

DISEÑO DE TRANSFORMADORES EN PARALELO PARA EL LABORATORIO
DE MÁQUINAS 1 DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

DEIBY STIVEN DEOSSA CORREA
YEISON ELIDER IDARRAGA CHAVARRIA
ANYI LORENA GONZALEZ BUSTAMANTE

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2012

DISEÑO DE TRANSFORMADORES EN PARALELO PARA EL LABORATORIO
DE MÁQUINAS 1 DE LA INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

DEIBY STIVEN DEOSSA CORREA
YEISON ELIDER IDARRAGA CHAVARRIA
ANYI LORENA GONZALEZ BUSTAMANTE

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogos en Eléctrica

Asesor
Elkin Darío Pérez Ramírez
Ingeniero Electricista

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2012

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	17
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	18
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS	20
3.1 OBJETIVO GENERAL	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4. REFERENTES TEÓRICOS	21
4.1 ¿QUÈ ES EL TRANSFORMADOR?.....	21
4.2 LEY DE FARADAY	22
4.3 LEY DE JOULE	23
4.4 CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES.....	23
4.4.1 Por su nivel de voltaje	24
4.4.1.1 Transformadores Elevadores y Reductores	24
4.4.2 Por su número de fases	24

4.4.2.1 Transformadores monofásicos	24
4.4.2.2 Transformadores Trifásicos	24
4.4.2.3 Transformadores Hexafásicos	25
4.4.3 Por la forma del núcleo	25
4.4.3.1 Transformador monofásico de columnas	25
4.4.3.2 Transformador monofásico acorazado	25
4.4.3.3 Transformador Toroidal	28
4.4.3.4 Por su núcleo	29
4.4.3.5 Por la posición de sus devanados	29
4.5 TRANSFORMADORES PARA CIRCUITOS TRIFÁSICOS	29
4.6 CIRCUITO EQUIVALENTE EXACTO DE UN TRANSFORMADOR REAL .	31
4.7 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE	34
4.8 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	35
4.9 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	35
4.9.1 Conexión ye-ye	36
4.9.2 Conexión ye-delta	37
4.9.3 Conexión delta-ye	39
4.9.4 Conexión delta-delta	39
4.10 PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR	40

4.11 RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR.....	41
4.12 REGULACIÓN DE VOLTAJE	42
4.13 TRABAJO EN PARALELO	43
4.14 REGULACIÓN DE TENSIÓN CON RESPECTO A LAS CARGAS.	45
4.15 CONEXIÓN PARA TRANSFORMADORES EN PARALELO	48
5. METODOLOGÍA	51
5.1 ACTIVIDADES PARA DESARROLLAR LOS OBJETIVOS	51
5.2 TIPO DE PROYECTO TEÓRICO PRÁCTICO	52
6 RESULTADOS DEL PROYECTO.....	54
6.1 DATOS TÉCNICOS LOGO 12/24 SIEMENS	54
6.2 TARJETA CON EL SENSOR DE CORRIENTE	55
6.3 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO.....	56
6.4 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES EN PARALELO.....	67
6.5 ¿EN QUÉ CONSISTE EL MÓDULO DE TRANSFORMADORES EN PARALELO?.....	68
6.6 GUÍA DE USO PARA EL USUARIO.....	70
6.7 MANTENIMIENTOS	71
7. CONCLUSIONES	82
8. RECOMENDACIONES	83

BIBLIOGRAFÍA..... 85

CIBERGRAFÍA..... 86

LISTA DE GRÀFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Transformador	22
Gráfico 2. Transformador trifásico de columnas.....	26
Gráfico 3. Transformador trifásico acorazado	27
Gráfico 4. Transformador hexafásico	28
Gráfico 5. Transformador con factor de potencia retrasado	46
Gráfico 6. Transformador con factor de potencia igual a uno.....	47
Gráfico 7. Transformador con regulación negativa	48
Gráfico 8. Logo 12/24 siemens	54
Gráfico 9. Tarjeta con sensor de corriente	56
Gráfico 10. Tarjeta rectificadora de señal de voltaje	56
Gráfico 11. Fuente de alimentacion del módulo	57
Gráfico 12. Panel del módulo	58
Gráfico 13. Extensión de potencia del módulo	59
Gráfico 14. Transformador de de 2kva del módulo	60

Gráfico 15. Protección trifásica (4 en total)	61
Gráfico 16. conexión interna trafo 2	62
Gráfico 17. Fuente de alimentación del transductor	63
Gráfico 18. contactor trifásico(3 en total).....	64
Gráfico 19. Logo (rele programable)	65
Gráfico 20. Conexión interna trafo 1	66
Gráfico 21. Mesa para módulo de transformadores en paralelo	73
Gráfico 22. Mesa para módulos de transformadores en paralelo.....	74
Gráfico 23. Circuito equivalente y cálculos del transformador de 2kva	75
Gráfico 24. Diagrama unifilar del prototipo de transformadores en paralelo	78
Gráfico 25. Diagrama de potencia.....	79
Gráfico 26. Diagrama unifilar.....	80
Gráfico 27. Diagrama de conexión del logo	81

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Conexiones del transformador	50
---	----

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Modelo de un transformador real.....	88
Anexo B. Banco trifásico de transformador compuesto por tres transformadores.....	89
Anexo C. Diagrama de conexión y cableado de un transformador trifásico Y-Y, Y-D, D-Y, D-D.....	90
Anexo D. Conexión Y-D	91
Anexo E. Conexión D-Y	92
Anexo F. Conexión D-D	93
Anexo G. Transformador de corriente.....	94

GLOSARIO

ACRÍLICO: el Acrílico es el polímero de metil metacrilato, PMMA. Es un Termoplástico naturalmente transparente. Una característica muy importante es su resistencia, es muy utilizado en la industria.

CABLE ENCAUCHETADO 4 HILOS: conductor de 4 o más cables independientes y convenientemente aislados, viene recubiertos a su vez, por otro aislante común.

CANALETA: Una canaleta es un ducto adherido a la pared o a cualquier superficie por medio del cual pasara el cable (del tipo que sea). Existen de diversos materiales, plásticas, metálicas, etc.

CARGA: **POTENCIA** que un sistema eléctrico suministra a los receptores conectados a este

CONECTOR BANANA: es un conector eléctrico que se utiliza para unir los equipos o para cerrar un circuito.

CONEXIÓN DELTA: las corrientes de línea son mayores que las corrientes de fase por un factor de raíz de 3 (1.73) y ATRASAN por 30 grados a estas últimas.

CONEXIÓN DY5: es la más utilizada en las prácticas en los transformadores elevadores de principio de línea y tienen un desfase de 150 °.

CONEXIÓN ESTRELLA: los voltajes de línea-línea son mayores que los voltajes de línea a neutro por un factor de raíz de 3 (1.73) y ADELANTAN por 30 grados a estos últimos.

CONTACTOR: es un mecanismo cuya misión es la de cerrar unos contactos, para permitir el paso de la corriente a través de ellos. Esto ocurre cuando la bobina del contactor recibe corriente eléctrica, comportándose como electroimán y atrayendo dichos contactos.

CORRIENTE: es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe al movimiento de los electrones en el interior del material.

DEFASE: la diferencia en el tiempo que existe entre la onda de tensión y la onda de corriente es el ángulo de desfase.

DEVANADO PRIMARIO: el devanado Primario es el que va conectado a la fuente que suministra la alimentación.

DEVANADO SECUNDARIO: el devanado secundario es el que recibe lo que le induce el primario, donde obtienes la tensión de salida.

ENTRADAS ANALÓGICAS: son entradas en las que se recibe una señal física, es decir, que no viene transformada en un sistema de unos y ceros.

ENTRADAS DIGITALES: estas entradas son las que normalmente toman 2 valores o niveles de voltaje predefinidos, un nivel alto es un 1 lógico y un valor bajo es un 0 lógico por lo que dicha señal es una colección de ceros y unos.

FASE: cada uno de los circuitos de una corriente eléctrica alterna.

FUENTE DE ALIMENTACIÓN: la encargada de suministrar energía eléctrica a los distintos elementos que componen nuestro sistema, puede ser de tipo: corriente alterna ó corriente directa, suministrada habitualmente con una misma tensión o voltaje.

LOGO (Siemens): fue el utilizado en el proyecto y es el encargado de manejar las señales analógicas para el proceso que necesitamos.

NEUTRO: sirve para determinar la diferencia de potencial entre las fases, sea monofásico, bifásico o trifásico.

PARO DE EMERGENCIA: al ser accionado este botón, se desactiva todo el proceso de inmediato.

PLC: programable logic controller, en español controlador lógico, se encargan de controlar la lógica de funcionamiento de procesos industriales, también utilizan operaciones aritméticas para manejar señales analógicas para realizar estrategias de control.

POTENCIA: es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado.

PROTECCIÓN ELÉCTRICA: son dispositivos de protección de sobre intensidad, abren el circuito cuando la intensidad que lo atraviesa pasa de un determinado valor, como consecuencia de una sobrecarga o un cortocircuito.

PROTECCIÓN TERMO MAGNÉTICA (BREAKER): es un aparato capaz de interrumpir o abrir un circuito eléctrico cuando la intensidad de la corriente eléctrica que por él circula excede de un determinado valor.

PULSADOR START: botón que, al ser pulsado, acciona un mecanismo que mantiene cerrado un circuito eléctrico.

PULSADOR STOP: botón que, al ser pulsado, abre un circuito o un proceso eléctrico.

SENTIDO HORARIO DE TRANSFORMADORES: el conocimiento del desfase (índice horario) es muy importante cuando se han de conectar transformadores en paralelo, dado que entonces, todos los transformadores deben tener el mismo índice horario, para evitar que puedan producirse corrientes de circulación entre los transformadores cuando se realice la conexión.

SISTEMA MONOFÁSICO: un sistema monofásico está formado por una única corriente alterna o fase y por lo tanto todo el voltaje varía de la misma forma.

SISTEMA TRIFÁSICO: un sistema trifásico consta de 3 fases o hilos vivos en los que cada uno está desfasado (atrasado) 120° respecto de los otros dos.

