (51)$$

$$V_p = \frac{211V + 212V + 210V}{3} = 211V$$

La intensidad promedio de las tres fases está definida de la siguiente forma.

$$I_p = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \quad (52)$$

$$I_p = \frac{55A + 65A + 60A}{3} = 60A$$

De la ecuación 50 ponemos datos y determinamos el factor de carga.

$$FC_{\%} = \left[\frac{60}{65} * \frac{211}{230} \right] * 100$$

$$FC_{\%} = \left[\frac{12660}{14950} \right] * 100$$

$$FC_{\%} = 84,68\%$$

La eficiencia del motor está definida de la siguiente forma.

$$\eta_M = \frac{P_s}{P_e} \quad (53)$$

Dónde:

P_e = Es la potencia de entrada al motor.

P_s = Es la potencia mecánica de salida del motor.

η_M = Es la eficiencia del motor.

$$\eta_M = \frac{12660}{14920} = 0,85$$

Las ecuaciones para determinar el porcentaje de pérdidas en función de la carga son expresadas bajo el principio de:

$$L(100\%) = a * (Fc100\%)^2 + b \quad (54)$$

$$L(\%MMD) = a * (Fc)^2 + b \quad (55)$$

Se requiere conocer dos puntos de eficiencia del motor a cualquier tipo de carga, el primer punto de eficiencia será el dato de placa que proporciona el fabricante, el otro punto de eficiencia es el que se obtenga con la medición.

La eficiencia nominal del motor a plena carga para motores se encuentra en la tabla 9.

Se obtendrán las pérdidas a plena carga y también las pérdidas al porcentaje de carga, como lo muestran las siguientes ecuaciones.

$$L(100\%) = P_{nom}(kW) * \left(\frac{1}{\eta(100\%)} - 1 \right) = 1,48 \quad (56)$$

Tabla 6 Valores de eficiencia nominal en % a plena carga para motores eléctricos.

Potencia nominal (kW)	Potencia nominal HP	3600(RPM) 2 polos	1800 (RPM) 4 polos	1200 (RPM) 6 polos	900 (RPM) 8 polos
0,746	1	75,5	82,5	80,0	74,0
1,119	1,5	82,5	84,0	85,5	77,0
1,492	2	84,0	84,5	86,5	82,5
2,238	3	87,5	87,5	87,5	84,0
3,730	5	87,5	87,5	87,5	85,5
5,595	7,5	89,5	89,5	89,5	85,5
7,460	10	89,5	89,5	89,5	88,5
11,19	15	91,0	91,0	90,2	88,5
14,92	20	91,0	91,0	90,2	89,5
18,65	25	91,0	92,4	91,7	89,5
22,38	30	91,0	92,4	91,7	91,0
29,84	40	91,7	93,0	93,0	91,0
37,30	50	92,4	93,0	93,0	91,7
44,76	60	93,0	93,6	93,6	91,7
55,95	75	93,0	94,1	93,6	93,0
74,60	100	93,6	94,5	94,1	93,0
93,25	125	94,5	94,5	94,1	93,6
111,9	150	94,5	95,0	95,0	93,6
149,2	200	95,0	95,0	95,0	94,1

Fuente:IEEE " Comparison of standars for determining efficiency of three Phase induction motors

$$L(\%MMD) = P_{nom}(kW) * Fc * \left(\frac{1}{n_M} - 1\right) \quad (57)$$

$$L(\%MMD) = 14950 * 0.8486 \left(\frac{1}{0.85} - 1\right)$$

$$L(\%MMD) = 2,24$$

Como ya se explicó en el CAPÍTULO II, las pérdidas en los motores son de dos tipos: las fijas y las variables. Por lo tanto las ecuaciones para determinar el porcentaje de pérdidas en función de la carga son expresadas:

$$L(100\%) = a * (Fc_{100\%})^2 + b \quad (58)$$

$$L(\%MMD) = a * (Fc)^2 + b \quad (59)$$

Dónde:

a = Pérdidas variables.

b = Pérdidas fijas.

$F_{C100\%}$ = Factor de carga = 1.0.

