

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



CONVERTIDOR ESTÁTICO DE FASE (CEF) PARA UTILIZACIÓN DE MOTORES TRIFÁSICOS A PARTIR DE ALIMENTADORES MONOFÁSICOS EN ZONAS RURALES

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELÉCTRICISTA

PRESENTADO POR:

RUBÉN ELEUTERIO RAU CALIZAYA

**PROMOCIÓN
1985-II**

**LIMA – PERÚ
2013**

**CONVERTIDOR ESTÁTICO DE FASE (CEF) PARA
UTILIZACIÓN DE MOTORES TRIFÁSICOS A PARTIR DE
ALIMENTADORES MONOFÁSICOS EN ZONAS RURALES**

A mi familia
A mis amigos
A la FIEE-UNI

SUMARIO

En el presente informe se expone el diseño de un convertidor estático de fase que permita, a partir de alimentadores monofásicos, la utilización de motores trifásicos en *zonas rurales y manteniendo la potencia nominal del motor.*

Esta solución es necesaria por cuanto, a pesar de existir una configuración estrena-neutro en las provincias, en las zonas rurales más alejadas solo le llega una línea monofásica y el respectivo neutro, imposibilitando así el uso de motores trifásicos.

En este trabajo se presentan las experiencias en la aplicación de estos convertidores estáticos de fase y el procedimiento que se ha seguido para la selección de las áreas de aplicación en poblaciones de baja densidad de carga y comunidades dispersas así como el procedimiento analítico que se ha seguido para el cálculo y construcción de estos convertidores.

En el método analítico se describe como determinar los parámetros de un convertidor de fase con autotransformador-condensador que permite conectar el convertidor a un motor trifásico específico para una carga dada. Las ecuaciones son desarrolladas para el tamaño de un condensador y relación de vueltas de autotransformador que dará una *operación balanceada a un motor trifásico.*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA	3
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 <i>Objetivos del trabajo</i>	3
1.3 Evaluación del problema	3
1.4 Alcance del trabajo.....	10
CAPÍTULO II	
METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	11
2.1 Diseño utilizando el Diagrama Vectorial	12
2.2 Diseño utilizando componentes simétricas.....	15
CAPÍTULO III	
PRUEBAS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	19
3.1 <i>Verificación de ecuaciones</i>	19
3.2 Materiales utilizados para la prueba	21
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	24
ANEXO A CÁLCULO DEL AUTOTRANSFORMADOR Y DE LOS CONDENSADORES PARA MOTORES MARCA WEG DE DISTINTOS HP	26
ANEXO B PROGRAMA EN LENGUAJE C# PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO DE FASE	28
BIBLIOGRAFÍA	33

INTRODUCCIÓN

El trabajo desarrollado surge por la necesidad de las localidades rurales alejadas de hacer uso de motores trifásicos y de manera económica. Esto porque hacia aquellas zonas, los proyectos de electrificación solo llevan una fase y su respectivo neutro. Las poblaciones que desean proporcionar un valor agregado a sus materias primas (convirtiéndolas en materia procesada o productos) mediante el uso de maquinaria que utiliza motores trifásicos, ven limitadas sus expectativas por este limitante.

Las soluciones comunes para este problema, eran realizadas por medio de grupos electrógenos trifásicos, los cuales tienen como desventaja su pérdida de potencia cuando se trabaja a más de 1000 msnm, además el costo de operación y mantenimiento es alto

Otra solución era hacer uso de una alimentación delta abierto, lo cual alimenta con dos fases y utiliza un condensador solo para el arranque del motor, con lo que la potencia se ve disminuida a 86.6 %.

La propuesta de solución, que se presenta en este informe, consiste del diseño de un convertidor estático de fase con autotransformador-condensador. Esto resulta económico y fiable, además de proporcionar la calidad de energía para el funcionamiento del motor trifásico sin perder la potencia nominal.

En este informe se presenta el diseño para un caso de estudio, es decir se especifica la potencia nominal del motor trifásico a utilizar, para luego determinar las características de los componentes del convertidor estático de fase. El diseño es logrado mediante dos metodologías: Uso de diagrama vectorial y utilización de componentes simétricas. Los datos obtenidos en el diseño son corroborados con pruebas de laboratorio.

El informe de suficiencia está dividido en tres capítulos principales:

- Capítulo I "Planteamiento de ingeniería del problema".- En este capítulo se expone el problema de ingeniería, se precisan los objetivos y se hace un análisis de la problemática para la justificación del diseño. Se precisan los alcances del diseño y se hace un resumen del trabajo realizado.
- Capítulo II "Metodología para la solución del problema".- Este capítulo se enfoca en explicar el diseño paso a paso del convertidor estático de fase mediante dos métodos de cálculo. Las secciones principales son: *Uso de diagrama vectorial y utilización de componentes simétricas.*
- Capítulo III "Pruebas y presentación de resultados".- En este capítulo se describe la

prueba de laboratorio y los resultados obtenidos, haciendo una comparación con los resultados teóricos que se obtienen de las fórmulas halladas.

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DE INGENIERÍA DEL PROBLEMA

En este capítulo se realiza el planteamiento de ingeniería del problema, para ello primeramente se describe el problema y luego se expone el objetivo del trabajo, también se evalúa el problema y se precisan los alcances del informe, para finalmente presentar una síntesis del diseño presentado.

1.1 Descripción del Problema

Necesidad de las localidades rurales alejadas de hacer uso de motores trifásicos y de manera económica.

1.2 Objetivos del trabajo

Diseño de un convertidor estático de fase con autotransformador-condensador sin perder la potencia nominal.

1.3 Evaluación del problema

En todo el Perú se encuentran realizando proyectos de electrificación rural. Estos proyectos tienen la limitación de que solo son alimentados con línea monofásica.

Es el Ministerio de Energía y Minas (MEM), a través de la Dirección General de Electrificación Rural (DGER-MEM), el que tiene la competencia en materia de electrificación rural de acuerdo a la Ley N° 28749, "Ley General de Electrificación Rural".

La ampliación de la frontera eléctrica en el ámbito nacional, se realiza en coordinación con los Gobiernos Regionales y Locales, y entidades públicas y privadas dedicadas a estos fines. Esto permite el acceso del suministro de electricidad a los pueblos del interior del país, lo cual es un medio para contribuir a su desarrollo económico-social, mitigar la pobreza, mejorar su calidad de vida y desincentivar la migración del campo a la ciudad.

Para el desarrollo rural integral es necesario se incremente el poder adquisitivo de la población rural promoviendo el uso de la electricidad en actividades productivas. Para ello se deben implementar de proyectos de electrificación rural con tecnologías y programas de acción, asimismo identificando, evitando, previniendo, mitigando o compensando los *impactos culturales, sociales y ambientales que estos pudieran ocasionar [1]*.

Actualmente en el Perú, casi la quinta parte de la población total carece de servicio eléctrico. En el contexto actual de globalización e integración regional, esta situación representa una clara desventaja respecto a los demás países del continente, cuyos

índices de electrificación en la mayoría de los casos son bastante superiores, relegando al Perú al penúltimo lugar en Latinoamérica (ibídem).

Los proyectos de electrificación rural desarrollados por la DGER-MEM, son clasificados como Proyectos de Inversión Pública (PIP), los mismos que de acuerdo al Título III, Art. 10 de la Ley 28749 [2], Ley General de Electrificación Rural, forman parte del Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) y se enmarcan en el proceso de *ampliación de la frontera eléctrica en las zonas rurales, localidades aisladas y de frontera* del Perú.

La página institucional del DGER proporciona información sobre los proyectos de electrificación rural [3]. El informe de proyectos - resumen ejecutivo [4] de octubre del 2012 resume los proyectos en ejecución y/o concluidos, se consigna el nombre del proyecto (ubicación), tipo de proyecto (Gobierno Local, PNER, Decreto de urgencia, etc.), situación, código SNIP, montos de inversión y de contrato, fecha de contrato (donde corresponda), plazo de contratación, el avances físicos y económicos, etc.