TIERRA: es una cuestión de seguridad, por donde se drenan las corrientes de falla, ya sean corrientes atmosféricas o corrientes de sobretensiones, estáticas y corrientes de cortocircuito.

TOTALIZADOR: equipo de medición compuesto por un medidor y tres bobinas de corrientes colocados en la baja tensión de un transformador de distribución para totalizar la carga suministrada.

TRANSFORMADOR: es un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia.

VAC: voltaje de corriente alterna.

VDC: voltaje de corriente directa.

VOLTAJE: es la magnitud física que, en un circuito eléctrico, impulsa a los electrones a lo largo de un conductor

RESUMEN

Actualmente se ha presentado la necesidad de realizar un trabajo de grado que mejore el uso racional de la energía, que sea práctico, didáctico y demostrativo a la vez, tanto para la institución como en un futuro para la industria, de esta manera se logra crear un proyecto innovador que tiene como objetivo disminuir al máximo los costos y las pérdidas de energía que se han venido generando debido al deterioro de las máquinas que hoy en día mantienen el sistema eléctrico en la institución, también se busca con los transformadores en paralelo disminuir el consumo de la energía eléctrica, de tal forma que cuando uno de los transformadores llegue al 50% de su capacidad, automáticamente entre el segundo transformador en funcionamiento, y así los dos suplan la demanda de corriente que el sistema este demandando en ese momento; y cuando la demanda de energía se reduzca, salga de funcionamiento uno de los transformadores, y solo quede un transformador energizando el sistema ya que la demanda es inferior al 50% de la capacidad del transformador y no es necesario que los transformadores estén en funcionamiento. Por esta razón es necesario implementar este prototipo de transformadores en paralelo para demostrar un mejor uso eficiente y racional de la energía eléctrica a través de lo aprendido durante la carrera.

También se pueden identificar que estos transformadores juntos con un sistema de control, forman un sistema automatizado que pueden realizar un cambio a través de un PLC y que automáticamente entra o sale uno de los transformadores sin necesidad de maniobrarlos.

INTRODUCCIÓN

El uso racional de la energía a partir de la aplicación de los transformadores en paralelo genera alta rentabilidad para el sistema eléctrico, ya que presenta alternativas para el desarrollo de la sociedad en general; igualmente en la reducción de costos y pérdidas generadas por los transformadores como máquina.

A continuación vamos a observar los beneficios que trae los transformadores en paralelo aplicándolo a la reducción de la energía eléctrica, tanto para la institución como para las industrias a un corto y mediano plazo, de esta manera se demuestra la importancia que tiene un acoplamiento de transformadores con un sistema de control que efectuaran disminución en la red eléctrica y por consiguiente en costos y perdidas energéticas, además se plantea un modelo práctico de un prototipo innovador que contiene partes esenciales como la electrónica, el control, la automatización, etc. La importancia de este proyecto es que proporciona al desarrollo intelectual de nosotros como parte de la comunidad que formamos y realizamos un aporte practico a la institución, y así desarrollamos nuevas alternativas para una mejor utilización de la energía eléctrica, a través de elementos que conocemos y podemos unificarlos y de esta manera hacer uno solo que nos ofrezca muchos más beneficios y nos facilite el aprendizaje.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente, en el Instituto tecnológico Pascual Bravo Institución Universitaria en el Laboratorio de Máquinas I, se ha presentado la necesidad de colocar transformadores en paralelo para alimentar todas las cargas que se encuentran en dicho laboratorio; ya que no se cuenta con un sistema adecuado para surtir todos los elementos conectados a la red eléctrica; al implementar este sistema, se busca instalar un prototipo de dos transformadores en paralelo controlado por un PLC que provean la energía necesaria, y reduzcan costos y pérdidas tanto económicas como energéticas en este laboratorio.

Este prototipo de transformadores en paralelo es un método que busca un uso adecuado de la energía eléctrica que se está suministrando al laboratorio, y al realizar el montaje de los transformadores se reducirían las pérdidas en un 50% y así se logrará hacer un uso racional de la energía.

2. JUSTIFICACIÓN

El beneficio que brindará este sistema al laboratorio de máquinas I de Instituto Tecnológico Pascual Bravo, será que este sistema logrará ser eficiente, controlado, y dará mayor capacidad a la hora de suplir la demanda; ya que se obtendrá un beneficio económico bastante satisfactorio en el consumo de energía. Este sistema estará manipulado por un PLC y este será el agente controlador, para conmutar los transformadores en el momento en que el nivel de carga exija conectar o desconectar de forma automática el transformador de respaldo. En cierto modo con la realización de este proyecto se busca adquirir conocimiento sobre el montaje, conexión, aplicación y el uso racional de energía utilizando dos transformadores en paralelo.

El aprovechamiento de la energía es muy importante porque de esta manera se estaría conservando el recurso energético tanto en la actualidad como en un futuro; también se implementaría un desarrollo tecnológico y productivo en el laboratorio de máquinas I; y en un futuro se utilizaría en las industrias con un propósito en común que es el uso racional de la energía eléctrica

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar dos transformadores en paralelo para el Laboratorio de Máquinas I de Instituto Tecnológico Pascual Bravo Institución Universitaria, con el fin de alimentar, repartir las cargas y disminuir las pérdidas cuando uno de ellos este por debajo del 50% de su capacidad, obteniendo así un uso racional y eficiente de energía.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las características o parámetros de los transformadores y PLC para el Laboratorio de Máquinas I del Instituto Tecnológico Pascual Bravo.
- Seleccionar el PLC para controlar el nivel de carga de los transformadores.
- Poner a punto el PLC en función de los transformadores.

4. REFERENTES TEÓRICOS

4.1 ¿QUÈ ES EL TRANSFORMADOR?

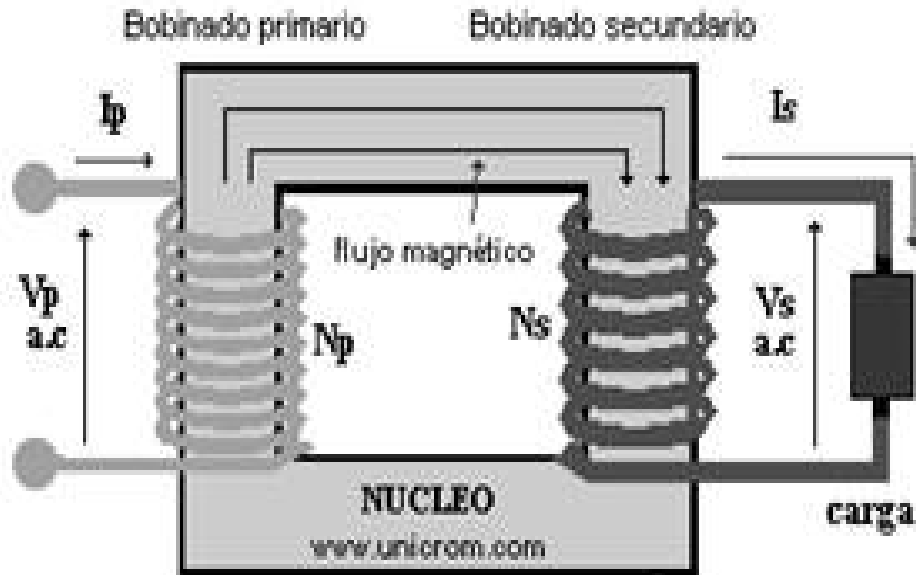
“El transformador, es un dispositivo que no tiene partes móviles, el cual transfiere la energía eléctrica de un circuito u otro bajo el principio de inducción electromagnética. La transferencia de energía la hace por lo general con cambios en los valores de voltajes y corrientes.

Un transformador elevador recibe la potencia eléctrica a un valor de voltaje y la entrega a un valor más elevado, en tanto que un transformador reductor recibe la potencia a un valor alto de voltaje y a la entrega a un valor bajo.

La invención del transformador, data del año de 1884 para ser aplicado en los sistemas de transmisión que en esa época eran de corriente directa y presentaban limitaciones técnicas y económicas. El primer sistema comercial de corriente alterna con fines de distribución de la energía eléctrica que usaba transformadores, se puso en operación en los Estados Unidos de América. En el año de 1886 en Great Barington, Mass, en ese mismo año, a la protección eléctrica se transmitió a 2000 volts en corriente alterna a una distancia de 30 kilómetros, en una línea construida en Cerchi, Italia. A partir de estas pequeñas aplicaciones iniciales, la industria eléctrica en el mundo, ha recorrido en tal forma, que en la actualidad es factor de desarrollo de los pueblos, formando parte importante en esta industria el transformador.”¹

¹ ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. El ABC de las máquinas eléctricas-1 transformadores, México. Limusa noriega editores, 2004, cap. 1.

Gráfico 1. Transformador



Fuente: BOYLESTAD Robert. L, Análisis Introductorio de Circuitos. México 1998 Editorial Prentice Hall, pagina 215

4.2 LEY DE FARADAY

“La Ley de Faraday establece que la corriente inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético que lo atraviesa

La inducción electromagnética fue descubierta casi simultáneamente y de forma independiente por Michael Faraday y Joseph Henry en 1830. La inducción electromagnética es el principio sobre el que se basa el funcionamiento del generador eléctrico, el transformador y muchos otros dispositivos.

Supongamos que se coloca un conductor eléctrico en forma de circuito en una región en la que hay un campo magnético. Si el flujo F a través del circuito varía con el tiempo, se puede observar una corriente en el circuito (mientras el flujo está variando). Midiendo la f.e.m. inducida se encuentra que depende de la rapidez de variación del flujo del campo magnético con el tiempo ”²

4.3 LEY DE JOULE

“La resistencia es el componente que transforma la energía eléctrica en energía calorífica, (por ejemplo un hornillo eléctrico, una estufa eléctrica, una plancha etc.).

