

**SELECCIÓN ÓPTIMA DE CONEXIONES TRIFÁSICAS EN BANCO DE  
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS ANTE DISTINTOS ESCENARIOS DE  
CARGA USANDO BÚSQUEDA EXHAUSTIVA.**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
SELECCIÓN ÓPTIMA DE CONEXIONES TRIFÁSICAS EN BANCO DE  
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS ANTE DISTINTOS ESCENARIOS DE  
CARGA USANDO BÚSQUEDA EXHAUSTIVA.**

**AUTOR:  
LUIS DAVID GUAÑUNA GUASGUA**

**DIRECTOR:  
ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ**

**Quito, febrero del 2020**

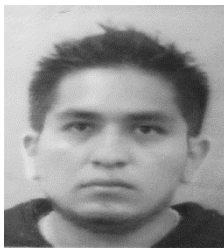
Luis David Guañuna Guasgua

**SELECCIÓN ÓPTIMA DE CONEXIONES TRIFÁSICAS EN BANCO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS ANTE DISTINTOS ESCENARIOS DE CARGA USANDO BUSQUEDA EXHAUSTIVA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador, 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Luis David Guañuna Guasgua** (Y'1993 – M'11.) Realizó sus estudios secundarios en Colegio Técnico Salesiano “Don Bosco” en la especialidad de Electricidad-Electrónica. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la Selección óptima de conexiones trifásicas en banco de transformadores monofásicos ante distintos escenarios de carga usando búsqueda exhaustiva. [lguanuna@est.ups.edu.ec](mailto:lguanuna@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Alexander Águila Téllez** (Y'1981 – M'09) recibió el título de Ingeniero Eléctrico y el de Máster en Eficiencia Energética en los años 2005 y 2010 respectivamente. Actualmente se encuentra estudiando para obtener su título de Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín, es miembro del Grupo de Investigación GIREI. Sus principales intereses de investigación incluyen la compensación VOLT-VAR en redes de distribución eléctrica, redes inteligentes, minimización de pérdidas de energía, las energías renovables y la eficiencia energética. Es profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana- Ecuador. [aaguila@ups.edu.ec](mailto:aaguila@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

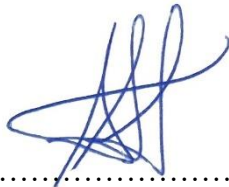
©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo Alexander Águila Téllez declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Selección óptima de conexiones trifásicas en banco de transformadores monofásicos ante distintos escenarios de carga usando búsqueda exhaustiva*” realizado por Luis David Guañuna Guasgua, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Febrero 2020



.....  
Alexander Águila Téllez

Cédula de identidad: 1755983184

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Luis David Guañuna Guasgua, con documento de identificación N° 1722691050, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “*Selección óptima de conexiones trifásicas en banco de transformadores monofásicos ante distintos escenarios de carga usando búsqueda exhaustiva*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....  
Nombre: Luis David Guañuna Guasgua

Cédula: 1722691050

Fecha: febrero de 2020

## ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN .....	2
2.	MARCO TEÓRICO.....	3
2.1	Pérdidas en sistemas de distribución .....	3
2.2	Capacidad ociosa en transformadores de distribución .....	4
2.3	Pérdidas en transformadores de distribución.....	4
2.3.1	Pérdidas en el núcleo .....	5
2.3.2	Pérdidas en el cobre .....	5
2.4	Determinación de pérdidas en transformadores de distribución .....	5
3.	CONEXIONES EN BANCOS DE TRANSFORMADORES.....	5
3.1	Conexión Delta-Delta.....	6
3.2	Conexión Estrella-Delta .....	6
3.3	Conexión Delta-Estrella .....	6
3.4	Conexión Estrella-Estrella.....	7
3.5	Conexión Delta Abierta-Delta Abierta.....	7
3.6	Conexión Estrella Abierta-Delta Abierta .....	8
3.7	Formas de conexión para el diseño de un banco de transformadores .....	8
4.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	8
4.1	Objetivos para resolver el problema.....	9
4.2	Implementación del modelo de búsqueda exhaustiva .....	9
4.2.1	Pérdidas de potencia en la creación de bancos de transformación para cargas solamente trifásicas.....	10
4.2.2	Pérdidas de potencia por conexión de bancos de transformación para cargas con componentes trifásicas y monofásicas. ....	10
4.2.3	Valores de pérdidas de potencia en cortocircuito y vacío de los transformadores monofásicos de distribución .....	12
4.2.4	Algoritmo de pérdidas por conexión mediante búsqueda exhaustiva.....	12
4.2.5	Restricciones .....	13
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	14
5.1	Caso 1 .....	14
5.2	Caso 2 .....	15
5.3	Caso 3 .....	16
5.4	Caso 4.....	17
5.5	Caso 5 .....	18
5.6	Caso 6 .....	19
5.7	Caso 7 .....	19
5.8	Caso 8.....	20
5.9	Caso 9 .....	21
5.10	Caso 10.....	22
5.11	Caso 11 .....	23
5.12	Caso 12.....	24
5.13	Caso 13 .....	24
5.14	Caso 14.....	25
6.	CONCLUSIONES .....	26
7.	TRABAJOS FUTUROS .....	27

8.	REFERENCIAS.....	27
9.	MATRIZ DEL ESTADO DE ARTE.....	32
10.	ANEXOS .....	36



## 1. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de distribución con bancos de transformadores monofásicos....	3
Figura 2. Conexión en vacío para pruebas en el transformador.....	5
Figura 3. Conexión en cortocircuito para pruebas en el transformador.....	5
Figura 4. Conexión delta-delta.....	6
Figura 5. Conexión estrella-delta.....	6
Figura 6. Conexión delta-estrella.....	7
Figura 7. Conexión estrella-estrella.....	7
Figura 8. Conexión delta abierta-delta abierta.....	7
Figura 9. Conexión estrella abierta-delta abierta.....	8
Figura 10. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por una carga trifásica de 250 [kVA].....	15
Figura 11. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por una carga trifásica de 12 [kVA].....	15
Figura 12. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por una carga trifásica de 85 [kVA].....	16
Figura 13. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por una carga trifásica de 190 [kVA].....	17
Figura 14. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por diferentes valores de cargas trifásicas en [kVA].....	18
Figura 15. Pérdidas producidas por un transformador monofásico ante una carga monofásica de 135 [kVA].....	19
Figura 16. Valores de capacidad de transformadores monofásicos en [kVA] ante diferentes cargas en [kVA].....	20
Figura 17. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 75 [kVA] y trifásica de 185 [kVA].....	20
Figura 18. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 120 [kVA] y trifásica de 35 [kVA].....	21
Figura 19. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 25 [kVA] y trifásica de 500 [kVA].....	22
Figura 20. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 330 [kVA] y trifásica de 30 [kVA].....	23
Figura 21. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 95 [kVA] y trifásica de 95 [kVA].....	24
Figura 22. Valores de pérdidas en [W] para un banco completo e incompleto para diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA].....	25
Figura 23. Valores de pérdidas en [W] para un banco completo e incompleto para diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA].....	26
Figura 24. Resumen e Indicador de la Temática- Estado del arte.....	34
Figura 25. Indicador de la formulación del problema - Estado del arte.....	34
Figura 26. Indicador de solución - Estado del arte.....	35

## 2. *ÍNDICE DE TABLAS*

Tabla 1. Valores de pérdidas de vacío y cortocircuito de transformadores monofásicos de 3 a 167 kVA Clase medio voltaje $\leq 25$ kV f-f/ clase voltaje $\leq 1,2$ kV f-f referidos a $85^\circ$ C [15].....	12
Tabla 2. Valores de pérdidas de vacío y cortocircuito de transformadores monofásicos de 15 a 333 kVA Clase medio voltaje $> 25$ kV y 34,5 Kv f-f, clase bajo voltaje $\leq 1,2$ kV f-f referidos a $85^\circ$ C [15].....	12
Tabla 3. Pseudocódigo del algoritmo de pérdidas por conexión mediante búsqueda exhaustiva.....	12
Tabla 4. Principales características de cada caso .....	14
Tabla 5. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para una carga trifásica de 250 [kVA]. .....	14
Tabla 6. Valores de capacidad de los transformadores que conforman el banco para una carga trifásica de 250 [kVA]. .....	15
Tabla 7. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para una carga trifásica de 12 [kVA]. .....	15
Tabla 8. Valores de capacidad de los transformadores que conforman el banco para una carga trifásica de 12 [kVA]. .....	16
Tabla 9. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para una carga trifásica de 85 [kVA]. .....	16
Tabla 10. Valores de capacidad de los transformadores que conforman el banco para una carga trifásica de 85 [kVA]. .....	16
Tabla 11. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para una carga trifásica de 190 [kVA]. .....	17
Tabla 12. Valores de capacidad de los transformadores que conforman el banco para una carga trifásica de 190 [kVA]. .....	17
Tabla 13. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para diferentes cargas trifásicas que se puedan presentar en [kVA].....	18
Tabla 14. Valores de capacidad de los transformadores ante diferentes cargas trifásicas que se puedan presentar en [kVA].....	18
Tabla 15. Valores de pérdidas producidas en [W] y valor de la capacidad del transformador monofásico en [kVA] ante una carga monofásica de 135 [kVA]. ..	19
Tabla 16. Valores de pérdidas producidas en [W] y capacidad en [kVA] de varios transformadores monofásico ante diferentes cargas monofásicas [kVA]. .....	19
Tabla 17. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 75 [kVA] y una carga trifásica de 185 [kVA]. .....	20
Tabla 18. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica de 185 [kVA] y monofásica de 75 [kVA]. .....	21
Tabla 19. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 120 [kVA] y una carga trifásica de 35 [kVA]. .....	21
Tabla 20. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica de 35 [kVA] y monofásica de 120 [kVA]. .....	21

Tabla 21. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 25 [kVA] y una carga trifásica de 500 [kVA]. .....	22
Tabla 22. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica de 500 [kVA] y monofásica de 25 [kVA]. .....	22
Tabla 23. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 330 [kVA] y una carga trifásica de 30 [kVA]. .....	23
Tabla 24. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica de 30 [kVA] y monofásica de 330 [kVA]. .....	23
Tabla 25. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 95 [kVA] y una carga trifásica de 95 [kVA]. .....	24
Tabla 26. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica y monofásica de 95 [kVA]. .....	24
Tabla 27. Valores de capacidad de transformadores en [kVA] que forman el banco completo e incompleto para una diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA]. .....	25
Tabla 28. Valores de pérdidas en [W] que forman el banco completo e incompleto para una diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA]. .....	25
Tabla 29. Valores de capacidad de transformadores en [kVA] que forman el banco completo e incompleto para una diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA]. .....	26
Tabla 30. Valores de pérdidas en [W] que forman el banco completo e incompleto para una diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA]. .....	26
Tabla 31. Matriz del estado de arte .....	32

# SELECCIÓN ÓPTIMA DE CONEXIONES TRIFÁSICAS EN BANCO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS ANTE DISTINTOS ESCENARIOS DE CARGA USANDO BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

## Resumen

En el presente documento se plantea un modelo matemático basado en Búsqueda Exhaustiva, el cual tiene como objetivo encontrar la conexión óptima para transformadores monofásicos en bancos trifásicos bajo el criterio de mínimas pérdidas. La implementación del modelo matemático de Búsqueda Exhaustiva en el programa computacional MatLab, sujeto a restricciones de capacidad de potencia y pérdidas por conexión, permite resolver el problema al encontrar la óptima conexión trifásica para un banco de transformación trifásica formado por unidades monofásicas. Los resultados propuestos, se lograron con la obtención de mínimas pérdidas de potencia por conexión, obtención de valores de capacidad para cada transformador, todo esto ante distintos escenarios de carga.

**Palabras Clave:** Conexión óptima de transformadores, minimización de pérdidas, búsqueda exhaustiva, selección de capacidad en transformadores, sistemas de transformación trifásicos.

## Abstract

This document contains a mathematical model based on Exhaustive Search, which objective to find the optimal connection for single-phase transformers in three-phase banks under the criterion of minimum losses. The implementation of the mathematical model of Exhaustive Search in the MatLab computer program, liable to restrictions on power capacity and connection losses, allows solving the problem by finding the optimal three-phase connection for a three-phase transformation bank formed by single-phase units. The proposed results were achieved with obtaining minimum power losses per connection, obtaining capacity values for each transformer, all this in different load scenarios.

**Keywords:** Optimal connection of transformers, loss minimization, exhaustive search, capacity selection in transformers, three-phase transformation systems.

## 1. Introducción

Los sistemas de distribución permiten suministrar de energía eléctrica a todo usuario que requiera de ella, para que este proceso se lleve a cabo, se requiere de transformadores de distribución trifásicos o bancos de transformadores monofásicos, conectados como un sola unidad, los cuales permiten transformar voltajes de un nivel a otro [1].

En ciertas ocasiones, es conveniente el uso de bancos de transformadores monofásicos de distribución ante un solo transformador trifásico de distribución, debido a que existen emergencias en las cuales pueden quedar en servicio solo dos de los tres transformadores que forman parte de la unidad de transformación. [2], [3].

La conexión de varios transformadores monofásicos como una sola unidad de transformación, permiten suplir cualquier carga que el sistema requiera de la manera más eficiente, es decir, pueden presentar diversos tipos de conexiones trifásicas dependiendo si las cargas son monofásicas, trifásicas o la unión de los tipos de cargas [4], [5].