Por otra parte, el Sector Energía y Minas viene desarrollando activamente, la electrificación rural del país, a través del Programa "Luz para Todos", el cual está conformado por diversos programas de electrificación, el cual presenta proyectos concluidos [5] y en preparación [6]. Estos se encuentran a cargo la Dirección General de Electrificación Rural - DGER/MEM, y los clasifica en proyectos agrupados y no agrupados.

Con la finalidad de acelerar la ejecución de las obras aprovechando las economías de escala, se han efectuado agrupaciones de proyectos, los cuales fueron licitados y contratados de esta manera. A diciembre de 2011 se han conformado 18 grupos de proyectos, desde el N° 1 al N° 18. La inversión total de estos 18 grupos es de S/. 950 millones que beneficiarán a su conclusión a una población de 1 millón 40 mil habitantes [7]. Del total de 341 proyectos se han concluido 121, quedan en ejecución 187 proyectos, 2 en licitación y 21 se encuentran próximos a licitarse (ibídem).

La DGER/MEM ejecuta proyectos de manera individual, ya sea porque son de gran envergadura o porque tienen algún tipo de financiamiento especial, estos se denominan proyectos no agrupados (ibídem).

Adicionalmente, desde el año 2006 se viene implementando el "Proyecto de Mejoramiento de Electrificación Rural mediante Fondos Concursables – FONER"; basado en el otorgamiento de Fondos Concursables, para subsidiar parcialmente, por parte del Estado, la inversión en proyectos de Electrificación Rural. Bajo este modelo, los promotores de Electrificación Rural, las Empresas de Distribución Eléctrica (EEDD-públicas y privadas) concursan por fondos, presentando proyectos socialmente rentables

dentro de sus respectivos ámbitos, los mismos que son sometidos a evaluación económico – financiera y determinación del porcentaje de subsidio que necesitan cada uno de estos proyectos. El MEM cuenta con el apoyo del Banco Mundial y del Global Environment Facility (GEF) para desarrollar el nuevo marco de proyectos [7], orientado a:

- Incrementar la eficiencia económica en el sector y atraer la participación y el financiamiento por parte de los gobiernos y de las empresas de distribución regionales.
- *Descentralizar la planificación y la implementación de proyectos.*
- Introducir concesiones rurales de la electricidad con regulaciones específicas para asegurar la viabilidad económica y financiera de proyectos.
- Crear mecanismos de estímulo para inversiones rurales de electrificación.
- Ampliar el uso de tecnologías nuevas para atender a poblaciones remotas, especialmente con energía renovable.
- Financiar Proyectos para suministrar electricidad a 110,000 nuevas conexiones (beneficiando, aproximadamente, a 473,000 personas), mayoritariamente en viviendas e instituciones públicas, tales como escuelas y centros de salud, utilizando como instrumento tanto la extensión de la red convencional, como el uso de fuentes de energía renovable para atender a poblaciones remotas.
- Implementar un programa piloto para desarrollar el uso productivo de la electricidad que permita incrementar las oportunidades para la generación de ingresos en áreas rurales.

El Proyecto inició sus actividades en agosto del año 2006 y culminó en septiembre del año 2012. El presupuesto total es de US\$ 144 550 000, que es financiado de la siguiente manera:

- BIRF*	US\$ 50 000 000
- GOB NAC	US\$ 51 450 000
- GEF	US\$ 10 000 000
- EEDD	US\$ 33 100 000
- COSTO TOTAL	US\$ 144 550 000

*BIRF: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento

Este proyecto tiene tres componentes:

- Componente 1: Inversión en Proyectos de electrificación Rural .- A través de este componente, se otorga subsidios directos al costo de inversión de proyectos de electrificación rural, presentados por empresas distribuidoras de servicio eléctrico calificadas para atender a los pobladores rurales.
- Componente 2: Asistencia Técnica para la implementación de un nuevo esquema de electrificación rural.- Este componente está diseñado para proveer de soporte técnico, así como la Construcción de capacidades de los agentes involucrados en el Proyecto.

Abarca cuatro bloques: Normatividad y regulación, desarrollo de capacidades de los agentes involucrados, promoción de la participación del sector privado, y; promoción del uso de energía renovable.

- Componente 3: Programa Piloto de usos productivos.- Este componente trata de reducir costos y contribuir al incremento de la productividad en zonas rurales, dando valor agregado a la producción mediante la aplicación productiva de energía.

En esto último es donde apunta el diseño propuesto en el presente informe de suficiencia. Respecto a este último componente, A la fecha se han desarrollado tres (3) Pilotos en el ámbito de la empresa Electro Sureste (Cusco), se trabajaron 11 proyectos productivos, incorporando 1508 Unidades Productivas Familiares (UPF). En la zona de concesión de la empresa Electro Centro (Junín) se trabajaron nueve proyectos productivos con 912 UPF; y en el Área Rural Electrificada de ADINELSA en la Región Lima se trabajaron 7 proyectos productivos incorporando otras 904 UPF. El 46% de UPF es liderada por mujeres [7]. Así mismo, se encuentran en desarrollo cinco consultorías para la promoción de los usos productivos en las áreas electrificadas de las empresas Electro Sureste, SEAL, Electro Centro, Electro Oriente y Electro Puno; adicionalmente, 5 consultorías se encuentran en proceso de concurso, cuyo inicio sería fue el 2012. Con estas consultorías se proyecta incorporar 15,000 UPF al uso productivo de electricidad.

En conclusión, la incorporación de la electricidad en los procesos productivos mejora la rentabilidad y rendimiento, incrementa la calidad de los productos y los precios finales. Por su parte, las distribuidoras se benefician con mayores demandas de energía y mejor distribución de carga.

En la fuente bibliográfica mencionada [7], se mencionan dos ejemplos para ilustrar este último componente (Figura 1.1). La foto de la izquierda corresponde al Sistema Eléctrico Rural SER (antes PSE) de Yurinaki Ramal 2, en el cual se ve a un agricultor cafetalero de La Olada, próximo a usar su despulpadora conectada a electricidad. La foto de la derecha corresponde a una productora de café en plena jornada con su despulpadora eléctrica, C.P. Maranura, La Convención, Cusco.



Figura 1.1 Ejemplos de electricidad en los procesos productivos (Fuente: Ref. [7])

Es necesario recalcar que los proyectos de electrificación en las zonas rurales son principalmente monofásicas, ya sea fase a fase o MRT (Monofásico con retorno por tierra), lo cual limita el uso de maquinaria más potente y a su vez eficiente. La maquinaria antes mostrada corresponde a equipos monofásicos.

A continuación, a manera de análisis, se muestra dos despulpadoras de café del mismo fabricante y con la misma potencia del motor (1 HP). La primera es monofásica (Figura 1.2) y la segunda es trifásica (Figura 1.3).



Figura 1.2 Despulpadora de café, monofásica: 350 kg/hora (Fuente: Ref: [8])



Figura 1.3 Despulpadora de café, trifásica: 500 kg/hora (Fuente: Ref: [9])

La primera (monofásica) tiene un rendimiento de 350 kg/hora y cuesta \$ 1070 USD, mientras que la segunda (trifásica) tiene un rendimiento de 500 kg/hora y cuesta \$ 1407 USD. Como se puede observar, con una misma potencia pero con distintos tipos de motor, se logra una mayor productividad con el motor trifásico (en dos horas se hace

aproximadamente lo que el otro hace en tres), en una jornada de 8 horas, con el motor trifásico se logra producir 4,000 Kg y con el monofásico 2800 Kg.

Extendiendo el análisis, por ejemplo para el molino de café, el mismo fabricante provee dos productos: Molino de café industrial (300 kg/h 5 HP \$ 3200 USD), y el molino para café clásico (60 kg/h 1 HP \$ 1130 USD). La lógica podría apuntar que para tener una productividad equivalente a la del molino industrial tendría que tener cinco molinos clásicos, pero las desventajas son enormes, el costo sería \$ 5650 USD (76% más caro), se necesitaría más horas/hombre. Es de destacar además que el mantenimiento de los motores monofásicos es más caro.



