

UNIVERSIDAD SAN PEDRO  
VICERRECTORADO ACADÉMICO  
ESCUELA DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA



## **Efecto de la conexión y carga en la eficiencia y regulación del transformador trifásico**

Tesis para obtener el Grado Académico de Maestro en Ingeniería  
Mecánica Eléctrica con mención en Redes de Distribución Eléctrica

**Autor**

**Diestra Sánchez, Segundo Nicolas**

Asesor

Robles Villanueva, Oscar

Chimbote – Perú

2018

**Palabras clave:** Eficiencia, Regulación, Transformador trifásico.

---

|      |                         |
|------|-------------------------|
| Tema | Transformador trifásico |
|------|-------------------------|

---

|              |                       |
|--------------|-----------------------|
| Especialidad | Redes de distribución |
|--------------|-----------------------|

---

**Keywords:** Efficiency, Regulation, Three-phase transformer

---

|       |                         |
|-------|-------------------------|
| Topic | Three-phase transformer |
|-------|-------------------------|

---

|       |                       |
|-------|-----------------------|
| Topic | Distribution networks |
|-------|-----------------------|

---

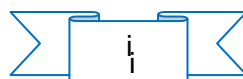
**Líneas de Investigación:**

**Área:** Ingeniería y Tecnología

**Sub área:** Ingeniería Eléctrica e informática

**Disciplina:** Ingeniería Eléctrica y Electrónica

**Línea de Investigación:** Sector Energía



## **TITULO**

Efecto de la conexión y carga en la eficiencia y regulación del transformador trifásico.

## **TITLE**

Effect of the connection and load on the efficiency and regulation of the three-phase transformer.



## RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito determinar el efecto de la conexión y la carga en la eficiencia y regulación del transformador trifásico.

Para llevar a cabo el estudio se trabajó con una muestra constituida por un transformador trifásico de 1,2 kVA y se optó por el diseño experimental. La aplicación del inventario de pruebas de ingeniería, mediante el instrumento *Ficha de Registro y cálculo de datos*, para la eficiencia y regulación después de la intervención experimental de conexión y tipo de carga, arrojó resultados diferentes. Pues, la eficiencia del transformador con carga resistiva en conexión delta logra un adelanto de 0.05% en comparación con la carga resistiva en delta; y para la carga inductiva en conexión delta obtiene un adelanto significativo de 25.87% en comparación con los resultados de la eficiencia con carga inductiva en conexión estrella. Asimismo, en el diagnóstico con respecto a la variable regulación, la conexión en delta para cargas resistivas e inductivas logra un adelanto significativo de 6.05%, en comparación con los resultados de la conexión estrella.

El tipo de conexión trifásica de cargas inductivas, mediante la aplicación de Pruebas de ingeniería basado en vacío, cortocircuito y cargas balanceadas, incrementó significativamente la eficiencia ( $p=0,000037$ , inferior al nivel de significancia 0.05) y regulación (conexión delta posee 5%, respecto a la estrella con 1.90%) en el transformador trifásico; en consecuencia, nuestra hipótesis de investigación para cargas inductivas fue confirmada.



## ABSTRACT

The purpose of the present investigation was to determine the effect of the connection and the load on the efficiency and regulation of the three-phase transformer.

To carry out the study we worked with a sample constituted by a three-phase transformer of 1.2 kVA and we opted for the experimental design. The application of the inventory of engineering tests, through the instrument Registration File and calculation of data, for the efficiency and regulation after the experimental intervention of connection and type of load, gave different results. Well, the efficiency of the transformer with resistive load in delta connection achieves an advance of 0.05% in comparison with the resistive load in delta; and for the inductive load in delta connection it obtains a significant advance of 25.87% in comparison with the results of the efficiency with inductive load in star connection. Likewise, in the diagnosis with respect to the regulation variable, the delta connection for resistive and inductive loads achieves a significant advance of 6.05%, in comparison with the results of the star connection.

The type of three-phase connection of inductive loads, through the application of engineering tests based on vacuum, short circuit and balanced loads, significantly increased the efficiency ( $p = 0.000037$ , lower than the level of significance 0.05) and regulation (delta connection has 5 %, with respect to the star with 1.90%) in the three- phase transformer; consequently, our research hypothesis for inductive loads was confirmed.

## ÍNDICE GENERAL

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| PALABRAS CLAVE .....                | i   |
| TITULO.....                         | ii  |
| RESUMEN.....                        | iii |
| ABSTRACT.....                       | iv  |
| INTRODUCCIÓN.....                   | 1   |
| METODOLOGÍA.....                    | 24  |
| RESULTADOS.....                     | 27  |
| ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....           | 47  |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 50  |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....     | 53  |
| ANEXOS Y APÉNDICES.....             | 56  |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   | Pag. |
|---|------|
| <b>Tabla 1.</b> Operacionalización de las variables.....  | 22   |
| <b>Tabla 2.</b> Variables intervinientes.....   | 25   |
| <b>Tabla 3.</b> Cargas y Conexiones para el transformador trifásico.....  | 27   |
| <b>Tabla 4.</b> Proporción de Cargas Resistivas en Ohmios.....  | 28   |
| <b>Tabla 5.</b> Proporción de Cargas Inductivas en Henrys.....  | 28   |
| <b>Tabla 6.</b> Pérdidas en el transformador trifásico mediante prueba de vacío y cortocircuito .....   | 28   |
| <b>Tabla 7.</b> Eficiencia en cargas resistivas según su conexión.....  | 29   |
| <b>Tabla 8.</b> Eficiencia en cargas inductivas según su conexión.....  | 33   |
| <b>Tabla 9.</b> Regulación en cargas resistivas según su conexión.....  | 37   |
| <b>Tabla 10.</b> Regulación en cargas inductivas según su conexión:.....  | 40   |
| <b>Tabla 11.</b> Resumen de la Regulación del transformador trifásico en cargas Resistivas e Inductivas .....   | 43   |
| <b>Tabla 12.</b> Prueba de hipótesis de las medias obtenidas por la Conexión de carga Resistiva transformador trifásico sobre la variable Eficiencia..... | 45   |
| <b>Tabla 13.</b> Prueba de hipótesis de las medias obtenidas por la Conexión de carga Inductiva transformador trifásico sobre la variable Eficiencia..... | 46   |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  | Pag. |
|--|------|
| <b>Figura 1.</b> Circuito equivalente de un transformador monofásico.....                              | 12   |
| <b>Figura 2.</b> Conexión delta-delta.....   | 14   |
| <b>Figura 3.</b> Conexión delta- estrella.....   | 15   |
| <b>Figura 4.</b> Conexión estrella-delta.....  | 15   |
| <b>Figura 5.</b> Conexión estrella-estrella.....   | 16   |
| <b>Figura 6.</b> Resistor en el dominio de tiempo y el dominio de frecuencia.....                      | 17   |
| <b>Figura 7.</b> Inductor en el dominio de tiempo y el dominio de frecuencia.....                      | 18   |
| <b>Figura 8.</b> Capacitor en el dominio de tiempo y el dominio de frecuencia.....                     | 18   |
| <b>Figura 9.</b> Cargas conectadas en estrella.....  | 19   |
| <b>Figura 10.</b> Cargas conectadas en delta.....  | 20   |
| <b>Figura 11.</b> Localización de la Universidad Nacional del Santa.....                               | 25   |
| <b>Figura 12.</b> Eficiencia del transformador trifásico con carga resistiva en<br>estrella.....       | 30   |
| <b>Figura 13.</b> Eficiencia del transformador trifásico con carga resistiva en delta. ..              | 31   |
| <b>Figura 14.</b> Eficiencia del transformador trifásico vs conexión con carga<br>resistiva.....       | 32   |
| <b>Figura 15.</b> Eficiencia del transformador trifásico con carga inductiva en<br>estrella.....       | 34   |
| <b>Figura 16.</b> Eficiencia del transformador trifásico con carga inductiva en delta. ..              | 35   |
| <b>Figura 17.</b> Eficiencia del transformador trifásico vs conexión con carga<br>inductiva.. ..       | 36   |
| <b>Figura 18.</b> Voltaje secundario vs. Corriente secundario para carga resistiva en<br>estrella..... | 38   |



|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 19.</b> Voltaje secundario vs. Corriente secundario para carga resistiva en delta.....     | 39 |
| <b>Figura 20.</b> Voltaje secundario vs. Corriente secundario para carga inductiva en estrella. .... | 41 |
| <b>Figura 21.</b> Voltaje secundario vs. Corriente secundario para carga inductiva en delta. ....    | 42 |
| <b>Figura 22.</b> Regulación del transformador trifásico para cargas resistivas e inductivas. ....   | 44 |
| <b>Figura 23.</b> Prueba T-Student para la eficiencia con carga resistiva. ....                      | 45 |
| <b>Figura 24.</b> Prueba T-Student para la eficiencia con carga inductiva. ....                      | 46 |

# INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es el resultado de una investigación que pretende experimentar y aplicar ensayos en transformadores trifásicos. Por ello afianzamos lo expuesto con antecedentes relacionados a la conexión y carga de estos, así como, a su eficiencia y regulación.

Según Gómez, Martínez, Rosendo, Romero y Riquelme (2003, p. 26), “un transformador trifásico se obtiene interconectando eléctricamente tres bancos monofásicos o bien devanando tres pares de arrollamientos sobre otras tantas columnas de un único ciclo magnético, que puede adoptar diferentes topologías”, que para nuestro estudio interesa comprender al transformador como una unidad de columnas sobre un mismo flujo magnético como son los transformadores comerciales que se utilizan en las subestaciones de baja tensión.

Como también, Córcoles, Pedra y Salichs (1996, p. 111), en el concepto de transformador trifásico señalan que “conectando tres transformadores monofásicos se puede conseguir uno trifásico (que en este caso se llama banco trifásico). El transformador trifásico puede tener otras formas constructivas derivadas del banco trifásico: con núcleo de tres o cinco columnas. El más utilizado es el de tres columna”, resaltando que el tipo transformador trifásico de mayor uso es el de tres columnas.

Asimismo, Córcoles *et al.* (1996, p. 111), añaden que un transformador trifásico en “régimen equilibrado tiene su primario conectado a un sistema simétrico de tensiones y su secundario en vacío o alimentando una carga simétrica (las tres impedancias son iguales). Tanto el primario como el secundario pueden estar conectados en triángulo o en estrella”.

Además, en el plan estratégico de Hidrandina 2013-2017, se menciona que “no obstante la existencia de regulaciones adecuadas para promover la eficiencia en el uso de la energía, no se ha logrado aún un avance suficientemente satisfactorio” (p. 35).

Por una parte, es necesario destacar los estudios realizados sobre transformadores trifásicos en diversos contextos. Así, en México, Jiménez, Pérez y Santos (2009), realizaron su investigación titulada “Metodología para pruebas de campo a transformadores de potencia mayores a 1 MVA”, llegando a las siguientes conclusiones: “los problemas en Transformadores de Potencia se originan debido a fallas en el sistema o al exceso de carga en los mismos, por lo que se deben realizar diversas pruebas experimentales para conocer el estado en que se encuentran los materiales para así extender la vida útil de los Transformadores de Potencia; conociendo el funcionamiento y componentes del Transformador, es de gran importancia realizar una metodología de pruebas para Transformadores de Potencia para evitar pérdidas, fallas en el equipo y en sistemas eléctricos, pues así aseguramos un correcto funcionamiento y una larga vida útil para los mismos, ya que de nada sirve colocar una gran estructura y buenos cálculos cuando la parte operativa del Transformador no se encuentra en buen estado; en esta tesis se presento una metodología para las pruebas de campo a los Transformadores de Potencia para que se determine la calidad en que se encuentran los materiales que componen al equipo, aplicando las normas adecuadas, para así asegurar una larga vida útil para el equipo; se desarrollo una técnica sistematizada estableciendo las pruebas que se realizan en campo para observar el comportamiento de la maquina y métodos de prueba para asegurar el correcto funcionamiento y extender la vida útil de los Transformadores de Potencia, y concluyendo se pueden tener mejoras y grandes beneficios fortaleciendo el desarrollo de técnicas sistematizadas, estableciendo pruebas que se realizan en campo para determinar la calidad de los materiales que componen al Transformador de Potencia”. (p. 57)

Por otra parte, es necesario destacar los estudios realizados sobre transformadores trifásicos en otros contextos. Como, en México, Morán (2013), realizó su investigación titulada “Descripción, selección y aplicación de los transformadores eléctricos”, y llegó a las siguientes conclusiones: “los transformadores son una de las maquinas eléctricas fijas con mayor porcentaje de eficiencia en los sistemas de producción y distribución de energía eléctrica; además de ser los puntos principales entre el sistema de distribución y los centros de consumo de energía, por lo que se requiere de su correcta operación la cual se garantiza, mediante la aplicación de una serie de pruebas de rutina por las cuales se deben someter una vez terminada su construcción; y es de vital importancia que se realice

un control anual de las condiciones operáticas del transformador, ya que, si bien es cierto que la resistencia del aislamiento junto con los valores del factor de potencia del aislamiento son satisfactorios, los índices de absorción y polarización no lo son, sugiriendo lo anterior a un deterioro del aislamiento del transformador como producto del envejecimiento o falta de mantenimiento”. (p. 191)

Además, en México, Antonio y Díaz (2008), realizaron su investigación de ingeniería titulada “Optimización aplicada al diseño y cálculo de un transformador de distribución”, y llegaron a las siguientes conclusiones: “otro de los datos utilizados son los pesos específicos de los materiales, ya que estos son de suma importancia para el cálculo de las pérdidas. Para determinar la eficiencia del transformador se debe conocer la potencia absorbida por el primario, potencia cedida por el secundario, pérdidas en el hierro y pérdidas por efecto Joule. Otras investigaciones se preocupan por el diseño del tanque del transformador ya que en el diseño del tanque las pérdidas son radiadas por las superficies expuestas del transformador hacia el medio de enfriamiento. La superficie interna del tanque en contacto con el aceite requerido por cada watt de pérdida dependerá del tipo de tanque que se use; para lograr el objetivo principal, el cual es la optimización del diseño de un transformador de distribución, se realizó el código para dicho diseño mediante lenguaje de programación C. En el programa sólo se variaron los volts/ vuelta con la finalidad de hacer más práctico, sencillo y rápido el cálculo, pues los datos de potencia trifásica, del voltaje en el primario, de tensión de fase en el secundario, del tipo de conexión (delta-estrella), son constantes; y los transformadores de distribución tipo poste monofásico y trifásico, son el elemento básico en las redes de distribución de energía eléctrica, en los sistemas urbanos y rurales. Son los que hacen posible al usuario final la utilización de la energía eléctrica de bajo consumo en los desarrollos habitacionales, residenciales y de micro industrias”. (p. 94)

Asimismo, es necesario presentar los estudios realizados sobre transformadores trifásicos en otros contextos. Así, en Quito, Corrales (1999), realizó su investigación titulada “Pruebas para instalación, puesta en servicio, operación y mantenimiento de transformadores de potencia”, y llegó a las siguientes conclusiones: “la sencillez aparente del transformador, oculta en realidad fenómenos al menos tan complejos como los que se producen en las máquinas rotativas. Como ejemplo se puede referir a los fenómenos de alta tensión, particularidad exclusiva de los transformadores, que, conectados a las redes

que tienen muchos kilómetros de longitud, hacen tan laboriosa su perfecta y su buena permanencia en servicio; los transformadores son uno de los principales elementos que se encuentran invariablemente en un sistema eléctrico por grande o pequeño que éste sea, son estos equipos los que han permitido el desarrollo de la Industria Eléctrica hasta las magnitudes en que actualmente se encuentran, pues debido a que es posible la transformación de los parámetros, voltaje y corriente, se tiene la posibilidad de transmitir a grandes distancias, grandes bloques de energía, permitiendo esto disponer de las fuentes de energía (hidroeléctricas, termoeléctricas, etc. por retiradas que se encuentren de los centros de consumo; y son también las máquinas más eficientes que se conocen, pues al no tener partes en movimiento no existen pérdidas por fricción o rozamiento y por otra parte la calidad de los materiales ferromagnéticos que componen el núcleo ha ido en aumento, lo cual permite que las eficiencias de estos equipos sean muy altas”. (p. 141)

También, es necesario destacar los estudios realizados sobre transformadores de potencia monofásicos en otros contextos. Como, en Ecuador, Iturralde y Moscoso (2012), realizaron su investigación titulada “Diseño de un módulo de pruebas de pérdidas en vacío y cortocircuito de transformadores monofásicos de distribución y potencias de hasta 25KVA”, que llegaron a las siguientes conclusiones: “las pruebas eléctricas se realizan con el propósito de confirmar que los transformadores, motores y cables han sido diseñados y construidos apropiadamente y puede soportar las condiciones de trabajo a las que estará sometido durante su funcionamiento normal; el cumplimiento de normas en lo referente a pérdidas en transformadores es obligatorio a fin de controlar la energía perdida por aspectos técnicos; la prueba en vacío determina la calidad del acero al carbono del que está fabricado el núcleo de un transformador; la prueba en cortocircuito determina las bondades y buenas características del cobre utilizado en los devanados del transformador; es muy importante realizar este tipos de pruebas para confirmar que el material utilizado especialmente en las en las bobinas sea cobre, puesto que existen transformadores con devanados aluminio-aluminio; y las normas NTE-INEN-2114 y NTE-INEN-2115 no admiten tolerancia, por lo tanto son de carácter estricto”. (p. 89)

En el contexto nacional, hemos hallado varios estudios sobre el problema que es motivo de estudio. Segura (2014), en Lima, realizó su investigación titulada “Criterios para elaborar el proyecto eléctrico y selección del transformador de aislamiento en agencias bancarias”, y llegó a las siguientes conclusiones: “la memoria descriptiva y las

especificaciones técnicas del proyecto eléctrico son tan importantes como los planos eléctricos, ya que cubren las condiciones requeridas para el dimensionamiento, definición de propiedades de fabricación, tratamiento, inspección y pruebas de los equipos; para el diseño del transformador es importante tomar en cuenta las pérdidas suplementarias (corrientes parásitas) para que el calentamiento del equipo no exceda el valor previsto en la garantía; y equipada y puesta en servicio la agencia bancaria será importante realizar el análisis de armónicos para determinar la calidad de energía que existe en la agencia, evitar la disminución de la vida útil de los equipos, mal funcionamiento de los elementos de protección, daño en los aislamientos, entre otros”. (p. 42)

Por un lado, Iparraguirre (1986), en Lima, realizó un estudio tecnológico denominado “Diseño de un transformador de distribución de 800 KVA 10/0.44 KV de mínimo precio financiero”, en la Universidad nacional de ingeniería, y obtuvo las siguientes conclusiones: “sobre la eficiencia del transformador es importante - mantener, las pérdidas en el núcleo tan bajas como sea posible, usando en el diseño materiales magnéticos de alto grado, es decir de grano orientado (UNI5IL 46). El material de alta calidad, aumenta el costo - inicial del transformador, sin embargo para una condición de carga dada, hay en el diseño óptimo en el cual los intereses anuales y cargo por depreciación sobre el costo inicial, mas el costo anual de pérdidas por energía es un mínimo. La eficiencia en este diseño es 98.67%; las pérdidas en el núcleo son independientes de la carga y por lo tanto los costos de demanda y energía estén asociados con las pérdidas y es necesario considerarlos en un caso para hacer los cargos adecuados y en el otro para saber en cuanto aumenta el costo de operación; las pérdidas en el cobre varían con el cuadrado de la corriente en el transformador, por tanto el cargo por demanda, debe ser modificado por un factor de coincidencia de carga pico, para tomar en cuenta la coincidencia de la carga; la altura de operación también es un factor físico preponderante, ya que la eficiencia de disipación de calor producido en el transformador varía con la altura; y en el diseño de este transformador, la altura de operación es al nivel del mar, de lo contrario se tendría que reducir el calentamiento del Cuadro II, 163 con el criterio CEI 79-19 de la página 165”. (p. 188-189)

También, es necesario destacar la investigación realizada sobre calidad del transformador por Ramos (1990), titulada “Control de calidad de un transformador de potencia de 7 MVA con conmutación y regulación de tensión bajo carga” en la

Universidad nacional de ingeniería, y llegó a las siguientes conclusiones: “las pérdidas en el fierro obtenidas de la prueba en vacío presentan a tensión nominal/ un incremento del 10% con respecto al valor teórico y un decremento del 2.5% con respecto al valor máximo garantizado; resultados muy satisfactorios/ en los que han influido considerablemente tanto la calidad de la plancha magnética como la buena construcción del núcleo magnético; las pérdidas en el cobre y la tensión de cortocircuito obtenidas de la prueba en cortocircuito, presentan con respecto a los valores calculados una muy buena aproximación del orden del 2%; disminuyendo así, considerablemente/ las pérdidas totales y con ello las pérdidas adicionales, una eficiente fabricación de los arrollamientos y correcto montaje y conexionado de los mismos han permitido obtener estos excelentes resultados; la medida de la resistencia de los arrollamientos por el método voltaperimétrico permite contrarrestar el efecto de inducción de los arrollamientos, obteniéndose así mayor precisión en las lecturas de los instrumentos y exactitud en los cálculos efectuados”. (p. 182-183)