Para la formación de un banco trifásico se utilizan unidades monofásicas de igual capacidad o de diferente capacidad, los cuales permiten abastecer la demanda requerida [2], [6].

En ciertos casos, para suplir cargas con componentes trifásicas y monofásicas que se presentan en el sistema de distribución, se utiliza la conexión de un banco de transformación debido a que esta configuración permite la conexión de un transformador con mayor capacidad que el resto de los transformadores [6].

Este transformador al ser de mayor capacidad, es asignando con un porcentaje alto de la carga monofásica y los otros transformadores con el resto de la carga, permitiendo abastecer toda la

demanda. Para la repartición de carga trifásica se toman en cuenta todos los transformadores [5], [6].

Debido a la formación de bancos de transformación por unidades con iguales o distintas capacidades, se producen pérdidas en la entrega de energía [7].

La mayor parte de pérdidas en la entrega de energía se deben a pérdidas propias y pérdidas por conexión de cada unidad monofásica que forma el banco de transformación [8].

Las pérdidas fijas son producidas por corrientes parasitas presentes en el transformador disminuyendo la eficiencia del mismo, al fabricar transformadores se toman en cuenta estas pérdidas, debido a que el transformador debe cumplir con un alto grado de eficiencia [8], [9].

Tanto las pérdidas propias como las pérdidas por conexión en el sistema de distribución, deben ser consideradas si se requiere que en alguna parte el sistema sea abastecido por un banco de transformación, debido a que la capacidad de cada transformador debe ser la correcta para evitar que el banco este sobrecargado y evitar pérdidas de energía en todo el sistema de distribución [10]–[13].

Las diferentes conexiones trifásicas que existen, son tomadas como aspectos importantes en el diseño de bancos de transformadores monofásicos de distribución, debido a que implica el abastecimiento del sistema si se presentan cargas desequilibradas [5], [14].

Para la resolución de un problema que esta sujeto a ciertas condiciones, en ciertos casos la utilización de un método de búsqueda exhaustiva permite encontrar soluciones óptimas a dichos problemas, respondiendo a condiciones propuestas y estableciendo en ciertos casos valores reales a los cuales el

problema puede ser solucionado en su totalidad [15], [16].

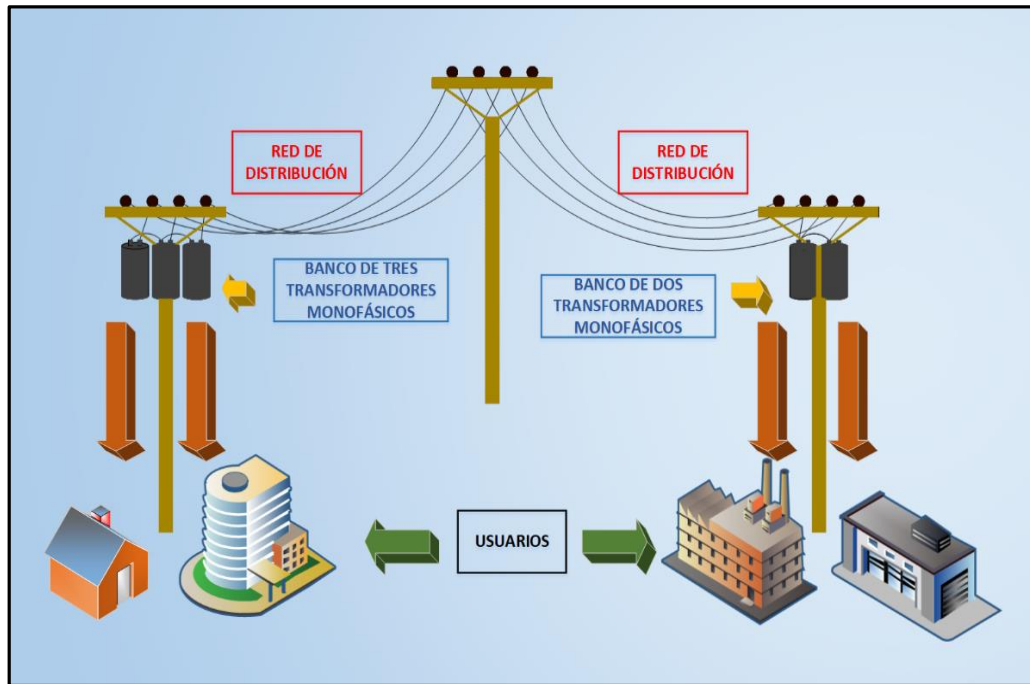


Figura 1. Sistema de distribución con bancos de transformadores monofásicos.

El presente trabajo, permite reducir las pérdidas producidas por transformación en sistemas de distribución, al seleccionar la conexión trifásica óptima para un banco de transformación trifásico formado por unidades monofásicas, se reducen las pérdidas producidas al conectar el banco a la red de distribución [17].

Otro aporte que se presenta debido a la óptima selección de conexiones trifásicas para bancos formados por unidades monofásicas, es el dimensionamiento correcto de los transformadores que forman el banco de transformación para que este pueda abastecer cargas presentes en el sistema de distribución, sin que estas produzcan desequilibrios por sobrecapacidad a todo el sistema [17].

## 2. Marco Teórico

Los sistemas de distribución son una parte muy importante dentro de un sistema eléctrico de potencia, ya que permiten la entrega de energía generada a todo usuario que la requiera. Este proceso de entrega de energía conlleva el uso de varios elementos que forman el sistema de distribución, los cuales producen pérdidas al sistema.

Aproximadamente 10 % de la energía eléctrica producida se pierde en la distribución y la mayoría de interrupciones que se producen son debido a problemas ocurridos en el sistema de distribución [18].

### 2.1 Pérdidas en sistemas de distribución

Dentro del sistema de distribución se producen pérdidas técnicas y no técnicas

que afectan en la entrega de energía eléctrica.

Las pérdidas no técnicas en su mayoría son causadas por el suministro ilegal de energía eléctrica el cual no es facturado en el sistema, también se pueden producir debido a errores técnicos o administrativos en el proceso de comercialización del servicio [19], [20][21].

Por otro lado, las pérdidas técnicas se producen por los elementos que forman el sistema de distribución en las diferentes etapas que lo conforman.

Debido a la función de componentes que forman el sistema de distribución, las pérdidas ser:

- Pérdidas producidas por el transporte:
  - En líneas de transmisión y subtransmisión .
  - En circuitos de distribución primaria y secundaria.
- Pérdidas producidas por transformación:
  - En transmisión, subtransmisión y distribución [17].

Un porcentaje alto de pérdidas en los sistemas de distribución se deben a de pérdidas producidas en transformación debido al uso de transformadores trifásicos de distribución o banco de transformadores formados por unidades monofásicas, estas pérdidas son debido a malas conexiones trifásicas, sobredimensionamiento del banco de transformación o del transformador trifásico de distribución, y sobrecargas que se presentan en el sistema [17], [22].

Para disminuir las pérdidas que se producen en los transformadores dentro del sistema de distribución, se puede realizar un análisis para una óptima

conexión de bancos de transformación formados por unidades monofásicas, buscando las mínimas pérdidas por conexión y la correcta capacidad de los transformadores que forman el banco, todo esto ante diferentes escenarios de carga. Por lo que a continuación se describen aspectos importantes para el análisis.

## **2.2 Capacidad ociosa en transformadores de distribución**

La capacidad que no se utiliza del transformador de distribución al abastecer una carga requerida se la llama capacidad ociosa [17].

La capacidad ociosa de un transformador de distribución permite analizar el comportamiento del transformador en relación con la demanda del sistema [23].

Para determinar las pérdidas que se producen en un transformador de distribución se debe ser un análisis con respecto a las pérdidas propias de los transformadores y las capacidades ociosas que estos presentan.

## **2.3 Pérdidas en transformadores de distribución**

Un transformador de distribución es instrumento eléctrico estático que permite la conversión de energía eléctrica de un nivel a otro, permitiendo la transferencia de dicha energía de un circuito hacia otro [19], [23].

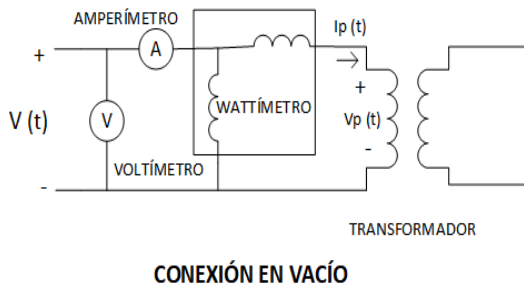
En los transformadores de distribución, al realizar la transferencia de energía eléctrica se producen pérdidas debido a la constitución del transformador y a las cargas presentes en los circuitos que se desean abastecer [24], [25].

Las pérdidas propias del transformador, se producen en el núcleo del transformador, denominadas pérdidas en el hierro, las cuales son consideradas

pérdidas fijas y las pérdidas producidas en el bobinado del transformador denominadas pérdidas en el cobre, las mismas que se consideran pérdidas variables, debido a que dependen del índice de carga al cual el transformador se encuentra sujeto. Al no existir partes móviles en la constitución del transformador no existen pérdidas mecánicas [26], [27].

### 2.3.1 Pérdidas en el núcleo

Son pérdidas consideradas fijas debido a que se originan en el núcleo del transformador, se forman por corrientes parasitas y por corrientes de histéresis debido al material del cual está construido dicho núcleo. Al realizar un ensayo en vacío al transformador se obtiene la potencia absorbida sin la conexión de cargas, la misma que coincide con las pérdidas producidas en el hierro [28], [29].

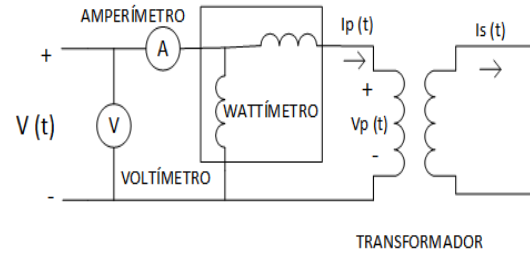


CONEXIÓN EN VACÍO

Figura 2. Conexión en vacío para pruebas en el transformador.

### 2.3.2 Pérdidas en el cobre

Estas pérdidas son producidas por el calentamiento en los devanados del transformador. Dependen del régimen de carga al cual el transformador está expuesto. Al realizar un ensayo en cortocircuito al transformador se produce una absorción de potencia por parte del lado cortocircuitado, la misma que coincide con las pérdidas en el cobre [30].



CONEXIÓN EN CORTOCIRCUITO

Figura 3. Conexión en cortocircuito para pruebas en el transformador.

## 2.4 Determinación de pérdidas en transformadores de distribución

Para la determinación matemática de las pérdidas en transformadores de distribución, se toman en cuenta todas las pérdidas que se producen, es decir, pérdidas en vacío, cortocircuito y la inclusión del índice de carga, debido a que considera pérdidas asociadas a la variación de la demanda para la cual el sistema fue diseñado [6], [17].

La expresión de pérdidas de los transformadores de distribución quedaría de la siguiente manera:

$$\Delta P = \Delta P_o + \Delta P_{cc} K^2 \quad (1)$$

Donde:

$\Delta P$  Pérdidas totales.

$\Delta P_o$  Pérdidas en vacío.

$\Delta P_{cc}$  Pérdidas en cortocircuito.

$K$  Índice de carga.

## 3. Conexiones en bancos de transformadores

La correcta conexión de transformadores al sistema de distribución, permite una mayor eficiencia en la entrega de energía eléctrica, evitando pérdidas en los circuitos que lo forman [17].

Para lograr mayor eficiencia en la conexión de transformadores de



distribución o bancos formados por unidades monofásicas, existen varias conexiones posibles al cual el banco puede estar sujeto, dependiendo de la demanda que se requiera abastecer, a continuación se analiza los tipos de conexiones más comunes que suelen presentarse [31], [32].

### 3.1 Conexión Delta-Delta

Este tipo de conexión se comporta bien ante cualquier tipo de carga, debido a que los desbalances que se producen por las cargas secundarias se reparten entre las fases del lado primario [23].

Esta configuración no posee neutro en la sección del primario ni en la sección del secundario debido a la conexión de sus devanados, lo que delimita su uso para suplir ciertas cargas [28].

Si se produce una falla en un transformador, se puede seguir abasteciendo el sistema, ya que la conexión permite que los dos transformadores restantes sigan en funcionamiento [23].

Este tipo de conexión permite la disminución de costos ya que la sección de los conductores disminuyen, debido a la presencia de corrientes en cada una de las fases [28], [33].

Los grupos de conexión más comunes para este tipo de conexión son dd0 y dd6. La conexión dd6 se utiliza cuando se requiere una tensión elevada en la línea, mientras la conexión dd0 es utilizada en transformadores de baja tensión [34].

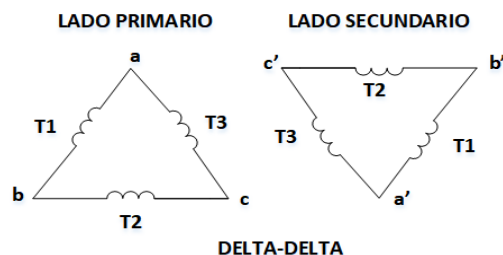


Figura 4. Conexión delta-delta.