Figura 1.4: Molino clásico, monofásico: 60 kg/hora (Fuente: Ref: [10])



Figura 1.5 Molino Industrial, trifásico: 300 kg/hora (Fuente: Ref: [11])

En conclusión, el uso de un motor trifásico brinda mayores beneficios que el motor monofásico. Por lo tanto, para hacer uso de esa ventaja, es que se busca tener un suministro trifásico en aquellas zonas rurales. Las opciones clásicas son el uso del grupo electrógeno trifásico y la alimentación en delta abierto, las cuales presentan limitaciones.

En el caso del grupo electrógeno trifásico, solo sería justificable su uso donde no hay energía eléctrica. Requiere para su funcionamiento gas o petróleo, cuyo suministro es *difícil por cuanto se debe transportar hasta la zona de uso, con el consecuente costo y riesgo*. Adicionalmente, si se considera superado lo anterior, el problema es la eficiencia del grupo electrógeno, el cual disminuye su rendimiento en 10% por cada 1000 metros de altura.

Un aspecto de cuidado para el uso del GE es el cálculo de su potencia. La selección de la capacidad del Grupo Electrónico debe ser lo más precisa posible [12] porque si es:

- Por exceso: No se aprovecha la capacidad total de generación. Existe un costo excesivo de inversión. Produce un bajo rendimiento del combustible a quemar por el Grupo Electrónico por cada Kw de electricidad generado.
- Por defecto: Imposibilidad de conectar todas las cargas previstas. Inestabilidad en la generación con continuas caídas de voltaje. Posible desconexión del generador eléctrico antes sobrecargas.

Por otro lado, sólo en el caso de las localidades donde llegan dos fases (no para MRT), se puede hacer uso de una alimentación delta abierto, que utiliza un condensador solo para el arranque del motor, pero para este caso la potencia se ve disminuida. El delta abierto es utilizado con solamente 2 transformadores de potencia logrando un sistema trifásico y donde la tensión Fase – Neutro no se necesita [13].

Con la conexión en delta abierta es posible transformar el voltaje de un sistema trifásico utilizando sólo dos transformadores. El arreglo delta abierto es idéntico a una conexión delta-delta, excepto que un transformador está ausente (Figura 1.6) [14].

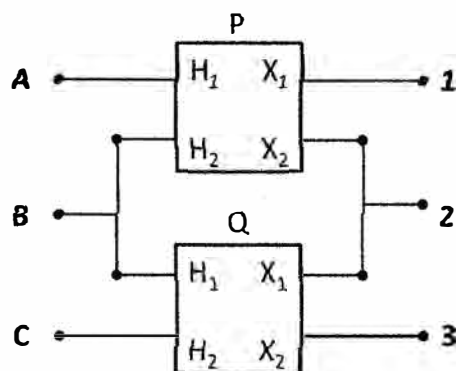


Figura 1.6 Conexión en delta abierto (Fuente: Ref. [14])

Sin embargo, la conexión delta abierta rara vez se utiliza porque la capacidad de

carga del banco de transformadores es de sólo 86.6 % de la capacidad instalada de los transformadores. Por ejemplo si se conectan en delta abierta dos transformadores de 50 kVA, la capacidad instalada del banco de transformadores es obviamente $2 \times 50 = 100$ kVA. Pero, aunque parezca extraño, solo puede suministrar 86.6 kVA antes de que los transformadores comiencen a sobrecalentarse [14].

La conexión en delta abierta se utiliza principalmente en situaciones de emergencia. Por lo tanto, si se conectan tres transformadores en delta-delta y uno de ellos se descompone y hay que eliminarlo, es posible alimentar la carga de forma temporal con los dos transformadores restantes (ibidem).

Para ilustrar la limitación de la capacidad de carga, se puede usar como ejemplo el caso de dos transformadores monofásicos de 150 kVA, 7200V/600V conectados en delta abierta. Aun cuando ña capacidad de cada transformador es de 150 kVA, los dos juntos no pueden soportar una carga de 300 kVA, esto es debido a que la corriente secundaria nominal de cada transformador es $I_s = 150 \text{ kVA} / 600 = 250 \text{ A}$, por lo tanto, la corriente I_s en las líneas 1,2 y 3 no pueden exceder los 250 A. En consecuencia, la carga máxima que los transformadores pueden soportar es

$$S = \sqrt{3}EI \quad (1.1)$$

Reemplazando $E = 600 \text{ V}$ e $I = 250 \text{ A}$, se obtiene 260 kVA, así pues la relación entre la carga máxima posible (260 kVA) y la capacidad nominal de los dos transformadores (300 kVA) es igual a 0.867 u 86.7%

Bajo tal análisis, es que el presente informe propone una solución económica sin la pérdida de potencia, permitiendo el uso de motores trifásicos de igual potencia de los monofásicos, pero obteniendo enormes ventajas en productividad, siendo de esta manera un aporte para la inclusión social promovida por el actual gobierno, lo que justifica su desarrollo.

1.4 Alcance del trabajo

El trabajo que se realiza en el presente informe de suficiencia es el diseño de una convertidor estático de fase (CEF) para que permita la utilización de motores trifásicos a partir de alimentadores monofásicos en zonas rurales, sin pérdida de potencia.

El diseño es realizado por dos metodologías:

- Uso de diagrama vectorial
- Utilización de componentes simétricas.

Los resultados del análisis y diseño son corroborados con las pruebas de laboratorio.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Este capítulo se enfoca en explicar el diseño paso a paso del convertidor estático de fase mediante dos métodos de cálculo. Como se indicó, la solución propuesta para el suministro de cargas trifásicas pequeñas y medianas en el área rural alimentadas exclusivamente por alimentadores monofásicos, es disponer de convertidores estáticos de fase (CEF).

Las ecuaciones analíticas que son desarrolladas en este informe, determinan el tamaño del condensador y relación de vueltas de autotransformador usando principios básicos de análisis de circuitos, según fue desarrollado en la publicación "Determination of Autotransformer – Capacitor Phase Converter Parameters" [15].

Los CEF son dispositivos que utilizan únicamente elementos pasivos en el circuito para suministrar potencia trifásica a una carga, a partir de una fuente de suministro monofásica. El CEF permite el uso de un motor trifásico a un sistema de potencia monofásica. Tres tipos de convertidor de fase son útiles: condensador, autotransformador-condensador y giratorios. La combinación Motor-convertidor son usados en numerosas aplicaciones como secado de grano, irrigación y sistemas de alimentación [18], [21].

Diversas investigaciones han estudiado el rendimiento de los convertidores autotransformador-condensador operando motores. Se desarrollaron estudios para determinar el de tamaño óptimo del condensador y la relación de vueltas del transformador para que produzca tensiones y corrientes equilibradas en el motor [20], [22]. Estos valores generalmente son determinados por métodos empíricos. Estas técnicas son satisfactorias en muchos casos.

El convertidor estático de fase (CEF) del caso de estudio, se integra con dos componentes básicos que son: un autotransformador y capacitores. Tiene como ventajas importantes la de obtener valores muy bajos de pérdidas y la habilidad para ajustar o *balancear las corrientes y maximizar la vida útil del motor.*

Las ecuaciones están en términos fácilmente disponibles y son los parámetros del motor: tensión y corriente de placa y ángulo de factor de potencia. Para ello se han determinado utilizar dos métodos para desarrollar las ecuaciones:

- Diagrama vectorial y
- Componentes simétricas.

Es necesario previamente mostrar un diagrama simplificado de un convertidor estático de fase autotransformador-condensador (Figura 2.1). Las líneas monofásicas son conectadas al primario del transformador y también a las dos bobinas del motor trifásico. Un banco de condensadores está conectado entre el terminal de paso del secundario del transformador y el tercer devanado del motor.

