

EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE LA ALIMENTACIÓN DE UN MOTOR TRIFÁSICO EN UNA RED MONOFÁSICA UTILIZANDO CONDENSADORES

ENERGY EVALUATION OF THE POWER SUPPLY OF A THREE-PHASE MOTOR IN A SINGLE-PHASE NETWORK USING CAPACITORS

Eduardo Hernández¹, Dennys Gadvay², Cristian Tierra³

edhernandez@esPOCH.edu.ec, dennys.gadvay@esPOCH.edu.ec, cptierra@esPOCH.edu.ec

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Grupos de Investigación Ciencia del Mantenimiento CIMANT, Riobamba, Ecuador.

Recibido 03/04/2020; Aceptado: 05/07/2020

Resumen: En la presente investigación de tipo experimental se realiza una comparación estadística de mediciones de potencia activa, potencia reactiva, factor de potencia, desbalance de corriente de un motor trifásico mediante dos métodos de conexión, alimentando el motor trifásico conectado a una red trifásica y conectado a una red monofásica para demostrar si existen diferencias significativas, las mediciones tomadas por el Analizador de la Calidad de la Energía proporcionará los parámetros de la calidad de la energía eléctrica en los dos casos de funcionamiento del motor.

Palabras-clave: Analizador de la Calidad de la Energía, red trifásica, red monofásica, desbalance, condensador.

Abstract: In this experimental research, a statistical comparison is made of measurements of active power, reactive power, power factor, current imbalance of a three-phase motor by two connection methods, feeding the three-phase motor connected to a three-phase network and Connected to a single-phase network to demonstrate if there are significant differences, the measurements taken by the Energy Quality Analyzer will provide the

parameters of the quality of the electrical energy in the two cases of motor operation.

Keywords: Energy Quality Analyzer, three phase network, single phase network, imbalance, capacitor.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el campo industrial se va incrementando paulatinamente incluso en el área rural, en donde predominan las empresas pequeñas y microempresas [1]. En este sector la alimentación de energía es monofásica; sin embargo, los motores eléctricos utilizados en su maquinaria son trifásicos. El costo de instalación de una línea de alimentación eléctrica de tipo trifásico resulta ser costoso, ya que depende de la cantidad de conductores activos y de la distancia que comúnmente es extensa, por lo mencionado, cuando las longitudes de las líneas son importantes, los accionamientos monofásicos reducen los costos de la instalación [2].

El uso de capacitores en motores monofásicos es muy utilizado como un método de arranque, además proporcionan un par de arranque dos veces mayor que un motor que no hace uso del condensador [3] [4]. En sistemas industriales es usual el utilizar bancos de capacitores para compensar la potencia reactiva que necesitan los motores para poder funcionar, estos bancos de capacitores estabilizan el factor de potencia [5], y controlan las pérdidas de potencia activa de motores trifásicos [6]. Cuando se crea la necesidad de conectar un motor trifásico y solo se dispone de una red monofásica, comúnmente se usan condensadores para compensar la tercera fase requerida por el motor, lo que permite arrancar estos motores [7]. Sin embargo, no se conoce la variación en la calidad de la energía eléctrica que se genera con esta configuración en el motor trifásico; por lo que, en esta investigación se realiza una comparación estadística de mediciones de potencia activa, potencia aparente, factor de potencia y desbalance de corrientes.

La comparación estadística de mediciones se realiza alimentando un motor trifásico en dos tipos de red, monofásica y trifásica. La relevancia de esta investigación de tipo experimental recae en que el estudio de los parámetros de la calidad de la energía eléctrica permite obtener el costo de las pérdidas de energía [8]; de tal manera que, al comparar con el costo de implementar una instalación trifásica nueva, se pueda elegir entre la alternativa más económica.

2. METODOLOGÍA

Para la toma de mediciones de esta investigación se utilizó un módulo de pruebas (Figura 1) que consta de un motor trifásico jaula de ardilla de 220 V, 1 HP y 3410 RPM acoplado a un alternador de 12 V y 35 A, mediante un sistema de poleas-banda. Al alimentar el inducido del alternador con 10 V de corriente directa y conectando dos consumidores (lámparas) de 12 V y 100 W, ejerció una carga al motor para las posteriores mediciones.