Fc = Factor de carga

Por lo tanto:

$$L(100\%) = a + b \quad (60)$$

$$L(\%MMD) = a * (Fc)^2 + b \quad (61)$$

Despejando las pérdidas variables en las ecuaciones

$$L(100\%) - L(\%MMD) = (1 - Fc^2) * a \quad (62)$$

Las pérdidas variables son:

$$a = \frac{L(100\%) - L(\%MMD)}{(1 - Fc^2)} \quad (63)$$

$$a = \frac{1,48 - 2,24}{(1 - 0,8486^2)}$$

$$a = -2,68$$

Las pérdidas fijas que son:

$$b = L(100\%) - a \quad (64)$$

$$b = 1,48 + 2,68$$

$$b = 4,16$$

Se puede obtener las pérdidas fijas por unidad para lo cual dividimos las cargas fijas con las cargas a plena carga:

$$b' = \frac{b}{L(100\%)} \quad (65)$$

La pérdida variable en valor unitario es:

$$1 = a' + b'$$

En dónde:

$$a' = 1 - b' \quad (66)$$

Ahora es posible obtener una fórmula para las pérdidas a cualquier factor de carga desde cero hasta plena carga y está expresada por la siguiente ecuación:

$$Ly = L(100\%) * [a' * (Fc_{(0-100\%)})^2 + b'] \quad (67)$$

La eficiencia para cualquier factor de carga $Fc_{(0-100\%)}$ se calcula con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{1}{\left[\frac{Ly}{Fc_{(0-100\%)} * P_{nom}(kW)} \right] + 1} \quad (68)$$

4.4 La Interpolación De LaGrange

Cuando se requiera conocer las pérdidas del motor a un factor de carga no predeterminado en las ecuaciones anteriores, el equipo utiliza una interpolación de segundo grado, para esto utiliza la interpolación de LaGrange.

La ecuación de LaGrange se representa concretamente como:

$$fn(x) = \sum_{j=0}^n Li(X) * f(Xi) \quad (69)$$

$$Li(x) = \prod_{i=0, i \neq j}^n \frac{x-x_i}{x_j-x_i} = \frac{x-x_0}{x_j-x_0} \dots \frac{x-x_{j-1}}{x_j-x_{j-1}} \frac{x-x_{j+1}}{x_j-x_{j+1}} \dots \frac{x-x_n}{x_j-x_n} \quad (70)$$

Y la ecuación de segundo orden para cuatro puntos se expresa en la siguiente forma:

$$f(X_a) = \frac{(X-X_1)*(X-X_2)*(X-X_3)}{(X_0-X_1)*(X_0-X_2)*(X_0-X_3)} * f(X_0) \quad (71)$$

$$f(X_b) = \frac{(X-X_0)*(X-X_2)*(X-X_3)}{(X_1-X_0)*(X_1-X_2)*(X_1-X_3)} * f(X_1) \quad (72)$$

$$f(X_c) = \frac{(X-X_0)*(X-X_1)*(X-X_3)}{(X_2-X_0)*(X_2-X_1)*(X_2-X_3)} * f(X_2) \quad (73)$$

$$f(X_d) = \frac{(X-X_0)*(X-X_1)*(X-X_2)}{(X_3-X_1)*(X_3-X_2)*(X_3-X_0)} * f(X_3) \quad (74)$$

El resultado del polinomio de LaGrange es la suma de todas las ecuaciones:

$$f_2(X) = f(X_a) + f(X_b) + f(X_c) + f(X_d) \quad (75)$$

Dónde:

$f_2(X) = Ly(X) =$ Pérdidas obtenidas del factor de carga.