El condensador de arranque es necesario para mejorar el par de arranque del motor. Este capacitor es removido del circuito con un relé de conmutación o temporizador en aproximadamente 50% de la velocidad síncrona del motor.

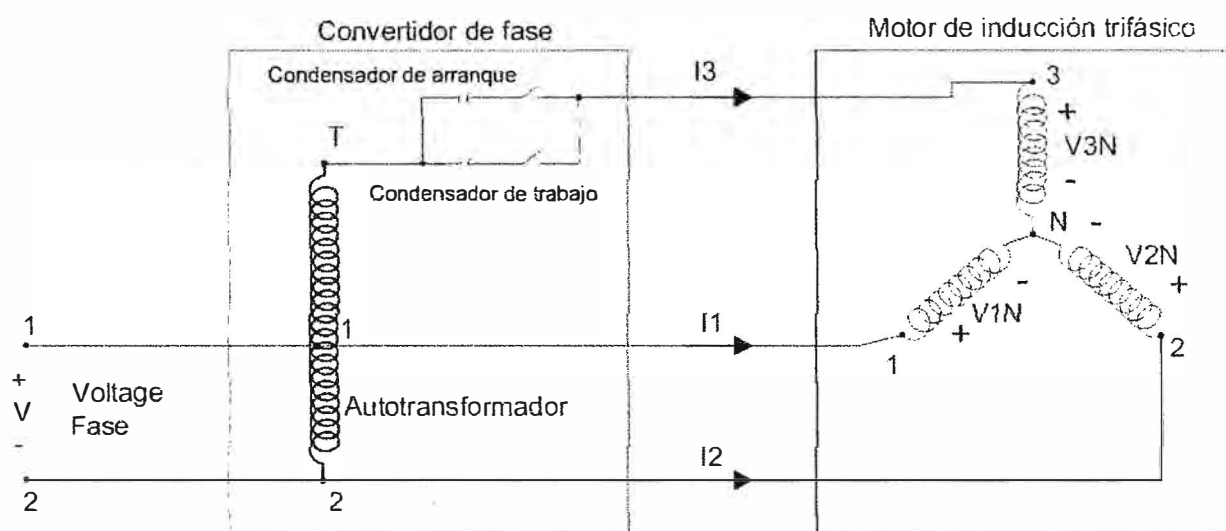


Figura 2.1 Autotransformador-Condensador combinación CEF motor de inducción 3ϕ
(Fuente: Elaboración propia)

2.1 Diseño utilizando el Diagrama Vectorial

En la Figura 2.2 se muestra un diagrama vectorial para un convertidor de fase y un motor trifásico, para el funcionamiento del motor bajo condiciones de tensión y corrientes balanceadas.

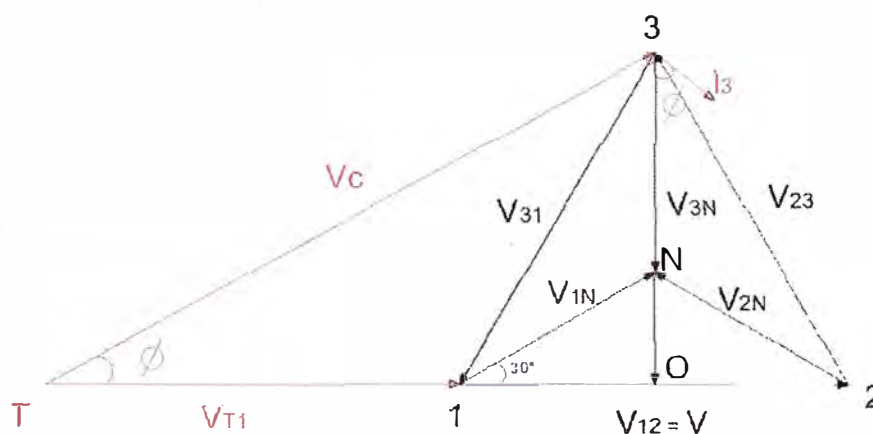


Figura 2.2 Diagrama vectorial convertidor estático de fase (Fuente: Elaboración Propia)

La tensión monofásica V es igual a V_{12} , la tensión nominal del motor. La tensión del

autotransformador V_{T2} está en fase con V y por lo tanto alineado al vector V_{12} . Las corrientes I_1 , I_2 e I_3 en los tres bobinados del motor están desfasados de las tensiones correspondientes por un ángulo ϕ , que es el ángulo fase.

En la Figura 2.2, sólo I_3 es mostrado. La tensión en el terminal 3 del motor se determina por la tensión en el condensador V_c y la tensión de salida del autotransformador V_{T2} .

La tensión del condensador V_c está en un ángulo recto con la corriente I_3 . Cuando el vector V_c se extiende, interseca a la tensión de salida del transformador vector V_{T2} en el punto T. Para operar el motor trifásico bajo condiciones balanceadas, la tensión de salida del transformador debería ser igual a V_{T2} , y la caída de tensión en el condensador debe ser V_c . El tamaño del condensador y la relación de transformación del transformador se derivan de la siguiente manera.

De la Figura 2.2 se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{NO} = V_{1N} \text{ Sen } 30^\circ = \frac{V_{1N}}{2} \quad (2.2)$$

Donde: V_{1N} , V_{2N} y V_{3N} son las Tensiones de fase del motor.

Además de la Figura 2.2 se tiene que:

$$V = 2V_{1N} \cos 30^\circ = 2V_{1N} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} * V_{1N} \quad (2.3)$$

Por lo tanto:

$$V = V_{12} = \sqrt{3} V_{1N} \quad (2.4)$$

Despejando se tiene que:

$$V_{1N} = \frac{\sqrt{3}}{3} V \quad (2.5)$$

Además en un sistema balanceado se cumple:

$$V_{1N} = V_{2N} = V_{3N} \quad (2.6)$$

También que:

$$V_{30} = V_{1N} + \frac{V_{1N}}{2} = \frac{3}{2} V_{1N} = \frac{\sqrt{3}}{2} V \quad (2.7)$$

También que $V_c \perp I_3 \Rightarrow \alpha$ entre 3-T-1 = Φ . Lo que significa que V_c es perpendicular a I_3 , entonces el ángulo entre que hace 3 y 1 con T es igual a Φ . Luego:

$$\alpha V_{30} = V_c \sin \Phi \quad (2.8)$$

Por lo tanto, desde las ecuaciones 2.7 y 2.8, se tiene

$$\frac{\sqrt{3}}{2} V = V_c * \sin \Phi \quad (2.9)$$

$$V_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{\sin \Phi} \quad (2.10)$$

La tensión en el condensador es:

$$V_C = X_C I_C = I_3 \left(\frac{1}{2\pi f C} \right) \quad (2.11)$$

Bajo condiciones balanceadas, la corriente en las 3 devanados del motor son iguales:

$I_1 = I_2 = I_3 = I$. Donde I es la corriente en la placa.

Sustituyendo el valor de V_C desde la ecuación 2.10 y 2.11 se tiene:

$$C = \frac{I_3}{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{\sin \Phi} \right) 2\pi f} = \frac{\left(\frac{I_3}{V} \right) \left(\frac{2 \sin \Phi}{\sqrt{3}} \right) 1}{2\pi f} \quad (2.12)$$

Simplificando se obtiene:

$$C = \frac{I}{V} \sin \Phi \frac{1}{\sqrt{3}\pi f} \quad (2.13)$$

Para el caso peruano, donde la frecuencia es 60 Hz, la fórmula anterior queda de la siguiente manera:

$$C = 3063 \left(\frac{I}{V} \right) \sin \Phi \quad (2.14)$$

Dónde:

V e I son las Tensión y corriente de placa del motor y Φ es el ángulo del factor de potencia.