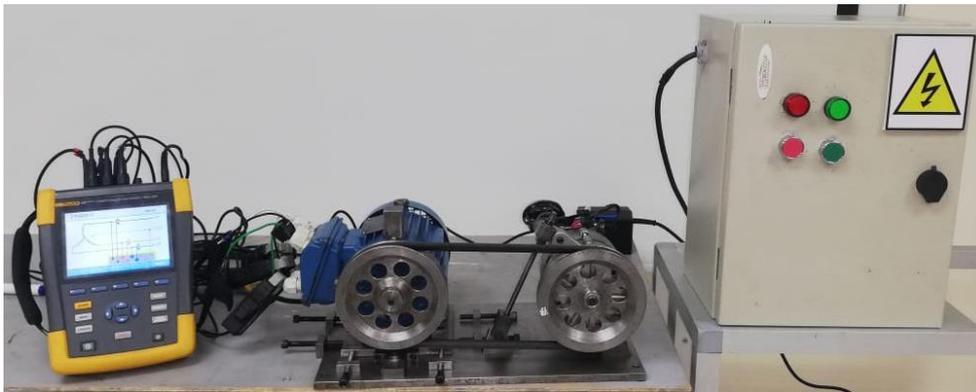


Ilustración 1. Módulo de ensayo

Para alimentar el motor se usó dos redes de alimentación: trifásica (220 V) y monofásica (220 V), cabe recalcar que la carga aplicada al motor fue la misma para todas las mediciones en los dos tipos de red. La alimentación del motor a la red trifásica fue el primer método para arrancar el motor mediante un arranque directo (Figura 2).

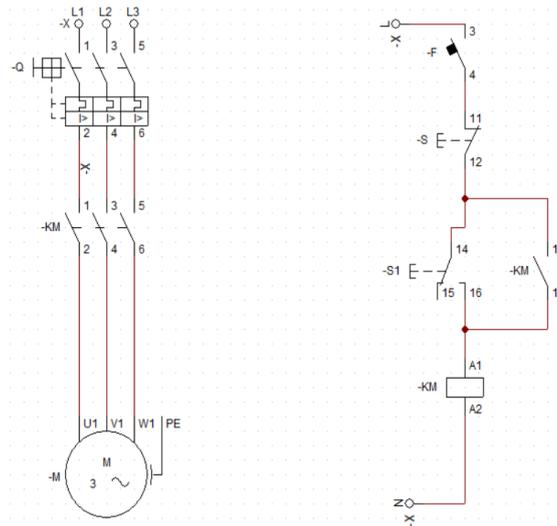


Figura 1. Circuito para la conexión a la red trifásica

El segundo método realizado fue alimentando el motor trifásico a una red monofásica mediante un arranque directo, usando dos condensadores para su funcionamiento (Figura 3), un condensador de arranque (C1) y un condensador permanente (C2). La red monofásica posee dos líneas que son la fase y neutro, éstas dos alimentan a dos de las tres líneas del motor trifásico, la tercera línea del motor faltante se conectó con la fase de la red y a la vez en serie con el condensador permanente que tuvo como función adelantar la corriente respecto al voltaje 90 grados eléctricos, la implementación de éste condensador simula la tercera línea requerida para que el motor arranque.