Asimismo, Lino (2017), en Arequipa, realizó el estudio tecnológico denominado “Implementación de un módulo didáctico de transformadores trifásicos de 3KVA. Para conexiones especiales”, en la Universidad Católica de Santa María, y llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones: “se logró la implementación del módulo didáctico de transformadores trifásicos de 3KA. Para conexiones especiales, la cual guarda relación directa con la teoría de las máquinas eléctricas rotativas es decir con los transformadores de potencia; que el módulo que se logró implementar, debido a las grandes corrientes que este puede soportar servirá para efectuar diferentes tipos de ensayos en el laboratorio, coadyuvando así al conocimiento del comportamiento de las máquinas eléctricas tanto estáticas como rotativas; se deberá de tener en cuenta los valores nominales de funcionamiento de las máquinas, los dispositivos y equipos, considerando su voltaje y corriente principalmente; y antes de energizar un circuito eléctrico en el laboratorio, donde se utilice el módulo, se recomienda realizarlos cálculos previos para poder asegurarse de no sobrepasar los valores nominales de los equipos e instrumentos que se están utilizando, como así también evitar cometer el menor número de errores en el desarrollo de las prácticas”. (p. 153)

Además, Maguiña (2016), en Callao, realizó un estudio tecnológico denominado “Diseño de un regulador automático LMV, en suministros de baja tensión según la norma

NTCSE”, en la Universidad nacional del Callao, y obtuvo las siguientes conclusiones: “el regulador automático LMV controla la tensión del suministro a través de una combinación de relés utilizando un solo transformador reductor; el regulador automático en ningún momento deja fuera de servicio a los suministros aguas abajo. Esto ocurre debido a que en las conexión internas la carga siempre esté conectada al transformador reductor en el lado secundario; se puede concluir que el regulador de tensión internamente controla el flujo magnético de acuerdo a la necesidad, este control lo hace con 4 pasos de tensión; se estima que la vida útil del regulador automático LMV es de 5 años debido a que la parte más delicada es la conmutación de los relés y la vida útil del circuito integrado programable; y el Regulador automático LMV resulta ser más confiable que los reguladores tradicionales debido a que no tienen una escobilla que se desgasta con el tiempo y maneja la corriente de carga, mientras que el nuevo regulador LMV solo lo hace en pocos pasos”. (p. 46-47)

De las investigaciones anteriores podemos concluir que los transformadores son los principales elementos de un sistema eléctrico; que para determinar su eficiencia se debe conocer la potencia absorbida por el secundario, las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por el efecto joule, Así mismo, la eficiente fabricación de los arrollamientos y su correcta conexión permiten excelentes resultados, por eso la importancia de nuestra la investigación en la conexión de cargas resistivas e inductivas, que son las que se encuentran en un sistema eléctrico. Por otra parte, la necesidad de realizar pruebas eléctricas en el transformador, para confirmar que han sido diseñados para trabajar en condiciones normales. De allí, la importancia de aplicar una metodología de pruebas para los transformadores trifásicos para evitar pérdidas, fallas, y asegurar un correcto funcionamiento en condiciones de trabajo; para ello se tendrá en cuenta los valores nominales como por ejemplo, el voltaje, la corriente, la potencia; y que antes de energizar el circuito eléctrico, realizar cálculos asegurar que no se sobrepasen los valores nominales.

Estos conceptos, estudios y consideraciones ofrecen una motivación en la investigación, pues fortalece la importancia de indagar más sobre las conexiones de los transformadores trifásicos. En consecuencia, la investigación sobre la conexión de los transformadores trifásicos se hace necesaria para investigar su influencia en la eficiencia y estabilidad del voltaje para cargas balanceadas.



Se justifica tecnológicamente debido a la importancia del presente trabajo de investigación radica en que permitirá el conocimiento sobre el transformador trifásico, especialmente en las redes de distribución eléctrica de baja tensión, de manera que pueda ser un punto de partida para el aporte de alternativas para solucionar factores tecnológicos para una mayor eficiencia energética, pues “no obstante la existencia de regulaciones adecuadas para promover la eficiencia en el uso de la energía, no se ha logrado aún un avance suficientemente satisfactorio” (Plan estratégico de Hidrandina 2013-2017, p. 35).

Se justifica en forma académica debido porque es conveniente que los resultados del trabajo de investigación sean utilizados por docentes y estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica eléctrica en los cursos de Maquinas eléctricas estáticas y Redes de distribución transporte de energía, como lo señala en sus fines la Sunedu de “difundir y promover la utilización de los trabajos de investigación en el ámbito académico” (Reglamento RENATI, art. 10).

Se justifica teóricamente, dado que los resultados que se obtengan en el presente estudio aportarán evidencias empíricas que apoyen el supuesto teórico que fundamente la consideración de las conexiones y cargas balanceadas en la eficiencia y regulación de los transformadores trifásicos.

Finalmente, existe una razón de carácter social que justifica nuestra investigación, dado que los resultados que se obtengan contribuirán a la comprensión del consumo de energía, que constituye un factor importante de la sociedad, ya que “los precios al consumidor en el sector energía han mostrado, en general, una tendencia creciente en los últimos años” (Plan estratégico de Hidrandina, 2013-2017, p. 20).

Las redes de distribución eléctrica cuentan entre sus elementos principales con transformadores trifásicos que se encargan de reducir el voltaje y proporcionar de energía a los centros de carga, la forma adecuada que propicien una mejor calidad de energía en el proceso de distribución, hace necesario nuestra investigación en la eficiencia y regulación de los transformadores trifásicos.

Además, como señala Magina (2016), en la actualidad las redes de distribución eléctrica son complejas debido a la carga que es variable en el tiempo que ocasiona que en algunos puntos de las redes obtengan una deficiente calidad de tensión, de allí la necesidad de un análisis de cargas de los transformadores trifásicos.

A partir de los antecedentes ya expuestos anteriormente, formulamos el enunciado del problema:

***¿Cuál es el efecto de la conexión y carga en la mejora de la eficiencia y regulación del transformador trifásico?***

De la bibliografía consultada se pudo revisar definiciones que serán útiles para el desarrollo de la investigación, tales como:

Según Gómez, Martínez, Rosendo, Romero y Riquelme (2003) el transformador trifásico se obtiene interconectando eléctricamente tres bancos monofásicos o bien devanando tres pares de arrollamientos sobre otras tantas columnas de un único ciclo magnético, que puede adoptar diferentes topologías. Desde un punto de vista puramente eléctrico ambas disposiciones se analizan y se comportan de igual modo en circuitos trifásicos perfectamente equilibrados por lo que los detalles constructivos pueden obviarse en este apartado (p. 26).

También, Córcoles, Pedra y Salichs (1996), aseguran que conectando tres transformadores monofásicos se puede conseguir uno trifásico (que en este caso se llama banco trifásico). El transformador trifásico puede tener otras formas constructivas derivadas del banco trifásico: con núcleo de tres o cinco columnas. El más utilizado es el de tres columnas”, resaltando que el tipo transformador trifásico de mayor uso es el de tres columnas (p. 111).

Según Wildi (2007) el transformador trifásico es un banco de transformadores compuesto de tres transformadores monofásicos puede ser reemplazado por un transformador trifásico. El núcleo magnético de este transformador tiene tres patas que portan los devanados primario y secundario de cada fase. Los devanados están conectados internamente, ya sea en Y o en delta, por lo que sólo se tienen que sacar seis terminales del tanque. Para una capacidad total dada, un transformador trifásico siempre es más pequeño y más barato que tres transformadores monofásicos (p. 249).

Los bancos de transformadores trifásicos tienen propiedades básicas cuando se utilizan tres transformadores monofásicos para transformar un voltaje trifásico, los devanados se pueden conectar de varias maneras. Así pues, los primarios se pueden conectar en delta y los secundarios en Y, o viceversa. Como resultado, la relación del voltaje de entrada trifásico al voltaje de salida trifásico depende no sólo de la relación de vueltas de los transformadores, sino también de la manera en que éstos están conectados.

Un banco de transformadores trifásicos también puede producir un *desplazamiento de fase entre el* voltaje de entrada trifásico y el voltaje de salida trifásico.

La cantidad del desplazamiento de fase depende de la relación de vueltas de los transformadores y de cómo están interconectados los primarios y secundarios.

Podemos entender el comportamiento básico de los bancos de transformadores trifásicos balanceados haciendo las siguientes suposiciones simplificadoras:

Las corrientes de excitación son despreciables; las impedancias del transformador, producidas por la resistencia y la reactancia de dispersión de los devanados, son despreciables; y la potencia de entrada aparente total al banco de transformadores es igual a la potencia de salida aparente total.

(Wildi, 2007, pp. 243-244)

El comportamiento de un banco de transformadores trifásicos se determina del mismo modo que el de un transformador monofásico. Al realizar los cálculos, procedemos como sigue:

Suponemos que los devanados primario y secundario están conectados en Y, *aun cuando no lo estén. Esto elimina* el problema de tener que trabajar con voltajes y corrientes en delta-Y y delta-delta; consideramos sólo un transformador (monofásico) de este supuesto banco de transformadores en Y-Y; el voltaje primario de este transformador hipotético es el voltaje de línea a neutro de la línea entrante; el voltaje secundario de este transformador es el voltaje de línea a neutro de la línea saliente; la capacidad de potencia nominal de este transformador es un tercio de la capacidad del banco de transformadores trifásicos; y la carga de este transformador es un tercio de la carga del banco de transformadores.

(Wildi, 2007, pp. 258-259)

Weedy (2012), menciona sobre el sistema de cálculo por unidad que para el análisis de redes de potencia, en lugar de utilizar los valores reales de las cantidades, es normal expresarlas con fracciones de unas magnitudes o cantidades de referencia, como por ejemplo los valores a plena carga. Estas fracciones se denominan por unidad (y se designan como p.u.) y se define el valor p.u. de cualquier magnitud en la forma:

$$\frac{\text{valor real (en cualquier unidad)}}{\text{valor de base o referencia en la misma unidad}}$$

Algunos autores expresan el valor p.u. como un porcentaje. Aunque el empleo de los valores p.u. puede a primera vista parecer más bien un método indirecto de expresión, tiene de hecho grandes ventajas; algunas de ellas son las siguientes:

El aparato considerado puede variar ampliamente de tamaño; las pérdidas y las caídas de tensión también varían considerablemente. En caso de aparatos del mismo tipo general las caídas de tensión y pérdidas p.u. son del mismo orden con independencia del tamaño. Como se verá posteriormente, se reduce el empleo de la raíz cúbica en los cálculos trifásicos; seleccionando las bases de tensión apropiadas se facilita la solución de redes que contienen varios transformadores; los valores p.u. por sí mismos se prestan más fácilmente al cálculo automatizado.

Weedy (2012), menciona sobre los circuitos trifásicos que la tensión de fase p.u. tiene el mismo valor numérico que la correspondiente tensión de la línea p.u. Con una tensión de línea de 100 kV y una tensión nominal de línea de 132 kV, el valor p.u. es 0,76. Las tensiones de fase equivalentes son  $100/\sqrt{3}$  kV y  $132/\sqrt{3}$  kV y por lo tanto el valor p.u. es de nuevo 0,76. Los valores reales de R, XL y X, para las líneas, cables y los demás aparatos son los valores de fase. Cuando se trabaja con valores óhmicos resulta ser menos confuso utilizar los valores de fase de todas las magnitudes. En el sistema p.u. los valores trifásicos de la tensión, corriente y potencia pueden utilizarse sin preocuparse de que el resultado sea incorrecto en un factor  $\sqrt{3}$ .

$$I_{base} = \frac{\text{base VA}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \quad (1)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}/\sqrt{3}}{I_{base}} \quad (2)$$

suponiendo un sistema conectado en estrella

$$Z_{base} = \frac{\frac{V_b}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_b}{\sqrt{3}}}{\frac{I_b \cdot V_b}{\sqrt{3}}} = \frac{V_b^2}{\sqrt{3} \cdot V_b \cdot I_b} \quad (3)$$

$$Z_{base} = \frac{(\text{tensión de la línea base})^2}{VA_{base}} \quad (4)$$

Debe señalarse que se obtiene el mismo valor para  $Z_{base}$  utilizando valores de base puros. De aquí que

$$Z_{p.u.} = \frac{Z(\Omega) \times VA \text{ base}}{(\text{tensión base})^2} \quad (5)$$

Es decir, es directamente proporcional a los voltamperes base e inversamente proporcional a la (tensión base)<sup>2</sup>. De aquí,

$$Z_{p.u.} (\text{bases nuevas}) = Z_{p.u.} (\text{base original}) \times \frac{V_{\text{anterior base}}}{V_{\text{nueva base}}} \times \frac{VA_{\text{nueva base}}}{VA_{\text{anterior base}}} \quad (6)$$

Weedy considera un transformador monofásico en el que la impedancia en serie total de los dos arrollamientos referidos al primario es  $Z_1$ , según se muestra en la figura 1.

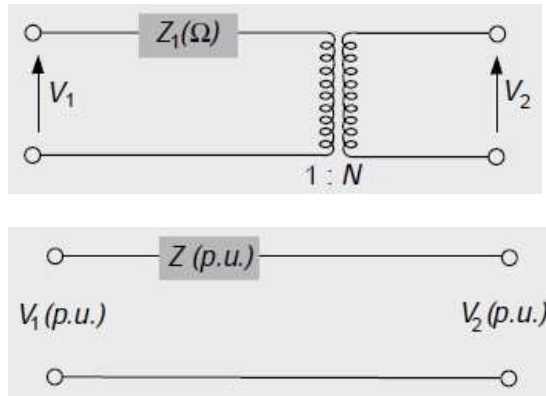


Figura 1. Circuito equivalente de un transformador monofásico. Tomada de Weedy (2012).

Entonces la impedancia  $p.u. = I_1 Z_1 / V_1$  en donde  $I_1$  y  $V_1$  son los valores nominales o bases. La impedancia total referida al secundario

$$Z_2 = Z_1 N^2 \quad [\Omega] \quad (7)$$

$$Z_{p.u.} = Z_1 N^2 \frac{V_2}{I_2} \quad (8)$$

$$Z_{p.u.} = Z_1 N^2 \frac{I_1}{N} \cdot \frac{1}{V_1 N} = \frac{Z_1 I_1}{V_1} \quad (9)$$

(Weedy 2012, pp. 30-33)

Las conexiones de transformadores trifásicos se pueden lograr utilizando tres transformadores monofásicos para transformar un voltaje trifásico, los devanados se pueden conectar de varias maneras. Así pues, los primarios se pueden conectar en delta y los secundarios en Y, o viceversa. Como resultado, la relación del voltaje de entrada trifásico al voltaje de salida trifásico depende no sólo de la relación de vueltas de los transformadores, sino también de la manera en que éstos están conectados.

Un banco de transformadores trifásicos también puede producir un desplazamiento de fase entre el voltaje de entrada trifásico y el voltaje de salida trifásico. La cantidad del desplazamiento de fase depende de la relación de vueltas de los transformadores y de cómo están interconectados los primarios y secundarios.

(Wildi, 2007, p. 243)

Un transformador trifásico consta de tres transformadores, separados o combinados, sobre un núcleo. Los primarios y secundarios de todo transformador trifásico pueden ser conectados independientemente en estrella (Y) o en delta ( $\Delta$ ). Esto da un total de cuatro conexiones posibles para un banco trifásico:

- Estrella- Estrella (Y-Y)
- Estrella - Delta (Y -  $\Delta$ )
- Delta - Estrella ( $\Delta$  - Y)
- Delta - Delta ( $\Delta$  -  $\Delta$ )

La clave para analizar un banco trifásico es mirar cada transformador del banco. Cada transformador monofásico del banco se comporta exactamente como los transformadores monofásicos ya estudiados. La impedancia, regulación de voltaje, eficiencia y demás cálculos similares para los transformadores trifásicos se hacen sobre una base por fase, utilizando las mismas técnicas ya desarrolladas para los transformadores monofásicos.

(Chapman, 2005, p. 118)

Las características y condiciones de una conexión delta-delta, según se muestra en la figura 2, son:

Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas de alumbrado o pequeñas y cargas trifásicas simultáneamente, para esto se puede localizar una derivación o tap en el punto medio del devanado secundario de uno de los transformadores conectándose a tierra y se conecta también al neutro del secundario, de esta manera, las cargas

monofásicas se conectan entre los conductores de fase y neutro, por lo tanto, el transformador con la derivación en el punto medio toma dos terceras partes de la carga monofásica y una tercera parte de la carga trifásica, los otros dos transformadores cada uno toma un tercio de las cargas monofásicas y trifásica,

Para poder cargar al banco trifásico en forma balanceada se deben cumplir con las siguientes condiciones:

Todos los transformadores deben tener idéntica relación de transformación; todos los transformadores deben tener el mismo valor de impedancia; y todos los transformadores deben conectar en el mismo tap o derivación.

(Harper, 1989, pp. 239-240)

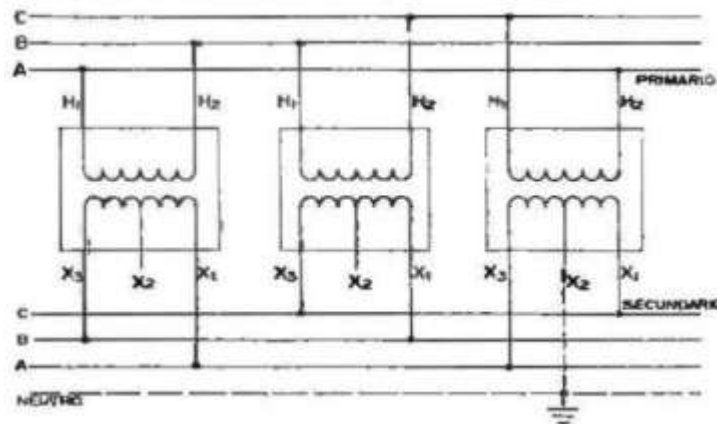


Figura 2. Conexión delta-delta. Tomada de Harper (1989).

Las características y condiciones de una conexión delta-estrella, según se muestra en la figura 3, son:

Este tipo de conexión se hace frecuentemente para alimentar en forma combinada, cargas trifásicas y cargas monofásicas en donde las cargas monofásicas pueden ser comparativamente grandes, los devanados secundarios pueden tener una derivación o tap. para obtener valores de voltaje distintos, en transformadores de gran potencia, la conexión delta -estrella, se usa frecuentemente para elevar voltaje, como es el caso de las centrales eléctricas, la conexión en estrella permite la facilidad de disponer de un neutro para conexión a tierra, tiene el inconveniente que cuando se conectan en paralelo

transformadores trifásicos en conexión delta-estrella, se debe tomar en consideración el desplazamiento angular entre la delta y la estrella (Harper, 1989, pp. 246-247).

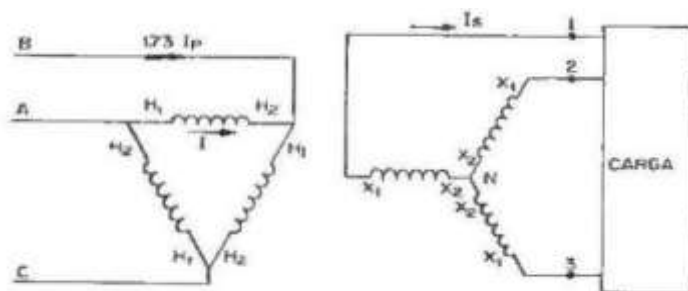


Figura 3. Conexión delta- estrella. Tomada de Harper (1989).

Las características y condiciones de una conexión estrella-delta, según se muestra en la figura 4, son:

Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas trifásicas grandes de un sistema trifásico de alimentación conectado en estrella, tiene la limitante de que para alimentar cargas monofásicas y trifásicas en forma simultánea no dispone del neutro, por otra parte, tiene la ventaja relativa de que la impedancia de los tres transformadores no necesita ser la misma en esta conexión, las relaciones entre corrientes y voltajes de fase de línea a línea para la conexión estrella delta, son las mismas que se tienen en la conexión delta-estrella (Harper, 1989, p. 250).