Mediante la ley de Joule podemos determinar la cantidad de calor que es capaz de entregar una resistencia, esta cantidad de calor dependerá de la intensidad de corriente que por ella circule y de la cantidad de tiempo que esté conectada, luego podemos enunciar la ley de Joule diciendo que la cantidad de calor desprendido por una resistencia es directamente proporcional a la intensidad de corriente a la diferencia de potencial y al tiempo”³

4.4 CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE TRANSFORMADORES

“La clasificación de los transformadores es grande ya que estos pueden variar en forma física, características eléctricas y eficiencia y cada una de estas clasificaciones se pueden adaptar mejor a cierta o varias aplicaciones.

²<http://www.mitecnologico.com/Main/LeyDeFaraday>

³<http://www.mitecnologico.com/Main/LeyDeJoule>

4.4.1 Por su nivel de voltaje

4.4.1.1 Transformadores Elevadores y Reductores

Un transformador puede ser "elevador o reductor" dependiendo del número de espiras de cada bobinado.

Si se supone que el transformador es ideal. (La potencia que se le entrega es igual a la que se obtiene de él, se desprecian las pérdidas por calor y otras), entonces:

Potencia de entrada (P_i) = Potencia de salida (P_s). $P_i = P_s$

4.4.2 Por su número de fases

4.4.2.1 Transformadores monofásicos

“Los transformadores monofásicos, tanto de columnas como acorazados, se usan en distribución de energía eléctrica, por ejemplo para reducir, en líneas de MT de 13,2 KV a BT, 220V. Se los suele encontrar, de pequeña potencia en soportes de líneas eléctricas rurales. También se los encuentra, en potencias altas, para constituir bancos trifásicos, con tres de ellos, en sistemas de distribución Ejemplos: 10 KVA; 13200/220 V.”⁴

4.4.2.2 Transformadores Trifásicos

El trifásico de columnas es el más usado. Se lo encuentra desde pequeñas potencias (10 KVA) hasta muy grandes (150 MVA). Como elevadores de tensión

en las centrales, reductores en las subestaciones, de distribución en ciudades, barrios, fábricas , etc.

4.4.2.3 Transformadores Hexafásicos

El hexafásico (6 fases en el secundario) se diferencia, constructivamente, del trifásico, en que tiene una derivación a la mitad de los devanados secundarios, y luego por supuesto, en la conexión entre ellos. Se lo usa para la rectificación industrial y en tracción eléctrica: subterráneos, tranvías, etc. Ejemplo: 13200/580 V.

4.4.3 Por la forma del núcleo

4.4.3.1 Transformador monofásico de columnas

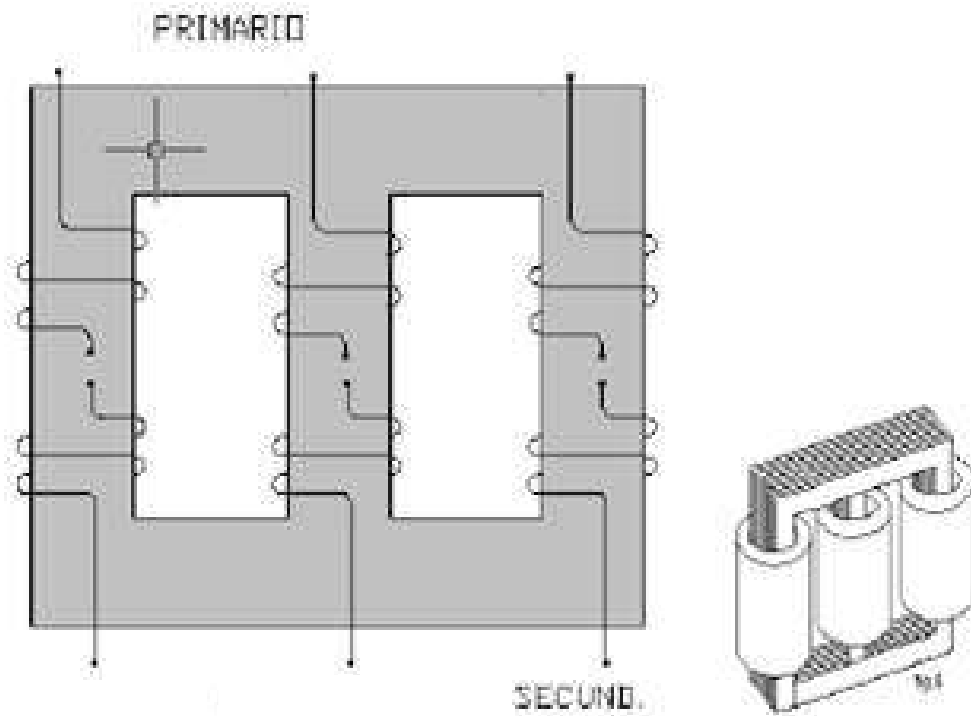
El transformador a columnas posee sus dos bobinados repartidos entre dos columnas del circuito magnético. En la figura se trata de un transformador monofásico dónde el circuito magnético se cierra por las culatas superior e inferior.

4.4.3.2 Transformador monofásico acorazado

El transformador acorazado se caracteriza por tener dos columnas exteriores, por las que se cierra el circuito magnético, estas dos columnas no poseen ningún devanado. En los transformadores monofásicos el devanado primario y secundario se agrupan en la columna central y el transformador tiene tres columnas en total.

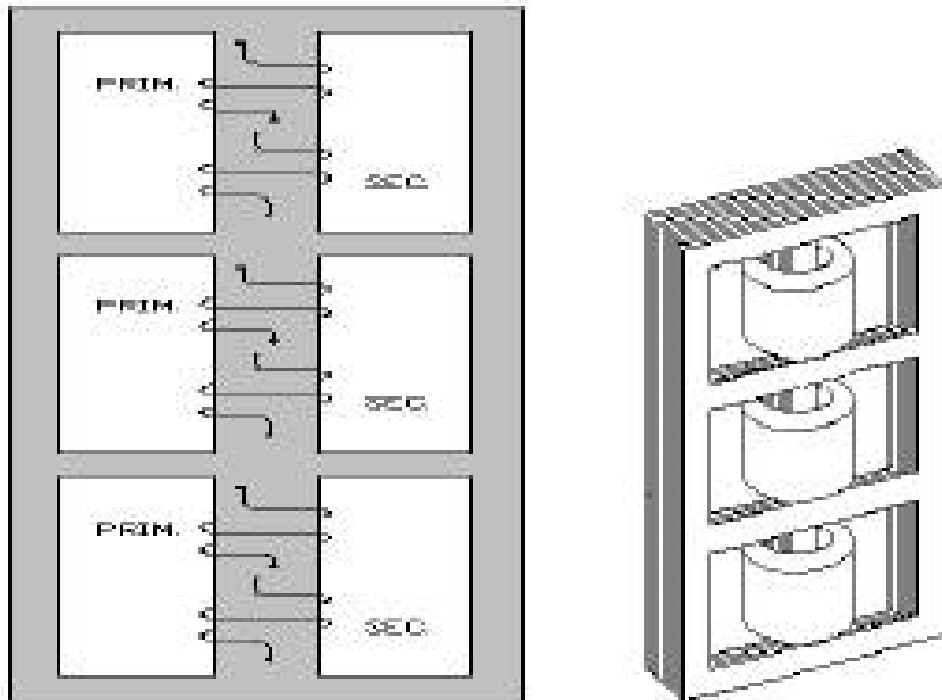
⁴ BOYLESTAD, Robert. L, Análisis Introductorio de Circuitos, México Editorial Prentice Hall, , 1998.

Gráfico 2. Transformador trifásico de columnas



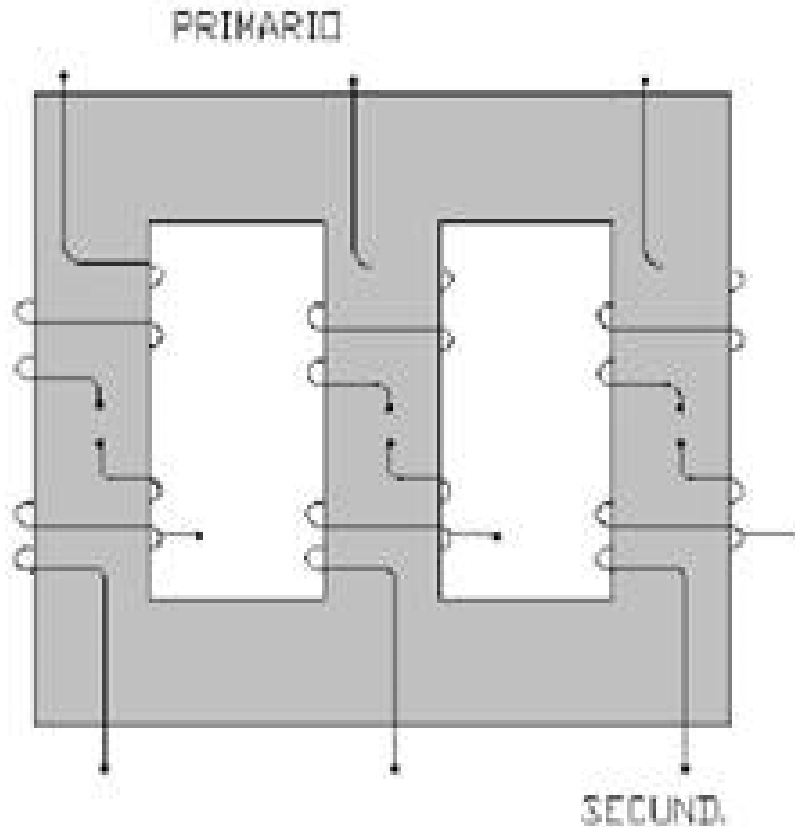
Fuente: BOYLESTAD, Robert .L, Análisis Introductorio de Circuitos, México Editorial Prentice Hall, 1998

Gráfico 3. Transformador trifásico acorazado



Fuente: BOYLESTAD, Robert .L, Análisis Introductorio de Circuitos, México: Editorial Prentice Hall, 1998

Gráfico 4. Transformador hexafásico



Fuente: BOYLESTAD, Robert .L, Análisis Introductorio de Circuitos, México, Editorial Prentice Hall, 1998.