La tensión de salida del transformador V_{T2} puede ser escrito en términos de la *tensión primaria*:

$$V_{T2} = nV \quad (2.15)$$

Donde n es la relación de transformación. De la Fig. 2.1 V_{T2} puede también ser expresado como:

$$V_{T2} = V_{T0} + \frac{V_{12}}{2} = V_C \cos \Phi + \frac{V_{12}}{2} \quad (2.16)$$

Reemplazando la ecuación 2.10 para V_C y como $V_{12} = V$:

$$V_{T2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{\sin \Phi} \cos \Phi + \frac{V}{2} \quad (2.17)$$

Ya que $V_{T2} = nV$ (de la ecuación 2.15), se obtiene:

$$nV = \frac{\sqrt{3}}{2} V \cot \Phi + \frac{V}{2} \quad (2.18)$$

Despejando n :

$$n = \frac{\sqrt{3}}{2} \cot \Phi + \frac{1}{2} \quad (2.19)$$

Donde:

- Φ ángulo del factor de potencia del motor
- C en μF

- I en amperios
- V Voltios
- n relación de Transformación

2.2 Diseño utilizando componentes simétricas

El método de componentes simétricos permite el análisis de rendimiento del motor bajo condiciones desbalanceadas. Un sistema desbalanceado de tres fasores puede ser resuelto en tres sistemas de fasores balanceados, llamados componentes simétricos de los fasores originales.

Los tres sistemas de fasores balanceados son:

- Componente de secuencia positiva,
- Componente de secuencia negativa, y
- Componente de secuencias cero.

El primero de los 2 sistemas consisten en tres fasores de igual magnitud y desplazados unos de otros por 120° . Componentes de secuencia negativa tienen una dirección opuesta de rotación que los de componentes de secuencia positiva. Los componentes de secuencias cero tienen igual magnitud y están en fase entre sí. [16] [20].

En la Figura 2.2, tomando V_{1N} como referencia, la fase de voltajes V_{1N} , V_{2N} y V_{3N} puede ser expresado por matrices en la ecuación 2.20. Los voltajes de los componentes de secuencia cero, positivo y negativo son V_{N0} , V_{N1} y V_{N2} . En Fase 1:

$$\begin{pmatrix} V_{1N} \\ V_{2N} \\ V_{3N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{1N0} \\ V_{1N1} \\ V_{1N2} \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Donde a es un operador, comúnmente llamado la característica del ángulo del sistema. Para un sistema de tres fases, a es definido como:

$$a = 1 \angle 120^\circ = \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.21)$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.22)$$

Para los voltajes de fase obtenidos de la ecuación 2.20 son:

$$V_{1N} = V_{1N0} + V_{1N1} + V_{1N2} \quad (2.23)$$

$$V_{2N} = V_{1N0} + a^2 V_{1N1} + a V_{1N2} \quad (2.24)$$

$$V_{3N} = V_{1N0} + a V_{1N1} + a^2 V_{1N2} \quad (2.25)$$

Las ecuaciones de voltaje (2.26 y 2.27), para una fase simple V y la tensión de salida del autotransformador nV , son obtenidos aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff's para la fase de convertidor del circuito del motor de la Figura 2.1:

$$V = V_{1N} - V_{2N} \quad (2.26)$$

$$nV = V_C + V_{3N} - V_{2N} \quad (2.27)$$

Sustituyendo los valores de V_{1N} , V_{2N} y V_{3N} de las ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25 en

2.26 y 2.27, y despejando n , la relación de vueltas del transformador es:

$$n = \frac{V_1 N_1 (a - a^2) + V_1 N_2 (a^2 - a) + V_c}{V_1 N_1 (1 - a^2) + V_1 N_2 (1 - a)} \quad (2.28)$$

Para condiciones balanceadas del motor, los voltajes de las secuencias cero y negativo son cero. Por lo tanto: $V_{1N} = V_{1N1}$

Reemplazando en la ecuación 2.23 y tomando V como voltaje de referencia y realizando una mayor simplificación de la ecuación 2.27, resulta:

$$n = \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \frac{V_c}{V} (\cos \phi - j \text{sen} \phi) \quad (2.29)$$

En la ecuación 2.29 n es un número real, por lo tanto igualando la parte imaginaria a cero.

$$0 = j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{V_c}{V} j \text{sen} \phi \quad (2.30)$$

Por lo tanto:

$$V_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{V}{\text{sen} \phi} \quad (2.31)$$

y la parte real nos queda de la siguiente manera:

$$n = \frac{1}{2} + \frac{V_c}{V} \cos \phi \quad (2.32)$$

Reemplazando V_c en la ecuación 2.32 por $I X_c$ y resolviendo para la capacitancia C en microfaradios y frecuencia de 60 Hz:

$$c = 3063 \left(\frac{I}{V} \right) \text{sen} \phi \quad (2.33)$$

Donde I es la corriente de plena carga del motor (amperios), V es la tensión nominal (voltios), y ϕ es el ángulo de factor de potencia (grados). Sustituyendo V_c de 2.32 y 2.33.

$$n = \frac{1}{2} + \frac{V_c}{V} \cot \phi \quad (2.34)$$

Las ecuaciones 2.33 y 2.34 son idénticas a las ecuaciones 2.14 y 2.19 desarrollado con el método vectorial.

La relación de transformación del autotransformador con respecto al voltaje de entrada es una función del factor de potencia únicamente y es independientemente de la corriente requerida, La corriente requerida I permite definir únicamente el calibre del conductor del devanado del autotransformador.

Los capacitores necesarios pueden calcularse utilizando la ecuación 2.33 donde se obtiene el valor de la capacitancia requerida en microfaradios. El voltaje de operación de los capacitores puede calcularse con los datos anteriores para seleccionar adecuadamente los capacitores apropiados.

En la Tabla 2.1 se muestran los valores del ángulo Φ y de la relación de transformación del autotransformador "n" para diferentes valores de factor de potencia. La Figura 2.3 ayuda a visualizar esta relación.

Tabla 2.1 Φ y n para distintos Factores de potencia (Fuente: Elab. propia)

F.P.	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
Φ	18.19	25.84	31.79	36.87	41.41	45.57	49.46	53.13	56.63	60.00
n	3.135	2.288	1.897	1.655	1.482	1.349	1.241	1.150	1.070	1.000

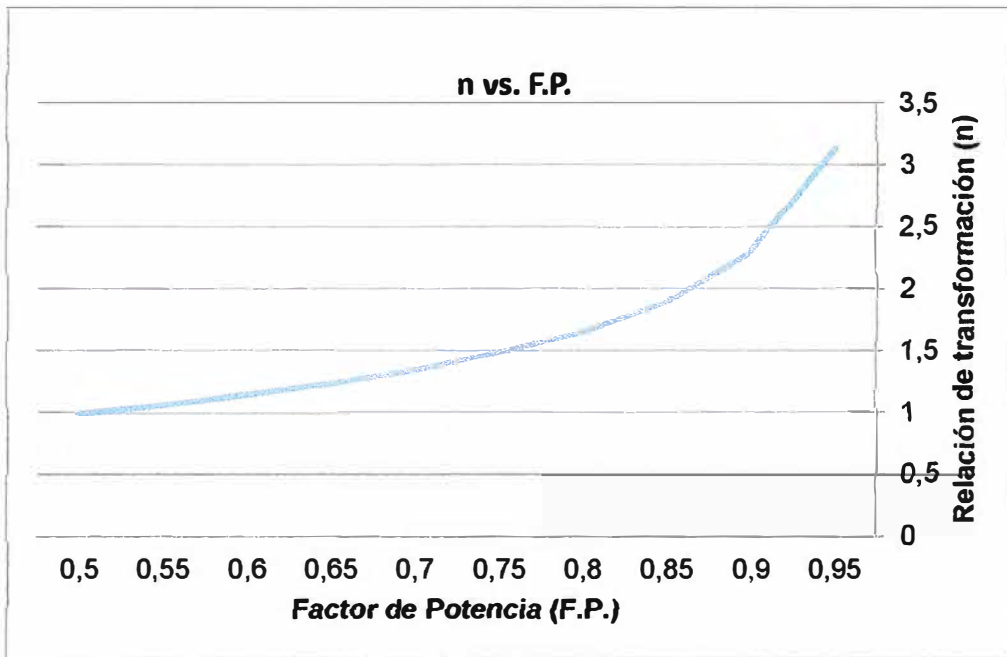


Figura 2.3 Relación n vs. Factor de Potencia (Fuente: Elab. propia)

Una de las limitaciones del convertidor estático de fase (CEF) es que no puede alimentar corrientes balanceadas a una carga que tiene un factor de potencia unitario como una carga puramente resistiva.