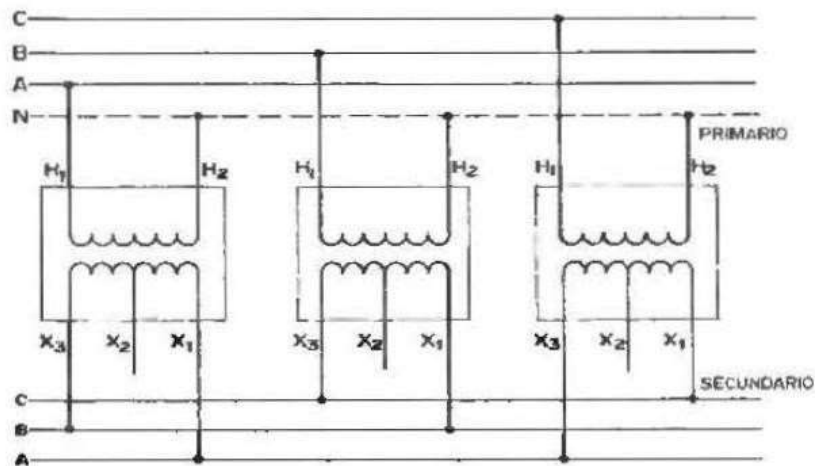


Figura 4. Conexión estrella-delta. Tomada de Harper (1989).



Las características y condiciones de una conexión estrella-estrella, según se muestra en la figura 5, son:

Esta conexión se usa cuando se requiere alimentar grandes cargas monofásicas en forma simultánea con cargas trifásicas, también se usa sólo si el neutro del primario se puede conectar sólidamente al neutro de la fuente de alimentación ya sea con un neutro común o a través de tierra. Cuando los neutros de ambos lados del banco de transformadores no se unen, el voltaje de línea a neutro tiende a (distorsionarse (no es senoidal). la conexión estrella-estrella se puede usar también sin unir los neutros, a condición de que cada transformador tenga un tercer devanado que se conoce como "devanado terciario," este devanado terciario está siempre conectado en delta.

Con frecuencia, el devanado terciario se usa para aumentar los servicios de la subestación (Harper, 1989, p. 251).

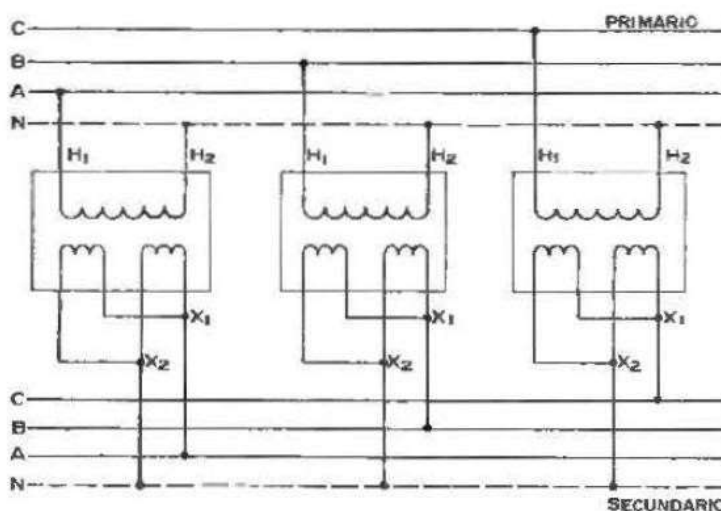


Figura 5. Conexión estrella-estrella. Tomada de Harper (1989).

Con respecto a las cargas industriales que son materia de nuestro estudio:

La mayoría de las veces no sabemos si una carga trifásica particular está conectada en delta o en Y. Por ejemplo, los motores, generadores, transformadores, capacitores, etc., trifásicos a menudo sólo tienen tres terminales externas, y no hay forma de saber cómo están hechas las conexiones internas. En estas circunstancias, simplemente suponemos que la conexión es en Y.

En una conexión en Y se entiende que la impedancia por fase es la impedancia de línea a neutro. El voltaje por fase es simplemente el voltaje de línea dividido entre  $\sqrt{3}$ . Por último, la corriente por fase es igual a la corriente de línea.

No sólo con cargas individuales podemos suponer que una conexión está en Y, sino también con centros de carga completos, como una fábrica que contiene motores, lámparas, calentadores, hornos, etc. Simplemente suponemos que el centro de carga está conectado en Y y proseguimos con los cálculos usuales.

(Wildi, 2007, p. 171)

Hayt y kemmerly (2012) señalan sobre tipos de cargas resistivas, inductivas y capacitivas para circuitos de corriente alterna:

- *Resistencia*

La resistencia es el caso más simple. En el dominio del tiempo, la ecuación de definición es  $v(t) = Ri(t)$ , en forma polar,  $V_m \angle \theta = R I_m \angle \phi$ . Pero  $V_m \angle \theta$  e  $I_m \angle \phi$  representan sólo los fasores generales de tensión y de corriente  $V$  e  $I$ . Por lo tanto,  $V = RI$  (p. 385). En la figura 6 se muestra.

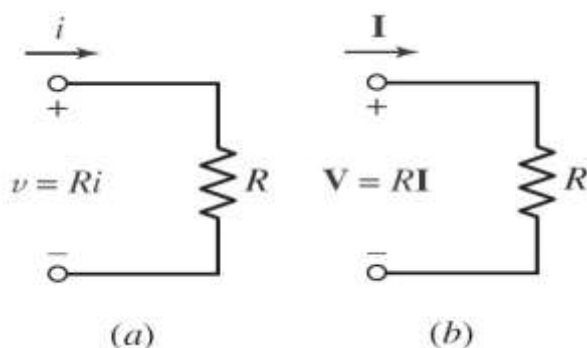


Figura 6. Resistor en (a) el dominio del tiempo,  $v = Ri$ ; (b) el dominio de la frecuencia,  $V = RI$ . Tomada de Hayt y kemmerly (2012).

- *Inductor*

Considerar ahora el inductor. La red en el dominio del tiempo, y la ecuación de definición, una expresión en el dominio del tiempo, es  $v(t) = L di(t)/dt$ , se obtiene la relación fasorial que se desea:  $V = j\omega LI$ , la  $I$  se retrasa a  $V$  en  $90^\circ$  en un inductor (p. 386).

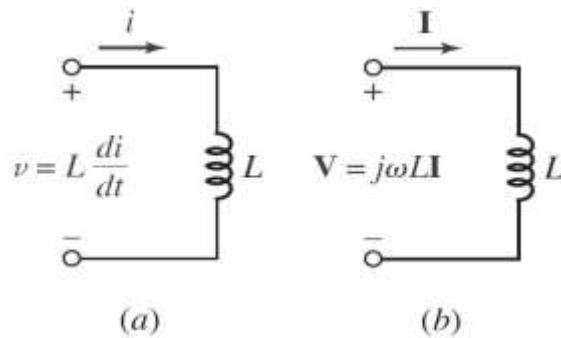


Figura 7. Inductor en (a) el dominio del tiempo,  $v = L di/dt$ ; (b) en el dominio de la frecuencia  $V = j\omega LI$ . Tomada de Hayt y kemmerly (2012).

- *Capacitor*

El elemento final por considerar es el capacitor. La relación corriente-tensión en el dominio del tiempo es  $i(t) = Cdv(t)/dt$ . La expresión equivalente en el dominio de la frecuencia es  $I = j\omega C V$ . De tal manera,  $I$  adelanta a  $V$  en  $90^\circ$  en un capacitor (p. 387).

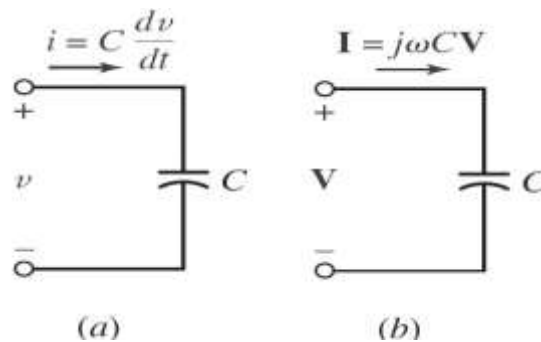


Figura 8. Capacitor en (a) en el dominio del tiempo (b) en el dominio de la frecuencia, entre la corriente del capacitor y la tensión. Tomada de Hayt y kemmerly (2012).

Wildi (2007, p. 167), afirma “que una carga trifásica está balanceada cuando los voltajes de línea son iguales y las corrientes de línea también. Esto corresponde a tres impedancias idénticas conectadas a través de la línea trifásica, una condición que se presenta comúnmente en circuitos trifásicos”. Además para el comportamiento las conexiones de cargas resistivas trifásicas para determinar la potencia en las líneas trifásicas:

*Cargas conectadas en estrella*

De acuerdo con la carga conectada en Y de la figura 9, la potencia aparente suministrada a cada rama es

$$S_z = \frac{E}{\sqrt{3}} \times I \quad (10)$$

Obviamente, la potencia aparente suministrada a las tres ramas es tres veces mayor. Por consiguiente, la potencia aparente total es

$$S = \frac{E}{\sqrt{3}} \times I \times 3 = \sqrt{3} EI \quad (11)$$

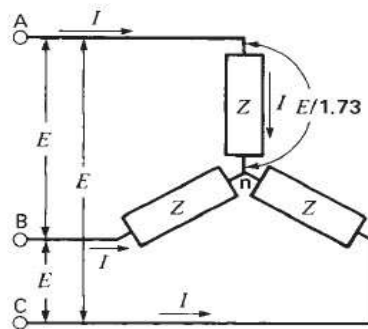


Figura 9. Cargas conectadas en estrella. Tomada de Wildi (2007).

- La corriente de cada elemento es igual a la corriente de línea I.
- El voltaje a través de cada elemento es igual al voltaje de línea E dividido entre  $\sqrt{3}$ .
- Los voltajes a través de los elementos están desfasados  $120^\circ$ .
- Las corrientes de los elementos están desfasadas  $120^\circ$ .

#### Cargas conectadas en delta

En el caso de una carga conectada en delta (Fig. 10), la potencia aparente suministrada a cada rama es

$$S_z = E \times \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

es igual a la de la carga conectada en Y. Por consiguiente, la potencia aparente total también es igual. Por lo tanto, tenemos

$$S = \sqrt{3} EI \quad (13)$$

donde

S: potencia aparente total suministrada por una línea trifásica [VA]

E: voltaje de línea efectivo [V]

I: corriente de línea efectiva [A]

$\sqrt{3}$ : una constante [valor aproximado = 1.73]

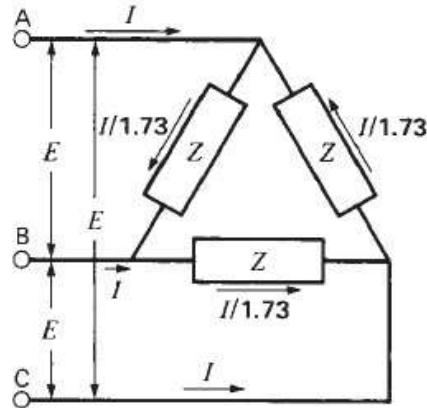


Figura 10. Cargas conectadas en delta. Tomada de Wildi (2007).

- La corriente de cada elemento es igual a la corriente de línea  $I$  dividida entre  $\sqrt{3}$ .
- El voltaje a través de cada elemento es igual al voltaje de línea  $E$ .
- Los voltajes a través de los elementos están desfasados  $120^\circ$ .
- Las corrientes de los elementos están desfasadas  $120^\circ$ .

(pp. 168-169)

Desde el punto de vista físico, una máquina tiene un circuito eléctrico, constituido por los devanados del inductor e inducido, donde se producen unas pérdidas por efecto Joule, llamadas vulgarmente pérdidas en el cobre, por otra parte, los arrollamientos se colocan en una estructura magnética, realizada con chapas de acero al silicio que ofrecen, debido a los campos magnéticos variables, unas pérdidas denominadas pérdidas en el hierro (Fraile, 2008, pp.108-109)

Chapman (2005), asegura que los transformadores son comparados y juzgados por su eficiencia. La eficiencia de un aparato está definida por la ecuación

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (14)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (15)$$

Estas ecuaciones se aplican a los motores, los generadores y también a los transformadores. Los circuitos equivalentes del transformador facilitan los cálculos de eficiencia. Existen tres tipos de pérdidas en los transformadores;

- Pérdidas en el cobre ( $I^2R$ ). Estas pérdidas son causadas por la resistencia en serie del circuito equivalente.
- Pérdidas por histéresis.
- Pérdidas por corrientes parásitas.

Para calcular la eficiencia de un transformador en una carga dada, adicione las pérdidas de cada resistencia y aplique la ecuación (15). Puesto que la potencia de salida está dada por

$$P_{out} = V_S I_S \cos\theta_S$$

la eficiencia está dada por

$$\eta = \frac{V_S I_S \cos\theta}{P_{Cu} + P_{nucleo} + V_S I_S \cos\theta} \times 100\% \quad (16)$$

(pp. 100-101)

La tensión que se aplica al devanado correspondiente, que será generalmente el de alta tensión, es del orden del 2 al 15 por 100 de la tensión nominal del transformador. Los porcentajes inferiores corresponden a los transformadores de mayor potencia. Dicha tensión recibe el nombre de tensión de cortocircuito, siendo un valor característico del transformador de tensión proporcionado por el fabricante y que se expresa en porcentaje respecto a la tensión nominal. La corriente que circula por el primario será del orden del 1 al 10 por 100 de la nominal, siendo los valores inferiores para los transformadores de mayor potencia y los superiores para los de pequeña potencia. Esta corriente recibe el nombre de intensidad de excitación, y es un valor característico del transformador, proporcionado por el fabricante, y que se expresa en porcentaje respecto a la corriente nominal (Sanjurjo, 1989, pp.74-76).

Wildi (2007), señala que “un importante atributo de un transformador es su regulación de voltaje. Con el voltaje aplicado en el primario mantenido de manera constante a su valor nominal”. Además añade que “la regulación del voltaje depende del factor de potencia de la carga. Por consiguiente, se debe especificar el factor de potencia. Si la carga es capacitiva, el voltaje sin carga puede exceder el voltaje a plena carga, en cuyo caso la regulación del voltaje es negativa” (p. 211).

Según, Chapman (2005), asegura que debido a que un transformador real tiene impedancia serie dentro de él, su voltaje de salida varía con la carga, aunque el voltaje de entrada permanezca constante. Para comparar adecuadamente transformadores en este aspecto, se acostumbra definir una cantidad llamada regulación de voltaje (VR). La regulación de voltaje a plena carga es una cantidad que compara el voltaje de salida del transformador sin carga (en vacío) con el voltaje de salida del transformador a plena carga. Está definida por la ecuación

$$VR = \frac{V_{SSC} - V_{SCC}}{V_{SCC}} \times 100\% \quad (17)$$

(p. 98)

Una vez que reconocimos nuestros antecedentes, la justificación por la que realizamos la investigación, problemática y definiciones. Procedimos a identificar nuestras operacionalización de variables por medio de tablas.

**Tabla 1**

*Operacionalización de las variables*

| Variables | Dimensiones | Indicadores         | Escala de medición | Técnicas e Instrumentos           |
|-----------|-------------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Conexión  | Resistor    | <del>Estrella</del> | 240 -1460 $\Omega$ | Técnicas Observación con equipos. |
|           |             | Delta               | 80-490 $\Omega$    |                                   |
|           | Inductor    | <del>Estrella</del> | 2.4 -6.4 H         | Instrumento Formato de            |
|           |             | Delta               | 0.8 -2.2 H         |                                   |
| Carga     | Resistor    | Resistencia         | 120 -730 $\Omega$  | Pruebas de ingeniería.            |
|           | Inductor    | Inductancia         | 1.2 -3.2 H         |                                   |

|            |                      |                       |                            |  |
|------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|--|
| Eficiencia | Potencia de salida   | Voltaje salida        | 209 – 231 V                | <i>Técnicas Pruebas de ingeniería (vacío, carga y cortocircuito)</i> |
|            |                      | Corriente salida      | 0 – 2 A                    |  |
|            | Factor de potencia   | 0.80 – 0.90           |                            |  |
|            | Pérdidas en el cobre | 0W – 15W              |                            |  |
| Regulación | Potencia de entrada  | Pérdidas en el núcleo | 0W – 30W                   | <i>Instrumento</i><br>Ficha de registro y cálculos de datos.         |
|            | Resistor             | Voltaje salida        | Carga mayor<br>Carga menor |  |
|            | Inductor             | Voltaje salida        | Carga mayor<br>Carga menor |  |

En la investigación se formuló la siguiente hipótesis nula para las variables eficiencia y regulación: el tipo de conexión y carga, no tiene efecto en la mejora de la eficiencia del transformador trifásico; y el tipo de conexión y carga, no tiene efecto en la mejora de la regulación del transformador trifásico. De igual modo, se formuló la hipótesis alternativa: el tipo de conexión y carga, tiene efecto en la mejora de la eficiencia del transformador trifásico; y el tipo de conexión y carga, tiene efecto en la mejora de la regulación del transformador trifásico.

**El objetivo general que he planteado para la investigación ha sido:**

*Determinar el efecto de la conexión y carga en la mejora de la eficiencia y regulación del transformador trifásico.*

En cuanto a los objetivos específicos que se determinó en la investigación fueron los siguientes:

- Identificar los tipos de carga y conexión para el transformador trifásico.
- Determinar la proporción de cargas en ohmios y Henrys para la prueba con cargas balanceadas.
- Determinar el nivel de las pérdidas en el transformador, mediante pruebas de vacío y cortocircuito.
- Determinar y comparar la eficiencia y regulación de las conexiones de cargas trifásicas.



## METODOLOGÍA DEL TRABAJO

De acuerdo al criterio de la orientación que se le da al estudio constituye *una investigación básica*, el enfoque de la investigación fue cuantitativo, porque se estudió objetivamente las variables e indicadores midiendo y registrando sus valores, se basó en la aplicación de los métodos estadísticos. El proceso de medición con equipos fue fundamental para la investigación cuantitativa, pues proporcionó la conexión fundamental entre la observación empírica y la expresión matemática de las relaciones cuantitativas. Los datos cuantitativos fueron de forma numérica, tales como estadísticas, porcentajes, etc.

El diseño de la investigación fue pre-experimental, porque se determinó el tipo de conexión de cargas resistivas e inductivas en la mejora de la eficiencia y regulación del transformador trifásico; cuyo diagrama es el siguiente:

M X O

**Donde:**

M: Muestra (transformador trifásico).

X: Conexión y tipo de carga.

O: Medición de eficiencia y regulación.

La muestra está constituida por un transformador trifásico de 1,2 kVA (ver figura 1 del Apéndice A), la cual quedó limitada por las variables a tratar: variable dependiente (eficiencia y regulación) y variable independiente (conexión y tipo de carga). Se estudió el análisis del transformador trifásico para determinar su eficiencia y regulación, en tipos y cantidades de cargas, como es de 120,150, 180, etc ohmios, y 1.2, 1.6, 2.0, etc henrios.

Por una parte, la técnica de Pruebas de ingeniería de vacío, con carga y de cortocircuito, mediante el instrumento *Ficha de Registro y cálculos de datos*, permitió recopilar información de potencia de salida y de entrada para calcular la Eficiencia, y de la misma manera obtener información del voltaje de salida con carga menor y mayor para calcular la Regulación. (Ver anexo 2.2). Por otra parte, para realizar los tipos de

Conexión de las cargas se utilizó los *Formatos de Pruebas* que fue aplicado a la muestra experimental. (Ver Anexo 2.1).

El estudio se ubica en el Laboratorio de Máquinas eléctricas de la Universidad Nacional del Santa, localizada en Urb. Bellamar S/N, Campus Universitario Nuevo Chimbote.



Figura 11. Localización de la Universidad Nacional del Santa.

Tomada de Google Maps (2019).

Asimismo, se controló las variables intervinientes: temperatura y voltaje de entrada; teniendo en cuenta de disminuir los errores aleatorios, accidentales y sistemáticos como se muestra a continuación:

**Tabla 2**

*Variables intervinientes*

| Errores      | Variables                           | Indicador                        | Repetición  |
|--------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------|
| Aleatorio    | Temperatura                         | Tiempo de operación 30s<br>20°C. | Tres veces. |
| Accidentales | Voltaje de entrada                  | 400V.                            | Tres veces. |
| Sistemáticos | Resistencia<br>Voltaje<br>Corriente | % error del instrumento.         | Tres veces  |

Los datos se procesaron en una hoja de cálculo en el programa de Excel, utilizando tablas estadísticas para estadística descriptiva; así como también los gráficos de columnas, línea y dispersión, de gran ayuda para ordenar los datos y representarlos para que puedan ser entendidos con facilidad. Asimismo, se aplicó la prueba de T-Student para comprobar el nivel de significancia de la conexión y tipo de carga en la eficiencia y regulación.

# RESULTADOS

## 3.1. Tipos de carga y conexión para el transformado trifásico.

Se establece el tipo de carga basado en las aplicaciones industriales donde los equipos y máquinas eléctricas son generalmente inductivos y resistivos como es el caso de los motores y hornos eléctricos. Asimismo, las conexiones de cargas según Hayt y Kemmerly (2012) se dan en estrella y delta.