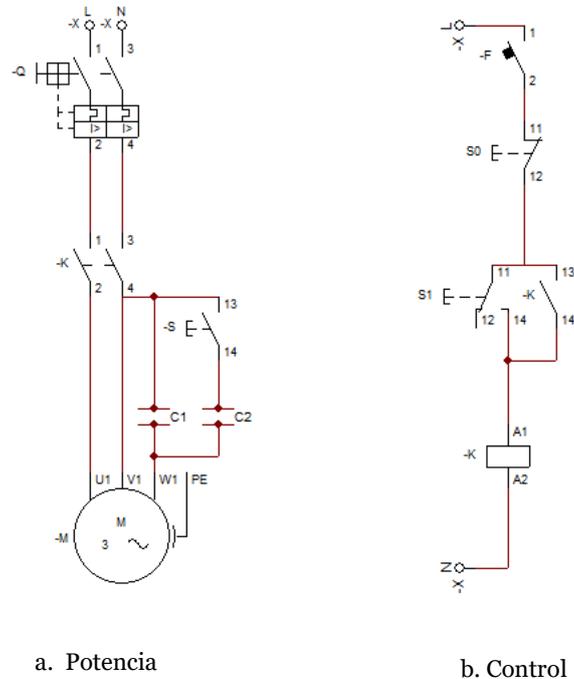


Figura 2. Circuito de conexión a la red monofásica

La capacidad del condensador permanente (C1 Figura 3 a) debe ser capaz de proporcionar una corriente tal que el motor funcione a plena carga; este condensador opera permanentemente durante el funcionamiento del motor, el condensador de arranque (C2 Figura 3 a) está conectado en paralelo con el condensador permanente y se conecta solamente durante el arranque del motor, al alcanzar la velocidad de trabajo se procede a su desconexión, la capacidad de C2 debe ser tal que proporcione una corriente elevada durante el arranque.

La capacidad del condensador de arranque fue de $200 \mu\text{F}$ el cual suministró la corriente necesaria para que el motor obtenga un par elevado. Los sistemas eléctricos industriales son propensos a sufrir desbalance de voltaje[9], este es un fenómeno que ocurre en sistemas trifásicos donde los voltajes y ángulos entre fases consecutivas no son iguales, se debe conocer que el balance perfecto de voltajes es técnicamente imposible[10]. Un efecto que produce el desbalance de voltaje en un motor eléctrico es el desbalance de corriente[9], debido a esta condición se conectó

un condensador permanente que tuvo como objetivo equilibrar la corriente consumida por las bobinas del motor, para obtener el menor valor de desbalance se hizo pruebas reemplazando diferentes valores de condensadores permanente en el circuito de potencia (Figura 3 a), éstos valores de capacidad, se obtuvieron al conectar cuatro condensadores de 10, 15, 20, 25 microfaradios disponiéndolos en conexión serie y paralelo[11].

Posteriormente se calculó el porcentaje de desbalance de corriente para cada uno de las capacidades de los condensadores mediante la siguiente ecuación [12]:

$$\%Dc = (\text{Intensidad [L1, L2, L3]} - \text{Intensidad media}) / (\text{Intensidad media}) * 100$$

Donde:

%Dc: Porcentaje de desbalance de corriente

El porcentaje de desbalance se calculó para cada línea respectivamente y se eligió el mayor valor, el cual representó el desbalance producido para cada valor de capacidad del condensador.

Tabla 1. Valores de Porcentaje de Desbalance de Corriente

Intensidad [A]			Condensador [μF]	Intensidad media [A]	Desbalance [%]
L1	L2	L3			
2,29	2,09	0,48	6,08	1,620	70,37
1,81	2,19	0,78	9,87	1,593	51,03
2,21	1,81	0,88	10,76	1,633	46,11
2,15	1,60	1,18	14,28	1,643	30,85
2,12	1,50	1,21	14,89	1,610	31,68
1,44	2,14	1,27	15,93	1,616	32,42
2,18	1,36	1,43	17,56	1,656	31,64
1,19	2,16	1,61	19,88	1,653	30,67

El resultado obtenido de las mediciones mostró que, a mayor capacidad del condensador permanente en la línea compensada, la corriente aumenta (Tabla 1), el menor valor de porcentaje de desbalance de corriente es de 30,67% correspondiente a un condensador de 19,88 μF (Figura 4). Una vez elegido el

condensador a conectar en el circuito de potencia se realizó el ensayo en la red monofásica.