$X =$ factor de carga

$X_0 = 1.0$ factor de carga

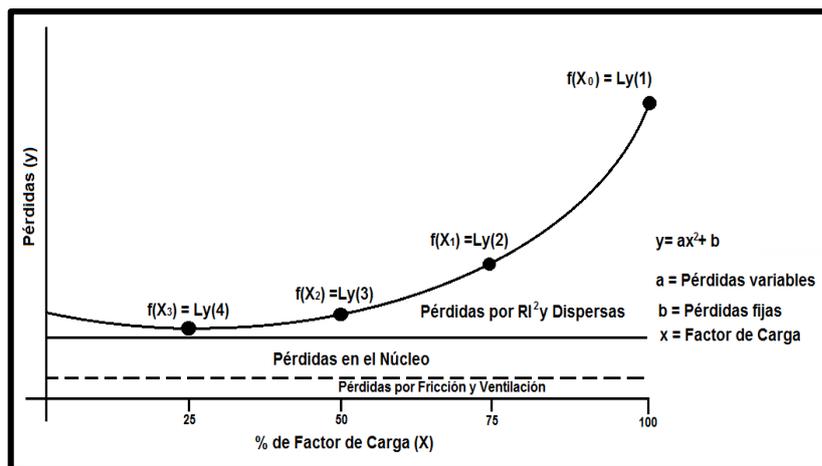
$X_1 = 0.75$ factor de carga

$X_2 = 0.5$ factor de carga

$X_3 = 0.25$ factor de carga

La figura 32, muestra las ecuaciones que determinan las pérdidas de los motores a diferentes factores de carga, se pueden observar los cuatro puntos que se utilizan para la interpolación de segundo orden con el polinomio de **LaGrange**.

Figura 36. Puntos para la interpolación de segundo orden con el polinomio de LaGrange.



Fuente: <http://pybonacci.org/2013/08/15/ajuste-e-interpolacion-unidimensionales-basicos-en-python-con-scipy/>

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MEDICIÓN

5.1 Análisis de resultados

Para el análisis de resultados se toma como referencia las siguientes normas de calidad de energía.

Límites para el índice de desbalance en tensión

La norma IEC61000-2-2, al igual que la norma IEEE 1159, recomienda que el índice de desbalance de tensión en un suministro eléctrico no debe superar el 2 %.

En la norma IEC61000-4-30 se establece que el tiempo de medida debe ser de una semana continuamente durante 10 minutos y/o cada 2 horas.

Límites para la variación lenta de voltaje

Todo equipo eléctrico está diseñado para trabajar con voltaje nominal óptimo ya sea 110, 120, 240, 480 y 600 voltios, empleando un margen de variación generalmente del 10% del voltaje nominal la norma ANSI C84 recomienda, para solventar las variaciones de voltaje en el sistema eléctrico debido a la conexión y desconexión de equipos.

Tabla 7. Norma ANSI C84.1

VALOR NOMINAL (V)	RANGO DESEABLE (V)	RANGO ACEPTABLE (V)
120	126 - 114	127 - 110
208	218 - 197	220 - 191
240	252 - 228	254 - 220
277	291 - 263	293 - 254
480	504 - 456	508 - 440
2.400	2.525 - 2.340	2.540 - 2.280
4.160	4.370 - 4.050	4.400 - 3.950
4.800	5.040 - 4.680	5.080 - 4.560
13.800	14.490 - 13.460	14.520 - 13.110
34.500	36.230 - 33.640	36.510 - 32.780

Fuente: Fundamentos y evaluación de la calidad de la energía eléctrica 2015

Límites armónicos de voltaje

La norma IEEE 519-2014 recomienda los siguientes límites para armónicos de voltaje

Tabla 8. Norma IEEE519-2014, armónicos de voltaje

TENSIONES DE LA RED	TASA DE DISTORSIÓN INDIVIDUAL %	TASA DE DISTORSIÓN TOTAL THDU %
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

^aHigh-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects will have attenuated at points in the network where future users may be connected.

Fuente: Fundamentos y evaluación de la calidad de la energía eléctrica 2015

Límites armónicos de corriente

La norma IEEE 519-2014 recomienda los siguientes límites para armónicos de corriente.

Tabla 9. Norma IEEE519-2014, armónicos de corriente

MÁXIMA DISTORSIÓN DE CORRIENTE EN PORCIENTO DE I_L						
ORDEN DEL ARMÓNICO INDIVIDUAL (Orden del armónico impar) ^{a,b}						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

^a Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

^b Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

^c All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{SC}/I_L .

where

I_{SC} = maximum short-circuit current at PCC

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at the PCC under normal load operating conditions

Fuente: Fundamentos y evaluación de la calidad de la energía eléctrica 2015

Con las recomendaciones de las normas de calidad de energía descritas anteriormente podemos realizar el análisis de resultado del motor tipo jaula de ardilla motor M3 y determinar

si el desequilibrio o desbalance de tensiones es la causa principal para tener pérdidas de energía en el motor y por ende disminución de la eficiencia del mismo.

En las siguientes tablas se indican el análisis de resultados de las mediciones realizadas en el motor trifásico jaula de ardilla motor M3.