**Tabla 3**

*Cargas y Conexiones para el transformador trifásico*

| Carga     | Conexión |
|-----------|----------|
| Resistiva | Estrella |
| Inductiva | Estrella |

*Nota:* Basado en las aplicaciones industriales.

En la tabla 3 se presenta los tipos de carga resistivos e inductivos, y sus respectivos tipos de conexión estrella y delta utilizados en la industria.

## 3.2. Proporción de cargas en Ohmios y Henrys para prueba con cargas balanceadas.

Wildi (2007), define las cargas balanceadas como tres impedancia idénticas conectadas mediante de cargas iguales, Se establece la proporción de cargas balanceadas teniendo en cuenta la corriente nominal del transformador trifásico de 1,73 A y los componentes de carga del laboratorio como es el caso de los reóstatos –resistencias variables de alambre-, y los inductores variables.

### 3.2. 1. Proporción de cargas en Ohmios

Se determina la proporción de cargas resistivas en ohmios, además de las consideraciones generales del ítem 3.2, con la precaución de no sobrepasar la corriente nominal del reóstato de 2A.

**Tabla 4***Proporción de Cargas Resistivas en Ohmios*

| Cargas Resistivas |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| R1                | R2  | R3  | R4  | R5  | R6  | R7  | R8  | R9  | R10 | R11 | R12 | R13 |
| (Ω)               | (Ω) | (Ω) | (Ω) | (Ω) | (Ω) | (Ω) | (Ω) | (Ω) | (Ω) | (Ω) | (Ω) | (Ω) |
| 120               | 150 | 180 | 200 | 220 | 240 | 270 | 310 | 340 | 440 | 490 | 630 | 730 |

*Nota:* Basado en las corrientes nominales del transformador y del reóstato respectivamente.

**3.2. 2. Proporción de cargas en Henrys.**

Se determina la proporción de cargas inductivas en Henrys, además de las consideraciones generales, con la precaución de no sobrepasar la corriente nominal del inductor variable de 0,65 A.

**Tabla 5***Proporción de Cargas Inductivas en Henrys*

| Cargas Inductivas |     |      |     |     |     |
|-------------------|-----|------|-----|-----|-----|
| L1                | L2  | L3   | L4  | L5  | L6  |
| (H)               | (H) | ((H) | (H) | (H) | (H) |
| 1.2               | 1.6 | 2.0  | 2.4 | 2.8 | 3.2 |

*Nota:* Basado en las corrientes nominales del transformador y del inductor variable respectivamente.

**3.3. Nivel de pérdidas en el transformador trifásico.**

Las pérdidas en el transformador trifásico se determinaron para un devanado, utilizando la relación adaptada de Chapman (2005):  $P_{loss} = P_{Cu} + P_{nucleo}$

**Tabla 6***Pérdidas en el transformador trifásico mediante prueba de vacío y cortocircuito*

| $P_{nucleo}$<br>Pérdidas en núcleo<br>línea<br>(W) | $P_{nucleo}$<br>Pérdidas en núcleo<br>devanado<br>(W) | $P_{Cu}$<br>Pérdidas en cobre<br>devanado<br>(W) | $P_{loss}$<br>Pérdidas en devanado<br>del transformador<br>(W) |
|--|---|--|--|
| 28.07  | 11.60   | 12.07  | 23.67  |

*Nota:* Basado en la Ficha de registro y Cálculos de datos.

La pérdida total del transformador trifásico es tres veces la pérdida en el devanado es decir de 71.1 W.

### 3.4. Eficiencia y Regulación de las conexiones de cargas trifásicas

#### 3.4.1. Eficiencia de las conexiones de cargas trifásicas

La Eficiencia del transformador trifásico se determinó utilizando las ecuaciones de Chapman (2005), como son: la Potencia de salida  $P_{out}$  que es igual al producto del voltaje, corriente y factor de potencia de salida.  $P_{out} = V_S I_S \cos \theta_S$

y, la Eficiencia del transformador trifásico  $\eta$  :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\%$$

Siendo la Potencia del transformador trifásico tres veces la Potencia de fase, para nuestra investigación se consideró la Potencia de fase que representa en igual magnitud a la Potencia del transformador.

**Tabla 7**

*Eficiencia en cargas resistivas según su conexión*

| Carga                     |     | Eficiencia de la Carga Resistiva |                       |
|---------------------------|-----|----------------------------------|-----------------------|
| resistiva<br>( $\Omega$ ) |     | Conexión Estrella<br>(%)         | Conexión Delta<br>(%) |
| R1                        | 120 | 87.89                            | 85.65                 |
| R2                        | 150 | 85.36                            | 84.59                 |
| R3                        | 180 | 83.16                            | 82.79                 |
| R4                        | 200 | 82.18                            | 82.30                 |
| R5                        | 220 | 80.22                            | 81.13                 |
| R6                        | 240 | 79.11                            | 78.86                 |
| R7                        | 270 | 77.75                            | 77.30                 |
| R8                        | 310 | 74.93                            | 75.17                 |
| R9                        | 340 | 73.10                            | 73.37                 |
| R10                       | 440 | 68.48                            | 68.37                 |
| R11                       | 490 | 66.26                            | 66.15                 |
| R12                       | 630 | 59.51                            | 60.61                 |
| R13                       | 730 | 56.93                            | 56.84                 |
| Media Aritmética          |     | 73.91                            | 73.96                 |
| Desviación estándar       |     | 9.30                             | 9.10                  |

*Nota:* Basado en el Banco de datos.

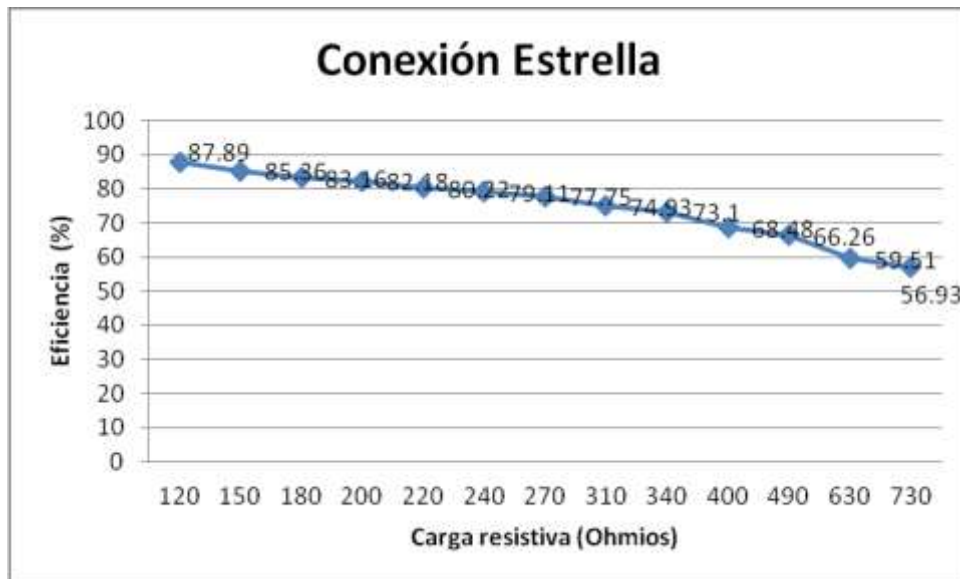


Figura 12. Eficiencia del transformador trifásico con carga resistiva en conexión estrella.

Fuente: Banco de datos.

### **Análisis de la Eficiencia del transformador trifásico con Carga resistiva en conexión Estrella.**

Según la figura 12 se evidencia que para la Carga resistiva con conexión Estrella, el transformador trifásico posee una eficiencia máxima de 87.9% para la carga resistivas R1 de 120  $\Omega$ . Así mismo la eficiencia menor de 56.9% se da para la carga R13 de 730  $\Omega$ .

Lo que se infiere es que la mayor eficiencia se da en el resistor menor R1, para la condición de cargas balanceadas.

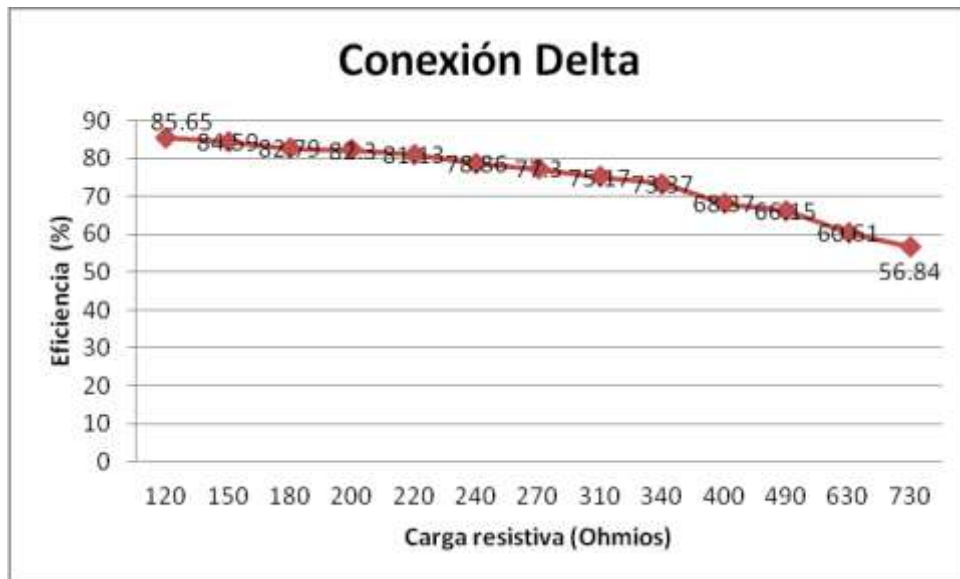


Figura 13. Eficiencia del transformador trifásico con carga resistiva en delta.

Fuente: Banco de datos.

### **Análisis de la Eficiencia del transformador trifásico con Carga resistiva en conexión Delta.**

Según la figura 13 se evidencia que para la Carga resistiva con conexión Delta, el transformador trifásico posee una eficiencia máxima de 85.7% para la carga resistivas R1 de 120  $\Omega$ . Así mismo la eficiencia menor de 56.8% se da para la carga R13 de 730  $\Omega$ .

Lo que se infiere es que la mayor eficiencia se da en el resistor menor R1, para la condición de cargas balanceadas.



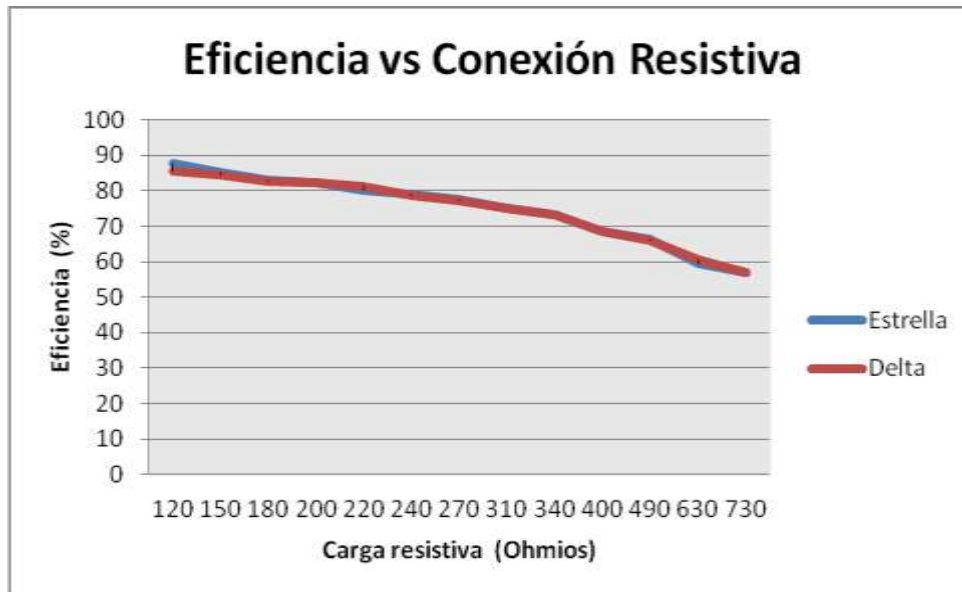


Figura 14. Eficiencia del transformador trifásico vs conexión con carga resistiva.

Fuente: Banco de datos.

### **Análisis de la Eficiencia del transformador trifásico vs. Conexión de Carga resistiva.**

Según la figura 14 se evidencia que la eficiencia para una carga resistiva en conexión estrella es casi igual que la eficiencia con carga resistiva en delta, bajo las condiciones de poseer las mismas cargas resistivas para los dos tipos de conexiones.

**Tabla 8***Eficiencia en cargas inductivas según su conexión*

| Carga               |     | Eficiencia de la Carga Inductiva |                |
|---------------------|-----|----------------------------------|----------------|
| Inductiva<br>(H)    |     | Conexión Estrella                | Conexión Delta |
|                     |     | (%)                              | (%)            |
| L1                  | 1.2 | 47.29                            | 70.86          |
| L2                  | 1.6 | 40.85                            | 66.64          |
| L3                  | 2.0 | 36.37                            | 62.79          |
| L4                  | 2.4 | 32.28                            | 58.64          |
| L5                  | 2.8 | 29.34                            | 55.57          |
| L6                  | 3.2 | 27.76                            | 52.33          |
| Media Aritmética    |     | 33.32                            | 59.19          |
| Desviación estándar |     | 5.33                             | 5.67           |

*Nota:* Basado en el Banco de datos.

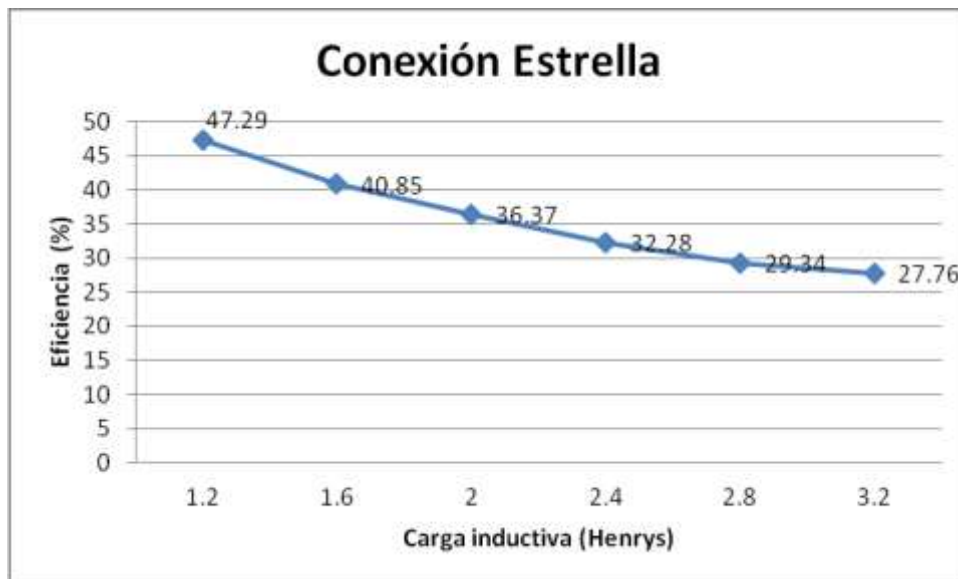


Figura 15. Eficiencia del transformador trifásico con carga inductiva en estrella.

Fuente: Banco de datos.

### **Análisis de la Eficiencia del transformador trifásico con Carga inductiva en conexión Estrella.**

Según la figura 15 se evidencia que para la Carga inductiva con conexión Estrella, el transformador trifásico posee una eficiencia máxima de 47.3% para la carga inductiva L1 de 1.2 H. Así mismo la eficiencia menor de 27.8% se da para la carga L6 de 3.2 H.

Lo que se infiere es que la mayor eficiencia se da en el inductor menor L1, para la condición de cargas balanceadas.

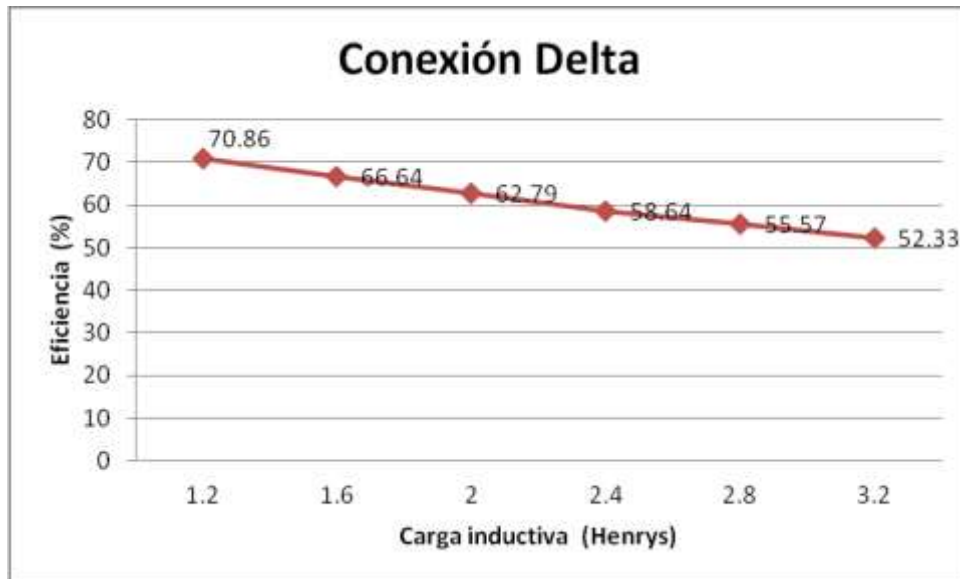


Figura 16. Eficiencia del transformador trifásico con carga inductiva en delta.

Fuente: Banco de datos.

### **Análisis de la Eficiencia del transformador trifásico con Carga inductiva en conexión Delta.**

Según la figura 16 se evidencia que para la Carga inductiva con conexión Delta, el transformador trifásico posee una eficiencia máxima de 70.9% para la carga inductiva L1. Así mismo la eficiencia menor de 52.3% se da para la carga L6.

Lo que se infiere es que la mayor eficiencia se da en el inductor menor L1, para la condición de cargas balanceadas.

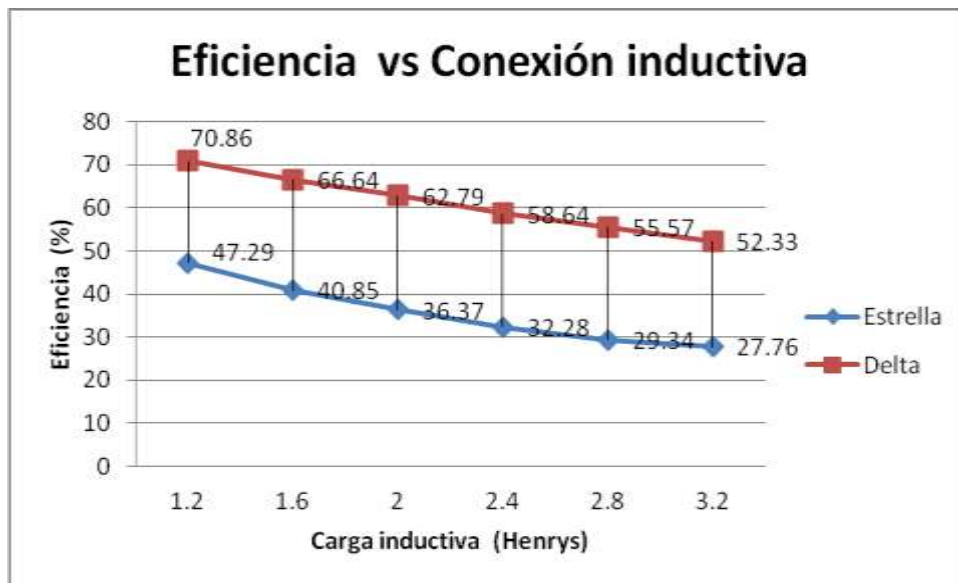


Figura 17. Eficiencia del transformador trifásico vs conexión con carga inductiva.

Fuente: Banco de datos.

### **Análisis de la Eficiencia del transformador trifásico vs. Conexión de Carga inductiva.**

Según la figura 17 se evidencia que la eficiencia para una carga inductiva en conexión delta es lo suficiente mayor (59.19% promedio) que la eficiencia con carga inductiva en estrella (33.32% promedio), bajo las condiciones de poseer las mismas cargas inductiva para los dos tipos de conexiones.

### 3.4.2. Regulación de las conexiones de cargas trifásicas.

La Regulación del transformador trifásico se determinó utilizando la ecuación adaptada de Chapman (2005), como es la Regulación de Voltaje  $VR$ , que relaciona el voltaje de salida sin carga, es decir en vacío  $V_{SSC}$  y el voltaje de salida a plena carga  $V_{SCC}$ .

$$VR = \frac{V_{SSC} - V_{SCC}}{V_{SCC}} \times 100\%$$

Para nuestra investigación se consideró el voltaje de salida a plena carga, como el voltaje para las máximas cargas resistivas e inductivas, por las limitaciones de cargas del laboratorio.