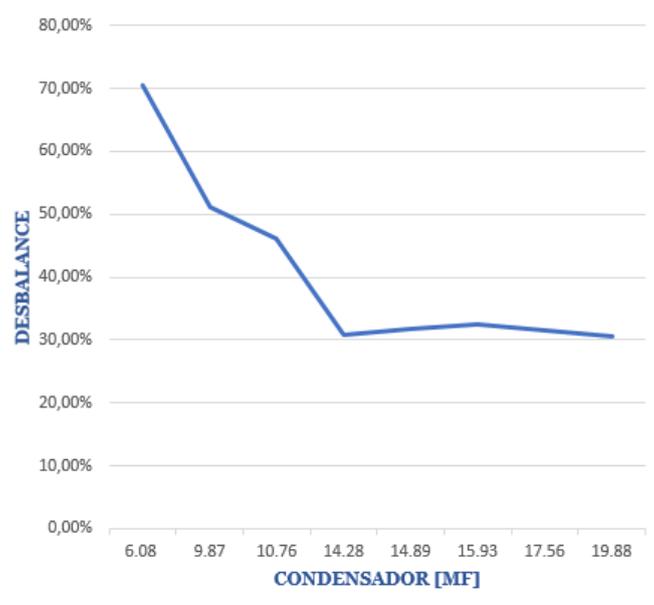


Figura 3. Gráfica % Desbalance

El equipo de análisis de la calidad de la energía empleado para realizar las mediciones en los dos tipos de red fue el Analizador de la Calidad de la Energía Fluke 435 serie II.

Para realizar el cableado (Figura 5) del equipo en el módulo de pruebas se desconectó la fuente de alimentación. Antes de realizar las mediciones se configuró el equipo Fluke con el tipo de conexión empleada en las bobinas del motor, se eligió la conexión estrella con neutro, además fue necesario configurar los accesorios del equipo tales como las pinzas voltimétricas Fluke TLS430, y las pinzas amperimétricas de CA Fluke i5S. La selección de estos accesorios fue en base a la corriente y tensión de consumo especificado en la placa del motor.

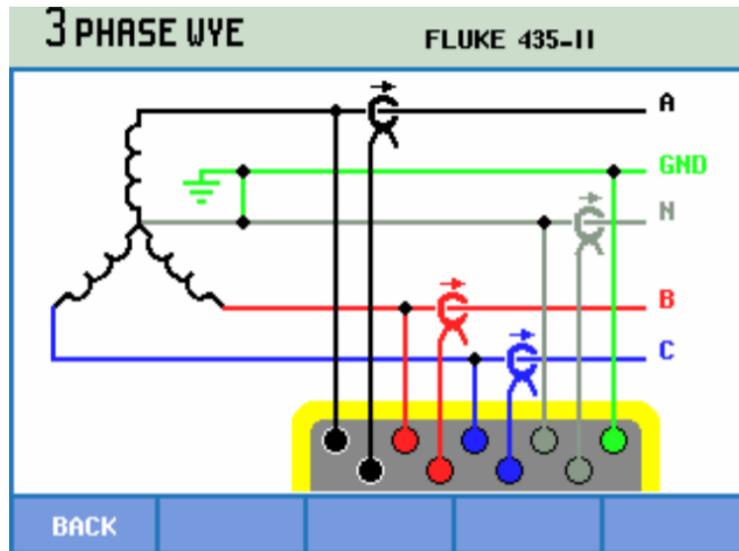


Figura 4. Diagrama de Cableado

Para acceder a la pantalla del analizador Fluke 435-II, y poder realizar las mediciones de voltio, amperio, frecuencia, fluctuaciones, armónicos, potencia y energía se realizó los siguientes pasos:

F1, es la tecla de arriba y abajo, se utilizó para desplazarse por la pantalla del multímetro. F3, es la tecla de acceso a la pantalla de tendencia. F4, es la tecla de acceso a la pantalla de eventos. F5, es la tecla de cambio entre los modos de actuación de pantalla HOLD y RUN. Al cambiar de HOLD a run aparece un menú que permite definir la hora de inicio y duración de la medida.

Con la ayuda del software Power Log se pudo descargar del equipo Fluke al PC datos de tendencias y de formas de onda, así como capturas de pantalla. La conexión de interfaz se encontró detrás la cubierta antipolvo situada en la esquina inferior izquierda del analizador se conectó mediante un cable USB.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la toma de treinta mediciones en los dos tipos de redes analizadas, correspondientes a cada uno de los siguientes parámetros de la energía eléctrica: potencia activa, potencia aparente y desequilibrio mostrados en las Tablas 2 y 3 se llegó a los resultados de los valores estadísticos indicados en la Tabla 4, cuyos histogramas se ilustran en la Figura 6.