### 3.2 Conexión Estrella-Delta

Este tipo de conexión produce que las cargas desequilibradas tengan mayor estabilización al hacer que el desequilibrio sea distribuido parcialmente por la conexión en delta del lado secundario. Debido a esto responde bien ante cualquier carga que se presente [23].

Debido al tipo de configuración existe un desplazamiento de  $30^\circ$  o múltiplos de este valor, entre el voltaje del primario con respecto al voltaje del secundario, puede presentar un problema si un banco de transformadores quiere ser puesto en paralelo con otro debido a que el ángulo de fase de los transformadores secundarios deben ser iguales [23], [28].

Al no presentar un neutro en el lado secundario, no se puede conectar el banco de transformación a tierra para garantizar mayor seguridad [28].

Los grupos de conexión más comunes para este tipo de conexión son yd5 y yd11. La conexión yd5 permite que el neutro se cargue con toda la intensidad nominal, además de reducir la tensión. La conexión yd5 es más utilizada en transformadores de centrales y subestaciones [34].

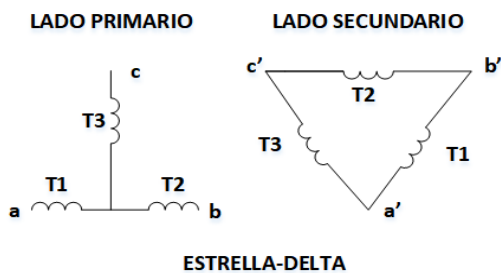


Figura 5. Conexión estrella-delta.

### 3.3 Conexión Delta-Estrella

Este tipo de conexión en sistemas de distribución permite la alimentación de cargas trifásicas como monofásicas sin ningún inconveniente [23].

La conexión del devanado primario del banco de transformación en delta permite compensar los desequilibrios que se producen debido a las cargas monofásicas [34].

Esta conexión no presenta problemas con los componentes en sus voltajes de la tercera armónica debido a que se consume una corriente circulante en la conexión en delta [28].

Presenta las mismas desventajas que la conexión estrella-delta si se requiere poner dos bancos de transformadores en paralelo [23].

Esta conexión permite contar con dos tipos de voltaje debido a la existencia del neutro que el lado secundario proporciona, además de responder bien ante cualquier tipo de carga [26].

El neutro en el lado secundario conectado a tierra permite contar con una protección adicional al sistema [28].

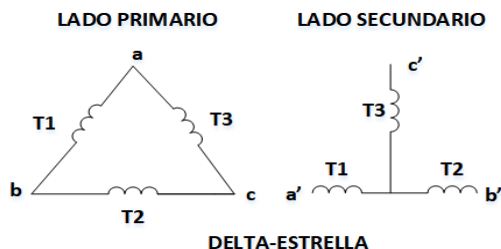


Figura 6. Conexión delta-estrella.

### 3.4 Conexión Estrella-Estrella

Este tipo de conexión permite que las cargas sean conectadas hacia un punto neutro formado por la conexión en estrella de cada transformador monofásico que forma parte del banco [23].

Este tipo de conexión presenta muchos inconvenientes al producir voltajes de tercer armónico muy elevados, si existen cargas desequilibradas pueden producir desequilibrios en los voltajes de fases del banco de transformación [28].

Se usa este tipo de conexión en ocasiones cuando la carga trifásica es

mucho mayor que la carga monofásica [35].

Al presentar un neutro el sistema permite la obtención de dos valores de voltaje, lo que es muy conveniente si se requiere de ellos [23].

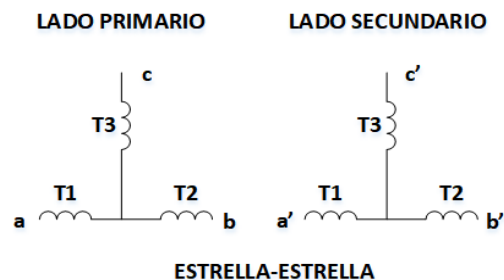


Figura 7. Conexión estrella-estrella.

### 3.5 Conexión Delta Abierta-Delta Abierta

Si dentro de un banco de transformación completo por algún motivo una de las fases no se encuentra en servicio, este tipo de configuración permite que el banco de transformación siga funcionando con dos transformadores abasteciendo el sistema trifásico con solo dos líneas, la potencia que suministraría el banco en este caso sería de dos tercios de su potencia aparente nominal [23], [36]. Este tipo de conexión no permite que existan dos valores de voltaje debido a que no existe la forma para la conexión de un neutro, pero puede ser utilizada si la carga trifásica no supera el 86% de la carga total [28].

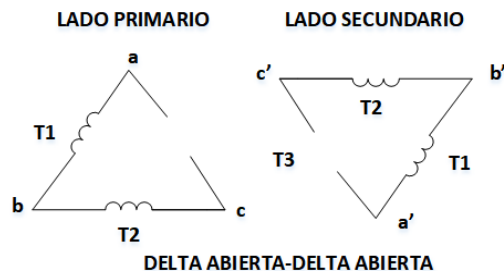


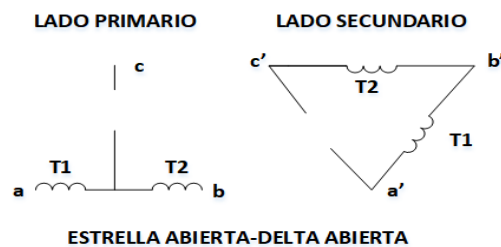
Figura 8. Conexión delta abierta-delta abierta.

### 3.6 Conexión Estrella Abierta-Delta Abierta

En este tipo de conexión los voltajes en los primarios de los transformadores que forman el banco se originan de dos de las fases y de la conexión del neutro. En ciertas áreas rurales es muy común el uso de este tipo de conexión debido a que en ciertos lugares el sistema de distribución solo consta de dos líneas [23].

Se puede presentar un neutro solo en el lado primario del banco de transformadores, debido a que este lado se encuentra conectado en estrella [28].

En esta conexión se presenta una desventaja, la cual es debido a que circula una corriente muy grande de retorno en el neutro del lado primario, pero puede ser utilizada si la carga trifásica no supera el 86% de la carga total [28].



ESTRELLA ABIERTA-DELTA ABIERTA

Figura 9. Conexión estrella abierta-delta abierta.

### 3.7 Formas de conexión para el diseño de un banco de transformadores

Los bancos de transformadores formados por unidades monofásicas, en ocasiones, su uso es mucho más convenientes que el uso de un solo transformador debido a que se pueden presentar problemas en el abastecimiento de energía eléctrica, los bancos de transformación pueden ser de gran ayuda para que el sistema siga en funcionamiento y logre abastecer la demanda requerida [19].

Para la formación de un banco de transformadores monofásicos de distribución, existen varias formas de conexión [20].

Las diferentes maneras de conexión pueden ser:

- Bancos formados por dos o tres transformadores monofásicos, que alimentan solamente cargas trifásicas.
- Bancos formados por transformadores monofásicos que pueden alimentar cargas formadas por componentes trifásicas y monofásicas, los cuales están formados por un transformador de mayor capacidad denominado transformador de fuerza y dos transformadores que suplen el resto de carga denominados transformadores de alumbrado [17], [37].

La conexión de un banco formado por solo dos unidades, un transformador de fuerza y otro como transformador de alumbrado, se utiliza en demandas que presenta un valor de carga monofásica elevado respecto a la carga trifásica presente [15].

## 4. Formulación del problema

Se pretende determinar la óptima conexión trifásica para bancos de transformadores formados por unidades monofásicas, para llevar a cabo todo esto, se necesita calcular el valor de capacidad para cada uno de los transformadores que forman el banco de transformación, también se necesita calcular las pérdidas por conexión para ser analizadas bajo un criterio de mínimas, además de elegir la conexión trifásica óptima dependiendo del escenario de carga propuesto, lo anterior mencionado se debe realizar bajo un algoritmo matemático que en este caso es mediante un modelo de búsqueda exhaustiva.

#### 4.1 Objetivos para resolver el problema

Debido a que el objetivo principal de este artículo es seleccionar la capacidad y conexión óptima de bancos de transformadores trifásicos, formados por unidades monofásicas, que respondan a un mínimo de pérdidas en sistemas de transformación para redes de distribución, ante diferentes escenarios de carga con componentes monofásicas y trifásicas, se plantean objetivos para cada tipo de escenario de carga.

Para resolver el problema para cargas solamente trifásicas, el objetivo es determinar la conexión con menos pérdidas por la formación del banco de transformación.

$$Pmin_{3f} = \Delta PC_{3f} \quad (2)$$

si,  $\Delta PC_{3f} > \Delta PI_{3f}$ ;

$$Pmin_{3f} = \Delta PI_{3f} \quad (3)$$

si,  $\Delta PC_{3f} > \Delta PI_{3f}$ ;

Donde:

$Pmin_{3f}$  Mínimas pérdidas para cargas trifásicas.

$\Delta PC_{3f}$  Pérdidas del banco completo.

$\Delta PI_{3f}$  Pérdidas del banco incompleto.

Para resolver el problema para cargas tanto trifásicas como monofásicas, el objetivo es determinar la conexión con menos pérdidas por la formación del banco de transformación.

$$Pmin_{13f} = \Delta PC_{13f} \quad (4)$$

si,  $\Delta PC_{13f} > \Delta PI_{13f}$

$$Pmin_{13f} = \Delta PI_{13f} \quad (5)$$

si,  $\Delta PC_{13f} > \Delta PI_{13f}$

Donde:

$Pmin_{13f}$  Mínimas pérdidas para cargas monofásicas-trifásicas.

$\Delta PC_{13f}$  Pérdidas del banco completo.

$\Delta PI_{13f}$  Pérdidas del banco incompleto.

Para resolver el problema para cargas solamente monofásicas, el objetivo es determinar el transformador que permita abastecer toda la demanda con mínimas pérdidas [38].

$$Pmin_{1f} = \Delta P_{1f} \quad (6)$$

Donde:

$Pmin_{1f}$  Mínimas pérdidas para cargas monofásicas.

#### 4.2 Implementación del modelo de búsqueda exhaustiva

Para la solución del problema se emplea una búsqueda exhaustiva, la cual permite encontrar la forma de conexión, capacidad de los transformadores y número de transformadores que formarán el banco bajo el criterio de mínimas pérdidas producidas en la formación del banco [17].

Para la creación del modelo de búsqueda exhaustiva se plantean distintos escenarios de cargas que se pueden presentar, estos escenarios pueden ser solamente con cargas trifásicas o monofásicas y cargas que pueden ser tanto trifásicas como monofásicas.

También, se debe considerar: tipos de conexión, las pérdidas que se producen en la formación de los bancos de transformadores, los valores de pérdidas de potencia en cortocircuito y vacío de los transformadores monofásicos de distribución.

Se incluye el valor de factor de potencia, 0,95 [39], el cual ayudará en el algoritmo de búsqueda exhaustiva a

determinar si se abastece la carga requerida con la presencia de pérdidas por la formación del banco de transformadores.

#### 4.2.1 Pérdidas de potencia en la creación de bancos de transformación para cargas solamente trifásicas

Para la determinación de este tipo de pérdidas, se considera que el banco está formado por dos o tres transformadores de igual capacidad, también se considera que el valor de potencia entregada por un banco completo está determinado por:

$$S_{co} = \sqrt{3} * I_L * V_L \quad (7)$$

Donde:

$I_L$  Corriente de línea [A].

$V_L$  Voltaje de línea [kV].

Al ser formado un banco por solo dos transformadores (delta abierta), el valor de potencia entregada por este banco incompleto está determinado por:

$$S_{in} = 2 * I_L * V_L \quad (8)$$

Al comparar las ecuaciones (7) y (8) se comprueba que el banco incompleto entrega  $2/\sqrt{3}$  veces más potencia con respecto al banco completo, debido a esta comparación las pérdidas en un banco formador por tres transformadores iguales es diferente a las pérdidas de bancos de transformación formados por dos transformadores iguales [17].

Debido a todo lo anterior, la ecuación de pérdidas de potencia para un banco completo es:

$$\Delta PC_{3f} = 3\Delta P_o + \frac{1}{3}\Delta P_{cc} * \left(\frac{S}{S_N}\right)^2 \quad (9)$$

La ecuación de pérdidas de potencia para un banco incompleto:

$$\Delta PI_{3f} = 2\Delta P_o + \frac{2}{3}\Delta P_{cc} * \left(\frac{S}{S_N}\right)^2 \quad (10)$$

Donde:

$\Delta P_o$  Pérdidas de potencia en vacío de un transformador [kW].

$\Delta P_{cc}$  Pérdidas de potencia en cortocircuito de un transformador [kW].

$S$  Potencia aparente de la carga total [kVA].

$S_N$  Potencia aparente nominal de un transformador [kVA].

Si se igualan las ecuaciones (9) y (10) el resultado es:

$$S_{cr} = \sqrt{\frac{3\Delta P_o}{\Delta P_{cc}}} * S_N \quad (11)$$

Donde:

$S_c$  Potencia crítica que limita a las dos conexiones.

La potencia crítica  $S_c$  demuestra el punto donde es factible cambiar un banco por otro, dependiendo de las pérdidas que se produzcan en el banco de transformación a un cierto nivel de carga trifásica.

#### 4.2.2 Pérdidas de potencia por conexión de bancos de transformación para cargas con componentes trifásicas y monofásicas.