**Tabla 9**

*Regulación en cargas resistivas según su conexión*

| Regulación de la Carga Resistiva |                   |                        |                        |                        |                        |
|----------------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Carga                            |                   | Conexión Estrella      |                        | Conexión Delta         |                        |
| R                                | Z<br>( $\Omega$ ) | I<br>secundario<br>(A) | V<br>secundario<br>(V) | I<br>secundario<br>(A) | V<br>secundario<br>(V) |
| R1                               | 120               | 1.11                   | 231.83                 | 1.88                   | 202.93                 |
| R2                               | 150               | 0.87                   | 230.13                 | 1.51                   | 209.90                 |
| R3                               | 180               | 0.73                   | 229.70                 | 1.26                   | 212.40                 |
| R4                               | 200               | 0.67                   | 231.90                 | 1.20                   | 214.57                 |
| R5                               | 220               | 0.59                   | 229.97                 | 1.08                   | 216.77                 |
| R6                               | 240               | 0.55                   | 230.00                 | 0.93                   | 216.70                 |
| R7                               | 270               | 0.50                   | 232.17                 | 0.84                   | 217.80                 |
| R8                               | 310               | 0.43                   | 229.80                 | 0.74                   | 219.03                 |
| R9                               | 340               | 0.39                   | 230.00                 | 0.67                   | 219.63                 |
| R10                              | 400               | 0.31                   | 231.43                 | 0.52                   | 221.57                 |
| R11                              | 490               | 0.28                   | 231.60                 | 0.47                   | 222.17                 |
| R12                              | 630               | 0.21                   | 231.73                 | 0.37                   | 222.90                 |
| R13                              | 730               | 0.19                   | 231.50                 | 0.32                   | 223.20                 |

*Nota:* Adaptado de la Ficha de registro y cálculos de datos.

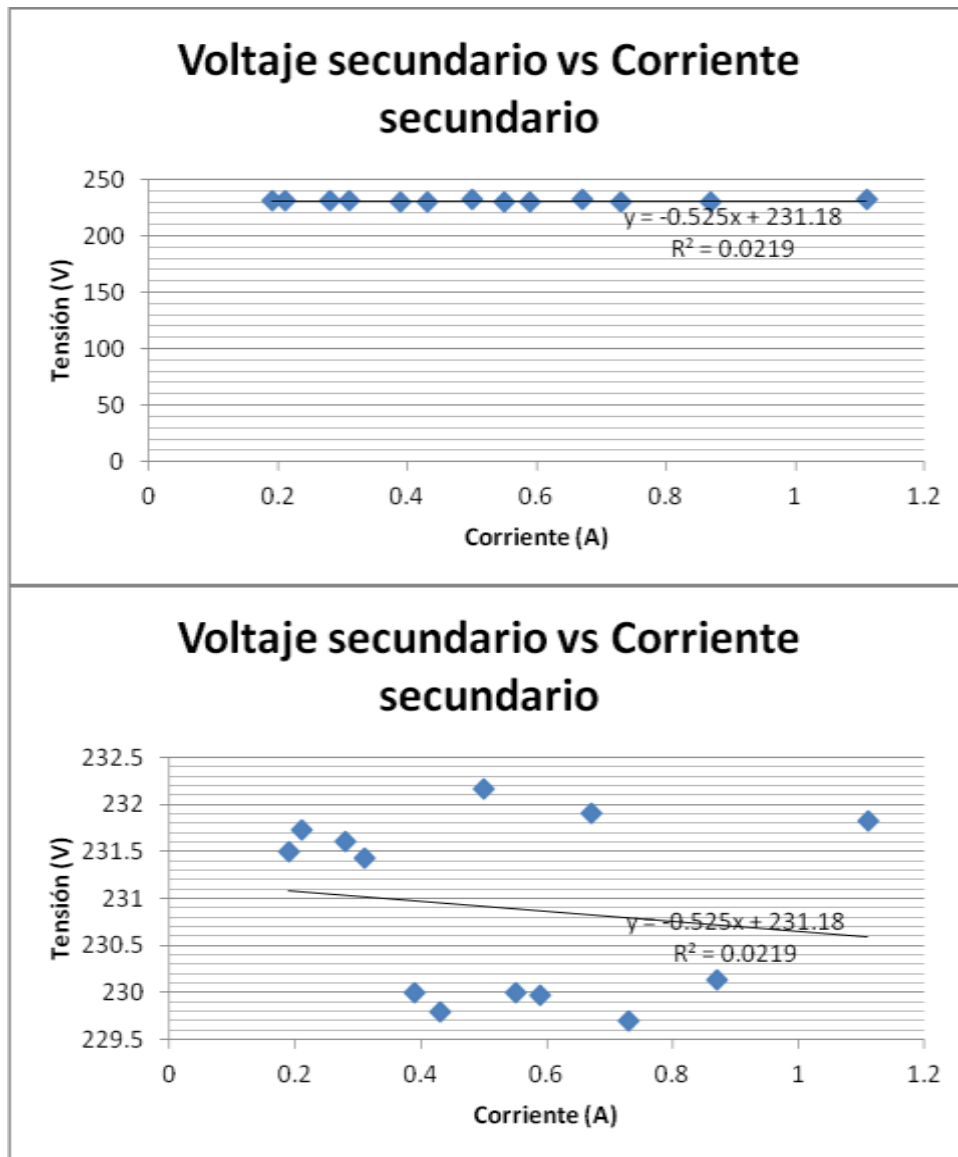


Figura 18. Voltaje secundario vs. Corriente secundario para carga resistiva en estrella.

Fuente: Ficha de registro y cálculos de datos.

### **Análisis de la Regulación del transformador trifásico con Carga resistiva en conexión Estrella.**

Según la figura 18 se evidencia que para la Carga resistiva con conexión Estrella, el transformador trifásico posee una tensión máxima de 231.1V y una tensión mínima de 230.15V. Lo que se infiere es que a pesar que la corriente varía desde 0.19A a 1.11A, la tensión en el secundario solo varía en 0.95V.

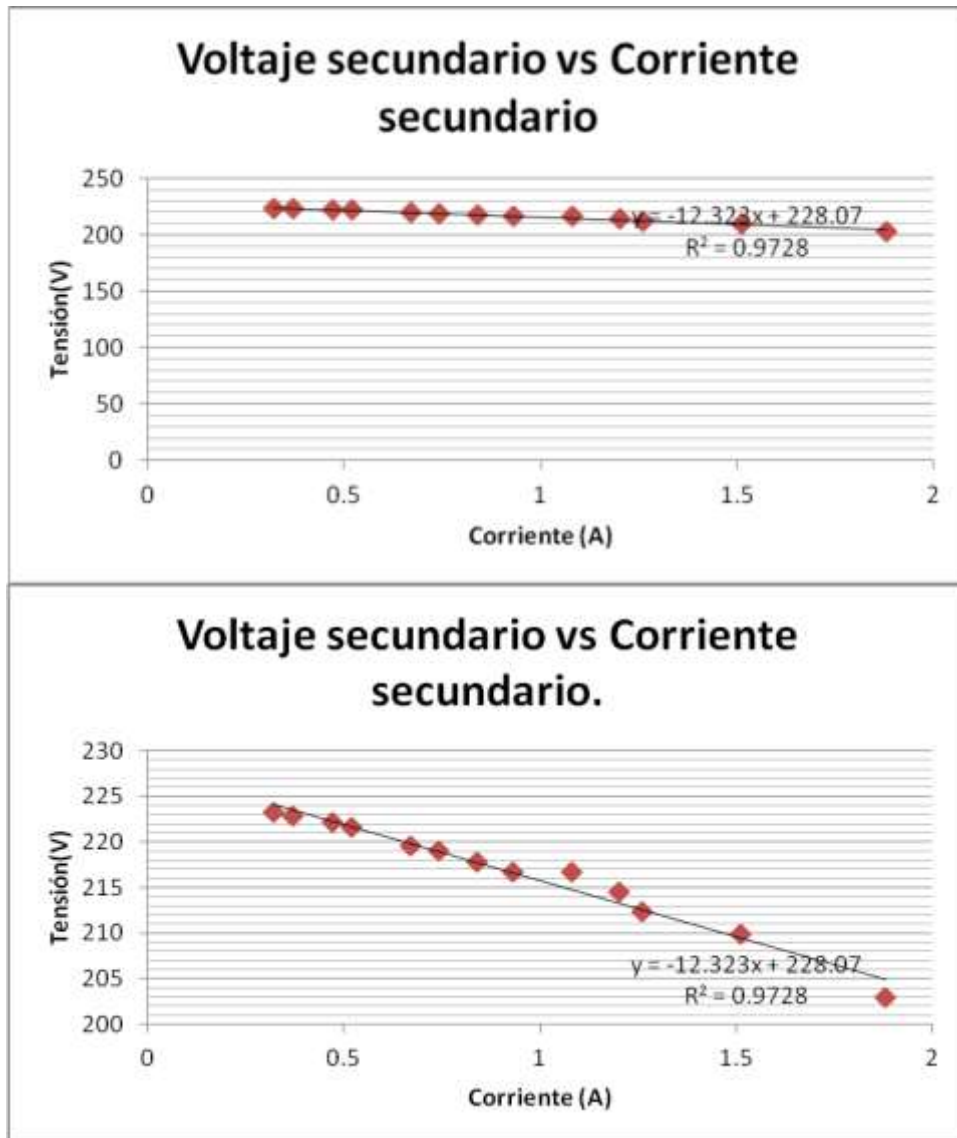


Figura 19. Voltaje secundario vs. Corriente secundario para carga resistiva en delta.

Fuente: Ficha de registro y cálculos de datos.

### **Análisis de la Regulación del transformador trifásico con Carga resistiva en conexión Delta.**

Según la figura 19 se evidencia que para la Carga resistiva con conexión Delta, el transformador trifásico posee una tensión máxima de 224V y una tensión mínima de 205V. Lo que se infiere es que mientras la corriente varía desde 0.32A a 1.88A, la tensión en el secundario varía en 19V, observándose una variación significativa de la tensión.



**Tabla 10***Regulación en cargas inductivas según su conexión*

| Carga |                   | Regulación de la Carga Inductiva |                        |                        |                        |
|-------|-------------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|       |                   | Conexión Estrella                |                        | Conexión Delta         |                        |
| L     | Z<br>( $\Omega$ ) | I<br>secundario<br>(A)           | V<br>secundario<br>(V) | I<br>secundario<br>(A) | V<br>secundario<br>(V) |
| L1    | 452               | 0.29                             | 223.6                  | 0.85                   | 213.5                  |
| L2    | 603               | 0.22                             | 224.87                 | 0.65                   | 219.17                 |
| L3    | 754               | 0.18                             | 226                    | 0.53                   | 221.43                 |
| L4    | 905               | 0.15                             | 226.23                 | 0.44                   | 221.2                  |
| L5    | 1056              | 0.13                             | 227.3                  | 0.38                   | 223.67                 |
| L6    | 1206              | 0.12                             | 228.03                 | 0.33                   | 224.83                 |

*Nota:* Adaptado de la Ficha de registro y cálculos de datos.

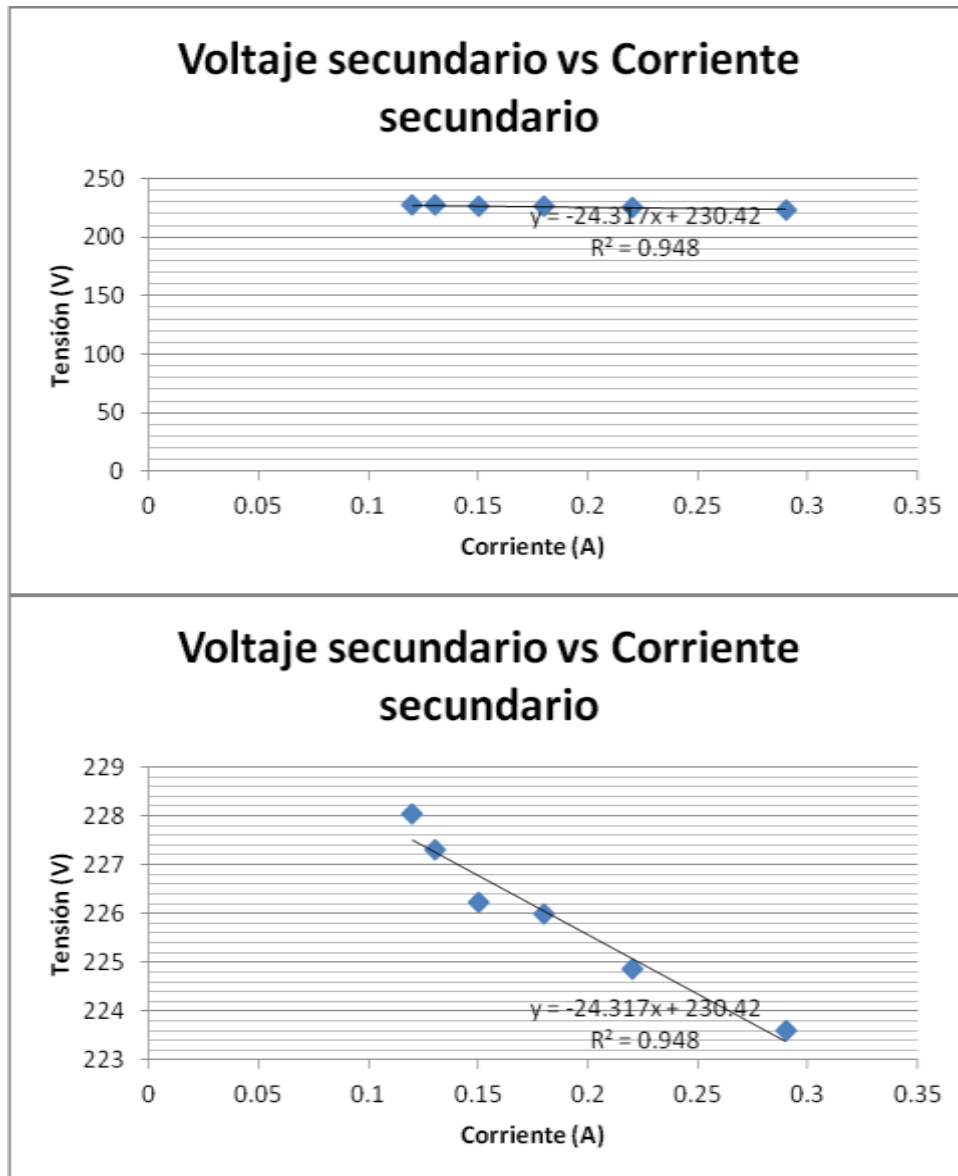


Figura 20. Voltaje secundario vs. Corriente secundario para carga inductiva en estrella.

Fuente: Ficha de registro y cálculos de datos.

### **Análisis de la Regulación del transformador trifásico con Carga inductiva en conexión Estrella.**

Según la figura 20 se evidencia que para la Carga inductiva con conexión Estrella, el transformador trifásico posee una tensión máxima de 227.5V y una tensión mínima de 223.4V. Lo que se infiere es que mientras la corriente varía desde 0.12A a 0.29A, la tensión en el secundario varía en 4.1V, observándose una variación de la tensión.

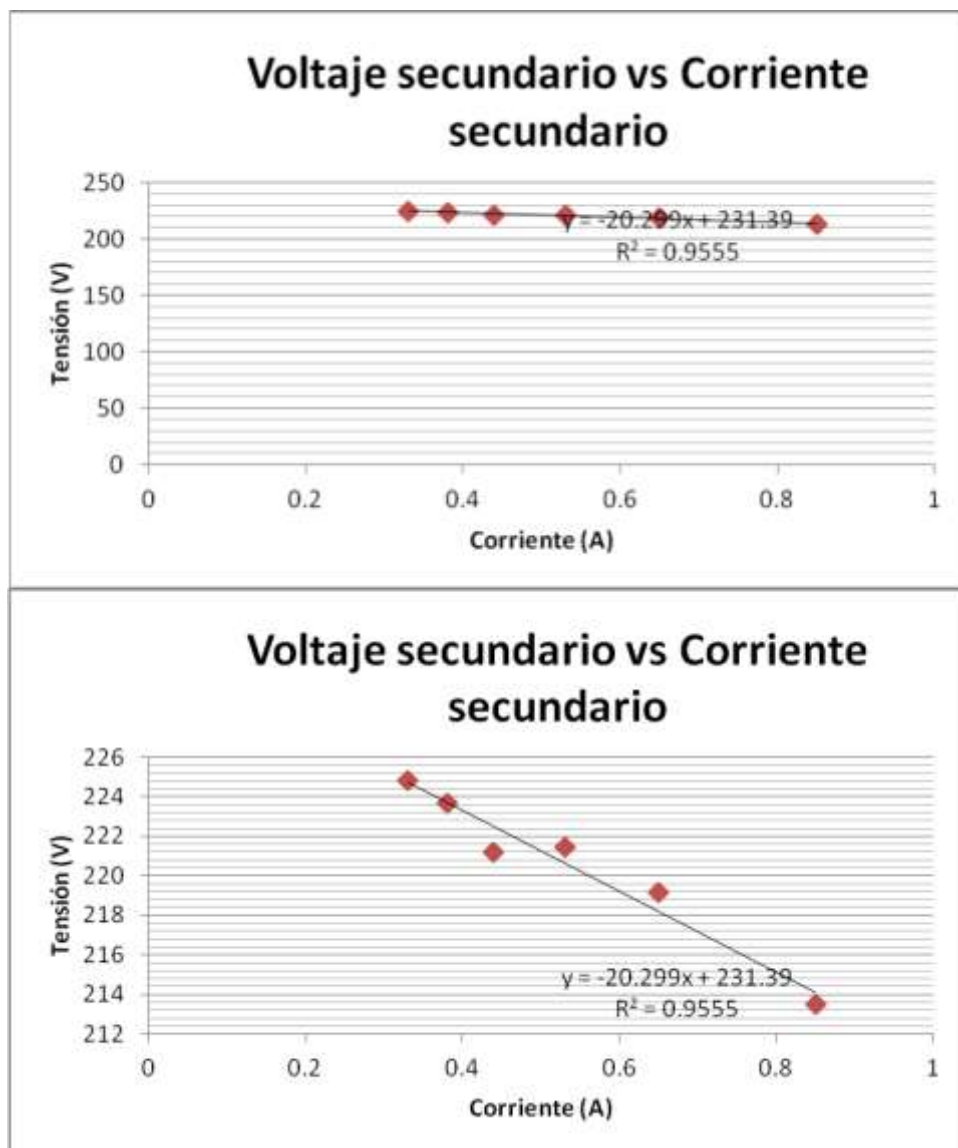


Figura 21. Voltaje secundario vs. Corriente secundario para carga inductiva en delta.

Fuente: Ficha de registro y cálculos de datos.

### **Análisis de la Regulación del transformador trifásico con Carga inductiva en conexión Delta.**

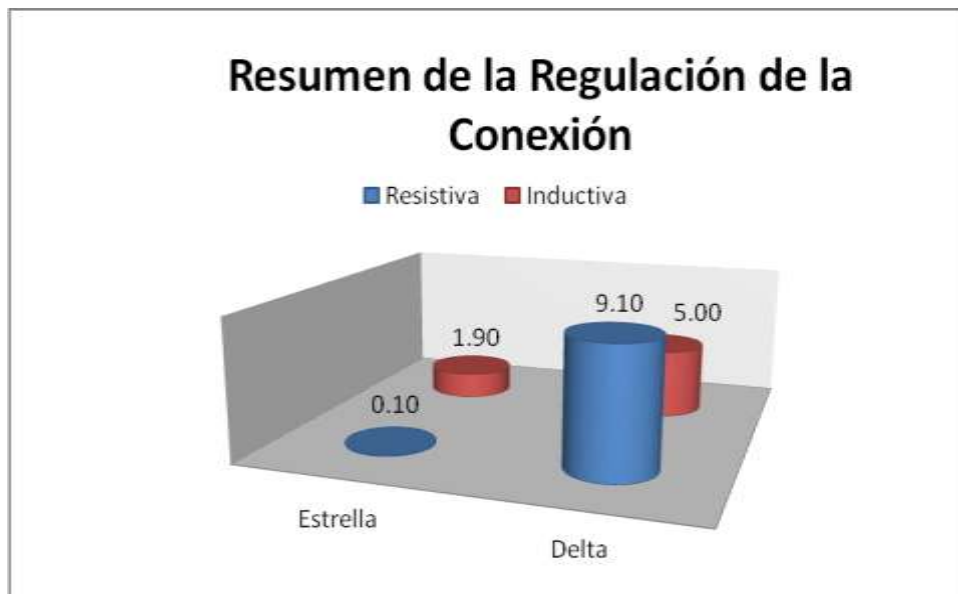
Según la figura 21 se evidencia que para la Carga inductiva con conexión Delta, el transformador trifásico posee una tensión máxima de 224.4V y una tensión mínima de 214V. Lo que se infiere es que mientras la corriente varía desde 0.33A a 0.85A, la tensión en el secundario varía en 10.4V, observándose una variación significativa de la tensión.