En la tabla 13 se realiza el análisis de resultados de voltaje y corriente.

Tabla 10. Análisis de resultados de voltaje y corriente motor M3.

Análisis de resultados voltaje y corriente.				
Parámetro	Máximo	Medio	Mínimo	Norma ANSI c84.1
V _{A-B}	212	211	210	Si cumple
V _{B-C}	213	212	211	Si cumple
V _{C-A}	210	210	209	Si cumple
A (A)	57	55	55	Si cumple
B (A)	65	65	63	Si cumple
C (B)	61	60	59	Si cumple

Fuente: Autores

En la tabla 14 se realiza el análisis de resultados de armónicos de voltaje y corriente.

Tabla 11. Análisis de resultados de armónicos voltaje y corriente

Análisis de resultados de armónicos voltaje y corriente					
Parámetro	3 ^{er} %	5 ^{to} %	7 ^{mo} %	THDV %	NORMA IEEE519-2014
Armónicos de voltaje	0.3	1.5	0.5	2,45	Si cumple
Parámetro	3 ^{er}	5 ^{to}	7 ^{mo}	THDV %	NORMA IEEE519-2014
Armónicos de corriente	0.5	6.4	5.6	8,14	Si cumple

Fuente: Autores

En la tabla 15 se realiza el análisis de resultados de desequilibrio de tensiones

Tabla 12. Análisis de resultados de desequilibrio de tensiones

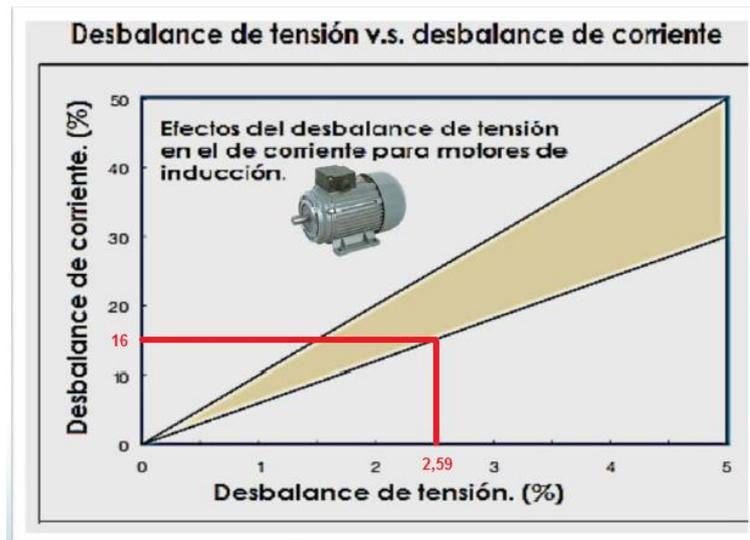
Parámetro	Máximo %	Media %	Mínimo %	NORMA IEEE 1159
Desequilibrio de tensiones	2,59	2,4	2,29	No cumple

Fuente: Autores

Con los siguientes resultados y determinando que de los parámetros de calidad de energía el parámetro de desequilibrio de tensiones se encuentra fuera de límites recomendados por la norma IEEE 1159, se realiza el análisis de eficiencia en el motor M3.

En la figura 47, se nota el efecto desequilibrio de las tensiones del 2,59% sobre la corriente.

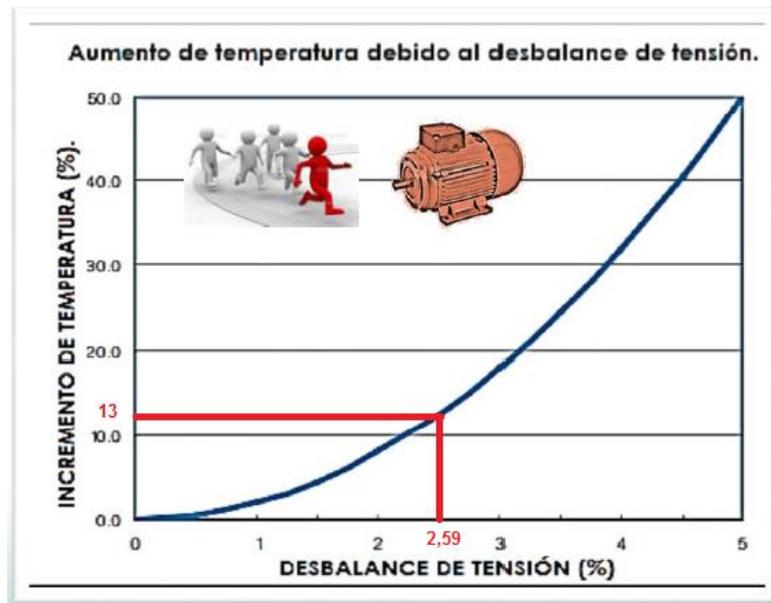
Figura 37, Desequilibrio de tensión vs desequilibrio de corriente