Para determinar las pérdidas que se producen en este tipo de bancos que suelen formarse por un transformador de fuerza con mayor capacidad y dos transformadores denominados de alumbrado con menor capacidad se deben considerar que el transformador de fuerza asume  $2/3$  de la carga monofásica

y los dos otros transformadores de alumbrado reciben 1/3 de la carga monofásica, lo cual produce una capacidad ociosa de entrega de 4/3 de carga monofásica. Este valor es considerado en el diseño del banco de transformadores.

La carga trifásica se divide para los tres transformadores por igual y se deben considerar en el análisis las pérdidas que se producen debido a este diseño.

También se debe considerar que se pueden formar bancos de dos transformadores para suplir estas cargas, en este caso el transformador de fuerza asume 2/3 de la carga monofásica y el transformador de alumbrado asume 1/3 de la carga monofásica.

La carga trifásica en este tipo de configuración se divide para los dos transformadores por igual [17].

Siendo los valores de  $A$  y  $B$  respectivamente:

$$A = \frac{\frac{2}{9}Kr^2 + \frac{4}{9}Kr + \frac{2}{9}}{S_{nfu}^2} \quad (12)$$

$$B = \frac{\frac{4}{9}Kr^2 + \frac{4}{9}Kr + \frac{1}{9}}{(S_{nal})^2} \quad (13)$$

Donde la relación entre la carga monofásica y trifásica es:

$$Kr = \frac{S_{1\phi}}{S_{3\phi}} \quad (14)$$

La ecuación de pérdidas de potencia para un banco completo es:

$$\Delta PC_{13f} = (\Delta P_{fu} + \Delta P_{al}) + [\Delta P_{ccfu} * A + \Delta P_{ccal} * B] * S_{3\phi}^2 \quad (15)$$

La ecuación de pérdidas de potencia para un banco incompleto es:

$$\Delta PI_{13f} = (\Delta P_{fu} + \Delta P_{al}) + \left[ \frac{0.33\Delta P_{ccfu}}{S_{nfu}^2} + \Delta P_{ccal} * \frac{Kr^2 + 1.15Kr + 0.33}{S_{nal}^2} \right] * S_{3\phi}^2 \quad (16)$$

Donde:

$\Delta P_{fu}$  Pérdidas de potencia en vacío del transformador de fuerza [kW].

$\Delta P_{al}$  Pérdidas de potencia en vacío del transformador de fuerza [kW].

$\Delta P_{ccfu}$  Pérdidas de potencia en cortocircuito del transformador de fuerza [kW].

$\Delta P_{ccal}$  Pérdidas de potencia en cortocircuito del transformador de alumbrado [kW].

$Kr$  Relación entre la carga monofásica y trifásica.

$S_{1\phi}$  Carga monofásica [kVA].

$S_{3\phi}$  Carga trifásica [kVA].

$S_{nfu}$  Potencia aparente nominal del transformador de fuerza [kVA].

$S_{nal}$  Potencia aparente nominal del transformador de alumbrado [kVA].

Si se igualan las ecuaciones (15) y (16) el resultado es:

$$Scr1 = \sqrt{\frac{\Delta P_{fu}}{\left[ \Delta P_{ccal} * \frac{c1}{S_{nal}^2} - \Delta P_{ccfu} * \frac{c2}{S_{nal}^2} \right]}} \quad (17)$$

Siendo los valores de  $C1$  y  $C2$  respectivamente:

$$c1 = \frac{5}{9}Kr^2 + \frac{6,35}{9}Kr + \frac{2}{9} \quad (18)$$

$$c2 = \frac{2}{9}Kr^2 + \frac{4}{9}Kr - \frac{2}{9} \quad (19)$$

Donde:

*Scr1* Potencia crítica que limita a las dos conexiones.

La potencia crítica *Scr1* demuestra el punto donde es factible cambiar un banco por otro, dependiendo de las pérdidas que se produzcan en el banco de transformación a un cierto nivel de carga formada por componentes trifásicas y monofásicas.

#### 4.2.3 Valores de pérdidas de potencia en cortocircuito y vacío de los transformadores monofásicos de distribución

Para determinar los valores de pérdidas en potencia de vacío y en cortocircuito de los transformadores que existen en el mercado, se tomó a consideración los valores proporcionados por la norma NTE INEN 2114:2004 [40], ya que muchos fabricantes se rigen a esta norma para la construcción de los transformadores monofásicos de distribución [41].

Tabla 1. Valores de pérdidas de vacío y cortocircuito de transformadores monofásicos de 3 a 167 kVA Clase medio voltaje  $\leq 25$  kV f-f/ clase voltaje  $\leq 1,2$  kV f-f referidos a  $85^\circ$  C [15]

Potencia Nominal [kVA]	Po [W]	Pc [W]
3	21	70
5	31	91
10	52	142
15	68	192
25	98	289
37,5	130	403
50	160	512
75	214	713
100	263	897
167*	379	1360

Tabla 2. Valores de pérdidas de vacío y cortocircuito de transformadores monofásicos de 15 a 333 kVA Clase medio voltaje  $> 25$  kV y 34,5 Kv f-f, clase bajo voltaje  $\leq 1,2$  kV f-f referidos a  $85^\circ$  C [15].

Potencia Nominal [kVA]	Po [W]	Pc [W]
15	141	246
25	185	360
37,5	229	488
50	267	606
75	331	821
100	386	1019
167	507	1497
250	628	2025
333	732	2510

#### 4.2.4 Algoritmo de pérdidas por conexión mediante búsqueda exhaustiva

Para realizar la búsqueda exhaustiva de la óptima conexión y pérdidas por formación del banco de transformadores se implementó un algoritmo, el cual fue creado en MatLab con todas las consideraciones vistas anteriormente, todo esto con la finalidad de explorar todas las posibles soluciones y escoger la mejor de ellas.

Tabla 3. Pseudocódigo del algoritmo de pérdidas por conexión mediante búsqueda exhaustiva.

##### Pseudocódigo del algoritmo de pérdidas por conexión mediante búsqueda exhaustiva

- Paso 1:** Creación de matrices con valores de capacidad, pérdidas en cortocircuito y vacío de los transformadores monofásicos disponibles.
- Paso 2:** Ingreso de cargas a suplir.
- Paso 3:** Selección del tipo de transformador a usar.
- Paso 4:** Cálculo de pérdidas si la carga es solo monofásica.  

$$\Delta P_{1f} = \Delta P_o + \Delta P_{cc}$$
- Paso 5:** Cálculo de la capacidad del transformador si la carga es solo monofásica.

$$\text{CapCT}_{1f} = \text{CT1}$$

**Paso 6:** Implementación de restricciones debido a sobrecargas de capacidad al transformador.

**Paso 7:** Cálculo de capacidades de los transformadores para un banco completo e incompleto para cargas solamente trifásicas.

$$\text{CapCT}_{3f} = \frac{1}{3}\text{CT1} + \frac{1}{3}\text{CT2} + \frac{1}{3}\text{CT3}$$

$$\text{CapIT}_{3f} = \frac{1}{2}\text{CT1} + \frac{1}{2}\text{CT2}$$

**Paso 8:** Cálculo de pérdidas para un banco completo e incompleto para cargas solamente trifásicas.

$$\Delta\text{PC}_{3f}, \Delta\text{PI}_{3f}.$$

**Paso 9:** Selección de mínimas pérdidas producidas entre banco completo e incompleto para cargas solamente trifásicas.

$$\text{Pmin}_{3f} = \Delta\text{PC}_{3f} \text{ si, } \Delta\text{PC}_{3f} > \Delta\text{PI}_{3f}$$

$$\text{Pmin}_{3f} = \Delta\text{PI}_{3f} \text{ si, } \Delta\text{PI}_{3f} > \Delta\text{PC}_{3f}$$

**Paso 10:** Implementación de restricciones debido a sobrecargas de capacidad en los transformadores que forman el banco.

**Paso 11:** Selección de la conexión trifásica para el banco con menos pérdidas para cargas solamente trifásicas.

**Paso 12:** Cálculo de capacidades de los transformadores para un banco completo e incompleto para cargas trifásicas-monofásicas.

$$\text{CapCT}_{13f} = \frac{1}{3}\text{CT1} + \frac{1}{3}\text{CT2} + \frac{1}{3}\text{CT3}$$

$$\text{CapIT}_{13f} = \frac{1}{2}\text{CT1} + \frac{1}{2}\text{CT2}$$

**Paso 13:** Cálculo de pérdidas para un banco completo e incompleto para cargas trifásicas-monofásicas.

$$\Delta\text{PC}_{13f}, \Delta\text{PI}_{13f}$$

**Paso 14:** Implementación de restricciones debido a sobrecargas de capacidad en los transformadores que forman el banco.

**Paso 15:** Selección de mínimas pérdidas producidas entre banco completo e incompleto para cargas trifásicas-monofásicas

$$\text{Pmin}_{31f} = \Delta\text{PC}_{13f}$$

$$\text{si, } \Delta\text{PC}_{13f} > \Delta\text{PI}_{13f} ;$$

$$\text{Pmin}_{31f} = \Delta\text{PI}_{13f}$$

$$\text{si, } \Delta\text{PI}_{13f} > \Delta\text{PC}_{13f}$$

**Paso 16:** Selección de la conexión trifásica para el banco con menos pérdidas para cargas trifásicas.

**Paso 17:** Selección de la conexión trifásica para el banco con menos pérdidas para cargas trifásicas-monofásicas

**Paso 18:** Visualización de la solución óptima.

**Paso 19:** Grafica de pérdidas producidas por los bancos.

**Paso 20:** Fin.

El algoritmo de búsqueda exhaustiva, permite encontrar la mejor conexión para un banco de transformadores ante distintos escenarios de cargas, este algoritmo crea primero los bancos de transformación dependiendo de las cargas que se requieren suplir en su totalidad luego selecciona las capacidades de los transformadores que forman el banco de transformación, después analiza que conexión produce menos pérdidas y la selecciona, por ultimo realiza una gráfica de las pérdidas que se producen en la formación de los bancos dependiendo del coeficiente de carga que estos presenten.

#### 4.2.5 Restricciones

El algoritmo de búsqueda exhaustiva, se plantea en base a demandas de carga trifásica, monofásica y la unión de los dos tipos de demanda.

Los valores de capacidad de los transformadores para demandas solamente trifásicas, cumplen con la restricción de no ser sobrecargados por la demanda y que esta sea repartida por igual para todos los transformadores.

Los valores de capacidad de los transformadores para demandas solamente monofásicas, cumplen con la restricción de no ser sobrecargados por la demanda y que esta sea abastecida en su totalidad por el transformador.

Los valores de capacidad de los transformadores para demandas con



componentes trifásicas y monofásicas, cumplen con la restricción de no ser sobrecargados por la demanda y que esta sea repartida dependiendo cual sea el transformador de fuerza y cuáles son los transformadores de alumbrado, cumpliendo con el criterio para alumbrado.

Otra restricción se debe al abastecimiento de toda la carga pese a que el sistema considere pérdidas con el análisis de factor de potencia de 0,95.

## 5. Análisis de resultados

El análisis de resultados se realiza base a la formación del banco de transformadores el cual puede ser completo e incompleto, el tipo de conexión trifásica que debe tener el banco y la capacidad que tienen los transformadores que lo conforman.

Todo lo anterior mencionado se hace bajo un análisis de las pérdidas que se producen en la conformación del banco dependiendo de la carga de ingreso.

Para la visualización de los resultados se hace el uso de graficas elaboradas en MatLab con tablas que muestran los valores de los resultados realizados en el análisis.

Tabla 4. Principales características de cada caso

Número de caso	Características
Caso 1	Formación de un banco de transformación para suplir una carga trifásica de 250 kVA.
Caso 2	Formación de un banco de transformación para suplir una carga trifásica de 12 kVA.
Caso 3	Formación de un banco de transformación para suplir una carga trifásica de 85 kVA.
Caso 4	Formación de un banco de transformación para suplir una carga trifásica de 190 kVA.
Caso 5	Formación de bancos de transformación para suplir diferentes cargas trifásicas

Caso 6	Selección de un transformador para suplir una carga monofásica de 135 kVA.
Caso 7	Selección de un transformador para suplir diferentes cargas monofásicas.
Caso 8	Formación de un banco de transformación para suplir una carga trifásica de 185 kVA y una carga monofásica de 75 kVA.
Caso 9	Formación de un banco de transformación para suplir una carga trifásica de 35 kVA y una carga monofásica de 120 kVA.
Caso 10	Formación de un banco de transformación para suplir una carga trifásica de 500 kVA y una carga monofásica de 25 kVA.
Caso 11	Formación de un banco de transformación para suplir una carga trifásica de 30 kVA y una carga monofásica de 330 kVA.
Caso 12	Formación de un banco de transformación para suplir una carga trifásica de 95 kVA y una carga monofásica de 95 kVA.
Caso 13	Formación de bancos de transformación para suplir diferentes cargas trifásicas y monofásicas, donde las cargas trifásicas son mayores que las monofásicas
Caso 14	Formación de bancos de transformación para suplir diferentes cargas trifásicas y monofásicas, donde las cargas monofásicas son mayores que las trifásicas.

### 5.1 Caso 1

La tabla 5, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir una demanda trifásica de 250 kVA y el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 5. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para una carga trifásica de 250 [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]	Tipo de conexión
250	1393.3	1759.5	Completa

En este caso las pérdidas por la formación de un banco completo al suplir

toda la demanda son mucho menores que las pérdidas por banco incompleto.