**Tabla 11**

*Resumen de la Regulación del transformador trifásico en cargas Resistivas e Inductivas*

| Carga      | Resumen de Regulación de la Conexión |                             |
|------------|--------------------------------------|-----------------------------|
|            | VR<br>Conexión Estrella<br>(%)       | VR<br>Conexión Delta<br>(%) |
| Resistiva  | 0.10                                 | 9.10                        |
| Inductiva  | 1.90                                 | 5.00                        |
| Media      |                                      |                             |
| Aritmética | 1.00                                 | 7.05                        |

*Nota:* Basado en la Ficha de registro y cálculos de datos.



*Figura 22.* Regulación del transformador trifásico para cargas resistivas e inductivas.

Fuente: Ficha de registro y cálculos de datos.

### **Análisis de la Regulación del transformador trifásico en cargas Resistivas e Inductivas**

Según la figura 22 se evidencia que la conexión de la carga en Delta posee una regulación máxima de 9.1% y 5% para cargas resistivas e inductivas respectivamente, en el transformador trifásico. Así mismo la regulación menor se da para la conexión Estrella.

### 3.5. Prueba de hipótesis por la conexión de cargas sobre la eficiencia

#### 3.5.1. Prueba de hipótesis por la conexión de carga resistiva sobre la eficiencia

**Tabla 12**

*Prueba de hipótesis de las medias obtenidas por la Conexión de carga Resistiva transformador trifásico sobre la variable Eficiencia*

| Prueba de comparación de medias | Prueba T – Student |               |                        | Decisión     |
|---------------------------------|--------------------|---------------|------------------------|--------------|
|                                 | Valor              | Probabilidad  | Nivel de significancia |              |
|                                 | observado          | significancia |                        | $p < \alpha$ |
| $H_0 : \mu_e = \mu_c$           | $t_0 = 1.72$       | $p = 0,49$    | $\alpha = 0,05$        | Se acepta    |
| $H_a : \mu_e > \mu_c$           |                    |               |                        | $H_0$        |

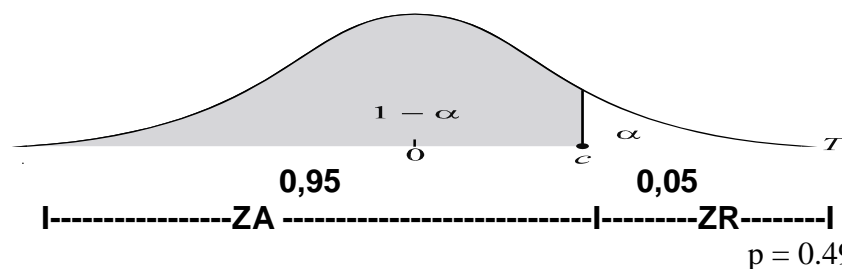
*Nota:* Basado en el Banco de datos.

#### Análisis

En la presente tabla se muestra la prueba de hipótesis para la comparación de porcentaje promedio obtenido por las cargas resistivas de la conexión estrella y delta, después de aplicar las pruebas de ingeniería basado en vacío, cortocircuito y cargas balanceadas.

En la comparación de puntajes promedio sobre eficiencia para carga resistiva, se reflejó muy bajo incremento del promedio de la conexión delta (73.96) % respecto al promedio de la conexión estrella (73.91) %, diferencia validada mediante la Prueba *T – Student*, al obtener una evidencia suficiente de los datos para generar probabilidad de no significancia experimental ( $p = 0,49$ ) mayor que el nivel de significancia fijado ( $\alpha = 0,05$ ), aceptando la  $H_0$  y rechazando  $H_a$ .

*Esto significa que el tipo de conexión trifásica para cargas resistivas balanceadas no mejoró en forma significativa la eficiencia, en el transformador trifásico, con niveles de confianza del 95%.*



*Figura 23.* Prueba T-Student para la eficiencia con carga resistiva. Basado en el Banco de datos.

### 3.5.2. Prueba de hipótesis por la conexión de carga inductiva sobre la eficiencia

**Tabla 13**

*Prueba de hipótesis de las medias obtenidas por la Conexión de carga Inductiva transformador trifásico sobre la variable Eficiencia*

| Prueba de comparación de medias                | Prueba T - Student |                               | Nivel de significancia $\alpha$ | Decisión                         |
|--|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|  | Valor observado    | Probabilidad de significancia |                                 |                                  |
| $H_0 : \mu_e = \mu_c$<br>$H_a : \mu_e > \mu_c$ | $t_0 = 1.86$       | $p = 0,000037$                | $\alpha = 0,05$                 | $p < \alpha$<br>Se rechaza $H_0$ |

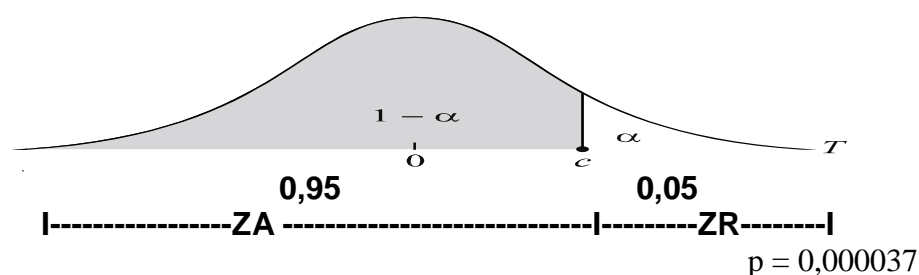
*Nota:* Basado en el Banco de datos.

#### Análisis

En la presente tabla se muestra la prueba de hipótesis para la comparación de porcentaje promedio obtenido por las cargas inductivas de la conexión estrella y delta, después de aplicar las pruebas de ingeniería basado en vacío, cortocircuito y cargas balanceadas.

En la comparación de puntajes promedio sobre eficiencia para carga inductiva, se reflejó un incremento significativo del promedio de la conexión delta (59.19) % respecto al promedio de la conexión estrella (33.32) %, diferencia validada mediante la Prueba *T - Student*, al obtener una evidencia suficiente de los datos para generar probabilidad de significancia experimental ( $p = 0,000037$ ) menor que el nivel de significancia fijado ( $\alpha = 0,05$ ), rechazando la  $H_0$  y aceptando  $H_a$ .

*Esto significa que el tipo de conexión trifásica para cargas inductivas balanceadas mejoró en forma significativa la eficiencia, en el transformador trifásico, con niveles de confianza del 95%.*



*Figura 24.* Prueba T-Student para la eficiencia con carga inductiva. Basado en la Ficha de registro y cálculos de datos.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los resultados encontrados plantean el siguiente panorama: en términos generales, con las conexiones de cargas trifásicas, la hipótesis propuesta, respecto a la variable eficiencia, sólo para cargas inductivas, se acepta; en efecto, el valor de  $p= 0,000037$ , inferior a 0,05, es lo suficientemente baja que nos conduce a aceptar la hipótesis de investigación en cargas inductivas. Asimismo, la hipótesis, con respecto a la variable regulación para cargas resistivas e inductivas, se acepta en su totalidad, es decir, la conexión Delta posee una media de 7.5% en su regulación, respecto a la conexión Estrella que obtiene una media de solo 1%, lo que nos conduce a aceptar la hipótesis de investigación. Esto implica que el tipo de conexión y carga influyó en la eficiencia y regulación del transformador trifásico de la muestra de estudio.

El análisis de los resultados amerita presentarlo en detalle. Por una parte, como se puede observar en los resultados organizados en la Tabla 7, con respecto a la variable *Eficiencia*, el transformador trifásico con carga resistiva en conexión delta obtiene una media de 73.96%; en consecuencia, se aprecia un adelanto no significativo, es decir, una ganancia de 0.05 puntos, en comparación con los resultados de la carga resistiva en estrella que logra una media de 73.91%. Por otra parte, como se observa en los resultados organizados en la Tabla 8, con respecto a la misma variable *Eficiencia*, el transformador trifásico con carga inductiva en conexión delta obtiene una media de 59.19%; en consecuencia, se aprecia un adelanto significativo con una ganancia de 25.87 puntos, en comparación con los resultados de la carga inductiva en estrella que logra una media de 33.32%.

Estos resultados demuestran que la carga inductiva con conexión delta logra un progreso importante de eficiencia. Además, como se puede observar en los resultados organizados en la Tabla 11, con respecto a la variable *Regulación*, la conexión en Delta para cargas resistivas e inductivas obtienen, una media de 7.5%; en consecuencia, se aprecia un adelanto significativo, es decir, una ganancia de 6.05 puntos, en comparación con los resultados de la conexión Estrella que logra una media de 1%. Estos resultados



demuestran que la conexión de carga en Delta logra un margen importante de regulación, es decir la conexión Estrella es más estable para cargas resistivas e inductivas.

Ahora bien, los resultados obtenidos en el transformador trifásico, determinó que las pérdidas en el núcleo del transformador en línea, mediante la prueba de vacío fue de 28.07 W con una corriente de 0.9 A, que permitió determinar la pérdida en el núcleo para un devanado en un valor 11.16 W; y las pérdidas en el cobre de un devanado, a partir de la prueba de cortocircuito fue 12.07 W con una voltaje de 12.03 V, lo cual se fundamenta por Sanjurjo (1989), quien para transformadores trifásicos de similar relación de transformación señala para la prueba en vacío una corriente de 0.1 A, y para la prueba en cortocircuito un voltaje de 9 V. Asimismo, estos resultados se asemejan al estudio de Iturralde y Moscoso (2012), que sostienen que la prueba en vacío determina la calidad del acero al carbono del núcleo de un transformador. Lo cual es corroborado por Segura (2014), al advertir que para el diseño del transformador es importante las pérdidas suplementarias (corrientes parásitas) para que el calentamiento del equipo no exceda el valor previsto en la garantía. Y confirmado por Iparraguirre (1986), al señalar que sobre la eficiencia del transformador es importante mantener, las pérdidas en el núcleo tan bajas como sea posible, usando materiales magnéticos de alto grado. Además, es preciso advertir lo que Chapman (2005) y Fraile (2008), desde la perspectiva conceptual el primero precisa que existen tres tipos de pérdidas en los transformadores, de los cuales dos se dan en el núcleo, como son las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes parásitas, y uno solo en el cobre; mientras que el segundo desde el punto de vista físico, señala que una máquina tiene un circuito eléctrico, donde se producen pérdidas por efecto Joule -pérdidas en el cobre-, y los arrollamientos se colocan en una estructura magnética, que debido a los campos magnéticos variables presentan unas pérdidas en el hierro.

Igualmente, es necesario resaltar los hallazgo de Morán (2013), y Antonio y Díaz (2008), el primero sostiene que los transformadores son maquinas con mayor porcentaje de eficiencia en los sistemas de distribución de energía eléctrica; y los segundos concluyen que para determinar la eficiencia del transformador se debe conocer la potencia absorbida por el primario, potencia cedida por el secundario, pérdidas en el hierro y pérdidas por efecto Joule. En efecto algunos autores teorizan sobre la eficiencia de los transformadores trifásicos. En ese sentido Chapman (2005), precisa que la

eficiencia del transformador es la potencia de salida entre a potencia de entrada, donde para calcular la eficiencia de un transformador en una carga dada, adicione las pérdidas en el núcleo y en el cobre. En consecuencia nuestros resultados cobran importancia con respecto a la eficiencia de transformadores trifásicos, en concordancia con el estudio de Ramos (1990), que señala que una eficiente fabricación de los arrollamientos y correcto montaje y conexionado han permitido obtener excelentes resultados.

Ahora bien, es preciso destacar que nuestros resultados, basados en una metodología también se asemejan a los hallazgos de Jiménez, Pérez y Santos (2009) dado que admite que es de importancia una metodología de pruebas para Transformadores de Potencia para evitar pérdidas, fallas en sistemas eléctricos, pues aseguramos un correcto funcionamiento y larga vida útil. En consecuencia el diseño e implementación de pruebas de ingeniería basado en vacío, cortocircuito y cargas balanceadas es una estrategia que adoptado por los investigadores permite que los tipos de carga y conexión cualifiquen sus valores porcentuales en la eficiencia y regulación de transformadores trifásicos.

## CONCLUSIONES

### General

El tipo de conexión trifásica de cargas inductivas, mediante la aplicación de Pruebas de ingeniería basado en vacío, cortocircuito y cargas balanceadas, incrementó significativamente la eficiencia ( $p=0,000037$ , inferior al nivel de significancia 0.05), rechazando la  $H_0$  y aceptando la  $H_a$ ; esto significa que el tipo de conexión trifásica para cargas inductivas balanceadas *mejoró en forma significativa la eficiencia, en el transformador trifásico*. Así mismo, el tipo de conexión trifásica de cargas resistivas, mediante la aplicación de Pruebas de ingeniería, no incrementó significativamente (solo ligeramente mayor) la eficiencia ( $p=0,49$ , superior al nivel de significancia 0.05), aceptando la  $H_0$  y rechazando  $H_a$ ; *esto significa que el tipo de conexión trifásica para cargas resistivas balanceadas no mejoró en forma significativa la eficiencia, en el transformador trifásico*. El tipo de conexión trifásica de cargas inductivas, mediante la aplicación de Pruebas de ingeniería, incrementó la regulación (conexión Delta posee 5%, respecto a la Estrella con 1.90%) del transformador trifásico; *en consecuencia, nuestra hipótesis de investigación para cargas inductivas fue confirmada para la variable regulación*. De igual forma, el tipo de conexión trifásica de cargas resistivas, mediante la aplicación de Pruebas de ingeniería, incrementó la regulación (conexión *estrella* posee 0.10%, respecto a la *delta* con 9.10%) en el transformador trifásico; *en consecuencia, nuestra hipótesis de investigación para cargas resistivas fue confirmada para la variable regulación*.

### Específicos

Se identificó que los tipos de carga trifásica balanceada son los resistivos e inductivos para conexiones en estrella y delta, dado que las industrias utilizan hornos y motores eléctricos.

Se determinó que las cargas resistivas trifásicas para el transformador trifásico, son: 120 $\Omega$ , 150 $\Omega$ , 180 $\Omega$ , 200 $\Omega$ , 220 $\Omega$ , 240 $\Omega$ , 270 $\Omega$ , 310 $\Omega$ , 340 $\Omega$ , 440 $\Omega$ , 490 $\Omega$ , 630 $\Omega$  y 730 $\Omega$ ; así mismo, las cargas inductivas trifásicas de 1.2H, 1.6H, 2H, 2.4H, 2.8H y 3.2H. Ambos tipos de carga se conectaron en forma balanceada para los dos tipos de conexión trifásica.

En el diagnóstico de las pérdidas en el transformador trifásico, se determinó que las pérdidas en el núcleo del transformador en línea y devanado, mediante la prueba de vacío, fueron de 28.07W y 11.16 W respectivamente; y las pérdidas en el cobre de un devanado, a partir de la prueba de cortocircuito, es de 12.07W; en consecuencia, se observa que las pérdidas en el devanado del transformador es de 23.67 W y del transformador total de 71.1 W.

Se determinó que la eficiencia media del transformador trifásico para cargas resistivas en conexión *estrella* y *delta* fueron, de 73,91% y 73.96%; y para cargas inductivas en conexión *estrella* y *delta* fueron, de 33,32% y 59.19% respectivamente. En consecuencia, se observa que la carga resistiva de mayor eficiencia fue la conexión *delta* con 73,96%, y para la carga inductiva de mayor eficiencia fue la conexión *delta* con 59.19%. Se determinó que la regulación del transformador trifásico para cargas resistivas en conexión *delta* y *estrella* fueron, de 9.10% y 0.10%; y para cargas inductivas en conexión *delta* y *estrella* fueron, de 5% y 1.90% respectivamente. En consecuencia, se observa que la carga resistiva de mayor regulación fue la conexión *delta* con 9.10%, que coincide con la carga inductiva, en términos de mayor regulación en la conexión *delta* con 5%.

## RECOMENDACIONES

Aplicar cargas capacitivas trifásicas balanceadas, además de las cargas resistivas e inductivas para realizar un análisis integral en la eficiencia y regulación de los transformadores trifásicos. Asimismo, se podría hacer un análisis en cargas no balanceadas para los distintos tipos de carga.

Para un mejor análisis de la regulación de voltaje con cargas inductivas en el transformador trifásico, se recomienda adquirir inductores variables de menor inductancia y mayor corriente nominal.

Aplicar las pruebas de ingeniería a transformadores trifásicos con otros tipos de conexión en sus devanados primario y secundario, para determinar sus pérdidas y poderlas comparar con respecto a su eficiencia y regulación.

Replicar la presente investigación en otros transformadores trifásicos, para lograr una mayor confiabilidad de los resultados en cuanto de los efectos de las pruebas de ingeniería basado en el vacío, cortocircuito y cargas resistivas, experimentado en el presente estudio. Asimismo, se deben aplicar pruebas de ingeniería, a fin de mejorar la eficiencia de las diferentes máquinas eléctricas que se utilizan en las redes de distribución eléctrica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antonio, R. & Díaz, J. (2008). *Optimización aplicada al diseño y cálculo de un transformador de distribución*. (Tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional. Recuperado el 05 de setiembre de 2017, desde <http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/1478/1/OPTAPLICADADISENO.pdf>
- Chapman, S. J. (2005). *Máquinas Eléctricas*. (4a ed.). México, México: Mc Graw Hill.
- Corrales, J. (1999). *Pruebas para instalación, puesta en servicio, operación y mantenimiento de transformadores de potencia*. (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 05 de setiembre de 2017, desde <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6196>
- Córcoles, F., Pedra, J. & Salichs, M. (1996). *Transformadores*. (1a ed.). Barcelona, España: Edicions UPC.
- Fraile, J. (2008). *Máquinas eléctricas*. (6a ed.). Madrid: Mc Graw Hill.
- Gómez, A., Martínez, J., Rosendo, J., Romero, E. & Riquelme, J. (2003). *Sistemas eléctricos de potencia, Problemas y ejercicios resueltos*. Madrid, España: Prentice Hall.
- Harper, G. E. (1989). *El ABC de las Máquinas Eléctricas - I Transformadores*. (1a ed.). México, México: Limusa.
- Hayt, W. & Kemmerly, J. (2012). *Análisis de circuitos en Ingeniería*. 8a. ed. México: Mc Graw Hill.
- Hidrandina (s.f.), *Plan estratégico de Hidrandina 2013-2017*. Chimbote. Recuperado el 22 de setiembre de 2017, desde [http://www.distriluz.com.pe/osinerg/ftp/hdna/Transp2/010109\\_2008\\_T4\\_1.pdf](http://www.distriluz.com.pe/osinerg/ftp/hdna/Transp2/010109_2008_T4_1.pdf)
- Iparraguirre, L. (1986). *Diseño de un transformador de distribución de 800 KVA 10/0.44 KV de mínimo precio financiero*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado el 05 de setiembre de 2017, desde [http://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI\\_8b608a4e9d87bdc758e79af208999514](http://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_8b608a4e9d87bdc758e79af208999514)

- Iturralde, J. & Moscoso, D. (2012). *Diseño de un módulo de pruebas de pérdidas en vacío y cortocircuito de transformadores monofásicos de distribución y potencias de hasta 25KVA*. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Cotopaxi. Recuperado el 06 de setiembre de 2017, desde <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1270>
- Jiménez, J., Pérez, J. & Santos, J. (2008). *Metodología para pruebas de campo a transformadores de potencia mayores a 1 MVA*. (Tesis de pregrado). Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica. Recuperado el 04 de setiembre de 2017, desde <http://tesis.ipn.mx/jspui/handle/123456789/5477>
- Lino, A. (2017). *Implementación de un modulo didáctico de transformadores trifásicos de 3KVA para conexiones especiales*. (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Santa María. Recuperado el 06 de setiembre de 2017, desde [http://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM\\_305051dc6e082b92337f87d3bb1f861c](http://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCSM_305051dc6e082b92337f87d3bb1f861c)
- Maguiña, L. (2016). *Diseño de un regulador automático LMV, en suministros de baja tensión según la norma NTCSE*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional del Callao. Recuperado el 06 de setiembre de 2017, desde <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/1749>
- Morán, C. (2013). *Descripción, selección y aplicación de los transformadores eléctricos*. (Tesis de pregrado). Universidad nacional autónoma de México. Recuperado el 04 de setiembre de 2017, desde <http://avalon.cuautitlan2.unam.mx/biblioteca/tesis/754.pdf>
- Ramos, J. (1990). *Control de calidad de un transformador de potencia de 7 MVA con conmutación y regulación de tensión bajo carga*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado el 06 de setiembre de 2017, desde <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2257>
- Sanjurjo, R. (1989). *Máquinas eléctricas*. Madrid: Mc Graw Hill.