Fuente: Fundamentos y evaluación de la calidad de la energía eléctrica 2015

Con 2,59% de desequilibrio en la tensión del motor M3 el desequilibrio de la corriente es de 16 % por ende incrementado la temperatura del motor.

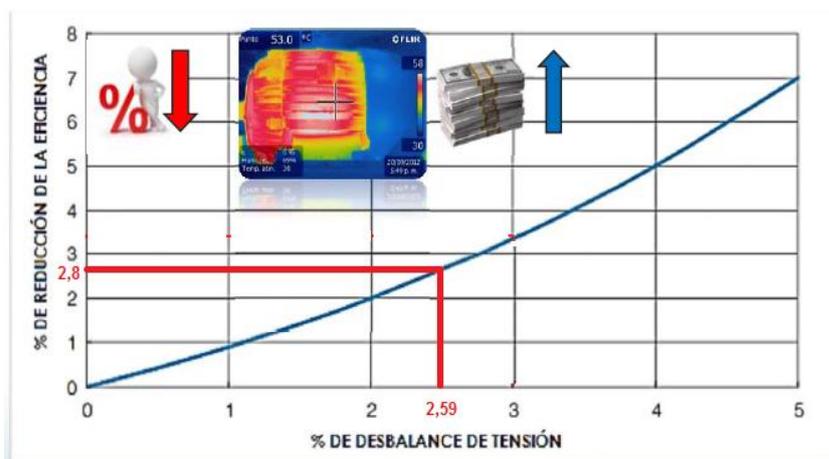
Figura 38. Aumento de temperatura debido al desequilibrio de tensión



Fuente: Fundamentos y evaluación de la calidad de la energía eléctrica 2015

Con 2,59% de desequilibrio en la tensión del motor M3 el incremento de la temperatura es del 13 % en el motor.

Figura 39. Disminución de la eficiencia del motor M3



Fuente: Fundamentos y evaluación de la calidad de la energía eléctrica 2015

Con 2,59% de desequilibrio en la tensión del motor M3 la reducción de la eficiencia es 2,8 %.

5.2 Ajuste en la eficiencia por desbalance en el voltaje.

El desbalance se produce por diferencia entre el voltaje máximo y el voltaje promedio tal y como demostramos en la ecuación 76.

$$MD_{prom} = V_{Max} - V_{prom} \quad (76)$$

Dónde:

MD_{prom} = Máxima diferencia al promedio

V_{Max} = Voltaje máximo entre fases (230V)

V_{prom} = Voltaje promedio entre fases, equivalente a 211 V (ecuación 51).

$$MD_{prom} = 230 - 211$$

$$MD_{prom} = 19V$$

Por lo cual el valor para ajuste de desbalance de voltaje en el motor M3 queda determinado con la siguiente ecuación:

$$\% ADV = \frac{MD_{prom}}{V_{prom}}$$

$$\% ADV = \frac{19}{211}$$

$$\% ADV = 9 \%$$

Al existir desbalance la eficiencia con las características del motor disminuyen conforme aumente el desbalance.

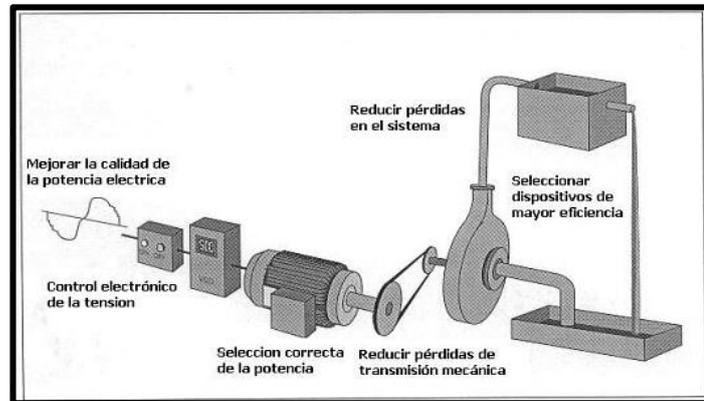
5.3 Recomendaciones para el uso correcto de motores trifásicos de inducción jaula de ardilla.