4.4.3.3 Transformador Toroidal

“Los transformadores toroidales representan, como ningún otro tipo, el diseño ideal sobre cómo debe ser un transformador. De hecho, FÁRADAY diseñó y bobinó el primer transformador sobre un núcleo toroidal. Tiene varias ventajas entre ellas

⁵ FITZGERALD, A. E, KINGSLEY, STEPHEN, UMANS, D, Máquinas Eléctricas, México: Mc Graw Hill. 2002.

alto rendimiento, bajo nivel de ruido, menor calentamiento, peso y tamaño reducido, facilidad de montaje.”⁵

4.4.3.4 Por su núcleo

Por el núcleo sobre el cual van las bobinas

- a) Núcleo de Aire
- b) Núcleo de Hierro
- c) Núcleo Variable

4.4.3.5 Por la posición de sus devanados

La clasificación más grande que hay de los transformadores es la de su posición de los devanados y estos se clasifican en:

- Transformadores de devanados separados
- Transformadores de devanados concéntricos
- Transformadores de bobinas alternadas.”

4.5 TRANSFORMADORES PARA CIRCUITOS TRIFÁSICOS

“Los principales sistemas de generación y distribución de potencia en el mundo son sistemas trifásicos de corriente alterna (CA), debido a las grandes ventajas que presentan.

⁶ FITZGERALD, A. E, KINGSLEY, STEPHEN, UMANS, D, Máquinas Eléctricas, México: Mc Graw Hill. 2002.

Los transformadores forman parte fundamental en sistemas trifásicos de CA. Por lo que para su utilización en estos sistemas, se pueden considerar dos configuraciones, la primera consiste en tomar tres transformadores monofásicos y conectarlos en un banco trifásico, es decir, tres transformadores por separados, unidos mediante algún tipo de conexión, esta configuración presenta la desventaja de ser más caro que utilizar un solo transformador trifásico, y tiene como ventaja que cualquier unidad del banco puede ser reemplazada individualmente.”⁶

4.6 CIRCUITO EQUIVALENTE EXACTO DE UN TRANSFORMADOR REAL

“Es posible construir un circuito equivalente que tome en cuenta todas las principales imperfecciones de los transformadores reales. Se considera cada una de estas imperfecciones y se incluye su efecto en el modelo de transformador.

El efecto más sencillo de evaluar son las pérdidas del cobre: estas son pérdidas resistivas en los devanados primario y secundario del núcleo del transformador; equivalen a la colocación de un resistor R_p en el circuito primario del transformador y un resistor R_s en el circuito secundario.

El flujo disperso en los devanados primarios ϕ_{DP} produce un voltaje e_{DP} dado por:

$$e_{DP(t)} = N_p \frac{d\phi_{DP}}{dt}$$

Y el flujo disperso en los devanados secundarios ϕ_{DS} produce un voltaje e_{DS} dado por:

$$e_{DS(t)} = N_s \frac{d\phi_{DS}}{dt}$$

Debido a que buena parte del recorrido del flujo disperse es a través del aire, y ya que el aire tiene una reluctancia constante mucho mayor que la del núcleo, el flujo ϕ_{DP} es directamente proporcional a la corriente en el circuito primario i_p y el flujo ϕ_{DS} es directamente proporcional a la corriente secundaria i_s .

$$\Phi_{DP} = (\mathcal{P}N_p) * i_p$$

$$\Phi_{DS} = (\mathcal{P}N_s) * i_s$$

Donde:

\mathcal{P} = permeancia del camino del flujo

N_p = numero de vueltas en la bobina primaria

N_s = numero de vueltas en la bobina secundaria

Sustituyendo la ecuación se tiene:

$$e_{DP(t)} = N_p \frac{d(\mathcal{P}N_p) * i_p}{dt} = N_p^2 * \mathcal{P} \frac{di_p}{dt}$$

$$e_{DS(t)} = N_s \frac{d(\mathcal{P}N_s) * i_s}{dt} = N_s^2 * \mathcal{P} \frac{di_s}{dt}$$

Las constantes en estas ecuaciones se pueden agrupar; entonces:

$$e_{DP(t)} = L_p \frac{di_p}{dt}$$

$$e_{DS(t)} = L_s \frac{di_s}{dt}$$

Donde $L_p = N_p^2 * \mathcal{P}$ es la auto-inductancia de la bobina primaria y

$L_s = N_s^2 * \mathcal{P}$ es la auto-inductancia de la bobina secundaria. Por lo tanto, el flujo disperso se considera como si fueran inductores primarios y secundarios.

¿Cómo se puede hacer un modelo de los efectos de la excitación en el núcleo? la corriente de magnetización i_m es proporcional al voltaje aplicado al núcleo y tiene 90° en retraso con respecto al voltaje aplicado, por lo que se puede modelar por una reactancia X_M conectada a través de la fuente de voltaje primaria. La corriente de pérdidas en el núcleo i_{R+e} es una corriente proporcional al voltaje aplicado al núcleo que está en *fase con el voltaje aplicado*, por lo que se puede considerar como una resistencia R_N conectada a través de la fuente de voltaje primaria. (Se debe recordar que ambas corrientes en realidad no son lineales, por lo que la inductancia X_M y la resistencia R_N son, a lo sumo, aproximaciones de los efectos de excitación reales.)⁷

El circuito equivalente se note que los elementos que conforman la rama de excitación están ubicados dentro de la resistencia primaria R_F y de la inductancia primaria L_F . Esto se debe a que el voltaje que en efecto se aplica al núcleo es en realidad igual al voltaje de entrada menos las caídas internas de voltaje en los devanados.

Aunque la figura es un modelo exacto de un transformador, no es muy útil. Para analizar los circuitos prácticos que contienen transformadores casi siempre es necesario convertir todo el circuito en uno equivalente con un solo nivel de voltaje. Por lo tanto, el circuito equivalente se debe referir a su lado primario o a su lado secundario.⁷

⁷ CHAPMAN, Stephen J, Máquinas eléctricas, México: 4ª edición, Mc Graw Hill companies Inc. 2007

4.7 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE

Los transformadores de corriente toman una muestra de corriente en una línea y la reducen a un nivel seguro y mensurable. En la figura se muestra el diagrama de un transformador de corriente típico. El transformador de corriente consta de un devanado secundario enrollado alrededor de un anillo ferromagnético, con una sola línea primaria que pasa a través del centro del anillo. El anillo ferromagnético capta y concentra una pequeña muestra de flujo de la línea primaria. Este flujo induce un voltaje y una corriente en el devanado secundario.

Los transformadores de corriente difieren de los demás transformadores en que sus devanados están débilmente acoplados. A diferencia de los demás transformadores, el flujo mutuo Φ_M en el transformador de corriente es más pequeño que el flujo disperso Φ_D . Debido al acoplamiento débil, no se aplican las relaciones de voltaje y corriente al transformador de corriente. Sin embargo, la corriente secundaria en un transformador de corriente es directamente proporcional a la corriente primaria que es mucho mayor y puede suministrar una muestra exacta de la corriente de la línea con propósitos de medición.

Los valores nominales de los transformadores de corriente se dan como relaciones de la corriente primaria con la secundaria. Las relaciones típicas de un transformador de corriente son 600:5, 800:5, o 1000:5. Una corriente de 5A es la estándar en el secundario de un transformador de corriente.

Es importante mantener en cortocircuito al transformador de corriente en todo momento; debido a que se pueden aparecer voltajes extremadamente altos a través de las terminales de sus secundarios abiertos. De hecho, la mayoría de los relés y otros aparatos que utilizan la corriente de un transformador de corriente tienen un enclavamiento en cortocircuito que se debe cerrar antes de remover el

relé para su inspección o ajuste. Sin este enclavamiento, aparecerán altos voltajes muy peligrosos en los terminales secundarios en el momento en que se retire el relé de su conexión.

4.8 TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Casi todos los sistemas principales de generación y distribución de potencia en el mundo de hoy son trifásicos de CA. Ya que los sistemas trifásicos tienen una función tan importante en la vida moderna, es necesario entender cómo se utilizan los transformadores en ellos.

Los transformadores para los circuitos trifásicos se pueden fabricar de dos maneras. Una de ellas consiste simplemente en tomar tres transformadores monofásicos y conectarlos en un banco trifásico. Otra alternativa es construir transformadores trifásicos con tres grupos de devanados enrollados en un núcleo en común. En las figuras se muestran estos tipos de construcción de los transformadores. Hoy en día se prefiere construir un transformador trifásico como tal, ya que es más ligero, pequeño, barato y un poco más eficiente. Este enfoque tiene la ventaja de que cualquier unidad en el banco puede ser reemplazada individualmente si se presenta alguna falla, pero la mayoría de las aplicaciones esto no supera las ventajas de una unidad trifásica combinada. Sin embargo, aún quedan muchas instalaciones en servicio que consisten en tres unidades monofásicas.

4.9 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Un transformador trifásico consta de tres transformadores, ya sea separados o combinados sobre un solo núcleo. Los primarios y secundarios de cualquier

transformador trifásico se pueden conectar independientemente en ye (Y) o en delta (Δ). Esto nos da un total de cuatro conexiones posibles para el banco de un transformador trifásico:

1. Ye-ye ($Y - Y$)
2. Ye-delta ($Y - \Delta$)
3. Delta-ye ($\Delta - Y$)
4. Delta-delta ($\Delta - \Delta$)

4.9.1 Conexión ye-ye

La conexión Y-Y de transformadores trifásicos se muestra en la figura. En una conexión Y-Y, el voltaje primario en cada fase del transformador está dado por

$V_{\phi P} = \frac{V_{LP}}{\sqrt{3}}$. El voltaje de fase primario se relaciona con el voltaje secundario por

medio de la relación de vueltas del transformador. El voltaje de fase en el secundario está relacionado con la línea de voltaje en el secundario por

$V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$ por lo tanto, la relación de voltaje general en el transformador es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a \quad Y - Y$$

La conexión ($Y - Y$) tiene dos problemas graves:

1. Si las cargas en el circuito del transformador no están equilibradas, entonces los voltajes en las fases del transformador pueden llegar a desequilibrarse severamente.