En la práctica cualquier factor de potencia arriba del 95% requiere una relación de transformación tan alta que resulta impráctica. Normalmente, los motores de inducción operan con un factor de potencia menor del 95%. Con valores menores del 70% el ángulo del factor de potencia se incrementa y requiere un menor valor de "n". Siguiendo esta tendencia, con un factor de potencia de 50%, el ángulo es de 60° y el valor de "n" es igual a 1.0 pero esta condición no se presenta normalmente, caso por el cual no se requiere el autotransformador.

Como durante el arranque un motor requiere de 4 a 6 veces el valor de su corriente nominal, debe conectarse un capacitor adicional al circuito, previsto de un medio de desconexión automático o manual para retirarlo de servicio una vez que el motor toma sus revoluciones a plena carga. Este medio de desconexión bien puede ser un relevador de control (temporizador) o un interruptor.

Para el cálculo del capacitor de arranque puede usarse la ecuación siguiente para 60 hz:

$$C = 3066 \left(\frac{5I}{V} \right) \text{sen } \emptyset \quad (2.25)$$

En este caso se asume el I de arranque igual a 5 veces la corriente nominal (I = Corriente nominal, V = voltaje de la fuente monofásica).

Ya que el par de arranque del motor puede controlarse por el valor de la corriente, variando los capacitores de arranque se afecta directamente al par de arranque. Normalmente un convertidor estático de fase (CEF) tiene una capacidad de arranque de cerca de 5 veces la corriente nominal para dar a la carga del motor características de arranque razonablemente normales.

CAPÍTULO III PRUEBAS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se describe la prueba de laboratorio y los resultados obtenidos, haciendo una comparación con los resultados teóricos que se obtienen de las fórmulas halladas.

3.1 Verificación de ecuaciones

Las ecuaciones (2.14) y (2.19) fueron verificados experimentalmente por un motor de 0.6-hp trifásico operando desde una alimentación monofásica a través de un convertidor de fase tipo condensador autotransformador.

El voltaje de salida del autotransformador se varió por la alimentación de sus bobinas primarios a través de un autotransformador. Los condensadores fueron conectados en paralelo para obtener el valor de la capacitancia lo más cercano posible a la que se dedujo con la ecuación analítica. El motor de prueba se cargo con un ventilador.

La prueba se llevó a cabo solo para la máxima potencia del motor. Los voltajes, corrientes y factor de potencia del motor en marcha y a plena carga se midieron con conmutación y adaptación de medida.

Los datos fueron obtenidos con el motor que opera con potencia trifásica y con el convertidor de fase. Esto proporcionó una comparación de voltajes, corrientes y factores de potencia del motor operando ambos con la misma fuente de poder.

Tabla 3.1 Valor de tensión, corriente y factor de potencia de la prueba de motores

Potencia	I	V	Factor de Potencia	φ
HP	Amp.	Volt		
0.6	2.4	220	0.82	34°55'

El valor previsto del tamaño del condensador para un funcionamiento equilibrado de un motor de 0.6-hp puede ser calculado de los datos de la Tabla 3.1 y la ecuación (2.14) de la siguiente manera:

$$C = 3066 * \left(\frac{2.4}{220} \right) * \text{sen} (34^\circ 55') \quad (3.1)$$

Obteniéndose $C = 19.14 \mu\text{F}$

El voltaje secundario del autotransformador requerido para un funcionamiento balanceado es obtenido de la ecuación (2.18):

$$nV = \frac{\sqrt{3}}{2} (220) \cdot \cot(34^\circ 55') + \frac{220}{2} \quad (3.2)$$

Obteniéndose $nV=382.96$ voltios

La ecuación (2.19) da la relación de vueltas del transformador:

$$n = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cot(34^\circ 55') \quad (3.3)$$

Obteniéndose la relación de transformación $n = 1.74$.

Para el cálculo de los parámetros de diseño un programa en C#, según se muestra en la Figura 3.1. El aplicativo permite simplificar los cálculos. En el Anexo B se encuentra el código del programa utilizado.

Figura 3.1 Panel del programa (Fuente: Elab. propia)

Los valores previstos y experimentalmente del tamaño del condensador, el voltaje del autotransformador y la relación de vueltas están resumidos en la Tabla 3.2. Los valores de capacitancia utilizados en la verificación experimental no pueden ser igual a los valores predichos con condensadores disponibles, pero los encontrados son lo suficientemente cercanos.

Tabla 3.2 Valores previstos y experimentales del convertidor de fase, Rendimiento del autotransformador - condensador

HP	Parámetros	Valores previstos para operación balanceada	Valores experimentales para operación balanceada
0.6	C (Condensador)	19.14 μ F	20
	nV (Tensión de salida del Autotransformador)	382.96 V	383 V
	n (Relación de transformación)	1.74	1.74

El rendimiento de los motores operando con una alimentación trifásica y la potencia monofásica a través del convertidor de fase es mostrado en la Tabla 3.3. No hubo diferencias significativas entre voltajes, corrientes, potencia de entrada y factor de potencia.

Tabla 3.3 Voltajes, corrientes, potencia de entrada y factor de potencia operando el motor trifásico en sistema trifásico y sistema monofásico a través del convertidor de fase

Motor	0.6 HP	
	Trifásico	Monofásico a través del Convertidor
I_1 (A)	2.4	2.45
I_2 (A)	2.4	2.5
I_3 (A)	2.4	2.4
V_{12} (V)	220	220
V_{23} (V)	220	220
V_{13} (V)	220	220
V_{1N} (V)	127	126
V_{2N} (V)	127	126
V_{3N} (V)	127	126
Potencia (kW)	0.447	0.470
Factor de potencia	0.82	0.83

El autotransformador se ha construido con tres derivaciones para distintos ángulos de factor de potencia que bien pueden ser para: 0.80, 0.82 y 0.85. Así como para que los capacitores que se usen para formar el banco de arranque y marcha, sean de capacidades relativamente pequeñas (10 microfaradios) que se consiguen fácilmente en el mercado y permitan ajustar en el sitio de instalación el valor total del banco de capacitores de marcha, ajustándolo a las condiciones de operación del motor y para las características particulares del mismo, afín de que tanto el voltaje de suministro en las tres fases, como el balanceo de las corrientes sea adecuado; operación sumamente simple que pueda ser realizado fácilmente. En el Anexo A se muestra los mismos cálculos pero para una serie de motores marca WEG.

3.2 Materiales utilizados para la prueba

Los siguientes (Tabla 3.4) son los materiales utilizados para la prueba, acorde con el diagrama unifilar de control y fuerza (Figura 3.2 y Figura 3.3).