Para lograr el uso eficiente de la energía eléctrica existen varias opciones en las aplicaciones de motores eléctricos logrando reducir costos asociados al consumo de energía.

La Figura 46, muestra alguna de estas opciones: selección correcta de la potencia del motor, mejorar la calidad de la energía eléctrica, reducir la carga mecánica sobre el motor, usar motores de alta eficiencia, usar controladores electrónicos de velocidad,

aplicar métodos de mantenimiento centrados en la eficiencia y el usar métodos de reparación que mantengan la eficiencia del motor.

Figura 40. Ahorro de energía en los sistemas de accionamiento.



Fuente: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1189&tip=7>

Mejorar la calidad de la energía eléctrica de la instalación

Los motores eléctricos de inducción están diseñados y fabricados para operar en las condiciones especificadas en la placa de características, llamadas condiciones nominales. Asimismo deben ser alimentados con un sistema trifásico simétrico de tensiones de forma de onda sinusoidal y de magnitud similar a la nominal, es decir el sistema debe tener una calidad de la potencia eléctrica perfecta.

Sin embargo los sistemas eléctricos industriales generalmente no presentan las condiciones ideales ni en simetría, forma de onda y magnitud es decir tiene una calidad de potencia eléctrica disminuida, los fenómenos de calidad de la potencia eléctrica que se presentan con mayor frecuencia son: tensión simétrica y de magnitud mayor o menor que la tensión de placa, tensión desequilibrada es decir las tres fases presentan magnitudes diferentes y forma de onda de la tensión distorsionada es decir no es una onda sinusoidal pura.

Si la calidad de la potencia eléctrica entregada por la red es baja el motor operara con mayores pérdidas y disminuyendo su tiempo de vida. Por lo tanto es importante se verifique el grado de calidad de la potencia eléctrica de las instalaciones eléctricas o en caso contrario se debe conocer las consideraciones a tomar en cuenta para la operación segura del motor.

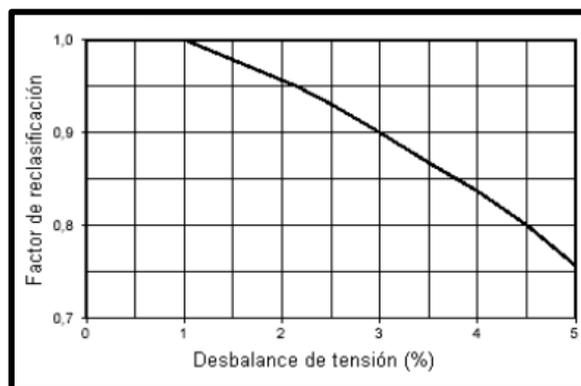
Minimizar el desequilibrio de tensiones

Los factores que crean el desequilibrio de tensión son: cargas monofásicas, cables de diferente calibre, fallas de circuitos, etc.

Los sistemas desequilibrados incrementan las pérdidas en el sistema eléctrico industrial y en el motor, aumentan el calentamiento y reducen la eficiencia del motor. Por lo tanto para evitar fallas por calentamiento las normas recomiendan operar el motor con una potencia menor a la potencia nominal.

Las normas recomiendan una curva para la desclasificación de la potencia del motor en función del grado de desequilibrio. El desequilibrio de tensiones no debe ser mayor a 2% de acuerdo a la norma IEEE 1159.

Figura 41. Efectos del desequilibrio de tensiones sobre la potencia nominal del motor.



Fuente:<http://es.slideshare.net/Josehuen/motores-39993373>

5.4 Beneficios del análisis de eficiencia energética.

El análisis de la eficiencia energética contribuye enormes beneficios en diferentes ámbitos:

- Reduce los gastos de energía en los hogares y empresas.
- Reduce por tanto los costos de producción, mejorando la competitividad de las empresas.
- Aumenta la confiabilidad de los equipos.
- Reduce el daño ambiental y la contaminación que afecta a la salud de todos.
- Aumenta la seguridad del abastecimiento de energía.
- Disminuye el consumo de recursos naturales.
- Reduce el deterioro al medio ambiente asociado a la explotación de recursos.