2. Los voltajes de terceras armónicas pueden ser grandes.

Si se aplica un grupo trifásico de voltajes a un transformador $Y - Y$, los voltajes en cualquier fase estarán separados por 120° de los voltajes en cualquier otra fase. Sin embargo, los componentes de la tercera armónica de cada una de las tres fases estarán entre sí, debido a que hay tres ciclos en la tercera armónica para cada ciclo de la frecuencia fundamental. Invariablemente habrá componentes de la tercera armónica en el transformador, debido a la no linealidad del núcleo. Estos componentes siempre se adicionan.

4.9.2 Conexión ye-delta

En la figura se muestra una conexión $Y - \Delta$ de los transformadores trifásicos. En esta conexión, el voltaje de línea primario está relacionado con el voltaje de fase primario por $V_{LP} = \sqrt{3}V_{\phi P}$, mientras que el voltaje de línea secundario es igual al voltaje de fase secundario $V_{LS} = V_{\phi S}$. la relación de voltaje para cada fase es:

$$\frac{V_{OP}}{V_{OS}} = \alpha$$

Por lo que la relación general entre el voltaje de línea en el lado primario del banco y el voltaje de línea en el lado secundario del banco es

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{OP}}{V_{OS}}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3} \alpha \quad Y - \Delta$$

La conexión $Y - \Delta$ no presenta problemas con los componentes en sus voltajes de la tercera armónica, puesto que se consumen en una corriente circulante en el lado Δ . Esta conexión también es más estable con respecto a las cargas desequilibradas, debido a que Δ redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente.

Sin embargo, este arreglo presenta un problema. Debido a la conexión, el voltaje secundario se desplaza 30° con respecto al voltaje primario del transformador. El hecho de que se desplace una fase puede causar problemas en la puesta en paralelo de los secundarios de dos bancos de transformadores. Los ángulos de fase de los transformadores secundarios deben ser iguales si se desea ponerlos en paralelo, lo que quiere decir que se tiene que poner atención a la dirección del desplazamiento de fase de 30° en cada banco del transformador para ponerlos en paralelo.

La conexión que se muestra en la figura causara que el voltaje secundario este en retraso si la secuencia de fase del sistema es abc . Si la secuencia de fase del sistema es acb , entonces la conexión que se muestra en la figura causara que el voltaje secundario este en adelanto con respecto del voltaje primario por 30° .⁸

4.9.3 Conexión delta-ye

En la figura se muestra la conexión $\Delta - Y$ de un transformador trifásico. En una conexión $\Delta - Y$, el voltaje de línea primario es igual al voltaje de fase primario $V_{LP} = V_{\phi P}$, mientras que los voltajes secundarios están relacionados por $V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$. Por lo tanto, la relación de voltaje de línea a línea en esta conexión es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \Delta - Y$$

Esta conexión tiene las mismas ventajas y el mismo desplazamiento de fase que el transformador $Y - \Delta$. La conexión que se muestra en la figura ocasiona que el voltaje secundario esté, como anteriormente, en retraso con respecto al voltaje primario en 30° .⁸

4.9.4 Conexión delta-delta

La conexión $\Delta - \Delta$ se muestra en la figura. En una conexión $\Delta - \Delta$, $V_{LP} = V_{\phi P}$ y $V_{LS} = V_{\phi S}$, por lo que la relación entre los voltajes de línea primario y el secundario es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a \quad \Delta - \Delta$$

Este transformador no tiene un desplazamiento de fase asociado y no tiene problemas con cargas desequilibradas o armónicos.⁸

4.10 PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR

“En los transformadores existen las siguientes pérdidas:

- 1) Pérdidas en el núcleo
 - a) Perdidas por Histéresis
 - b) Corrientes parásitas o de Foucault
 - 2) Pérdidas en el cobre
 - a) en el devanado primario
 - b) en el devanado secundario
1. Pérdidas en el núcleo
 - a) Las pérdidas por histéresis se deben a que el flujo magnético se invierte varias veces por segundo y este movimiento origina fricción y es causa, por lo tanto de un consumo de energía. Para reducir estas pérdidas se usa acero en láminas con un porcentaje de silicio.
 - b) Las corrientes parasitas se deben a que el flujo circula por el núcleo del transformador y debido a que el material del núcleo del transformador también es buen conductor, se forman en la superficie del núcleo pequeñas corrientes, llamadas corrientes parasitas. Estas pérdidas, se reducen disminuyendo el espesor de las láminas del núcleo aislándolas entre sí.

2. Pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre en los devanados primario y secundario son proporcionales a la resistencia de estos devanados y también a la intensidad de la

corriente que circula por ellos. Estas pérdidas se pueden calcular por las fórmulas

$I_p^2 R_p$, $I_s^2 R_s$ dónde:

I_p : Corriente del primario

R_p : Resistencia del devanado (se puede medir directamente con el instrumento apropiado)

I_s : Corriente en el secundario

R_s : Resistencia del devanado secundario

La resistencia óhmica de los devanados es muy pequeña, su valor está entre 0.005 y 3 Ω

4.11 RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR

“Puesto que las pérdidas en el transformador se pueden determinar experimentalmente, el rendimiento puede calcularse con toda facilidad. Es decir:

$$\text{Rendimiento } \eta = \frac{\text{potencia de salida}}{\text{potencia de salida} + \text{pérdidas}} * 100$$

$$\text{Potencia de salida} = E_s I_s \cos \theta_s$$

$$\text{Pérdidas} = I_p^2 R_p + I_s^2 R_s + P_o \text{ (pérdidas en el núcleo)}$$

4.12 REGULACIÓN DE VOLTAJE

“Debido a que un transformador real tiene dentro de él impedancias en serie, el voltaje de salida de un transformador varía con la carga incluso cuando el voltaje de entrada permanece constante. Para comparar convenientemente los transformadores en este aspecto, se acostumbra definir una cantidad llamada regulación de voltaje (*RV*). La regulación de voltaje a plena carga es una cantidad que compara el voltaje de salida de un transformador sin carga (en vacío) con el voltaje de salida a plena carga. Se define por la ecuación:

$$RV = \frac{V_{S, nl} - V_{S, fl}}{V_{S, fl}} * 100\%$$

Debido a que en vacío $V_S = \frac{V_P}{a}$, la regulación de voltaje también se puede expresar como:

$$RV = \frac{\frac{V_P}{a} - V_{S, fl}}{V_{S, fl}} * 100\%$$

Si el circuito equivalente del transformador está en el sistema por unidad, entonces la regulación de voltaje se puede expresar como:

$$RV = \frac{V_{p, pu} - V_{s, fl, pu}}{V_{s, fl, pu}} * 100\%$$

Normalmente es deseable tener una regulación de voltaje tan pequeña como sea posible. Para un transformador ideal $RV = 0\%$. No siempre es una buena idea tener una baja regulación de voltaje ya que, a veces, los transformadores de alta impedancia y alta regulación de voltaje se utilizan deliberadamente para reducir las fallas de corriente en un circuito”⁸.

Para determinar la regulación de voltaje de un transformador es necesario entender las caídas de voltajes en su interior. Considérese el circuito equivalente del transformador. Se pueden ignorar los efectos de la rama de excitación de la regulación de voltaje del transformador, por lo que se deben considerar solo impedancias en serie. La regulación de voltaje del transformador depende tanto de la magnitud de estas impedancias en serie como del ángulo de fase de la corriente que fluye a través del transformador. La manera más fácil de determinar el efecto de las impedancias y los ángulos de fase reales en la regulación de voltaje del transformador es por medio de un diagrama fasorial, un dibujo de los voltajes y corrientes fasoriales en el transformador.

4.13 TRABAJO EN PARALELO

El funcionamiento en paralelo de dos o más transformadores se produce cuando ambos se hallan unidos por sus devanados primarios y por los secundarios. Prácticamente, es necesario distinguir el caso de que esta unión sea inmediatamente directa sobre unas mismas barras ómnibus o bien que se efectúe a través de largas líneas en la red de distribución: la condición sobre la igualdad de las tensiones de cortocircuito tiene importancia solamente en el primer caso, ya

⁸ RAS, Enrique Oliva. Transformadores de potencia, de medida y de protección. Barcelona: Marcombo- Boixareu, 1994.

que los conductores intermedios existentes en el caso de una red tienden a regularizar la distribución de la carga de los transformadores.

Los transformadores pueden acoplarse en paralelo por sus secundarios, por los primarios o bien por los primarios y secundarios a la vez. Cuando la instalación lo permita, en las centrales por ejemplo, es preferible adoptar la primera solución, que añade la impedancia interna de los transformadores la de los generadores, siempre considerable, y la repartición de la carga en proporción debida entre los distintos grupos es más fácil de obtener. La teoría de la marcha en paralelo forma parte en este caso, del estudio de conjunto de las centrales eléctricas, por lo que nos ceñiremos a considerar el acoplamiento de los transformadores realizados simultáneamente por ambos lados de la conexión primario y secundario. Es claro que la frecuencia, una de las características esenciales de la instalación, será con ello sin más, rigurosamente la misma para todos los transformadores acoplados. Las restantes condiciones que han de cumplirse para que el funcionamiento sea posible y se realice de modo práctico, son las siguientes:

- 1.- Los desfases secundarios respecto al primario han de ser iguales para los transformadores que hayan de acoplarse en paralelo.
- 2.- El sentido de rotación de las fases secundarias ha de ser el mismo en todos ellos.
- 3.- Las relaciones entre las tensiones de líneas han de ser idénticas.
- 4.- Las caídas de impedancia para las tensiones de cortocircuito, deben tener los mismos valores relativos para todos los transformadores, siendo preferible además que esta igualdad se cumpla por separado para las caídas óhmicas y la f.e.m. de reactancia.