Tabla 3.4 Materiales utilizados (Fuente: Elab. Propia)

Cantidad	Descripción	Precio (S/.)
1	Caja de paso de Fe ^o Ga ^o 300x400x150 mm	20
1	Condensador 20uF - 220 VAC	10
1	Condensador 70uF - 480 VAC	28
2	Contactores de 12 A-220 VAC-60 Hz	50

1	Temporizador mecánico al trabajo 0-30 seg	30
1	Autotransformador 550 Watts 0-220/264-383—417 VAC	100
1	Pulsador Start simple color verde	10
1	Pulsador Stop simple color rojo	10
1	Relé de 2.5 A	50
2	Dos lámparas pilotos 220 VAC, rojo y verde	10
Total		318

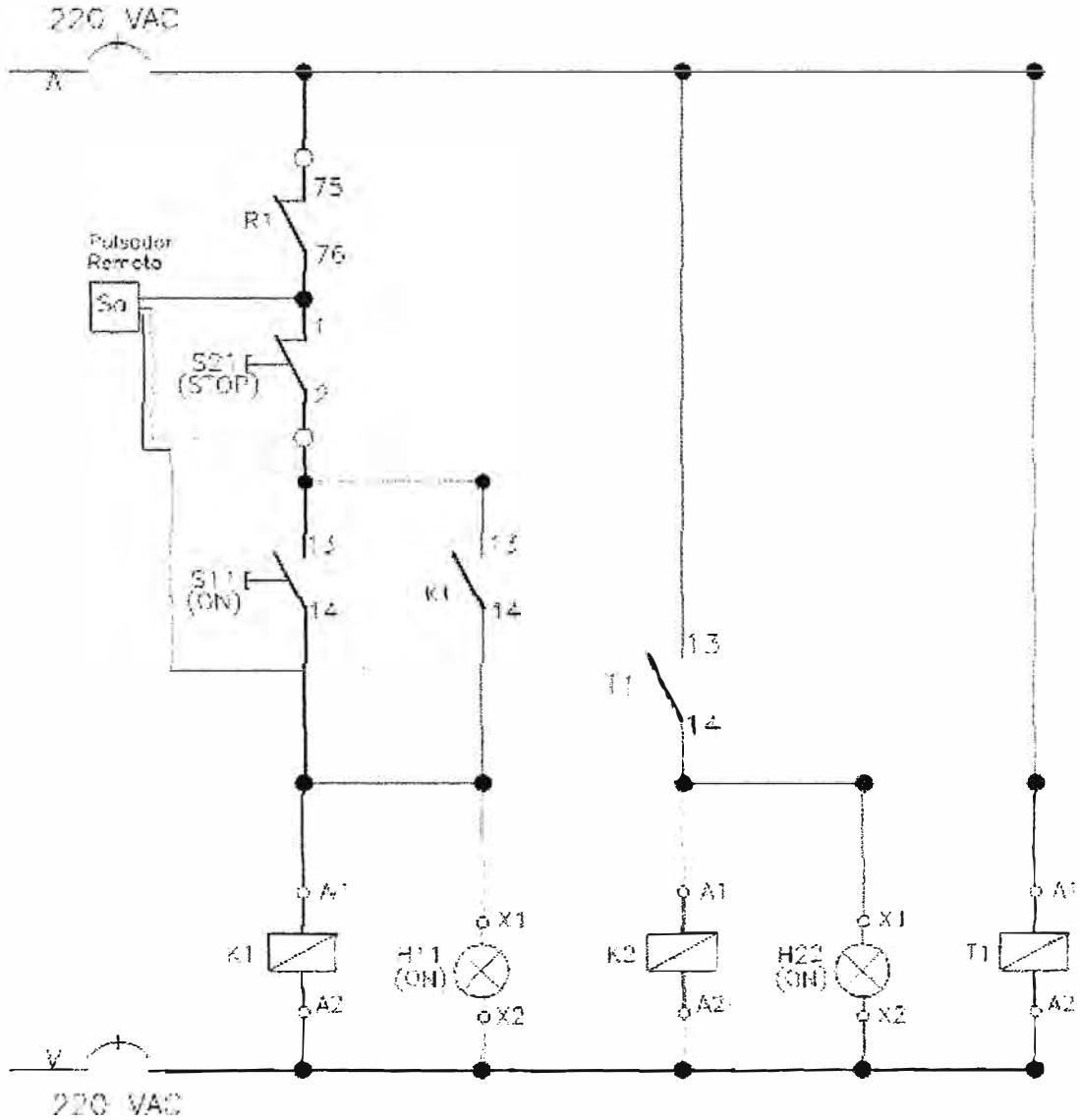


Figura 3.2 Diagrama de control (Fuente: Elab. propia)

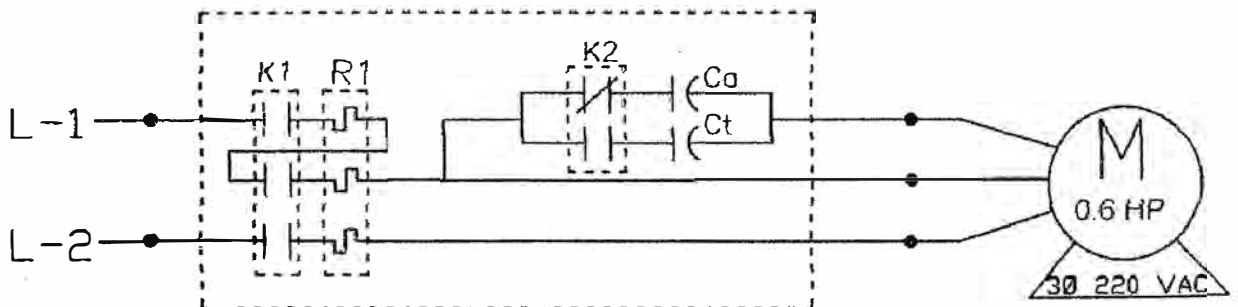


Figura 3.3 Diagrama de fuerza (Fuente: Elab. propia)

En donde:

K1	Contactador electromagnético para arranque de motor
K2	Contactador electromagnético para condensadores
T1	Temporizador mecánico al trabajo de 0-30 segundos
R1	Relé térmico para motor de 2.5 A
Ca	Condensador de arranque de motor
Ct	<i>Condensador de trabajo normal</i>
S11	Pulsador arranque NO color verde
S21	Pulsador parada NC color rojo
H11	Piloto indica que el motor arrancó
H22	Piloto indica que el motor está trabajando
M	Motor trifásico de 0.6 HP 220 VAC. 60 Hz

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Se verifica que las ecuaciones desarrolladas puede ser aplicado para determinar analíticamente el tamaño de la capacitancia y la calibración del autotransformador para un funcionamiento equilibrado de un motor trifásico con un convertidor de fase autotransformador-condensador.
2. Al obtener un diseño adecuado del convertidor estático de fase , económico y con un funcionamiento eficiente, se puede llegar a lograr una verdadera electrificación rural, que en nuestro país será de gran utilidad para la alimentación de servicios en sistemas de distribución de comunidades de baja densidad de carga y con alta dispersión, ya que en varias regiones de la república el número de pequeñas comunidades que queda pendiente de electrificar e integrar a los beneficios es considerable y en la situación actual sería como una forma de inclusión social.

Recomendaciones

1. Basado en que el precio por la construcción de la solución es económica respecto a los beneficios que se obtienen, se recomienda su fabricación a mayor escala, lo cual, a su vez, abarataría los costos y el precio final al beneficiario.