Tabla 2. Mediciones de parámetros de la red trifásica

Nº	Potencia activa [W]	Potencia aparente [VA]	Factor de potencia	Desbalance de tensión [%]	Desbalance de Intensidad [%]
1	601,5	786,9	0,76	0,31547321	4,78896104
2	597,6	784,5	0,76	0,08505103	1,25786164
3	598,2	785,1	0,76	0,06515638	3,79537954
4	601,8	787,5	0,76	0,35427374	0,28913672
5	594,9	781,5	0,76	0,40152580	0,16934801
6	595,8	783,6	0,76	0,34952814	4,011461320
7	594,9	782,7	0,76	0,30031533	2,08688245
8	593,4	781,2	0,76	0,15534954	5,32132624
9	592,2	780,3	0,76	0,20971688	0,83542189
10	593,7	780,9	0,76	0,27090754	2,26700252
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	591,6	780,3	0,76	0,27570304	5,4396728

Tabla 3. Mediciones de parámetros de la red monofásica

Nº	Potencia activa [W]	Potencia aparente [VA]	Factor de potencia	Desbalance de tensión [%]	Desbalance de Intensidad [%]
1	598,2	1082,6	0,55	9,82683573	62,3931624
2	597,9	1082,3	0,55	9,86182094	62,4558304
3	590,3	1068,4	0,55	9,84862819	62,4668825
4	592,6	1072,2	0,55	9,87782934	62,5367863
5	593,9	1074,4	0,55	9,87736162	62,5147232
6	596,9	1079,9	0,55	9,86502486	62,4705189
7	597,6	1081,6	0,55	9,84600805	62,4446413
8	594,3,	1075,3	0,55	9,85128351	62,4262102
9	594	1075	0,55	9,85595148	62,4668044
10	596,2	1078,4	0,55	9,87016679	62,4889413
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
30	594,1	1079,5	0,55	9,90329004	62,2641509

Tabla 4. Valores estadísticos de la potencia activa

Parámetro	Tipo de red	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar
Potencia activa [W]	Trifásica	588,6	601,8	593,5	3,295
	Monofásica	589,7	598,5	594,6	2,601
Potencia aparente [V*A]	Trifásica	777,3	787,5	781,2	2,571
	Monofásica	1067	1083	1077	4,675
Desbalance de tensiones [%]	Trifásica	0,065	0,589	0,342	0,123
	Monofásica	9,809	9,922	9,864	0,029
Desbalance de intensidades [%]	Trifásica	1,013	4,789	2,724	0,946
	Monofásica	62,20	62,61	62,41	0,112