Las dos primeras condiciones son eliminatorias, de no satisfacerse, el acoplamiento es imposible. Las dos últimas son necesarias para la buena marcha de la instalación.⁹

4.14 REGULACIÓN DE TENSIÓN CON RESPECTO A LAS CARGAS.

Para obtener la regulación de tensión en un transformador se requiere entender las caídas de tensión que se producen en su interior. Consideremos el circuito equivalente del transformador simplificado: los efectos de la rama de excitación en la regulación de tensión del transformador puede ignorarse, por tanto solamente las impedancias en serie deben tomarse en cuenta. La regulación de tensión de un transformador depende tanto de la magnitud de estas impedancias como del ángulo fase de la corriente que circula por el transformador. La forma más fácil de determinar el efecto de la impedancia y de los ángulos de fase de la intensidad circulante en la regulación de voltaje del transformador es analizar el diagrama fasorial, un esquema de las tensiones e intensidades fasoriales del transformador.

La tensión fasorial V_S se supone con un ángulo de 0° y todas las demás tensiones e intensidades se comparan con dicha suposición. Si se aplica la ley de tensiones de Kirchhoff al circuito equivalente, la tensión primaria se halla:

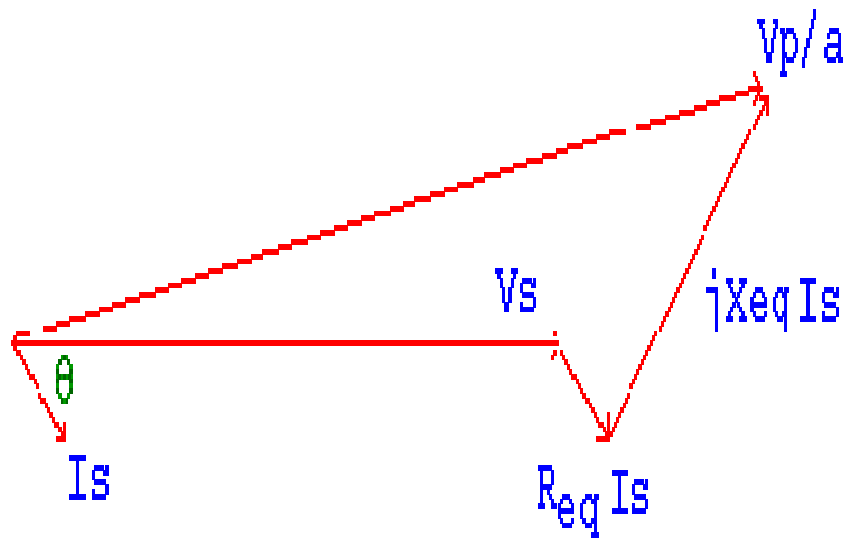
$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{EQ} I_S + jX_{EQ} I_S$$

Un diagrama fasorial de un transformador es una representación visual de esta ecuación.

⁹ CHAPMAN, Stephen J: revisión técnica Martínez, José Demetrio y Morón Juan Yedra. Bogotá: McGraw Hill, 1987

Dibujamos un diagrama fasorial de un transformador que trabaja con un factor de potencia retrasado. Es muy fácil ver que $V_P / a > V_S$ para cargas en retraso, así que la regulación de tensión de un transformador con tales cargas debe ser mayor que cero.

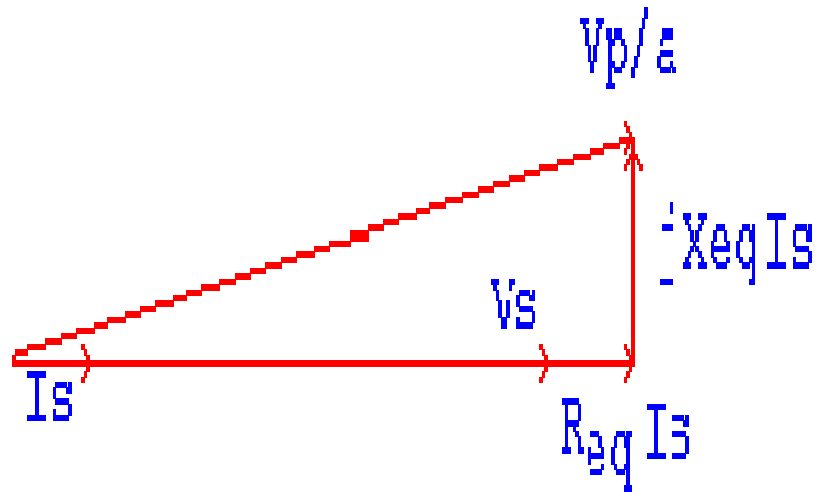
Gráfico 5. Transformador con factor de potencia retrasado



Fuente: MOELLER, Werr, Electrotecnia general y aplicada, Barcelona: Editorial Labor, 1972

Ahora vemos un diagrama fasorial con un factor de potencia igual a uno. Aquí nuevamente se ve que la tensión secundaria es menor que la primaria, de donde $V_R = 0$. Sin embargo, en este caso la regulación de tensión es un número más pequeño que el que tenía con una corriente en retraso.¹¹

Gráfico 6. Transformador con factor de potencia igual a uno



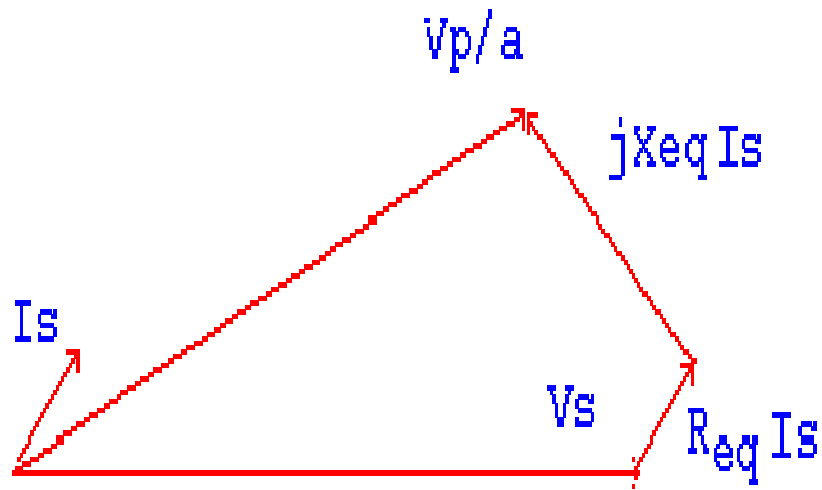
Fuente: MOELLER, Werr, Electrotecnia general y aplicada, Barcelona: Editorial Labor, 1972

Si la corriente secundaria está adelantada, la tensión secundaria puede ser realmente mayor que la tensión primaria referida. Si esto sucede, el transformador tiene realmente una regulación negativa como se ilustra en la figura 6.¹⁰

¹⁰ MOELLER, Werr, Electrotecnia general y aplicada, Barcelona: Editorial Labor, 1972

¹¹ CHAPMAN, Stephen J; revisión técnica Martínez, José Demetrio y Morón Juan Yedra. Bogotá: McGraw Hill, 1987

Gráfico 7. Transformador con regulación negativa



Fuente: MOELLER, Werr, Electrotecnia general y aplicada, Barcelona: Editorial Labor, 1972

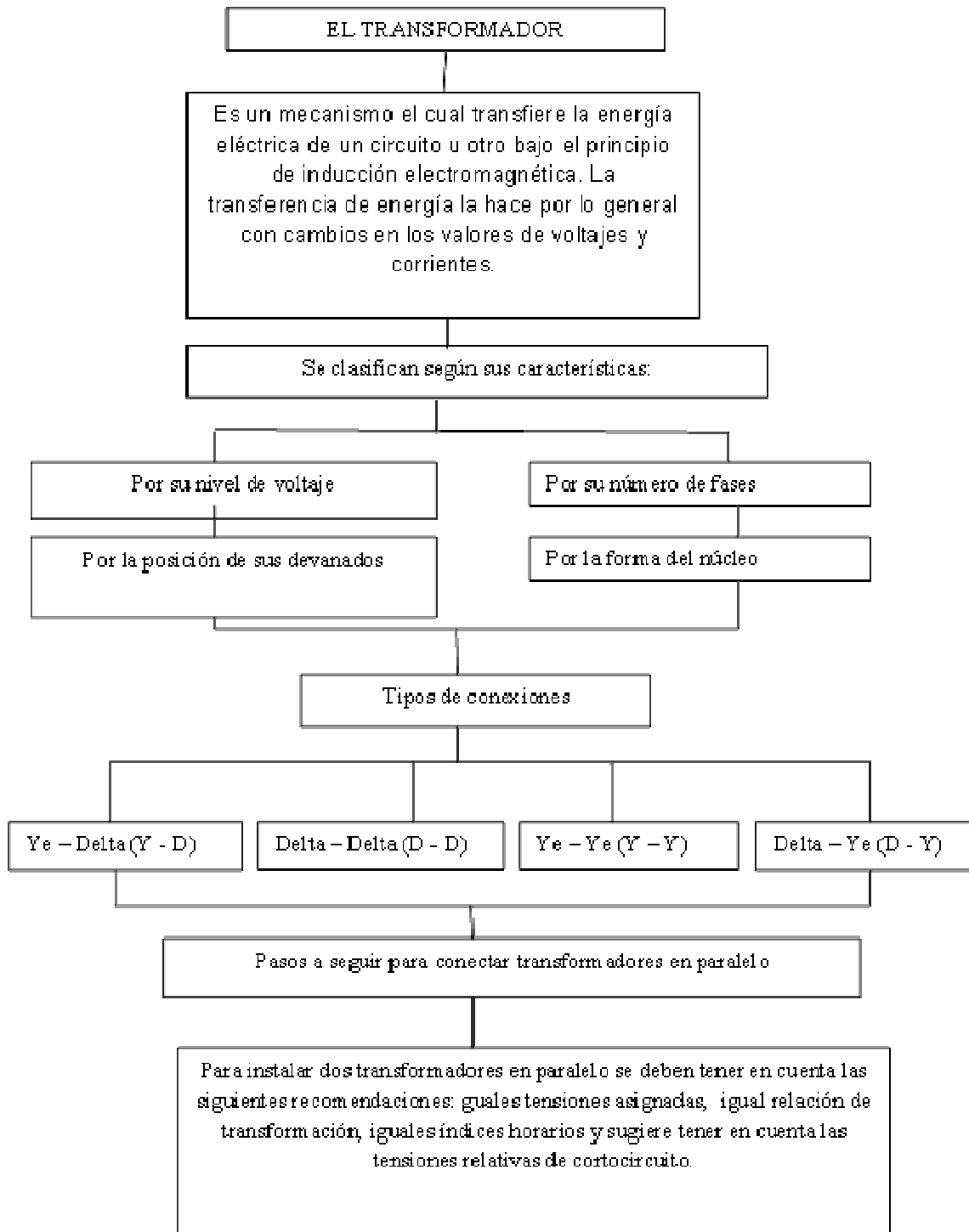
4.15 CONEXIÓN PARA TRANSFORMADORES EN PARALELO

Cuando se conectan varios transformadores en paralelo se obliga a que estos tengan las mismas tensiones primaria y secundaria; por esta razón se exige que cuando se vayan a conectar varios transformadores en paralelo tengan la misma relación de transformación (en el caso de que los transformadores en paralelo sean trifásicos se debe tener en cuenta su índice horario).