- Reduce el impacto de los gases de efecto invernadero (GEI).

Por tanto la eficiencia energética (EE) es un "recurso" energético que cuenta con enormes ventajas, además de ser muy abundante y de bajo costo relativo.

La aplicación de técnicas de análisis de consumo energético, nuevas tecnologías y procedimientos de control, permite diseñar soluciones de EE adaptadas a las necesidades específicas de cada industria.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se analizó con los parámetros adecuados las pérdidas de energía producida en motores trifásicos asíncronos con líneas desequilibradas.

Se realizó las mediciones en los motores utilizando el equipo FLUKE 435 II en diferentes equipos con distintas cargas.

Se elaboró un informe en el cual especificamos los resultados basados en los datos obtenidos.

Se propone soluciones viables tanto técnicas como económicas para mitigar efectos negativos del resultado de la medición.

6.2 Recomendaciones

Utilizar solamente las pinzas amperimétricas como se suministran en el kit del analizador de calidad energética, o bien pinzas adecuadas para un uso seguro con el analizador, desactivar los sistemas de alimentación antes de realizar las conexiones en el caso que sea posible.

Utilizar siempre el equipo de protección personal apropiado. Evitar trabajar solo y trabaje teniendo en cuenta las advertencias indicadas en el manual de uso de equipo Fluke 435 II.

Capacitar a los estudiantes y docentes sobre el uso del analizador de energía Fluke 435 II, además tener claro su importancia en el estudio de la calidad de energía y su beneficio en la reducción de costos de mantenimiento y aumento de confiabilidad en los equipos.

BIBLIOGRAFÍA.

ALONSO. 1976. FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO. [aut. libro] MERCELO ALONSO. *FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO*. MEXICO : EDWARD J. FINN, 1976.

BANERJEE, A. JOUANNE AND B. 2001.ASSESSMENT OF VOLTAGE UNBALANCE. [aut. libro] A. JOUANNE. *ASSESSMENT OF VOLTAGE UNBALANCE*. EEUU : PARAFINE, 2001.

CHAPMAN, STEPHEN J. 1991. MAQUINASS ELECTRICAS. *MAUINAS ELECTRICAS*. EEUU : MAGRAWN-HILL, 1991.

IEC 61000-4-15. 2003. ENSAYOS Y MEDICIONES TECNICAS - MEDIDOR DE FLICKER. [aut. libro] IEC 61000-4-15. *ESPICIFICACIONES FUNCIONALES Y DE DISEÑO*. ESPAÑA : PARAFINE, 2003.

IEE 61000-3-3. 2008. LIMITACION DE LAS VARIACIONES DE TENSION. [aut. libro] IEE. *LÍMITES*. ESPAÑA : PARAFINE, 2008.

IEEE. 2003. STANDART 519 PRACTICAS Y RECOMENDADOS. *STANDART 519 PRACTICAS Y RECOMENDADOS*. EEUU : PARAFINE, 2003.

KLEPPNER. 1973.*An Introduction to Mechanics*. s.l. : McGraw-Hill, 1973.

LEE, CH. Y. 1999. EFFECTS OF UNBALANCE VOLTAGE ON THE OPERATION PERFORMANCE OF A THREE-PHASES INDUCTION MOTOR. *IEEE TRANS. ENERGY CONVERSION*. EEUU : PARAFINE, 1999.

LENZ. 1890. PRINCIPIO DE VONSERVACION DE LA ENERGIA. *PRINCIPIO DE CONSERVACION DE LA ENERGIA*. ITALIA : PARAFINE, 1890.

SANTAMARTA, JOSE. 2000. LA EFICIENCIA ENERGETICA. [aut. libro] SANTAMARTA. *LA EFICIENCIA ENERGETICA*. ESPAÑA : PARAFINE, 2000.

TESLA, NIKOLA. 1888.*PRINCIPIOS DE MOTORES DE INDUCCION*. EEUU : PARAFINE, 1888.

ANEXOS