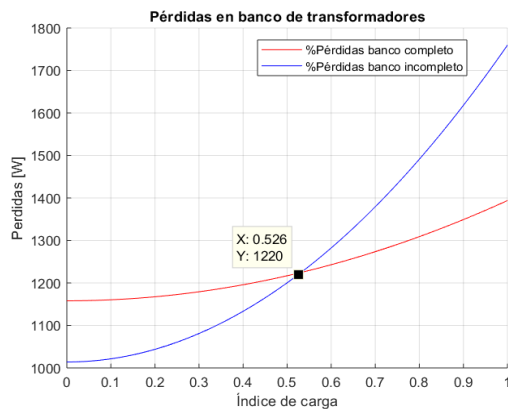


Figura 10. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por una carga trifásica de 250 [kVA].

En la figura 10, se puede observar que, para una carga solamente trifásica de 250 kVA y valores de pérdidas de vacío y cortocircuito tomados de la tabla 2, para ese tipo de transformadores, la óptima forma de conexión es la de un banco completo debido a que produce menos pérdidas al abastecer por completo a la carga, también se puede observar que si el sistema solo requiere hasta el 52.6 % aproximadamente de la carga total se puede cambiar por un banco incompleto debido a que las pérdidas son mucho menores.

Tabla 6. Valores de capacidad de los transformadores que conforman el banco para una carga trifásica de 250 [kVA].

Tipo de conexión	Trafo 1 [kVA]	Trafo 2 [kVA]	Trafo 3 [kVA]
Completo	100	100	100
Incompleto	167	167	0

La tabla 6, muestra los valores de capacidad de los transformadores que forman el banco completo y el banco incompleto para abastecer una carga de 250 kVA.

En este caso, la óptima conexión es la de un banco completo con tres transformadores de 100 kVA Si por

alguna razón una de las líneas del sistema de distribución se desconecta, el banco de transformación completo ya no funcionaría debido a que no lograría abastecer la carga.

La conexión trifásica usada en este caso es delta-estrella debido a que el sistema puede contar con un neutro en el caso de ser necesario, si se produce un desequilibrio la conexión del primario podría repartirlo entre sus tres fases.

## 5.2 Caso 2

La tabla 7, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir una demanda trifásica de 12 kVA y el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 7. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para una carga trifásica de 12 [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]	Tipo de conexión
12	112.41	149.44	completa

En este caso las pérdidas por la formación de un banco completo al suplir toda la demanda son mucho menores que las pérdidas por banco un incompleto.



Figura 11. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por una carga trifásica de 12 [kVA].

En la figura 11, se puede observar que, para una carga solamente trifásica de 12 kVA y valores de pérdidas de vacío y cortocircuito tomados de la tabla 1, para ese tipo de transformadores, las pérdidas por la formación de un banco completo son mucho menores que las producidas por un banco incompleto, es por eso que para este caso la conexión óptima es la de un banco completo. No existe un índice de carga que permita cambiar una configuración por otra.

Tabla 8. Valores de capacidad de los transformadores que conforman el banco para una carga trifásica de 12 [kVA].

Tipo de conexión	Trafo 1 [kVA]	Trafo 2 [kVA]	Trafo 3 [kVA]
Completo	5	5	5
Incompleto	10	10	0

La tabla 8 muestra los valores de capacidad que los transformadores presentan al formar el banco completo e incompleto para abastecer una carga de 12 kVA.

En este caso, con la capacidad de 5 kVA para cada transformador monofásico parte del banco completo de transformación, se logra abastecer la carga total requerida, inclusive si se producen pérdidas, al analizarlas para un factor de potencia requerido de 0.95. En este caso el tipo de conexión es delta-estrella debido a que se puede conectar un neutro al sistema y de esta forma obtener voltajes de fase-fase y fase-neutro.

### 5.3 Caso 3

La tabla 9, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir una demanda trifásica de 85 kVA y el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 9. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para una carga trifásica de 85 [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]	Tipo de conexión
85	779.9	1015.2	incompleta

En este caso las pérdidas por la formación de un banco completo al suplir toda la demanda son mucho menores que las pérdidas por banco incompleto.

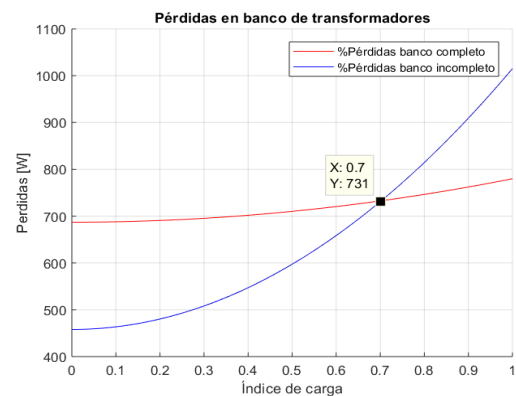


Figura 12. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por una carga trifásica de 85 [kVA].

La figura 12, en este caso, muestra que para una carga solamente trifásica de 85 kVA y valores de pérdidas de vacío y cortocircuito tomados de la tabla 1, las pérdidas por un banco completo son mucho menores que las pérdidas por un banco incompleto, pero si la carga está a un 70% aproximadamente de su total se puede reemplazar la conexión por una conexión incompleta, debido a que se producen menos pérdidas.

Tabla 10. Valores de capacidad de los transformadores que conforman el banco para una carga trifásica de 85 [kVA].

Tipo de conexión	Trafo 1 [kVA]	Trafo 2 [kVA]	Trafo 3 [kVA]
Completo	37.5	37.5	37.5
Incompleto	37.5	37.5	0

La tabla 10, muestra que al formar un banco completo se utilizan 3 transformadores de 37.5 kVA, la misma capacidad de los transformadores que formarían el banco incompleto, es por eso que se elige una conexión incompleta debido a que utiliza menos transformadores. Para llegar a esta resolución se tomó en cuenta también el análisis de pérdidas producidas en el banco incompleto respecto al factor de potencia de 0.95 y se pudo establecer que pese a que las pérdidas sean mayores que un banco completo las cargas siguen siendo abastecidas en su totalidad. En este caso el tipo de conexión es estrella abierta-delta abierta debido a que se puede conectar con solo dos líneas primarias y un neutro.

#### 5.4 Caso 4

La tabla 11, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir una demanda trifásica de 190 kVA y el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 11. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para una carga trifásica de 190 [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]	Tipo de conexión
190	1188.1	1589.5	incompleta

En este caso las pérdidas por formación de un banco incompleto son mucho menores que las pérdidas de un banco completo.

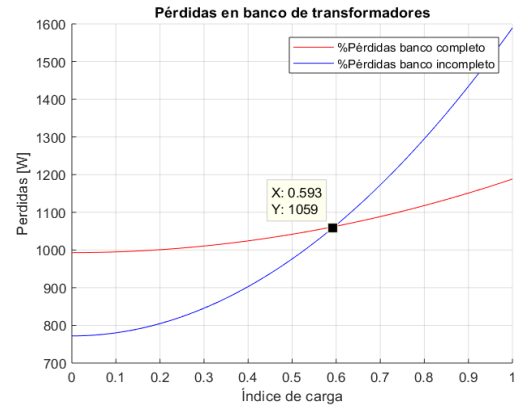


Figura 13. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por una carga trifásica de 190 [kVA].

En la figura 13, se puede observar que, para una carga de 190 kVA, con valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 2 para ese tipo de transformadores, las pérdidas producidas por un banco completo van a ser menores que las producidas por un banco completo, las pérdidas de un banco completo son mucho menores que las pérdidas formadas por un banco incompleto, se puede hacer el reemplazo por un banco incompleto si solo se requiere abastecer hasta el 59.3 % de la carga total pero con diferentes capacidades en los transformadores que conforman el banco como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 12. Valores de capacidad de los transformadores que conforman el banco para una carga trifásica de 190 [kVA].

Tipo de conexión	Trafo 1 [kVA]	Trafo 2 [kVA]	Trafo 3 [kVA]
Completo	75	75	75
Incompleto	100	100	0

Como se puede ver en la tabla 12, debido a que un banco completo entrega pérdidas de potencia muchos menores que un banco incompleto al abastecer una carga de 190 kVA, en este caso, la configuración del banco sería la de un

banco completo con tres transformadores de 75 kVA.

Para la conexión trifásica del banco, se utiliza una conexión triángulo-estrella, debido a que puede proporcionar dos tipos de tensiones proporciona un neutro al sistema.

## 5.5 Caso 5

La tabla 13, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir varias demandas trifásicas en kVA y el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 13. Valores de pérdidas producidas por los bancos de transformadores para diferentes cargas trifásicas que se puedan presentar en [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]	Tipo de conexión
30	459.44	500.66	Incompleta
60	631.8	735.61	Completa
90	791.12	970.32	Completa
120	930.3	1129.1	Completa
150	1003	1391.8	Completa
180	1168.1	1505.7	Completa
210	1231.4	1770.6	Completa
240	1375.4	1701.1	Completa
270	1433.1	1883.6	Completa
300	1497.7	2087.5	Completa
330	1737.5	2313	Incompleta
360	1778.6	2559.9	Incompleta
390	1823.4	2351.1	Completa
420	1871.7	2526.1	Completa

En este caso, para suplir demandas trifásicas con los valores propuestos, la mayor parte se la realiza con la formación de un banco completo.

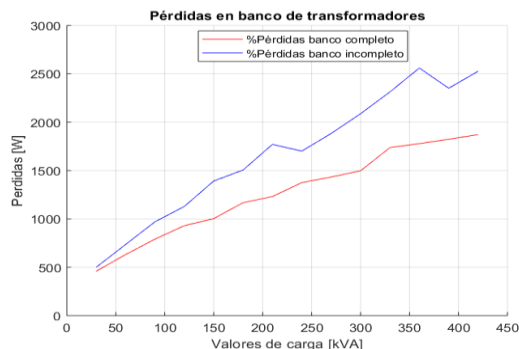


Figura 14. Pérdidas producidas por un banco completo e incompleto por diferentes valores de cargas trifásicas en [kVA].

En la figura 14, en base a valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 2 para ese tipo de transformadores, se pueden apreciar las pérdidas que se producen en la formación de bancos tanto completos como incompletos para suplirlas diferentes demandas.

Se puede observar que, la mayoría de conexiones en banco completos producen menos pérdidas que las que se producen por la formación de un banco incompleto.

Tabla 14. Valores de capacidad de los transformadores ante diferentes cargas trifásicas que se puedan presentar en [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Capacidad de los transformadores que conforman el banco completo [kVA]	Capacidad de los transformadores que conforman el banco incompleto [kVA]
30	15	15
60	25	37.5
90	37.5	50
120	50	75
150	50	75
180	75	100
210	75	100
240	100	167
270	100	167
300	100	167
330	167	167
360	167	167
390	167	250
420	167	250

La tabla 14, muestra diferentes valores de demanda y la capacidad de los transformadores que forman los bancos de transformación.

Debido a que la conformación de los bancos tanto trifásicos como monofásicos son de distintas capacidades, en el caso de capacidades iguales se escoge el banco con menor número de transformadores, siempre y cuando las pérdidas que se producen no afecten en la capacidad de entrega total del banco, para esto se hace un análisis de pérdidas con un factor de 0.95 y se analiza si las pérdidas cumplen con los requerimientos de carga total a suplir.

### 5.6 Caso 6

La tabla 15, muestra las pérdidas que el sistema presenta para abastecer una demanda monofásica de 135 kVA, además la capacidad del transformador para suplir toda la carga requerida.

Tabla 15. Valores de pérdidas producidas en [W] y valor de la capacidad del transformador monofásico en [kVA] ante una carga monofásica de 135 [kVA].

Carga monofásica [kVA]	Pérdidas totales [W]	Capacidad del transformador [kVA]
135	1188.1	167

En este caso el valor de capacidad del transformador es de 167 kVA para suplir una carga monofásica de 135 kVA

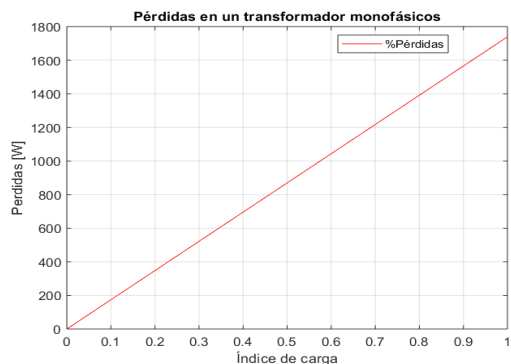


Figura 15. Pérdidas producidas por un transformador monofásico ante una carga monofásica de 135 [kVA].

En la figura 15, se puede observar para una carga monofásica de 135 kVA y valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 1 para ese tipo de transformadores, las pérdidas que se producen al usar un transformador de 167 kVA para abastecer una carga de 135 kVA, en este caso el análisis de pérdidas para un factor de potencia de 0.95, demuestra que la carga sigue siendo abastecida y no hay riesgo de que se sobrecargue el transformador.

### 5.7 Caso 7

La tabla 16, muestra para diferentes valores de cargas monofásicas, las pérdidas que se producen debido a la selección del transformador monofásico que abastecerá la demanda total requerida.

Tabla 16. Valores de pérdidas producidas en [W] y capacidad en [kVA] de varios transformadores monofásico ante diferentes cargas monofásicas [kVA].