Cuando se va a realizar la conexión en paralelo de los transformadores se presenta otros factores como la caída de tensión, tensiones relativas de cortocircuito, etc.

Para realizar la conexión correcta de los transformadores en paralelo se deben seguir los siguientes pasos: iguales tensiones asignadas, igual relación de transformación, iguales índices horarios y sugiere tener en cuenta las tensiones relativas de cortocircuito.

Tabla 1. Conexiones del transformador



5. METODOLOGÍA

5.1 ACTIVIDADES PARA DESARROLLAR LOS OBJETIVOS

- definir las características o parámetros de los transformadores y PLC.
 - Consultar el tipo de transformadores que se necesita para suplir las cargas del laboratorio.
 - Basados en las características de dichos transformadores, se debe buscar el tipo de PLC (Control Lógico Programable) que pueda controlar la conexión y desconexión de los transformadores.
- Instalar los transformadores en paralelo y PLC en el laboratorio.
 - Hacer un reconocimiento visual en el laboratorio.
 - Definir el lugar donde quedaran instalados los dos transformadores después de haber ubicado por donde llegan las líneas de alimentación (RED PM)).
 - Tomar medidas de ubicación para los dos transformadores, medidas de las distancias de los cables desde el punto de conexión (tablero eléctrico) hasta los transformadores.
 - Montaje y conexión de los transformadores.
- Seleccionar el PLC para controlar el nivel de carga de los transformadores.
 - Observar los tipos de PLC que se encuentran en el Instituto Tecnológico Pascual Bravo y averiguar por fuentes externas.

- Seleccionar el PLC más adecuado para el control que se va a realizar en los transformadores.
- poner a punto el PLC en función de los transformadores.
 - Chequeo de voltajes, corrientes, protecciones, verificación de conexiones.
 - Realizar todas las conexiones tanto en potencia como de control.
 - Pruebas al sistema de control PLC, simulando la operación de conexión y desconexión del transformador de apoyo, con la conmutación de los contactores de potencia y sensores de carga.
 - Poner a prueba todo el sistema de potencia y control en vacío.
 - Potencia a prueba todo el sistema de potencia y control con carga.
 - Entrega del proyecto en funcionamiento.

5.2 TIPO DE PROYECTO TEÓRICO PRÁCTICO

El tipo de proyecto es teórico-práctico porque se realiza una serie de consultas sobre los transformadores, sus diferentes tipos, clases de conexiones, las formas y parámetros que se deben tener en cuenta para realizar el acople eléctrico de los transformadores.

Una vez ya recopilada y organizada la información se procede con la instalación de los transformadores y todo el sistema de control haciendo tangible la parte teórica.

El tipo de investigación es aplicada, ya que se utilizarán los conocimientos adquiridos en el tecnológico pascual bravo a lo largo de estos 5 semestres de formación en el área de tecnología eléctrica, por medio de estos se logra que la implementación de un prototipo de acoplamiento de transformadores en paralelo,

sea de gran importancia a los conceptos previamente aprendidos en las asignaturas como circuitos, control, transporte de energía, aéreas que por su enfoque y su pensum nos brindas las herramientas que básicamente ; se necesitan para el entendimiento de todo lo relacionado con la parte de investigación, diseño y elaboración del proyecto.

5.3 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

PRIMARIA: Realizar consultas con diferentes docentes en el área de eléctrica y afines del Instituto Tecnológico Pascual Bravo, que tengan experiencia y conocimiento en este tipo de proyecto.

SECUNDARIA: las investigaciones en libros y revistas que contengan temas sobre máquinas eléctricas y transformadores; se realizarán en las bibliotecas del Instituto Tecnológico Pascual Bravo, UDEA, UNAL ya que el programa de ingeniería eléctrica se encuentra en estas universidades.

6 RESULTADOS DEL PROYECTO

6.1 DATOS TÉCNICOS LOGO 12/24 SIEMENS

Gráfico 8. Logo 12/24 siemens



Fuente:<https://www.swe.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/noticias/pages/logo!ahora2igualdegeniales.aspx>

Dimensiones

Ancho*Alto*Profundo107*90*55mm

Peso

265 gramos

Tensión de entrada

12/24VDC

Consumo de corriente

40-100 ma / 60-175 ma

Entradas digitales	8
Entradas rápidas	4
Entradas analógicas	4 de 0-10v
Frecuencia de entrada	4hz
Salidas	4 a relé
Corriente permanente	10 A por relé

6.2 TARJETA CON EL SENSOR DE CORRIENTE

Tarjeta con el sensor de corriente ACS709 -75 a 75A

Descripción tarjeta con el sensor de corriente ACS711 12 a 12,5A T-ACS711-12,5

DATOS TÉCNICOS

- Sensor de corriente basado en efecto Hall, con salida indicadora de sobre-corriente.
- Voltaje alimentación: 3 a 9 V
- Voltaje salida: Voltaje análogo proporcional a la -corriente centrado en $V_{cc}/2$
- Corriente medida: Entre $\pm 12.5A$
- Resistencia en la línea de medida: $\sim 1.2 \text{ m}\Omega$
- Incertidumbre: 5 %
- Ancho de banda: 80 khz
- Aislamiento eléctrico: 100V

Gráfico 9. Tarjeta con sensor de corriente



Fuente: http://www.didacticaselectronicas.com/components/com_virtuemart/shop_image/product/Tarjeta_con_el_s_4e2dcb9dede19.jpg

Gráfico 10. Tarjeta rectificadora de señal de voltaje



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

6.3 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

Se instalará el sistema de transformadores en paralelo en el laboratorio de máquinas I del Instituto Tecnológico Pascual Bravo, y será sometido a una serie de pruebas de medidas de voltajes, corrientes, impedancia, etc. Durante un periodo de tiempo establecido, para observar los beneficios obtenidos durante su funcionamiento y si sus reducciones en pérdidas y en costos son en realidad considerables para el proceso que se ha llevado a cabo.

Gráfico 11. Fuente de alimentacion del módulo



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

Este es el tablero principal de laboratorio de maquinas 1, es el encargado de suministrar el punto de conexión y tensión al modulo para el funcionamiento ideal del mismo.

Gráfico 12. Panel del módulo



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

Este es el modulo de control de los transformadores en paralelo encargado del mando del sistema en paralelo para su correcto uso en cualquier utilizacion sea practica o demostrativa.

Gráfico 13. Extensión de potencia del módulo



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

Este es la extensión de potencia del modulo es la encargada de enlazar la fuente de alimentacion (tablero electrico de maquinas 1) y el modulo de los transformadores en paralelo

Gráfico 14. Transformador de de 2kva del módulo



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

Uno de los 2 transformadores es la parte esencial del prototipo de los transformadores en paralelo es el encargado de soportar la potencia y demanda de la carga que se conecte en el modulo.

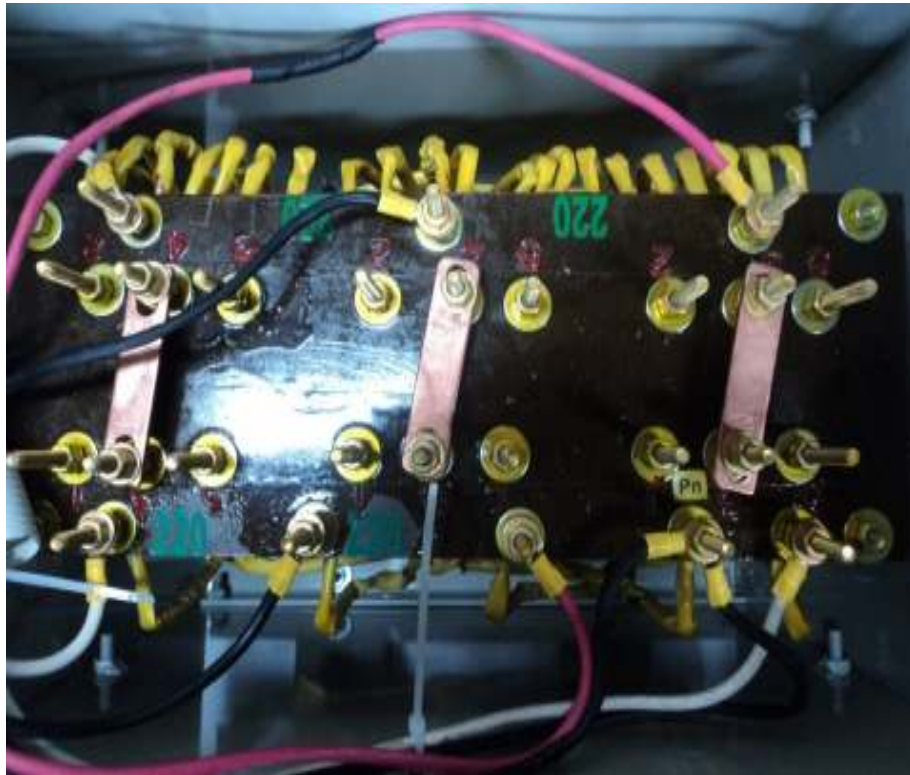
Gráfico 15. Protección trifásica (4 en total)



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

Este es una de las 4 protecciones del modulo son las encargadas de brindarle seguridad a todo el sistema de transformadores en paralelo

Gráfico 16. conexión interna trafo 2



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

Esta es la conexión de interna del traformador 2 por lo que se puede ver se alimenta con 3 hilos ,fases R,S,T en el primario y en el secundario tiene 5 hilos ,3 fases R,S,T, neutro y tierra como se ve en la conexión la tierra y el neutro estan unidos fisicamente.