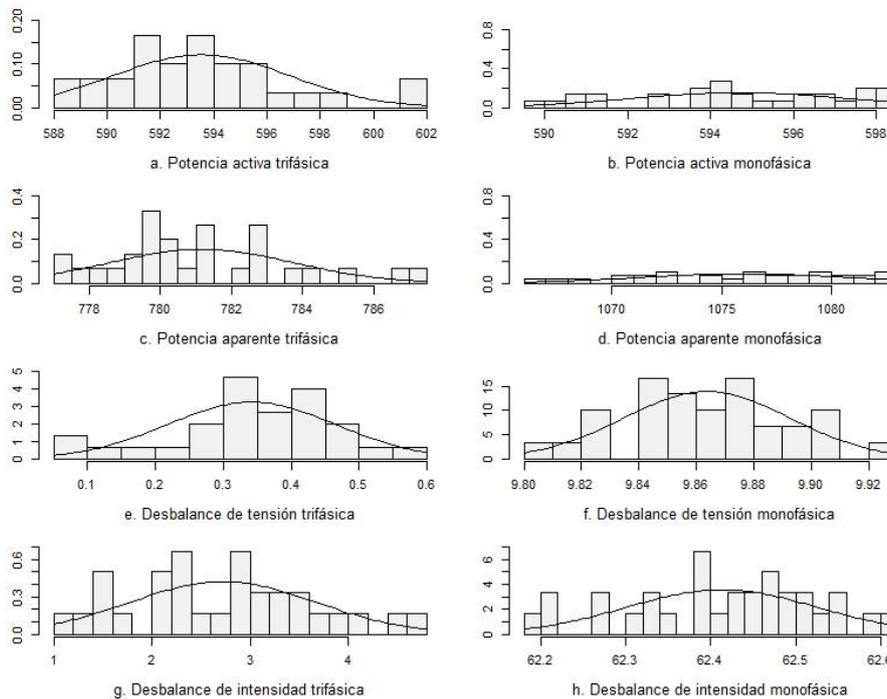


Figura 5. Histogramas de frecuencias de las medidas

En la tabla 4 se indica que la media de las potencias activa y aparente consumida por el motor en la red trifásica son mayores que las consumidas en la red monofásica; en tanto que, la media del desbalance de la tensión e intensidad, son menores en la red trifásica; sin embargo, es importante no solo cotejar las medias de las variables medidas, sino también comparar las de muestras; y para ello, el primer paso es realizar un test de normalidad, por lo que se efectuó la prueba de Shapiro-Wilk, obteniendo los resultados indicados en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la prueba de normalidad

Magnitud	Tipo de red	[w]	P-valor	Normalidad
Potencia activa	Trifásica	0,9388	0,0843 > 0,05	Si
Potencia activa	Monofásica	0,9456	0,1287 > 0,05	Si
Potencia aparente	Trifásica	0,9462	0,1334 > 0,05	Si
Potencia aparente	Monofásica	0,9459	0,1314 > 0,05	Si
Desbalance de voltaje	Trifásica	0,9624	0,3559 > 0,05	Si
Desbalance de voltaje	Monofásica	0,9840	0,9199 > 0,05	Si
Desbalance de corriente	Trifásica	0,9822	0,8808 > 0,05	Si
Desbalance de corriente	Monofásica	0,9652	0,4174 > 0,05	Si

Dado que en las pruebas de Shapiro-Wilk se encontró que todos los datos se distribuyen normalmente, se aplica el método paramétrico de t-student para la demostración de la hipótesis; en donde la H_0 corresponde a la igualdad de las muestras, que indica que las mediciones de los parámetros eléctricos en los motores conectados en una fuente trifásica y los conectados en una fuente monofásica mediante condensador, son iguales. Los resultados de esta prueba obtenidos mediante el software estadístico R se tabulan en la Tabla 6.

Tabla 6. Variables Comparadas

VARIABLES COMPARADAS	T	Df	P-valor
P. activa 3F – P. activa 1F	-1,5050	55,033	0,1380 > 0,01
P. aparente 3F – P. aparente 1F	-302,74	45,067	2,2e-16 < 0,01
D. voltaje 3F – D. voltaje 1F	- 412,77	32,163	2,2e-16 < 0,01
D. corriente 3F – D. corriente 1F	-343,09	29,813	2,2e-16 < 0,01

En la evaluación de hipótesis, para las potencias activas, el p-valor obtenido (Ver Tabla 6), es mayor que 0,05; por lo tanto, se acepta el H_0 y se concluye que no existe evidencia suficiente para demostrar que las muestras son diferentes con el 95% de confianza; por consecuencia, las potencias activas para las conexiones eléctricas trifásica y monofásica, son similares, aunque en la conexión monofásica es ligeramente mayor. Este resultado también se puede observar en la Figuras 7, lo que evidencia la utilización de la misma carga para el motor en los dos tipos de conexiones.