Carga monofásica [kVA]	Pérdidas totales [W]	Capacidad del transformador [kVA]
20	545	25
30	717	37.5
40	873	50
50	873	50
60	1152	75
70	1152	75
80	1405	100
90	1405	100
100	1405	100
110	2004	167
120	2004	167
130	2004	167
140	2004	167
150	2004	167
160	2004	167



En este caso, los valores de pérdidas en vacío y cortocircuito son tomados de la tabla 1 para ese tipo de transformadores, los cuales permiten determinar las pérdidas que se producen debido a la elección de la capacidad del transformador monofásico para suplir las cargas que se presentan en la tabla 15.

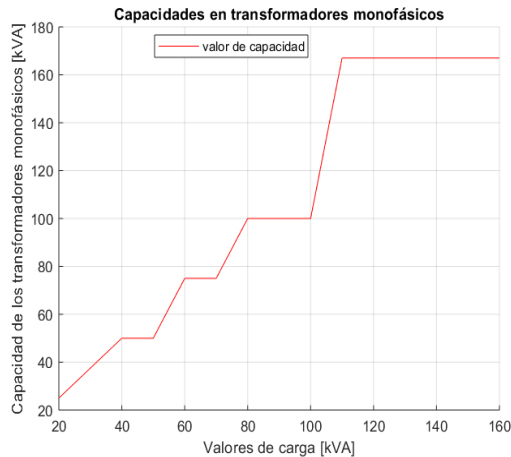


Figura 16. Valores de capacidad de transformadores monofásicos en [kVA] ante diferentes cargas en [kVA].

En la figura 16, se observa la capacidad de los transformadores para suplir cargas hasta un cierto límite. Como por ejemplo un transformador de 100 kVA puede suplir cargas desde los 76 hasta los 100 kVA, ya que para cargas menores e iguales de 75 kVA existen otros transformadores que pueden suplir estos requerimientos.

### 5.8 Caso 8

La tabla 17, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir una carga monofásica de 75 kVA y una carga trifásica de 185 kVA, también muestra el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 17. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 75 [kVA] y una carga trifásica de 185 [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]
185	75	3477	3384.9

En este caso para suplir una carga trifásica de 185 kVA y una carga monofásica de 75 kVA, las pérdidas que se producen en la formación de un banco incompleto son menores que las que se producen por un banco completo.

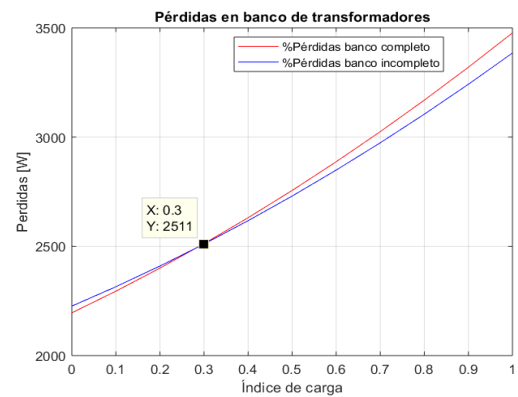


Figura 17. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 75 [kVA] y trifásica de 185 [kVA].

La figura 17, muestra para un valor de carga trifásica de 185 kVA, un valor de carga monofásica de 75 kVA, valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 2 para ese tipo de transformadores, las pérdidas que se producen en la conformación del banco trifásico y monofásico para suplir esa carga,

Se puede observar que, si la carga tiene en un 30 % de su total se puede cambiar la configuración por un banco completo, a partir del 30 % se debe usar una conexión trifásica incompleta debido a que las pérdidas disminuyen y la carga tanto monofásica como trifásica puede ser abastecida en su totalidad.

Tabla 18. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica de 185 [kVA] y monofásica de 75 [kVA].

Conexión	Cap. trafo fuerza [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]
completa	167	100	100
incompleta	167	167	

La tabla 18, muestra el valor de capacidad del transformador de fuerza, y los de alumbrado para abastecer una carga trifásica de 185 kVA y una carga monofásica de 75 kVA, en este caso se seleccionó una conexión incompleta con un transformador de alumbrado y de fuerza de 167 kVA

En la formación del banco incompleto, se producen menores pérdidas y las cargas tanto trifásicas como monofásicas son abastecidas en su totalidad.

También se puede ver que, para este tipo de configuración siendo la carga monofásica menor que la trifásica la conexión del banco de ser de manera incompleta, la conexión trifásica del banco es en estrella abierta-delta abierta debido a que solo se necesita dos líneas de alimentación y un neutro.

## 5.9 Caso 9

La tabla 19, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir una carga monofásica de 120 kVA y una carga trifásica de 35 kVA, también muestra el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 19. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 120 [kVA] y una carga trifásica de 35 [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]
35	120	3619.9	3725.4

En este caso para suplir una carga trifásica de 35 kVA y una carga monofásica de 120 kVA, las pérdidas que se producen en la formación de un banco completo son menores que las que se producen por un banco incompleto.

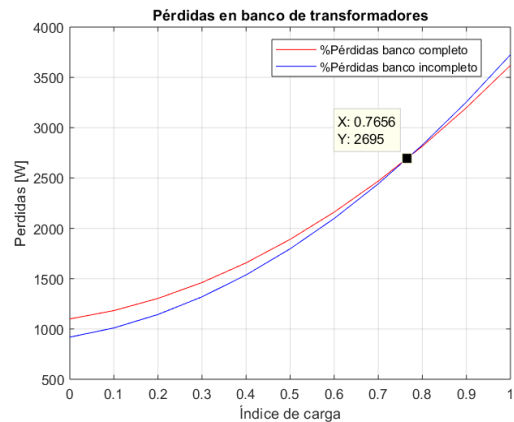


Figura 18. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 120 [kVA] y trifásica de 35 [kVA].

En la figura 18, para una carga trifásica de 35 kVA y una carga monofásica de 120 kVA, con valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 2 para ese tipo de transformadores, se puede determinar que, las pérdidas del banco completo son mucho menores que las pérdidas para un banco incompleto si se quiere abastecer la carga en su totalidad, pero puede ser reemplazado por un banco incompleto si solo se requiere abastecer el 76.5 % de la carga total.

Tabla 20. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica de 35 [kVA] y monofásica de 120 [kVA].

Conexión	Cap. trafo fuerza [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]
completa	100	50	50
incompleta	167	75	

La tabla 20, muestra el valor de capacidad del transformador de fuerza, y



los de alumbrado para abastecer una carga trifásica de 35 kVA y una carga monofásica de 120 kVA, en este caso se seleccionó una conexión completa con un transformador de fuerza de 100 kVA y dos transformadores de alumbrado de 50 kVA.

La conexión para este caso es la de un banco completo, debido a que la carga mayoritaria es la carga monofásica, además de que los transformadores que conforman la parte de alumbrado su capacidad es mucho menor que el transformador de fuerza debido al criterio que el transformador de fuerza asume 2/3 de la capacidad total de la carga monofásica y al sumarla con la capacidad que se requiere para la carga trifásica nos entrega un valor mucho más grande respecto a los otros. En este caso la conexión trifásica para este tipo de cargas es la de delta-estrella debido a que si se produce asimetrías en la carga, la parte de conexión en delta equilibraría esas asimetrías.

### 5.10 Caso 10

La tabla 21, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir una carga monofásica de 25 kVA y una carga trifásica de 500 kVA, también muestra el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 21. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 25 [kVA] y una carga trifásica de 500 [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]
500	25	3619.9	3725.4

En este caso para suplir una carga trifásica de 500 kVA y una carga monofásica de 25 kVA, las pérdidas que

se producen en la formación de un banco incompleto son menores que las que se producen por un banco completo.

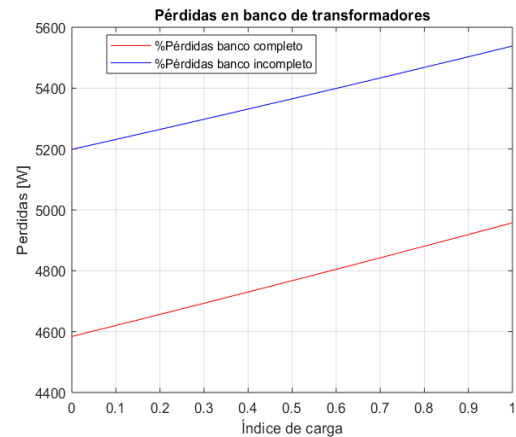


Figura 19. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 25 [kVA] y trifásica de 500 [kVA].

En la figura 19, se puede observar que, para una carga trifásica de 500 kVA y una carga monofásica de 25 kVA, con valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 2 para ese tipo de transformadores, las pérdidas para un banco completo son mucho menores que las pérdidas producidas por un banco incompleto, no existe un límite de carga que permita el remplazo de un banco por otro.

Tabla 22. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica de 500 [kVA] y monofásica de 25 [kVA].

Conexión	Cap. trafo fuerza [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]
completa	250	250	250
incompleta	333	333	

La tabla 22, muestra el valor de capacidad del transformador de fuerza, y los de alumbrado para abastecer una carga trifásica de 500 kVA y una carga monofásica de 25 kVA, en este caso se seleccionó una conexión completa con un transformador de fuerza de 250 kVA

y dos transformadores de alumbrado de igual capacidad.

La conexión para abastecer este tipo de cargas es la de un banco completo, como se puede ver los 3 transformadores son de igual capacidad debido a que la carga monofásica es mucho menor que la carga trifásica, la conexión trifásica en este tipo de configuración es la de estrella-estrella, debido a que la carga trifásica en este caso es mucho mayor que la carga monofásica, lo que permite la utilización del neutro tanto en el lado del primario como del secundario.

### 5.11 Caso 11

La tabla 23, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir una carga monofásica de 330 kVA y una carga trifásica de 30 kVA, también muestra el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 23. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 330 [kVA] y una carga trifásica de 30 [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]
30	330	7965.6	7617.1

En este caso para suplir una carga trifásica de 330 kVA y una carga monofásica de 30 kVA, las pérdidas que se producen en la formación de un banco incompleto son menores que las que se producen por un banco completo.

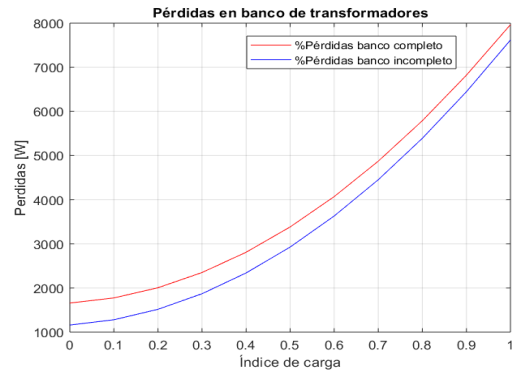


Figura 20. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 330 [kVA] y trifásica de 30 [kVA].

En la figura 20, muestra que, para el caso de una carga trifásica de 30 kVA y una monofásica de 330 kVA, con valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 2, para ese tipo de transformadores, las pérdidas producidas por un banco incompleto siempre van a ser menores y no existe un punto donde se pueda cambiar una conexión por otra, todo esto debido a que la potencia monofásica es mucho mayor que la potencia trifásica.

Tabla 24. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica de 30 [kVA] y monofásica de 330 [kVA].

Conexión	Cap. trafo fuerza [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]
completa	250	100	100
incompleta	250	167	

La tabla 24, muestra el valor de capacidad del transformador de fuerza, y los de alumbrado para abastecer una carga trifásica de 30 kVA y una carga monofásica de 330 kVA, en este caso se seleccionó una conexión incompleta con un transformador de fuerza de 250 kVA y un transformador de alumbrado de 167 kVA.

La conexión en este caso es la de un banco incompleto debido a que la mayor

parte de la carga a suplir es monofásica y las pérdidas que se producen en un banco incompleto es mucho menor, la conformación del banco incompleto es de dos transformadores con diferente capacidad uno es mayor que el otro, la conexión trifásica para este banco es en estrella abierta-delta abierta debido a que solo se requiere de dos líneas y un neutro para su conexión.

### 5.12 Caso 12

La tabla 25, muestra las pérdidas que se producen en la formación del banco completo e incompleto al suplir una carga monofásica de 95 kVA y una carga trifásica de 95 kVA, también muestra el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 25. Valores de pérdidas producidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 95 [kVA] y una carga trifásica de 95 [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]
95	95	2603.6	2794.9

En este caso para suplir una carga trifásica de 95 kVA y una carga monofásica de 95 kVA, las pérdidas que se producen en la formación de un banco completo son menores que las que se producen por un banco incompleto.

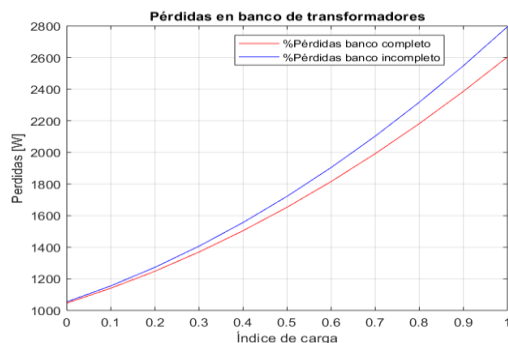


Figura 21. Valores de pérdidas para un banco completo e incompleto para una carga monofásica de 95 [kVA] y trifásica de 95 [kVA].