Segura, A. (2014). *Criterios para elaborar el proyecto eléctrico y selección del transformador de aislamiento en agencias bancarias*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado el 05 de setiembre de 2017, desde

<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/4525>

SUNEDU. (6 de setiembre de 2016) Artículo 10 [Capítulo III]. Reglamento RENATI [Resolución N° 033-2016]. DO: 598706. Recuperado el 21 de setiembre de 2017, desde

<http://busquedas.elperuano.com.pe/normaslegales/aprueban-reglamento-del-registro-nacional-de-trabajos-de-inv-resolucion-no-033-2016-suneducd-1425605-1/>

Weedy, B. et al. (2012). *Sistemas eléctricos de gran potencia*. (5a ed.). Reino Unido: Wiley.

Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. (6a ed.). México, México: Pearson.



# ANEXOS Y APÉNDICES

## ANEXO N° 01

### BANCO DE DATOS

#### 1.1 Banco de Datos de la Eficiencia para carga Resistiva

| Resistor<br>(Ohmios) | Conexión<br>Estrella | Conexión<br>Delta |
|----------------------|----------------------|-------------------|
| 120                  | 87.89                | 85.65             |
| 150                  | 85.36                | 84.59             |
| 180                  | 83.16                | 82.79             |
| 200                  | 82.18                | 82.30             |
| 220                  | 80.22                | 81.13             |
| 240                  | 79.11                | 78.86             |
| 270                  | 77.75                | 77.30             |
| 310                  | 74.93                | 75.17             |
| 340                  | 73.10                | 73.37             |
| 440                  | 68.48                | 68.37             |
| 490                  | 66.26                | 66.15             |
| 630                  | 59.51                | 60.61             |
| 730                  | 56.93                | 56.84             |

*Nota:* Adaptado de la Ficha de registro y cálculos de datos.

## 1.2 Banco de Datos de la Eficiencia para carga Inductiva

| Inductor<br>(Henrys) | Conexión<br>Estrella | Conexión<br>Delta |
|----------------------|----------------------|-------------------|
| 1.2                  | 47.29                | 70.86             |
| 1.6                  | 40.85                | 66.64             |
| 2.0                  | 36.37                | 62.79             |
| 2.4                  | 32.28                | 58.64             |
| 2.8                  | 29.34                | 55.57             |
| 3.2                  | 27.76                | 52.33             |

*Nota:* Adaptado de la Ficha de registro y cálculos de datos.

## ANEXO N° 02

# PRUEBAS DE INGENIERÍA

## (Ensayo de transformadores)

### 1. Título

Pruebas de ingeniería basado en vacío, cortocircuito y cargas balanceadas para obtener la eficiencia y regulación de transformadores trifásicos.

### 2. Objetivos

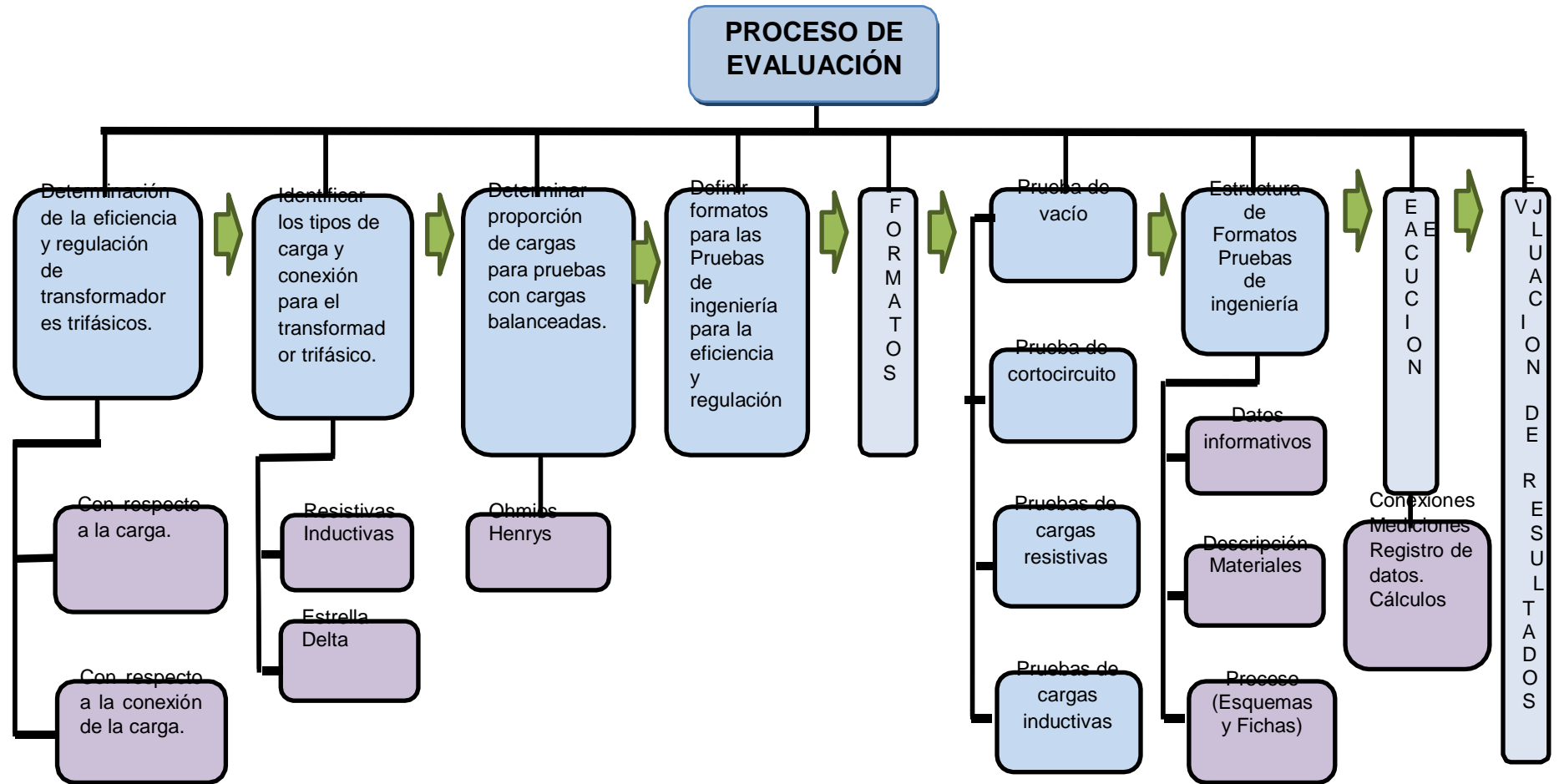
#### **Objetivo general:**

Contribuir a la obtención de la eficiencia y regulación de transformadores trifásicos,

#### **Objetivos específicos:**

1. Determinar la eficiencia del transformador trifásico en relación con la carga.
2. Determinar la eficiencia del transformador trifásico en relación con la conexión.
3. Determinar la regulación del transformador trifásico en relación con la carga.
4. Determinar la regulación del transformador trifásico en relación con la conexión.

### 3. Diseño



Diseño metodológico de las Pruebas de ingeniería.

#### **4. Descripción del diseño.**

##### **a) Determinación de la eficiencia y regulación de transformadores trifásicos.**

Para determinar la eficiencia y regulación de transformadores trifásicos se coordinó con el ingeniero y asesor del proyecto para poder aplicar las pruebas de ingeniería.

##### **b) Búsqueda de la información pertinente.**

Consistió en la revisión de la bibliografía especializada y la consulta a expertos sobre las bases teórico-científicas de la investigación.

##### **c) Propuesta de pruebas de ingeniería.**

Las pruebas de ingeniería tuvieron por finalidad aplicar las estrategias metodológicas sobre vacío, cortocircuito y cargas balanceadas respectivamente, según la Norma IEC 60076-1 para la clasificación de Pruebas eléctricas de rutina que se realizan a todos los transformadores  $\leq$  a 5 kVA como son pruebas de resistencia, tensión inducida, vacío cortocircuito y tensión aplicada. Por lo expuesto, se propone las siguientes pruebas:

.N° 01:

Prueba de vacío

N° 02:

Prueba de cortocircuito.

N° 03:

Prueba de cargas resistivas.

N° 04:

Prueba de cargas inductivas.

#### **5. Monitoreo y evaluación de la propuesta.**

El proceso del monitoreo entendido como el recojo de la información sobre los logros y dificultades de la ejecución de las pruebas de ingeniería nos permitió constatar y reorientar las actividades desarrolladas en el transformador trifásico a través de los *Formatos de Pruebas de ingeniería* para lograr los objetivos que nos hemos propuesto.

## 2.1 Formatos de Pruebas de ingeniería.

### Formato de Prueba de ingeniería N° 01

#### I. DATOS INFORMATIVOS

- 1.1. Centro de práctica: Campus UNS    1.3. Ambiente físico: Laboratorio Máquinas eléctricas    1.5. Fecha: 24/01/18  
 1.2. Norma: IEC 60076-1    1.4. Título: **“Prueba de vacío”**    1.6. Investigador: Nicolas Diestra Sánchez

#### II. DESCRIPCIÓN

| COMPETENCIA                            | CONOCIMIENTOS                                       | INDICADORES DE CONTROL   | INSTRUMENTO                    |
|--|---|--|--------------------------------|
| -Determinar las pérdidas en el núcleo. | -Transformadores trifásicos.<br>- Pruebas de vacío. | - Voltaje de entrada.<br>- Pérdidas en el núcleo.<br>- Corriente en el primario. | -Ficha de registro y cálculos. |
|  |   |  |                                |

#### II. MATERIALES

- 01 Transformador trifásico 1200 VA, 400V, a=1/1, Y-D.
- 01 Banco de pruebas.
- 01 Vatímetro.
- 01 Multímetro Digital.
- 01 Pinza amperimétrica.
- Conectores varios.

### III. PROCEDIMIENTO

Monta el circuito de la figura. Preocúpate en conectar los instrumentos correctamente, especialmente el vatímetro. Con el secundario abierto en vacío, realiza lo siguiente:

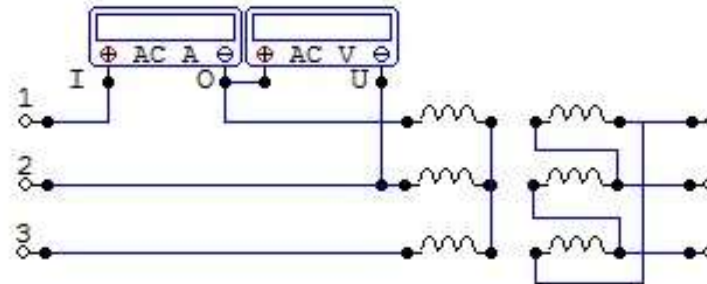


Figura 1. Esquema de conexiones para prueba de vacío.

1. Conecta los terminales 1, 2 y 3 a una fuente trifásica de corriente alterna para la tensión nominal, en este caso 400 V.
2. Mide la potencia activa absorbida por la lectura del vatímetro y registra.
3. Mide la tensión en el primario con la ayuda de un voltímetro y anota.
4. Mide la corriente en el primario con el amperímetro y escribe.
5. Calcula la potencia aparente absorbida por el primario.
6. Utiliza la *Ficha de registro y cálculos 2.1* para calcular los parámetros de magnetización del transformador.

*Nota:* Elaboración propia. Figura esquematizada por el autor con CircuitMaker 2000 trial.

## Formato de Prueba de ingeniería N° 02

### I. DATOS INFORMATIVOS

1.1. Centro de práctica: Campus UNS      1.3. Ambiente físico: Laboratorio Máquinas eléctricas      1.5. Fecha: 24/01/18  
 1.2. Norma: IEC 60076-1      1.4. Título: **“Prueba de Cortocircuito”**      1.6. Investigador: Nicolas Diestra Sánchez

### II. DESCRIPCIÓN

| COMPETENCIA                           | CONOCIMIENTOS   | INDICADORES DE CONTROL  | INSTRUMENTO                     |
|---------------------------------------|---|---|---------------------------------|
| -Determinar las pérdidas en el cobre. | -Transformadores trifásicos.<br>- Pruebas de cortocircuito. | - Voltaje de cortocircuito.<br>- Potencia de cortocircuito.<br>- Resistencia del conductor en el primario y secundario. | - Ficha de registro y cálculos. |
|                                       |   |   |                                 |

### II. MATERIALES

- 01 Transformador trifásico 1200 VA, 400V, a=1/1, Y-D.
- 01 Variac trifásico.
- 01 Banco de pruebas.
- 01 Vatímetro.
- 01 Multímetro Digital.
- 01 Pinza amperimétrica.
- Conectores varios.



### III. PROCEDIMIENTO

Es posible conectar el amperímetro también en el secundario. La tensión inicial en el primario debe ser 0 V. Desconecta la fuente de tensión en el primario antes de colocar el amperímetro para medir la  $I_{cc}$  en el secundario.

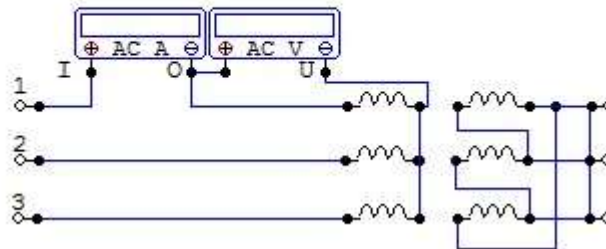


Figura 1. Esquema de conexiones para prueba de cortocircuito.

1. Con una fuente de voltaje de CA ajustable (variac), alimenta el primario del transformador como en la figura. Asegúrate de que la tensión de salida inicial de la fuente es de 0 V.
2. Aumenta gradualmente la tensión de la fuente de CA aplicada al primario hasta que la corriente indicada en el amperímetro sea la corriente nominal del transformador.
3. Anota los valores de  $P_{cc}$ ,  $V_{ccp}$  e  $I_n$  medidos.
4. Utiliza la *Ficha de registro y cálculos 2.1* para calcular los parámetros del conductor del transformador.

*Nota:* Elaboración propia. Figura esquematizada por el autor con CircuitMaker 2000 trial.

## Formato de Prueba de ingeniería N° 03

### I. DATOS INFORMATIVOS

1.1. Centro de práctica: Campus UNS      1.3. Ambiente físico: Laboratorio Máquinas eléctricas      1.5. Fecha: 25/01/18  
 1.2. Norma: IEC 60076-1      1.4. Título: **“Prueba de Cargas Resistivas”**      1.6. Investigador: Nicolas Diestra Sánchez

### II. DESCRIPCIÓN

| COMPETENCIA   | CONOCIMIENTOS  | INDICADORES DE CONTROL  | INSTRUMENTO                              |
|---|--|---|--|
| -Determinar la eficiencia y regulación con cargas resistivas balanceadas. | -Eficiencia y regulación de transformadores.<br><br>- Conexiones de cargas resistivas. | - Voltaje de salida.<br>- Corriente de salida.<br>- Factor de potencia. | - Ficha de registro y cálculos de datos. |
|   |  |   |  |

### II. MATERIALES

- 01 Transformador trifásico 1200 VA, 400V, a=1/1, Y-D.
- 01 Banco de pruebas.
- 01 Resistencia variables (reóstato hasta 1.8 A)
- 01 Vatímetro.
- 01 Multímetro Digital.
- 01 Pinza amperimétrica.
- Conectores varios.

### III. PROCEDIMIENTO

A. Monta el circuito de la figura. Preocúpate en conectar los instrumentos correctamente, especialmente el vatímetro. Con el secundario conectado a cargas resistivas en estrella, realiza lo siguiente:

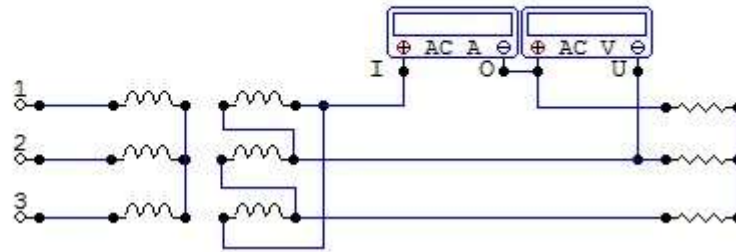


Figura 1. Esquema de conexiones para cargas resistivas en estrella.

1. Conecta los terminales 1, 2 y 3 a una fuente trifásica de corriente alterna para la tensión nominal, en este caso 400 V.
2. Mide la tensión de salida en el secundario con la ayuda de un voltímetro y registra.
3. Mide la corriente de salida en el secundario con el amperímetro y anota.
4. Mide el factor de potencia de salida y escribe.
5. Calcula la eficiencia y regulación para cargas resistivas en estrella.
6. Utiliza la *Ficha de registro y cálculos 2.2 y 2.4* para calcular la eficiencia y regulación del transformador con cargas resistivas en estrella.

B. Monta el circuito de la figura. Preocúpate en conectar los instrumentos correctamente, especialmente el vatímetro. Con el secundario conectado a cargas resistivas en delta, realiza lo siguiente:

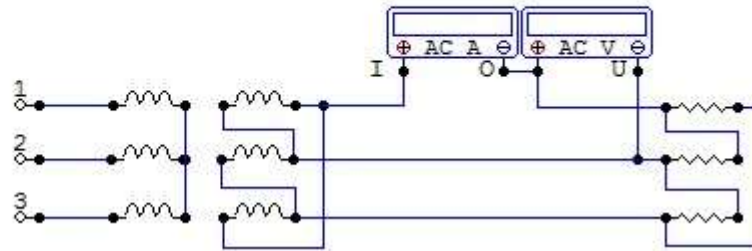


Figura 2. Esquema de conexiones para cargas resistivas en delta.

7. Conecta los terminales 1, 2 y 3 a una fuente trifásica de corriente alterna para la tensión nominal, en este caso 400 V.
8. Mide la tensión de salida en el secundario con la ayuda de un voltímetro y registra.
9. Mide la corriente de salida en el secundario con el amperímetro y anota.
10. Mide el factor de potencia de salida y escribe.
11. Calcula la eficiencia y regulación para cargas resistivas en delta.
12. Utiliza la *Ficha de registro y cálculos 2.2 y 2.4* para calcular la eficiencia y regulación del transformador con cargas resistivas en delta.

*Nota:* Elaboración propia. Figura esquematizada por el autor con CircuitMaker 2000 trial.

## Formato de Prueba de ingeniería N° 04

### I. DATOS INFORMATIVOS

1.1. Centro de práctica: Campus UNS      1.3. Ambiente físico: Laboratorio Máquinas eléctricas      1.5. Fecha: 26/01/18  
 1.2. Norma: IEC 60076-1      1.4. Título: **“Prueba de Cargas Inductivas”**      1.6. Investigador: Nicolas Diestra Sánchez

### II. DESCRIPCIÓN

| COMPETENCIA   | CONOCIMIENTOS  | INDICADORES DE CONTROL  | INSTRUMENTO                              |
|---|--|---|--|
| -Determinar la eficiencia y regulación con cargas inductivas balanceadas. | -Eficiencia y regulación de transformadores.<br>- Conexiones de cargas inductivas. | - Voltaje de salida.<br>- Corriente de salida.<br>- Factor de potencia. | - Ficha de registro y cálculos de datos. |
|   |  |   |  |

### II. MATERIALES

- 01 Transformador trifásico 1200 VA, 400V, a=1/1, Y-D.
- 01 Banco de pruebas.
- 01 Inductancia variables (hasta 0.65 A)
- 01 Vatímetro.
- 01 Multímetro Digital
- 01 Pinza amperítrica.
- Conectores varios.

### III. PROCEDIMIENTO

A. Monta el circuito de la figura. Preocúpate en conectar los instrumentos correctamente, especialmente el vatímetro. Con el secundario conectado a cargas inductivas en estrella, realiza lo siguiente:

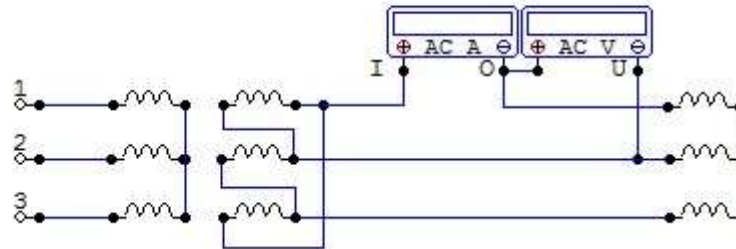


Figura 1. Esquema de conexiones para cargas inductivas en estrella.