ANEXOS

ANEXO A
CÁLCULO DEL AUTOTRANSFORMADOR Y DE LOS CONDENSADORES PARA
MOTORES MARCA WEG DE DISTINTOS HP

Tabla A.1 Cálculo del autotransformador y de los condensadores para motores marca WEG de distintos HP-220 VAC

HP	In	RPM	Porcentaje de la potencia nominal						Autotransformador			Condensadores	
			Rendimiento			Factor de potencia			n	Tensión De Salida	Potencia watts	Trabajo Uf	Arranque Uf
			50	75	100	50	75	100					
0.16	0.83	1700	48.0	56.0	60.0	0.44	0.54	0.63	1.20	265	132	8.98	44.92
0.25	1.23	1700	50.0	58.0	61.0	0.43	0.54	0.63	1.20	265	196	13.31	66.56
0.33	1.54	1680	54.0	61.0	63.0	0.46	0.58	0.68	1.30	287	265	15.74	78.68
0.5	1.90	1730	60.0	67.0	71.0	0.5	0.63	0.72	1.40	308	346	18.38	91.88
0.75	2.64	1730	66.0	72.0	73.0	0.52	0.65	0.75	1.48	326	501	24.34	121.68
1	3.18	1730	76.0	78.5	78.5	0.6	0.71	0.79	1.62	355	636	27.17	135.86
1.5	4.60	1730	77.5	79.5	79.5	0.58	0.71	0.79	1.62	355	919	39.30	196.52
2	6.08	1730	80.5	81.5	82.0	0.59	0.71	0.79	1.62	355	1215	51.95	259.75
3	8.68	1720	82.0	83.0	83.1	0.61	0.73	0.8	1.65	364	1757	72.58	362.90
4	11.58	1750	83.5	85.0	84.5	0.62	0.74	0.8	1.65	364	2344	96.83	484.15
5	14.02	1745	84.5	86.0	85.5	0.63	0.75	0.81	1.70	373	2873	114.58	572.91
6	16.62	1755	84.0	86.0	86.5	0.63	0.76	0.82	1.74	383	3448	132.57	662.86
7.5	20.20	1760	84.0	86.5	87.0	0.63	0.75	0.82	1.74	383	4191	161.13	805.64
10	27.20	1755	86.5	88.0	87.5	0.67	0.78	0.83	1.79	394	5712	211.43	1057.15
0.6	2.4	1800						0.82	1.74	383	498	19.14	95.72

ANEXO B
PROGRAMA EN LENGUAJE C# PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DEL
CONVERTIDOR ESTÁTICO DE FASE

Son tres archivos con código en lenguaje C# que se utilizan para el cálculo de los parámetros requeridos en el convertidor estático de fase: program.cs, Form1.cs y datosentradabean.cs.

Nota: Se mantiene el formato original del compilador a fin de hacer más didáctico la comprensión de los programas desarrollados.

B.1 Código de program.cs

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Windows.Forms;

namespace aplicacion
{
    static class Program
    {
        /// <summary>
        /// Punto de entrada principal para la aplicación.
        /// </summary>
        [STAThread]
        static void Main()
        {
            Application.EnableVisualStyles();
            Application.SetCompatibleTextRenderingDefault(false);
            Application.Run(new Form1());
        }
    }
}
```

B.2 archivo Form1.cs

El archivo Form1.cs que logra el diseño de la interfaz de entrada de datos.

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using System.Drawing.Printing;

namespace aplicacion
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        private PrintDocument printDocument1 = new PrintDocument();
        private PrintPreviewDialog printPreviewDialog1 = new PrintPreviewDialog();

        public Form1()
        {

```

```

        printDocument1.PrintPage += new
PrintPageEventHandler(printDocument1_PrintPage);
        initializeComponent();
    }

    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        datosentradabean bean = new datosentradabean();

        try
        {
            String coseno = this.angulo.Text;
            String amperios = this.amperios.Text;
            String voltios = this.voltios.Text;

            if (String.IsNullOrEmpty(coseno) || String.IsNullOrEmpty(amperios) ||
String.IsNullOrEmpty(voltios))
            {
                MessageBox.Show("Faltan datos y numericos");
            }
            else
            {
                bean.amperios = Convert.ToDouble(amperios, new
System.Globalization.CultureInfo("en-US"));
                bean.voltios = Convert.ToDouble(voltios, new
System.Globalization.CultureInfo("en-US"));
                double cose = Convert.ToDouble(coseno, new
System.Globalization.CultureInfo("en-US"));
                if (cose < 1)
                {
                    bean.angulo = Math.Acos(cose);
                    double valorm = Math.Round(bean.calcularvalorN(), 2);
                    double valorc = Math.Round(bean.calcularvalorC(), 2);
                    double valor5c = Math.Round(bean.calcularvalorC() * 5, 2);
                    double aux = Math.Round(valorm * bean.voltios, 0);
                    double potencia = Math.Round(bean.calcularpotencia(1.15), 0);

                    this.valorm.Text = Convert.ToString(valorm);
                    this.valorc.Text = Convert.ToString(valorc);
                    this.valor5c.Text = Convert.ToString(valor5c);
                    this.valort.Text = Convert.ToString(aux);
                    this.txtautotrans.Text = Convert.ToString(potencia);
                }
                else
                {
                    MessageBox.Show("Factor Potencia tiene que ser menor que 1");
                }
            }
        }
        catch (Exception E)
        {

```

```

        MessageBox.Show("Datos tiene que ser numéricos");
        Limpiar(this);
    }

}

protected void button1_Click_1(object sender, EventArgs e)
{
    CaptureScreen();
    printPreviewDialog1.Document = printDocument1;
    printPreviewDialog1.ShowDialog();
}

Bitmap memoryImage;

private void CaptureScreen()
{
    Graphics myGraphics = this.CreateGraphics();
    Size s = this.Size;
    memoryImage = new Bitmap(s.Width, s.Height, myGraphics);
    Graphics memoryGraphics = Graphics.FromImage(memoryImage);
    memoryGraphics.CopyFromScreen(this.Location.X, this.Location.Y, 0, 0, s);
}

private void printDocument1_PrintPage(System.Object
sender, System.Drawing.Printing.PrintPageEventArgs e)
{
    e.Graphics.DrawImage(memoryImage, 0, 0);
}

public static void Limpiar(Form ofrm)
{
    // Checar todos los textbox del formulario
    foreach (Control oControls in ofrm.Controls)
    {
        if (oControls is TextBox)
        {
            oControls.Text = ""; // Eliminar el texto del TextBox
        }
    }
}
}
}

```

B.3 Código de archivo datosentradabean.cs

El archivo datosentradabean.cs es en donde se logra obtener y realizar todas las formulas para el programa.

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;

```

```
using System.Text;

namespace aplicacion
{
    class datosentradabean
    {
        public double voltios;
        public double amperios;
        public double angulo;

        public datosentradabean()
        {
            voltios = 0;
            amperios = 0;
            angulo = 0;
        }

        public double calculovalorN()
        {
            double resultado = 0;
            double aux = Math.Tan(this.angulo);
            double aux2 = 1/aux;
            double variable = Math.Sqrt(3)/(2);
            variable = variable * aux2;
            double razon = 0.5;
            resultado = variable + razon;

            return resultado;
        }

        public double calcularvalorC()
        {
            double resultado = 0;

            double aux;
            aux = 3066 * (this.amperios / this.voltios);

            resultado = aux * Math.Sin(this.angulo);

            return resultado;
        }

        public double calcularpotencia(double valor)
        {
            double resultado = this.voltios * this.amperios * Math.Cos(this.angulo) * valor;

            return resultado;
        }
    }
}
```

- [15] IEEE, Transactions on Industry Applications de January-February 1973 "Determination of Autotransformer – Capacitor Phase Converter Parameters". <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=4158351>
- [16] G. O. Calabrese, Symmetrical Components Applied to Electric Networks. New York; Ronald, 1959.
- [17] K. A. Harkness and J. W. Hooper, "An evaluation of the phase converter three-phase motor" Eng. Experiment Station, Kansas State College, Bull 38,no. 11, July 1954.
- [18] G.H. Huber, "Application and effects of 15 hp and larger three-phase motors on single-phase lines", presented at the IEEE Rural Electrification Conf., Dallas, Tex, May 12-13, 1966. Paper 34-CP-66-226.
- [19] C.W. James, "Overcurrent protection of motors served by phase converters", presented at the IEEE Rural electrification Conf., Cedar Rapids, Iowa, May 1-2, 1967. Paper 34-CP-67-262.
- [20] W. V. Lyon, Application of the Methods of Symmetrical Components. New York: McGraw-Hill, 1937.
- [21] L.H. Soderholm and L.F. Charity, "Progress on development of IEEE-ASAE rural motor starting application single guide", IEEE trans. Ind. Gen. Apply vol. VQA-6, pp. 69-70, Jan. /Feb. 1970.