La figura 21, muestra que para cargas iguales tanto monofásicas como trifásicas de 95 kVA, con valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 1, para ese tipo de transformadores, las pérdidas para un banco completo siempre son menores en ningún punto determinado por el índice de carga existe la forma de cambiar una conexión por otra.

Tabla 26. Valores de la capacidad de transformadores que forman el banco completo e incompleto para una carga trifásica y monofásica de 95 [kVA].

Conexión	Cap. trafo fuerza [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]	Cap. del trafo alumbrado [kVA]
completa	100	75	75
incompleta	167	100	

La tabla 26, muestra el valor de capacidad del transformador de fuerza, y los de alumbrado para abastecer una carga trifásica de 95 kVA y una carga monofásica de 95 kVA, en este caso se seleccionó una conexión completa con un transformador de fuerza de 100 y un dos transformadores de alumbrado de 75 kVA.

En este caso, para la formación del banco completo el valor de capacidad del transformador de fuerza es mayor que los de alumbrado lo que permite abastecer toda la demanda de carga requerida, la conexión trifásica para este banco es la de delta-estrella la cual permite una mayor estabilización ante posibles desequilibrios, también se permite utilizar un neutro para la protección de la instalación en el lado del secundario y la formación de voltajes de fase-fase y fase-línea.

### 5.13 Caso 13

La tabla 27, muestra los valores de capacidad que tienen los transformadores al elegir la óptima conexión para suplir diferentes cargas formadas por

componentes trifásicas y monofásicas, también muestra el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 27. Valores de capacidad de transformadores en [kVA] que forman el banco completo e incompleto para una diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica [kVA]	Óptima conexión	Trafo [kVA]
100	15	incompleta	75, 75
125	30	incompleta	100, 100
150	45	incompleta	167, 167
175	60	incompleta	167, 167
200	75	incompleta	167, 167
225	90	incompleta	250, 167
250	105	incompleta	250, 250
275	120	incompleta	250, 250
300	135	completa	250, 167, 167
325	150	completa	250, 167, 167

En este caso, para diferentes valores de cargas formadas por componentes trifásicas y monofásicas, y valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 1, para ese tipo de transformadores, se pueden determinar los valores de capacidad que tendrán los transformadores para formar bancos de transformación que pueden ser completos e incompletos.

Tabla 28. Valores de pérdidas en [W] que forman el banco completo e incompleto para una diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]
100	15	2127	1909.9
125	30	2630	2354.1
150	45	3160.4	2336.5
175	60	3764.8	2940.3
200	75	3689	3658.9
225	90	4440.7	4257.8
250	105	4286.3	3927.8
275	120	4963.9	4569.3

300	135	5063.2	5094.1
325	150	5717.2	5823.7

La tabla 28, muestra el valor de las pérdidas que se producen en la formación de bancos completos e incompletos para el abastecimiento de cargas formadas por componentes trifásicas y monofásicas.

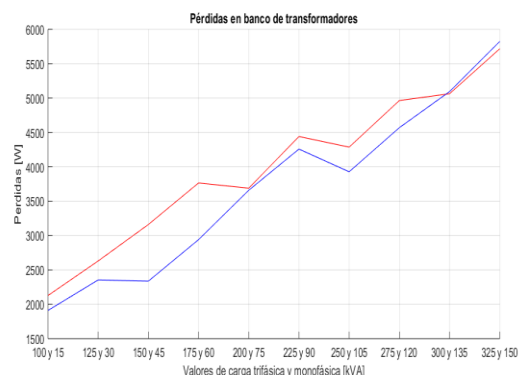


Figura 22. Valores de pérdidas en [W] para un banco completo e incompleto para diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA].

En la gráfica 22, se puede ver las pérdidas producidas por los bancos completos e incompletos ante diferentes cargas, lo que permite la elección de la conexión correcta para la formación del banco. El análisis se hizo dando valores mayores para las cargas trifásicas y valores menores para las cargas monofásicas.

#### 5.14 Caso 14

La tabla 29, muestra los valores de capacidad que tienen los transformadores al elegir la óptima conexión para suplir diferentes cargas formadas por componentes trifásicas y monofásicas, también muestra el tipo de conexión que debe tener el banco debido al análisis entre pérdidas que se producen.

Tabla 29. Valores de capacidad de transformadores en [kVA] que forman el banco completo e incompleto para una diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica [kVA]	Óptima conexión	Trafo [kVA]
15	100	completa	75, 37.5, 37.5
30	125	completa	100, 50, 50
45	150	incompleta	167, 100
60	175	completa	167, 75, 75
75	200	incompleta	250, 167
90	225	incompleta	250, 167
105	250	incompleta	250, 167
120	275	completa	250, 167, 167
135	300	incompleta	333, 250
150	325	incompleta	333, 250

En este caso, para diferentes valores de cargas formadas por componentes trifásicas y monofásicas, y valores de pérdidas en vacío y cortocircuito tomados de la tabla 2, para ese tipo de transformadores, se pueden determinar los valores de capacidad que tendrán los transformadores para formar bancos de transformación que pueden ser completos e incompletos.

Tabla 30. Valores de pérdidas en [W] que forman el banco completo e incompleto para una diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA].

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica [kVA]	Pérdidas banco completo [W]	Pérdidas banco incompleto [W]
15	100	3102.3	3520.7
30	125	3694.6	3807.3
45	150	5105.8	4080.7
60	175	4729.9	5429
75	200	5906.1	4367.8
90	225	5885.1	3332.5
105	250	6693.6	6423.4
120	275	5563.7	7698
135	300	6272.6	6036.1
150	325	7707.9	7550.4

La tabla 30, muestra el valor de las pérdidas que se producen en la formación de bancos completos e incompletos para el abastecimiento de cargas formadas por componentes trifásicas y monofásicas.

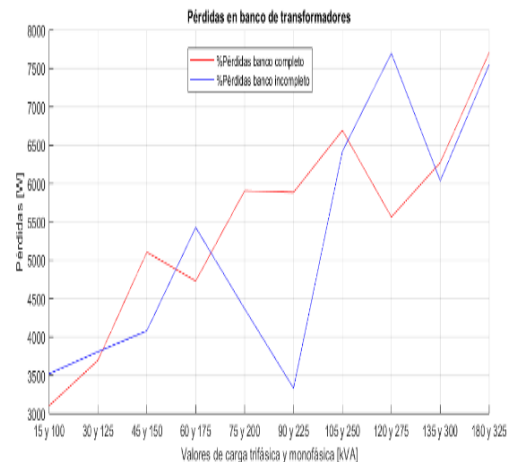


Figura 23. Valores de pérdidas en [W] para un banco completo e incompleto para diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA].

En la figura 23, se puede ver las pérdidas producidas por los bancos completos e incompletos ante diferentes cargas, lo que permite la elección de la conexión correcta para la formación del banco. El análisis se hizo dando valores mayores para las cargas monofásicas y valores menores para las cargas trifásicas.

## 6. Conclusiones

Los valores de pérdidas por conexión obtenidos mediante el algoritmo de búsqueda exhaustiva en MatLab, permiten establecer la óptima conexión trifásica que los bancos de transformación tendrán ante diferentes escenarios de carga, por lo que el sistema de distribución reduciría considerablemente el porcentaje de pérdidas que se producen debido a la transformación.

Al ser un modelo basado en pérdidas por conexión ante diferentes cargas, permite deducir si las capacidades de los transformadores que forman el banco de transformación van a ser las correctas y no va existir un desequilibrio debido a que las cargas pueden tener tanto componentes trifásicas como monofásicas.

Ha sido necesario implementar restricciones para evitar sobrecargas en los transformadores monofásicos, debido a que al no colocar estas restricciones los transformadores monofásicos se sobredimensionan y las pérdidas aumentan considerablemente.

Un banco incompleto en ciertos casos puede quedar solo con dos unidades y aun así seguir abasteciendo la demanda requerida, debido a que la entrega de potencia es  $2/\sqrt{3}$  mayor que la que entrega 3 unidades.

El índice de carga presente en cada escenario de carga propuesto, permite establecer si factible el cambio de un banco por otro, debido a que este cambio genera mucho menos pérdidas aumentando la eficiencia en los transformadores que forman el banco de transformación

Al presentar valores de igual capacidad para los transformadores monofásicos cuando se establece si el banco es completo o incompleto, se elige un banco incompleto debido a que se reduce el número de transformadores y se podrían abaratar los costos, siempre y cuando las pérdidas que se presentan no afecten en la entrega de demanda total.

## 7. Trabajos Futuros

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser tomados para análisis de futuras investigaciones como:

Incorporación de un análisis económico para la selección de la óptima conexión trifásica de un banco de transformadores monofásicos ante distintos escenarios de carga.

Pérdidas de energía en banco de transformadores monofásicos ante diferentes escenarios de carga.

Análisis de capacidad ociosa en sistemas de transformación debido al sobredimensionamiento de unidades monofásicas que forman un banco de transformación trifásico.

Selección óptima de conexiones trifásicas para bancos de transformación formado por unidades monofásicas mediante el análisis de pérdidas producidas por el tipo de conductor y distancias de conexión ante diferentes escenarios de carga.

## 8. Referencias

- [1] J. C. Olivares-Galván, P. S. Georgilakis, E. Vázquez-Martínez, and J. A. Mendieta-Antúnez, "Comparison of three-phase distribution transformer banks against three-phase distribution transformers," in *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)*, 2010.
- [2] W. H. Kersting and W. H. Phillips, "Modeling and analysis of unsymmetrical transformer banks serving unbalanced loads," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 3, pp.

- 720–725, 1996.
- [3] I. Džafić, R. A. Jabr, and H. T. Neisius, “Transformer Modeling for Three-Phase Distribution Network Analysis,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2604–2611, 2015.
- [4] W. H. Kersting and J. S. Rathbun, “Analysis of an ungrounded wye-delta transformer bank serving an induction motor and single-phase lighting loads,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 39–45, 2000.
- [5] C. Prodan, N. Poienar, C. Ungureanu, and D. Cernomazu, “Conclusions about the study of the special connections at the three-phase transformers,” in *2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, 2012.
- [6] M. A. De Armas and G. Garcia, “Selection of asymmetrical transformers banks with emphasis in losses and efficiency,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 8, no. 6, pp. 678–684, 2010.
- [7] W. H. Kersting, W. H. Phillips, and W. Carr, “A New Approach to Modeling Three-Phase Transformer Connections,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 1, pp. 169–175, 1999.
- [8] W. H. Kersting and W. Carr, “The Wye-Delta Center Tapped Transformer Bank,” in *2018 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*, 2018.
- [9] J. C. Olivares-Galván, R. Escarela-Pérez, P. S. Georgilakis, and E. Campero-, “Separation of No-Load Losses for Distribution Transformers Using Experimental Methods : Two Frequencies and Two Temperatures,” in *7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)*, 2010.
- [10] M. Shareghi, B. T. Phung, M. S. Naderi, T. R. Blackburn, and E. Ambikairajah, “Effects of Current and Voltage Harmonics on Distribution Transformer Losses,” in *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2012.
- [11] S. Magdaleno-Adame, C. Perez-Rojas, T. D. Kefalas, and S. Garcia-Martinez, “Electromagnetic Finite Element Analysis of Electrical Steels Combinations in Lamination Core Steps of Single-Phase Distribution Transformers,” in *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 2017.
- [12] A. A. Tellez, D. F. C. Galarza, and L. O. Matos, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7273776.
- [13] R. Pérez, R. Rodrigues, and A. Aguila, “Analysis and Simulation of Ferroresonance in Power Transformers using Simulink,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 460–466, 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8327400.