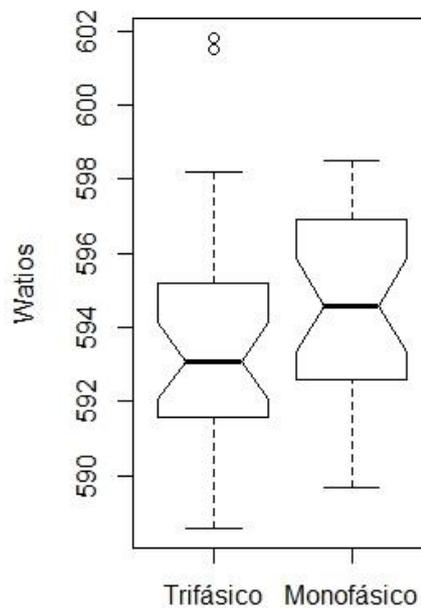


Figura 6. Diagrama cajas de comparación de la potencia activas

En lo concerniente a la evaluación de hipótesis del resto de parámetros, el p-valor obtenido (ver Tabla 6), es menor que 0,05; por lo tanto, se rechaza el H_0 y se concluye que las muestras son diferentes con el 95% de confianza; por consiguiente, estos parámetros eléctricos correspondientes a las conexiones trifásicas y monofásicas son diferentes. La Figura 8 ilustra estos resultados, evidenciando que, en la conexión monofásica basada en la utilización de condensadores, se generan mayores pérdidas, puesto que en estas conexiones se observa mayor potencia aparente y desbalance tanto de tensión como de intensidad.

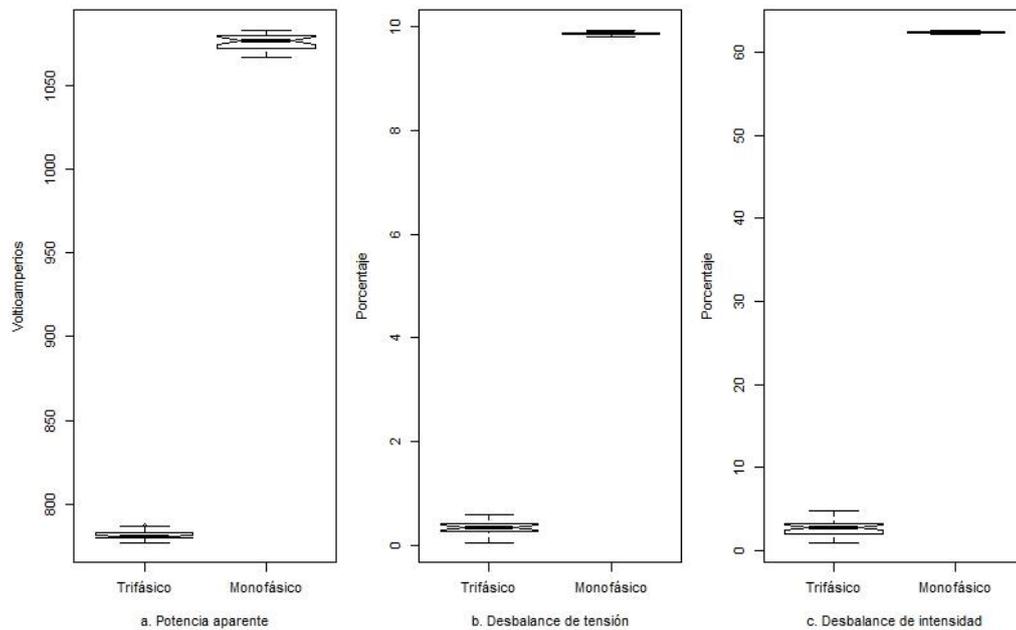


Figura 7. Diagrama de cajas de comparación de las potencias aparentes (a) y del desbalance de tensión (b) e intensidad (c)

En cuanto al factor de potencia, no se observó ninguna variación durante todas las medidas realizadas, estableciéndose en 0,76 para la alimentación trifásica y 0,55 para la alimentación monofásica, siendo el primero el mejor entre los dos.

Con los valores de las medias de la Tabla 4, se ha calculado los incrementos y decrementos de las magnitudes medidas, cuyos resultados se observan en la tabla 7 en donde las variaciones más notables corresponden a los desbalances de tensión y de intensidad.