1. Conecta los terminales 1, 2 y 3 a una fuente trifásica de corriente alterna para la tensión nominal, en este caso 400 V.
2. Mide la tensión de salida en el secundario con la ayuda de un voltímetro y registra.
3. Mide la corriente de salida en el secundario con el amperímetro y anota.
4. Mide el factor de potencia de salida y escribe.
5. Calcula la eficiencia y regulación para cargas inductivas en estrella.
6. Utiliza la *Ficha de registro* y cálculos 2.2 y 2.4 para calcular la eficiencia y regulación del transformador con cargas inductivas en estrella.

B. Monta el circuito de la figura. Preocúpate en conectar los instrumentos correctamente, especialmente el vatímetro. Con el secundario conectado a cargas inductivas en delta, realiza lo siguiente:

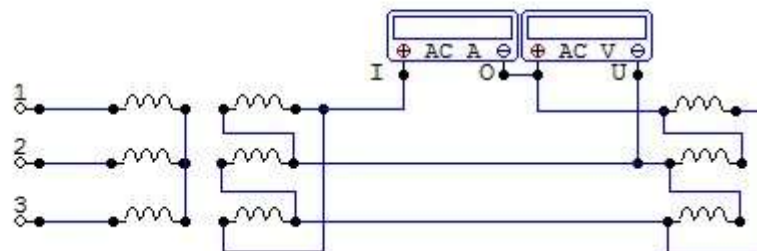


Figura 2. Esquema de conexiones para cargas inductivas en delta.

7. Conecta los terminales 1, 2 y 3 a una fuente trifásica de corriente alterna para la tensión nominal, en este caso 400 V.
8. Mide la tensión de salida en el secundario con la ayuda de un voltímetro y registra.
9. Mide la corriente de salida en el secundario con el amperímetro y anota.
10. Mide el factor de potencia de salida y escribe.
11. Calcula la eficiencia y regulación para cargas inductivas en delta.
12. Utiliza la *Ficha de registro* y cálculos 2.2 y 2.4 para calcular la eficiencia y regulación del transformador con cargas inductivas en delta.

*Nota:* Elaboración propia. Figura esquematizada por el autor con CircuitMaker 2000 trial.

## 2.2 Ficha de Registro y Cálculos de datos.

### 2.2.1 Pruebas de vacío y cortocircuito

| 2.2.1 Pruebas de vacío y cortocircuito |                  |                 |   |                                  |              |          |   |                          |              |          |                                  |  |   |  |  |                    |  |
|--|------------------|-----------------|---|----------------------------------|--------------|----------|---|--------------------------|--------------|----------|----------------------------------|--|---|--|--|--------------------|--|
| Prueba                                 | Conexión entrada | Conexión salida | Ajustar Voltaje entrada (V) al nominal                |                                  |              |          | Perdidas en núcleo (W) Pot. activa absorbida Po |                          |              |          | Corriente en el primario Ipo (A) |  |   |  | Potencia aparente absorbida en primario (VA) So                                | Factor de Potencia |  |
|  |                  |                 | Repetición 1  | Repetición 2                     | Repetición 3 | Promedio | Repetición 1                                    | Repetición 2             | Repetición 3 | Promedio | Repetición 1                     | Repetición 2   | Repetición 3                            | Promedio   |  |                    |  |
| Vacío                                  | Estrella         | Delta           | 405   | 404                              | 404.7        | 404.63   | 28.1  | 28.1                     | 28           | 28.07    | 0.08                             | 0.09   | 0.09                                    | 0.09   | 35.07  |                    |  |
| <b>I nominal (A)=</b>                  | 1.73             | a= Np/N         | 1   | <b>Voltaje cortocircuito Vcc</b> |              |          |   | Potencia de cotocircuito |              |          |                                  | Resistencia de cortocircuito (Ω)<br>$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}$ | Resistencia primario (Ω)<br>$r_1=r_2*a$ | Resistencia secundario (Ω)<br>$r_2=R_{cc}/(a+1)$<br>$R_{cc}=r_1+r_2$ | <b>Perdidas en cobre (W)</b><br>$P_{cu} = r_1*I_p^2 + r_2*I_s^2$<br>carga nom. |                    |  |
| Prueba                                 | Conexión entrada | Conexión salida | Ajustar Voltaje entrada a 0V aumentar hasta I nominal |                                  |              |          | Pcc (W)   |                          |              |          |                                  |  |   |  |  |                    |  |
|  |                  |                 | Repetición 1  | Repetición 2                     | Repetición 3 | Promedio | Repetición 1                                    | Repetición 2             | Repetición 3 | Promedio |                                  |  |   |  |  |                    |  |
| Cortocircuito                          | Estrella         | Delta           | 12  | 12.2                             | 11.9         | 12.03    | 12.20   | 11.9                     | 12.10        | 12.07    |                                  | 4.03   |   | 2.02   | 2.02   | 12.07              |  |

Nota: Elaborado por el autor con Excel.



## 2.2.2 Pruebas de cargas resistivas

| 2.2.2 Pruebas de cargas resistivas |                          |                            |     |                    |              |              |          |                           |              |              |          |                    |              |              |          |  |  |  |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----|--------------------|--------------|--------------|----------|---------------------------|--------------|--------------|----------|--------------------|--------------|--------------|----------|--|--|--|
| Conexión del Transformador         | Tipo / Conexión de Carga | Carga balanceada (Ω) o (H) |     | Voltaje salida (V) |              |              |          | I2 = Corriente salida (A) |              |              |          | Factor de potencia |              |              |          | Pot. salida (W)  | Pot. entrada (W)   | Eficiencia %                                 |
|                                    |                          |                            |     | Repetición 1       | Repetición 2 | Repetición 3 | Promedio | Repetición 1              | Repetición 2 | Repetición 3 | Promedio | Repetición 1       | Repetición 2 | Repetición 3 | Promedio | $I_s = I_2/\sqrt{3}$<br>$I_p = I_s$<br>$P_{out} = V_2 I_2 \cos \theta_2$ | $P_{in} = P_{Cu} + P_{magn} + V_2 I_2 \cos \theta$<br>$P_{cu} = r1 * I_p^2 + r2 * I_s^2$ | $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$ |
|                                    |                          | R1                         | 120 | 232.1              | 231.3        | 232.1        | 231.83   | 1.11                      | 1.11         | 1.11         | 1.11     | 0.872              | 0.873        | 0.873        | 0.873    | 129.66   | 147.52   | 87.89  |
|                                    |                          | R2                         | 150 | 229.9              | 230.4        | 230.1        | 230.13   | 0.87                      | 0.87         | 0.87         | 0.87     | 0.866              | 0.872        | 0.869        | 0.869    | 100.45   | 117.68   | 85.36  |
|                                    |                          | R3                         | 180 | 229.7              | 229.0        | 230.4        | 229.70   | 0.73                      | 0.73         | 0.73         | 0.73     | 0.861              | 0.861        | 0.867        | 0.863    | 83.55  | 100.47   | 83.16  |
|                                    |                          | R4                         | 200 | 231.9              | 231.8        | 232.0        | 231.90   | 0.67                      | 0.67         | 0.67         | 0.67     | 0.864              | 0.864        | 0.864        | 0.864    | 77.51  | 94.32  | 82.18  |
|                                    |                          | R5                         | 220 | 230.0              | 229.9        | 230.0        | 229.97   | 0.59                      | 0.59         | 0.59         | 0.59     | 0.863              | 0.861        | 0.865        | 0.863    | 67.61  | 84.28  | 80.22  |
|                                    |                          | R6                         | 240 | 229.9              | 230.0        | 230.1        | 230.00   | 0.55                      | 0.55         | 0.55         | 0.55     | 0.860              | 0.862        | 0.862        | 0.861    | 62.91  | 79.52  | 79.11  |
|                                    | <b>R</b>                 | R7                         | 270 | 232.1              | 232.3        | 232.1        | 232.17   | 0.50                      | 0.50         | 0.50         | 0.50     | 0.863              | 0.862        | 0.862        | 0.862    | 57.80  | 74.34  | 77.75  |
|                                    | <b>Estrella</b>          | R8                         | 310 | 230.1              | 229.5        | 229.8        | 229.80   | 0.43                      | 0.43         | 0.43         | 0.43     | 0.864              | 0.860        | 0.862        | 0.862    | 49.18  | 65.63  | 74.93  |
|                                    |                          | R9                         | 340 | 229.5              | 230.2        | 230.3        | 230.00   | 0.39                      | 0.39         | 0.39         | 0.39     | 0.859              | 0.862        | 0.862        | 0.861    | 44.59  | 61.00  | 73.10  |
|                                    |                          | R10                        | 440 | 231.6              | 231.3        | 231.4        | 231.43   | 0.31                      | 0.31         | 0.31         | 0.31     | 0.857              | 0.856        | 0.857        | 0.857    | 35.49  | 51.82  | 68.48  |
|                                    |                          | R11                        | 490 | 231.4              | 231.7        | 231.7        | 231.60   | 0.28                      | 0.28         | 0.28         | 0.28     | 0.855              | 0.856        | 0.855        | 0.855    | 32.02  | 48.33  | 66.26  |
|                                    |                          | R12                        | 630 | 231.6              | 231.8        | 231.8        | 231.73   | 0.21                      | 0.21         | 0.21         | 0.21     | 0.850              | 0.851        | 0.851        | 0.851    | 23.90  | 40.17  | 59.51  |
| <b>Estrella</b>                    |                          | R13                        | 730 | 231.7              | 231.5        | 231.3        | 231.50   | 0.19                      | 0.19         | 0.19         | 0.19     | 0.846              | 0.846        | 0.846        | 0.846    | 21.48  | 37.74  | 56.93  |
| <b>Delta</b>                       |                          | R1                         | 120 | 202.9              | 203.0        | 202.9        | 202.93   | 1.88                      | 1.88         | 1.88         | 1.88     | 0.568              | 0.568        | 0.568        | 0.568    | 125.12   | 146.07   | 85.65  |
|                                    |                          | R2                         | 150 | 210.1              | 210.2        | 209.4        | 209.90   | 1.5                       | 1.51         | 1.51         | 1.51     | 0.568              | 0.588        | 0.58         | 0.579    | 105.66   | 124.92   | 84.59  |
|                                    |                          | R3                         | 180 | 212.4              | 212.9        | 211.9        | 212.40   | 1.26                      | 1.27         | 1.26         | 1.26     | 0.565              | 0.576        | 0.568        | 0.57     | 88.26  | 106.61   | 82.79  |
|                                    |                          | R4                         | 200 | 215.1              | 214.8        | 213.8        | 214.57   | 1.2                       | 1.2          | 1.19         | 1.20     | 0.569              | 0.569        | 0.568        | 0.569    | 84.30  | 102.43   | 82.30  |
|                                    |                          | R5                         | 220 | 216.7              | 216.8        | 216.8        | 216.77   | 1.08                      | 1.08         | 1.08         | 1.08     | 0.565              | 0.566        | 0.565        | 0.565    | 76.41  | 94.19  | 81.13  |
|                                    | <b>R</b>                 | R6                         | 240 | 216.6              | 216.2        | 217.3        | 216.70   | 0.93                      | 0.92         | 0.93         | 0.93     | 0.56               | 0.554        | 0.562        | 0.559    | 64.77  | 82.13  | 78.86  |
|                                    | <b>Delta</b>             | R7                         | 270 | 217.9              | 217.5        | 218.0        | 217.80   | 0.84                      | 0.84         | 0.84         | 0.84     | 0.553              | 0.552        | 0.554        | 0.553    | 58.41  | 75.57  | 77.30  |
|                                    |                          | R8                         | 310 | 218.9              | 219.1        | 219.1        | 219.03   | 0.74                      | 0.74         | 0.74         | 0.74     | 0.547              | 0.55         | 0.547        | 0.548    | 51.28  | 68.22  | 75.17  |
|                                    |                          | R9                         | 340 | 219.3              | 219.8        | 219.8        | 219.63   | 0.68                      | 0.67         | 0.67         | 0.67     | 0.541              | 0.543        | 0.544        | 0.543    | 46.34  | 63.15  | 73.37  |
|                                    |                          | R10                        | 440 | 221.3              | 221.5        | 221.9        | 221.57   | 0.52                      | 0.52         | 0.52         | 0.52     | 0.537              | 0.538        | 0.54         | 0.538    | 35.81  | 52.38  | 68.37  |
|                                    |                          | R11                        | 490 | 222.3              | 221.8        | 222.4        | 222.17   | 0.47                      | 0.47         | 0.47         | 0.47     | 0.535              | 0.533        | 0.537        | 0.535    | 32.25  | 48.76  | 66.15  |
|                                    |                          | R12                        | 630 | 223.0              | 222.9        | 222.8        | 222.90   | 0.37                      | 0.37         | 0.37         | 0.37     | 0.53               | 0.53         | 0.529        | 0.53     | 25.22  | 41.61  | 60.61  |
|                                    |                          | R13                        | 730 | 223.2              | 223.2        | 223.2        | 223.20   | 0.32                      | 0.32         | 0.32         | 0.32     | 0.522              | 0.522        | 0.522        | 0.522    | 21.53  | 37.87  | 56.84  |

Nota: Elaborado por el autor con Excel.

### 2.2.3 Pruebas de cargas inductivas

| 2.2.3 Pruebas de cargas inductivas |                          |                            |                    |              |              |          |                           |              |              |          |                    |              |              |          |  |   |  |       |
|------------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------|--------------|--------------|----------|---------------------------|--------------|--------------|----------|--------------------|--------------|--------------|----------|--|---|--|-------|
| Conexión del Transformador         | Tipo / Conexión de Carga | Carga balanceada (Ω) o (H) | Voltaje salida (V) |              |              |          | I2 = Corriente salida (A) |              |              |          | Factor de potencia |              |              |          | Pot. salida (W)  | Pot. entrada (W)  | Eficiencia %                                 |       |
|                                    |                          |                            | Repetición 1       | Repetición 2 | Repetición 3 | Promedio | Repetición 1              | Repetición 2 | Repetición 3 | Promedio | Repetición 1       | Repetición 2 | Repetición 3 | Promedio | $I_s = I_2/\sqrt{3}$<br>$I_p = I_s$<br>$P_{out} = V_s I_s \cos \theta_s$ | $P_{Cu} + P_{nucleo} + V_s I_s \cos \theta$<br>$P_{cu} = r_1 * I_1^2 + r_2 * I_2^2$ | $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$ |       |
|                                    |                          | L1                         | 1.2                | 223.6        | 223.7        | 223.5    | 223.60                    | 0.29         | 0.29         | 0.29     | 0.29               | 0.391        | 0.391        | 0.391    | 0.391  | 14.64   | 30.96  | 47.29 |
|                                    |                          | L2                         | 1.6                | 224.9        | 224.7        | 225.0    | 224.87                    | 0.22         | 0.22         | 0.22     | 0.22               | 0.393        | 0.393        | 0.394    | 0.393  | 11.23   | 27.50  | 40.85 |
|                                    | <b>L Estrella</b>        | L3                         | 2.0                | 226.1        | 225.9        | 226.0    | 226.00                    | 0.18         | 0.18         | 0.18     | 0.18               | 0.395        | 0.395        | 0.396    | 0.395  | 9.29  | 25.53  | 36.37 |
|                                    |                          | L4                         | 2.4                | 226.0        | 226.2        | 226.5    | 226.23                    | 0.15         | 0.15         | 0.15     | 0.15               | 0.397        | 0.395        | 0.393    | 0.395  | 7.74  | 23.97  | 32.28 |
|                                    |                          | L5                         | 2.8                | 227.1        | 227.6        | 227.2    | 227.30                    | 0.13         | 0.13         | 0.13     | 0.13               | 0.393        | 0.397        | 0.395    | 0.395  | 6.74  | 22.97  | 29.34 |
|                                    |                          | L6                         | 3.2                | 229.2        | 227.5        | 227.4    | 228.03                    | 0.12         | 0.12         | 0.12     | 0.12               | 0.395        | 0.395        | 0.394    | 0.395  | 6.24  | 22.46  | 27.76 |
| Estrella                           |                          |                            |                    |              |              |          |                           |              |              |          |                    |              |              |          |  |   |  |       |
| Delta                              |                          |                            |                    |              |              |          |                           |              |              |          |                    |              |              |          |  |   |  |       |
|                                    |                          | L1                         | 1.2                | 213.1        | 213.3        | 214.1    | 213.50                    | 0.85         | 0.85         | 0.85     | 0.85               | 0.397        | 0.398        | 0.401    | 0.399  | 41.77   | 58.95  | 70.86 |
|                                    |                          | L2                         | 1.6                | 219.5        | 219.1        | 218.9    | 219.17                    | 0.65         | 0.65         | 0.65     | 0.65               | 0.407        | 0.407        | 0.408    | 0.407  | 33.50   | 50.28  | 66.64 |
|                                    | <b>L Delta</b>           | L3                         | 2.0                | 221.4        | 221.7        | 221.2    | 221.43                    | 0.53         | 0.53         | 0.53     | 0.53               | 0.416        | 0.412        | 0.411    | 0.413  | 27.98   | 44.57  | 62.79 |
|                                    |                          | L4                         | 2.4                | 221.6        | 221.1        | 220.9    | 221.20                    | 0.44         | 0.44         | 0.44     | 0.44               | 0.416        | 0.415        | 0.415    | 0.415  | 23.34   | 39.80  | 58.64 |
|                                    |                          | L5                         | 2.8                | 223.7        | 223.6        | 223.7    | 223.67                    | 0.38         | 0.38         | 0.38     | 0.38               | 0.418        | 0.418        | 0.418    | 0.418  | 20.51   | 36.91  | 55.57 |
|                                    |                          | L6                         | 3.2                | 224.7        | 224.9        | 224.9    | 224.83                    | 0.33         | 0.33         | 0.33     | 0.33               | 0.419        | 0.419        | 0.419    | 0.419  | 17.95   | 34.30  | 52.33 |
|                                    |                          |                            |                    |              |              |          |                           |              |              |          |                    |              |              |          |  |   |  |       |

Nota: Elaborado por el autor con Exc

## 2.2.4 Regulación de cargas resistivas e inductivas

| 2.2.4 Regulación de cargas resistivas e inductivas |                          |          |       |                                |              |              |          |                              |              |              |          |   |  |             |
|--|--------------------------|----------|-------|--------------------------------|--------------|--------------|----------|------------------------------|--------------|--------------|----------|---|--|-------------|
| Conexión del Transformador                         | Tipo / Conexión de Carga |          |       | Voltaje salida Plena carga (V) |              |              |          | Voltaje salida Sin carga (V) |              |              |          | Regulación<br>$VR = \frac{V_{ssc} - V_{scc}}{V_{scc}} \times 100\%$ |  |             |
|  |                          |          |       | Repetición 1                   | Repetición 2 | Repetición 3 | Promedio | Repetición 1                 | Repetición 2 | Repetición 3 | Promedio |   |  |             |
|  | <b>R</b>                 | Estrella | 232.1 | 231.3                          | 232.1        | 231.8        | 231.7    | 231.5                        | 231.3        | 231.5        |          |   |  | <b>-0.1</b> |
| Estrella   |                          | Delta    | 202.9 | 203.0                          | 202.9        | 202.9        | 223.2    | 223.2                        | 223.2        | 223.2        |          |   |  | <b>9.1</b>  |
|  | <b>L</b>                 | Estrella | 223.6 | 223.7                          | 223.5        | 223.6        | 229.2    | 227.5                        | 227.4        | 228.0        |          |   |  | <b>1.9</b>  |
| Delta  |                          | Delta    | 213.1 | 213.3                          | 214.1        | 213.5        | 224.7    | 224.9                        | 224.9        | 224.8        |          |   |  | <b>5.0</b>  |
| <i>Nota:</i> Elaborado por el autor con Excel.     |                          |          |       |                                |              |              |          |                              |              |              |          |   |  |             |

## Apéndice A

### Equipos e instrumentos de las Pruebas de vacío y cortocircuito



*Figura 1.* Transformador trifásico y variac del Laboratorio de Máquinas eléctricas de la UNS. Fotografiado por el autor.



*Figura 2.* Banco de pruebas del Laboratorio de Máquinas eléctricas de la UNS. Fotografiado por el autor.



*Figura 3.* Vatímetro y multímetro del Laboratorio de Máquinas eléctricas de la UNS. Fotografiado por el autor.



*Figura 4.* Conectores del Laboratorio de Máquinas eléctricas de la UNS. Fotografiado por el autor.

## Apéndice B

### Equipos e instrumentos de las Pruebas de Cargas



Figura 5. Transformador trifásico .del Laboratorio de Máquinas eléctricas de la UNS. Fotografiado por el autor.



Figura 6. Banco de pruebas del Laboratorio de Máquinas eléctricas de la UNS. Fotografiado por el autor.



Figura 7. Resistencias e inductores variables del Laboratorio de Máquinas eléctricas de la UNS. Fotografiado por el autor.



Figura 8. Vatímetro y multímetro del Laboratorio de Máquinas eléctricas de la UNS. Fotografiado por el autor.



Figura 9. Conectores del Laboratorio de Máquinas eléctricas de la UNS. Fotografiado por el auto