- [14] X. Wanjun, X. Lijie, W. Wei, and C. Qi, "Application of Single-Phase Distribution Technology and Analysis of Energy-Saving Effect," in *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2010.
- [15] M. Z. Coban and R. M. Mersereau, "A Fast Exhaustive Search Algorithm for Rate-Constrained Motion Estimation," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 7, no. 5, pp. 769–773, 1998.
- [16] L. Hui and C. Yonghui, "Study of Heuristic Search and Exhaustive Search in Search Algorithms of the Structural Learning," in *2010 Second International Conference on Multimedia and Information Technology*, 2010.
- [17] A. Águila-Téllez, "Medidas para minimizar las pérdidas de energía en circuitos de distribución," Ciego de Ávila, 2009, pp. 10–51.
- [18] F. M. F. Flaih, L. Xiangning, S. M. Dawoud, and M. A. Mohammed, "Distribution System Reconfiguration for Power Loss Minimization and Voltage Profile Improvement Using Modified Particle Swarm Optimization," in *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2016.
- [19] J. C. Maldonado-Chica, P. M. Cando-Naula, and P. A. Mendez, "Determinación de pérdidas de energía en transformadores de distribución mediante algoritmo de compensación en sistemas de medición," Cuenca, 2018, pp. 23–25.
- [20] A. Aguila and J. Wilson, "Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 73, no. 1, p. 012018, Jul. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012018.
- [21] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. W. González, "Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review," *Heliyon*, vol. 4, no. 8, p. e00746, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00746.
- [22] A. S. De la Cruz-Aquieta and A. Águila-Téllez, "Corrección de simetría de corrientes en redes eléctricas de distribución mediante óptima conexión de transformadores monofásicos empleando búsqueda exhaustiva," Quito, 2019, pp. 5–8.
- [23] A. E. Robayo-Cabrera and A. Águila-Téllez, "Optmización de transformadores de distribución basada en la minimización de pérdidas por capacidad ociosa y conexiones inadecuadas," Quito, 2015, pp. 57–85.
- [24] S. Choy-Lajes, V. Davel-Borges, and C. Hernández, "Pérdidas por las líneas en las conexiones de transformadores y bancos de distribución," vol. 5, no. 12, 2001, pp. 37–45.
- [25] J. C. Olivares, Y. Liu, J. M. Canedo, R. Escarela-Pérez, J. Driesen, and P. Moreno, "Reducing Losses in Distribution Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*,



- vol. 18, no. 3, pp. 821–826, 2003.
- [26] J. Fraile-Mora, “Máquinas Eléctricas,” 5th ed., Madrid: McGRAW-HILL, 2003, pp. 161–226.
- [27] B. F. Caldeira, F. D. P. Coelho, G. A. M. Maciel, A. L. M. Coelho, and I. P. Faria, “Testing and Diagnostics of Distribution Transformers Losses in the Presence of Harmonics,” in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395793.
- [28] S. J. Chapman, “Máquinas Eléctricas,” 5th ed., México: McGRAW-HILL, 2012, pp. 49–117.
- [29] M. Kundu, S. Jadhav, and K. Bagdia, “Technical Loss Reduction through Active Repair of Distribution Transformers : Results from the field,” in *2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS)*, 2017.
- [30] N. S. Rao-Mohan, “Experience in Short Circuit Testing of LV Short Circuit Testing Transformer,” in *2011 North American Power Symposium*, 2011.
- [31] D. J. Freire-Macias, V. X. García-Alaña, and N. Vega, “Análisis matemático y simulación en matlab del fenómeno de ferresonancia en banco de transformadores trifásicos.,” Guayaquil, 2018, pp. 26–49.
- [32] IEEE C57.12.70-2011, “IEEE Standard for Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power TransformersTitle,” 2012, pp. 1–56.
- [33] W. Castro, F. Rodríguez, and O. Astudillo, “Diseño y construcción de un banco de pruebas para transformadores,” 2015, pp. 63–142.
- [34] G. Revelo-Erazo, J. Yucato-Checa, and H. Pérez, “Diseño y construcción de módulos monofásicos de transformación didácticos que permitan analizar la utilidad y aplicación de los diferentes grupos de conexión trifásica para el laboratorio de máquinas eléctricas en la carrera de ingeniería en mantenimiento,” Ibarra, 2017, pp. 85–107.
- [35] L. Xiaodong, W. Jackson, and R. Laughy, “Transformer winding connections for practical industrial applications,” in *2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference*, 2007.
- [36] W. H. Kersting and W. Carr, “Grounded Wye-Delta Transformer Bank Backfeed Short-Circuit Currents,” vol. 53, no. 1, pp. 65–70, 2017.
- [37] B. Javier, R. López, and G. Ampuño, “Análisis y Modelación Matemática de Bancos Trifásicos de transformadores con Conexión Delta-Estrella y Diferentes Grupos Vectoriales,” Guayaquil, pp. 5–25, 2016.
- [38] V. Orejuela, D. Arias, and A. Aguila, “Response of Residential Electricity Demand Against Price Signals in Ecuador,” in *PROCEEDINGS of the 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention*, 2015, no. Concapan XXXV, pp. 373–378.
- [39] Empresa Eléctrica Quito S.A.,

“Normas para sistemas de distribución Parte A,” in *Guía para diseño de redes para distribución*, 2015, pp. 1–166.

- [40] Instituto Ecuatoriano de Normalización,  
“Transformadores de distribución nuevos monofasicos, Valores de corriente sin carga, pérdidas y voltajes de cortocircuito,” in *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2114:2004*, Quito, 2012, p. 5.
- [41] H. Peña, J. Prentice, and O. Guzman, “Normas de transformadores de distribución,” 2010, pp. 3–27.

## 9. Matriz del Estado de arte

Tabla 31. Matriz del estado de arte

SELECCIÓN ÓPTIMA DE CONEXIONES TRIFÁSICAS EN BANCO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS ANTE DISTINTOS ESCENARIOS DE CARGA USANDO BÚSQUEDA EXHAUSTIVA.																			
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA	
			Pérdidas en sistemas de distribución	Capacidad ociosa en transformadores	Conexiones en bancos de transformadores	Conexiones trifásicas para transformadores de distribución	Pérdidas en transformadores de distribución	Pérdidas para bancos completos	Pérdidas para bancos incompletos	Pérdidas en vacío y cortocircuito	Tipos de Conexiones trifásicas	Capacidades de los transformadores	Pérdidas para bancos con carga trifásica	Pérdidas para bancos con carga monofásica	Pérdidas para banco con carga trifásica y monofásica	Algoritmo de búsqueda exhaustiva	Selección de conexión por pérdidas producidas	Óptima conexión trifásica	Óptima capacidad de los transformadores
1	2010	Comparison of three-phase distribution transformer banks against three-phase distribution transformers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	1996	Modeling and analysis of unsymmetrical transformer banks serving unbalanced loads	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	2015	Transformer Modeling for Three-Phase Distribution Network Analysis	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	2000	The analysis of an ungrounded Wye-Delta transformer bank serving an induction motor and single-phase lighting loads	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	2012	Conclusions about the study of the special connections at the three-phase transformers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	2010	Selection of Asymmetrical Transformers Banks with Emphasis in Losses and Efficiency	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	1999	A new approach to modeling three-phase transformer connections	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	2018	The Wye-Delta Center Tapped Transformer Bank	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	2010	Separation of no-load losses for distribution transformers using experimental methods: Two frequencies and two temperatures	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10	2012	Effects of current and voltage harmonics on distribution transformer losses	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	2017	Electromagnetic finite element analysis of electrical steels combinations in lamination core steps of single-phase distribution transformers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	2010	Application of Single-Phase Distribution Technology and Analysis of Energy-Saving Effect	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	1998	A fast exhaustive search algorithm for rate-constrained motion estimation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14	2010	Study of Heuristic Search and Exhaustive Search in Search Algorithms of the Structural Learning	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
15	2016	Distribution system reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using Modified particle swarm optimization	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
16	2018	Determinación de pérdidas de energía en transformadores de distribución mediante algoritmo de compensación en sistemas de medición	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
17	2009	Medidas para minimizar las pérdidas de energía en circuitos de distribución	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
18	2018	Optimización de transformadores de distribución basada en la minimización de pérdidas por capacidad ociosa y conexiones inadecuadas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
19	2003	Reducing losses in distribution transformers	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
20	2018	Testing and diagnostics of distribution transformers losses in the presence of harmonics	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
21	2017	Technical loss reduction through active repair of distribution transformers: Results from the field	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
22	2011	Experience in Short Circuit Testing of LV Short Circuit Testing Transformer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
23	2012	IEEE Standard for Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
24	2015	Análisis matemático y simulación en matlab del fenómeno de ferresonancia en banco de transformadores trifásicos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
25	2015	Diseño y construcción de un banco de pruebas para transformadores	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
26	2007	Transformer Winding Connections for Practical Industrial Applications	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
27	1996	Models of grounded mid-tap open-wye and open-delta connected transformers for rigorous analysis of a distribution system	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
28	2016	Grounded Wye-Delta Transformer Bank Backfeed Short-Circuit Currents	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
29	2016	Análisis y modelación matemática de paralelismo de bancos trifásicos de transformadores con conexión Delta-Estrella y de diferentes grupos vectoriales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
30	2010	Normas de transformadores de distribución	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
CANTIDAD:			6	9	7	14	20	3	3	3	15	13	3	2	2	2	14	7	3	3

## 9.1 Indicadores del estado de arte

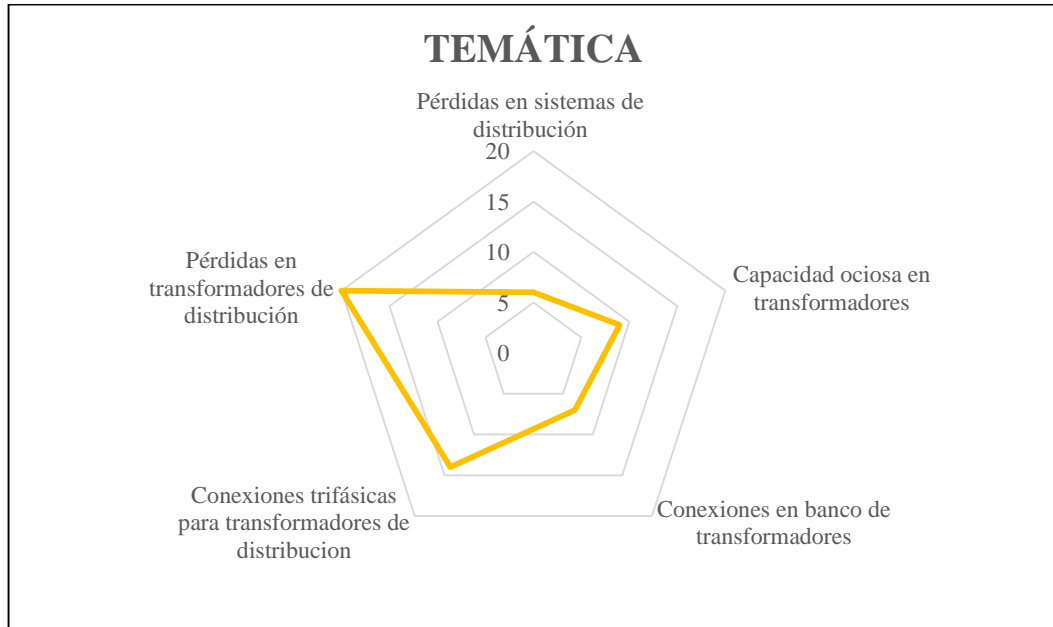


Figura 24. Resumen e Indicador de la Temática- Estado del arte



Figura 25. Indicador de la formulación del problema - Estado del arte

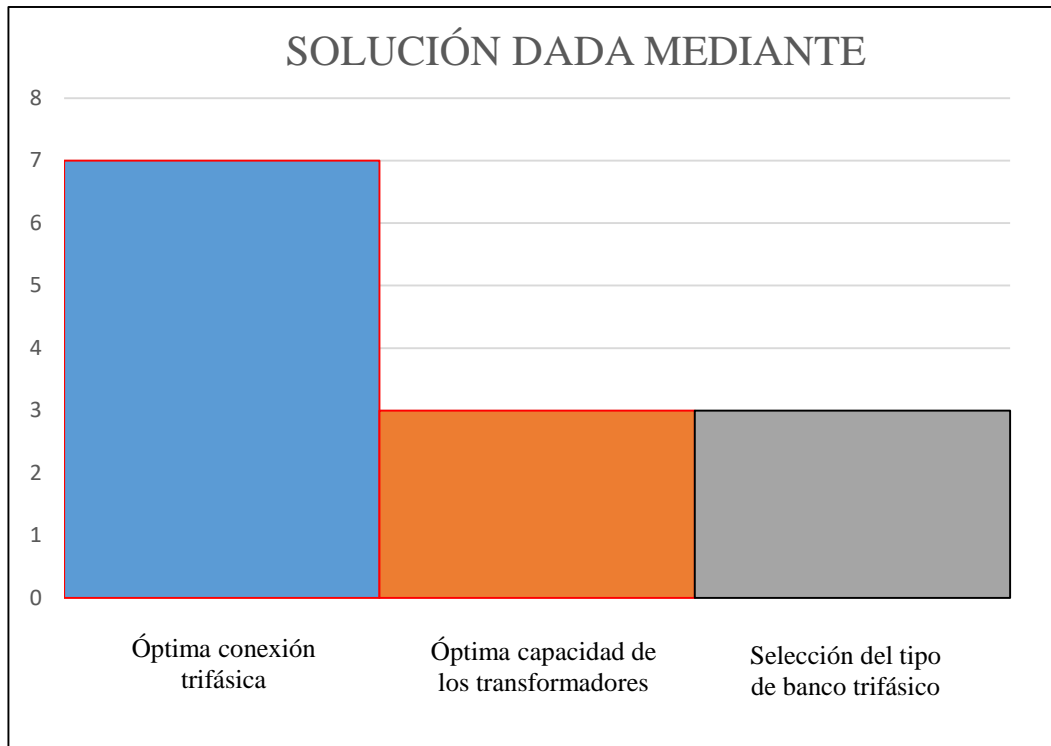


Figura 26. Indicador de solución - Estado del arte

## 10. Anexos

Tabla 30. Valores de capacidad de transformadores en [kVA] que forman el banco completo e incompleto para una diferentes cargas trifásicas y monofásicas en [kVA]

Carga trifásica [kVA]	Carga monofásica[kVA]	Conexión	Transformador de fuerza [kVA]	Transformador de alumbrado [kVA]	Transformador de alumbrado [kVA]
150	20	Completa	75	75	75
160	40	Incompleta	167	167	
170	60	Incompleta	167	167	
180	80	Incompleta	167	167	
190	100	Incompleta	250	167	
200	120	Incompleta	250	167	
210	140	Incompleta	250	250	
220	160	Incompleta	333	250	
230	180	Incompleta	333	250	
240	200	Incompleta	333	250	
250	220	Incompleta	333	250	
150	240	Incompleta	75	100	
150	20	Completa	167	100	100
150	30	Incompleta	167	167	
150	40	Incompleta	167	167	
150	50	Incompleta	167	167	