Tabla 7. Variaciones de las magnitudes eléctricas medidas

Parámetro	Tipo de red	Media	Variación
Potencia activa [W]	Trifásica	593,5	0,2%
	Monofásica	594,6	
Potencia aparente [V*A]	Trifásica	781,2	37,9%
	Monofásica	1077	
Desbalance de tenciones [%]	Trifásica	0,342	2784,2%
	Monofásica	9,864	
Desbalance de intensidades [%]	Trifásica	2,724	2191,1%
	Monofásica	62,41	
Factor de potencia	Trifásica	0,76	-27,6%
	Monofásica	0,55	

En la tabla 7 se muestra una variación del 37,9% de la potencia aparente respecto a la red trifásica, lo que indica un consumo excesivo y resulta en una penalización a pagar que se contabiliza a partir del factor de potencia inferior establecido por cada empresa suministradora, establezcamos un ejemplo en el que se necesita llevar una red trifásica a 1 Km de distancia, pero se opta por implementar condensadores, el cual consume 0,2958 kVA/h más que una red trifásica y funciona 3000 horas/año durante 5 años, sabiendo que la tarifa en nuestro medio es de \$0.09 por kVA/h, da un costo de \$ 399,33 , el valor calculado se adiciona al costo de funcionamiento del motor en una red trifásica. Se debe tomar cuenta el alto costo que conlleva el instalar una red trifásica a lugares muy distantes de la urbe, en nuestro medio el costo referencial de implementación de una red monofásica es de 2000 dólares por cada 100 metros y de 5000 dólares por cada 100 metros en una red trifásica. En el ejemplo propuesto la alternativa más económica sería la de implementar la instalación de una red monofásica asumiendo el costo de consumo excesivo de potencia.

4. CONCLUSIÓN

La utilización de condensadores para conectar un motor trifásico en una red monofásica consigue poner en marcha al mencionado motor; no obstante, los parámetros de la energía eléctrica resultan notablemente afectados, en donde la potencia activa y el factor de potencia desmejora en aproximadamente 1/3 con respecto a los obtenidos en una red trifásica. Por otro lado, los desbalances de tensión y de intensidad se incrementan en más del 2000%. Esto indica que el rendimiento del motor se afecta de manera importante, por lo que esta alternativa no se aconseja mantener por un tiempo prolongado. Ante estos resultados se

recomienda realizar análisis similares para el funcionamiento de motores trifásicos conectados a redes monofásicas de 220 V por medio de variadores de frecuencia.

En el ejemplo propuesto, la alternativa más económica es la de implementar la instalación de una red monofásica asumiendo el costo de consumo excesivo de potencia para cinco años, éste método no se torna factible si se desea instalar una red trifásica a una distancia de 100 metros, puesto que el consumo excesivo de potencia igualaría el costo de instalar la red trifásica al cabo de cinco años.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Pérez C, *Hacia una nueva visión de lo rural*. 2005.
- [2] S. Jornadas, “Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia - 2013,” no. Merletti 2005, pp. 432–437, 2013.
- [3] “Determinacion de capacitores para arranque de motores monofasicos.pdf.”
- [4] R. Bargalló, “Diseño de un Motor de Inducción Monofásico,” pp. 14–15, 2014.
- [5] C. Espinoza and M. Perez, “Metodología para el diseño y dimensionamiento adecuado de banco de capacitores para correccion de factor de potencia en la empresa yambersa,” pp. 0–77, 2015.
- [6] J. A. Pomahuali, “La aplicación de condensadores en el control de pérdidas de motores trifásicos en la Sociedad Minera Austria Duvaz SAC.”
- [7] “Boletín mensual preparado por Oscar Núñez Mata, Consultor, Costa Rica,” no. 506, p. 8919, 2011.
- [8] C. S. Aragón, E. de Olivera Pamplona, and J. R. V. Medina, “La eficiencia energética como herramienta de gestión de costos: una aplicación para la identificación de inversiones de en eficiencia energética, su evaluación económica y de riesgo,” *Rev. Digit. del Inst. Int. Costos*, no. 1, pp. 48–73, 2012.
- [9] O. Núñez and C. Rica, “M o t o r,” no. 506, p. 8919, 2010.
- [10] F. JAMI, “Desbalance De Voltaje,” *Escuela Politécnica Nacional*. 2003.
- [11] C. Veloso, “Capacitores O Condensadores En Serie Y Paralelo,” *ETools*, pp. 2–3, 2017.
- [12] G. Casaravilla and V. Echinope, “Desbalances - Estudio de alternativas para su estimacion,” no. 1, pp. 1–5, 2010.