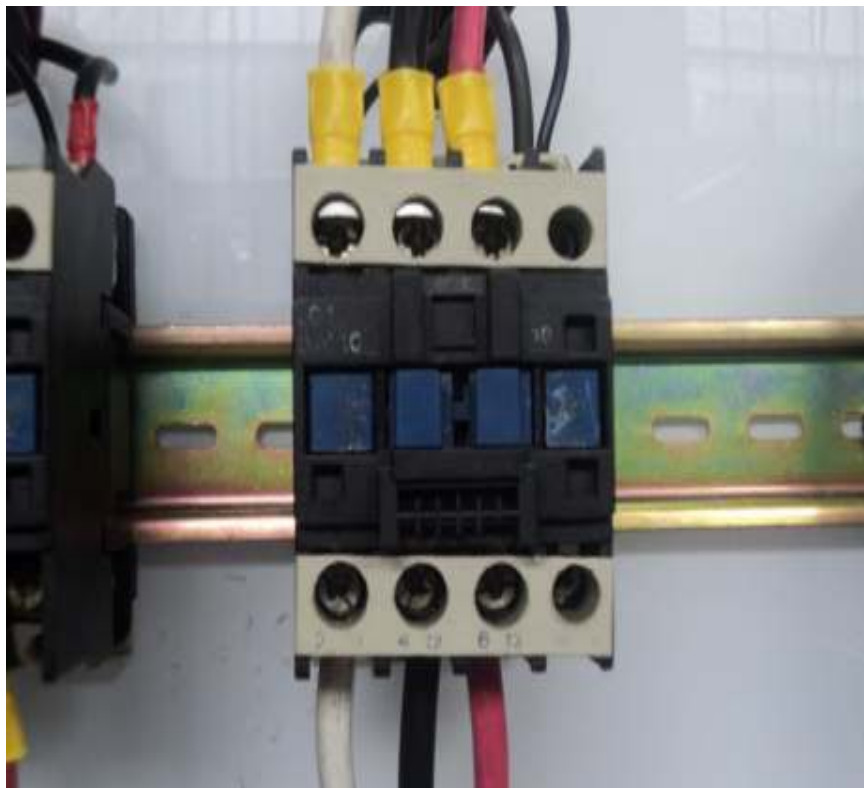
Gráfico 17. Fuente de alimentacion del transductor



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

Este es la fuente de la tarjeta transductora, esta fuente se encarga de alimentar la tarjeta con 9 vdc y asi esta tarjeta pueda funcionar.

Gráfico 18. contactor trifasico(3 en total)



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

Este es uno de los 3 contactores del modulo son los encargados de habilitar el funcionamiento de los transformadores del modulo.

Gráfico 19. Logo (rele programable)



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

El rele programable (LOGO) es el encargado de manejar el control como tal es el que me da el mando de enlazar los transformadores apenas la tarjeta trasductora sensa el 50 por ciento de transformador 1.

Gráfico 20. Conexión interna trafo 1



Fuente: Foto tomada con una cámara digital Canon A2200/S por los estudiantes responsables del proyecto.

Esta es la conexión de interna del transformador 1 por lo que se puede ver se alimenta con 3 hilos ,fases R,S,T en el primario y en el secundario tiene 5 hilos ,3 fases R,S,T, neutro y tierra como se ve en la conexión la tierra y el neutro estan unidos fisicamente.

6.3.1 características eléctricas del transformador trifásico¹⁴

- Potencia nominal: 2 KVA
- Tipo: seco
- Numero de fases: 3
- VOLTAJE PRIMARIO: 220 V
- I primaria: 5.25 A
- $V_{cc} \% = Z_{cc}\%$: 3.3

- PESO: 80 Kg
- FRECUENCIA: 60 HZ
- VOLTAJE SECUNDARIO: 220V
- Conexión: DY5
- Regulación: $\pm 2 \cdot 2.5\%$
- Temperatura: 125°C
- Refrigeración: AN

6.4 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES EN PARALELO

Se alimenta desde el tablero de máquinas I desde una red trifásica principal (R, S, T) a 220v, por medio de un toma trifásico, la alimentación entra al totalizador de 30 A, y de allí se deriva para las protecciones termo-magnéticas tanto del transformador 1 como del transformador 2 y estas dos protecciones son variables de 15 a 25 amperios y las salidas de estas protecciones van dirigidas a unos contactores encargados de accionar los transformadores. El contactor KM1 es el encargado de hacer entrar en funcionamiento el sistema por medio del pulsador start, este pulsador va a la entrada del PLC logo y de allí envía la señal al contactor KM1 para que este se accione y entre en funcionamiento el transformador 1 y cuando el transformador 1 entre directo a manejar la carga porque es superior al 50% de la capacidad de corriente del transformador, entra la tarjeta tras-ductora que está anclada a una de las fases del transformador, sensea la corriente alterna y transforma a un voltaje directo de 0 a 5 V_{DC} que va a la entrada analógica del logo; el control en el logo después de hacer pasado 2.5 V_{DC} realiza el cambio y entra el contactor del primario del transformador 2, en el programa del PLC logo la entrada del secundario del transformador 2 está habilitada por medio temporizador que siente que la entrada del contactor del primario del transformador 2 se temporiza un tiempo de 100 ó 200 ms la entrada

del contactor del secundario del transformador 2, y este ya queda en paralelo con el transformador 1 y este secundario de los dos transformadores queda en paralelo al totalizador de la carga que es de 30 A y desde allí ya queda el sistema en funcionamiento y cada uno de los transformadores queda soportando el 50 % de la demanda actual.

6.5 ¿EN QUÉ CONSISTE EL MÓDULO DE TRANSFORMADORES EN PARALELO?

Este módulo de control para dos transformadores contiene lo siguiente:

- 2 protecciones termo magnéticas de 30A uno es el totalizador y el otro para el secundario de los transformadores y para la carga.
- El totalizador es la protección principal del módulo.
- 3 contactores:
 - KM1: habilita el sistema del transformador 1
 - KM2: habilita el primario del transformador 2
 - KM3: habilita el secundario del transformador 2 para enlazar los dos transformadores.
- Conectores banana: son los encargados de enlazar o unir los transformadores con la carga.
- 3 pulsadores:
 - Pulsador start:** encargado de enviar la señal al logo para hacer entrar el funcionamiento el sistema del transformador 1.
 - Pulsador stop:** encargado de enviar al sistema la señal a la entrada del logo para interrumpir el sistema o apagarlo.
 - Paro de emergencia:** encargado de enviar la señal a la entrada del logo para interrumpir el sistema en caso de emergencia.
- 4 pilotos:

Piloto amarillo: indica presencia de tensión.

Piloto verde transformador 1: está anclado a la bobina de KM1 y cuando KM1 se accione da la indicación de que el transformador 1 está en uso o accionado.

Piloto verde primario transformador 2: está anclado a la bobina de KM2 y cuando KM2 se accione me da la indicación de que el primario del transformador 2 está habilitado.

Piloto verde secundario transformador 2: está anclado a la bobina de KM3 y cuando KM3 se accione da la indicación de que el secundario del transformador está habilitado y por consiguiente el sistema ya se encuentra en paralelo.

- 1 logo: es el encargado de la programación y el control del módulo de los transformadores en paralelo.
- Protección del logo: es el encargado de proteger el sistema contra algún problema de tensión de corriente.
- Tarjeta Trasductora: encargada de sensar corriente y enviar una señal analógica a la entrada del logo, esta señal es de 0 a 5 V_{DC}, es equivalente a la entrada de corriente AC : 0 a 5 A
- Esta tarjeta contiene dos integrados, dos condensadores y un bus de datos.
- 2 transformadores en paralelo idénticos fabricados por Maxwell con una potencia de 2KVA cada uno, con una corriente trifásica de 5.26 A, y la conexión horaria es DY5, encargados de soportar la demanda o la carga.

6.6 GUÍA DE USO PARA EL USUARIO

1. Verificar que esté conectado el sistema
2. Ver que la protección principal este apagada
3. Accionar la protección principal
4. Verificar que la alimentación del logo este activa
5. Encender el logo
6. Oprimir el pulsador start
7. Verificar en el piloto que presencia de tensión y el transformador 1 este activo
8. Cuando el transformador 1 esté en funcionamiento y la carga sea mayor a 2.5 A se debe verificar que la tarjeta trasductora le esté enviando la señal al logo para que entre en funcionamiento el transformador 2
9. Verificar tensiones en R, S, T, N
10. En caso de algún problema oprimir el paro de emergencia
11. Para apagar totalmente el sistema se oprime el pulsador stop y se apaga el totalizador.

6.7 MANTENIMIENTOS

Mantenimiento transformadores secos

Pruebas

- Medición de resistencia óhmica de los devanados.
- Relación de transformación.
- Polaridad, desplazamiento angular y secuencia de fases.
- Pérdidas en vacío y corriente de excitación a tensión nominal.
- Tensión de impedancia y pérdidas debidas a la carga en la tensión nominal.

Pruebas dieléctricas:

- tensión aplicada
- tensión inducida
- resistencia de aislamiento

Los transformadores secos se destacan, pues son ecológicamente insuperables, debido a la total ausencia de líquidos aislantes, no representan riesgo alguno de explosión o de contaminación, además del hecho de ser fabricados únicamente con materiales que no atacan el medio ambiente. Además de no necesitar mantenimiento, estos transformadores posibilitan diversas economías, a saber, en el proyecto eléctrico y civil cuando se los compara con los aislados en aceite de la misma potencia.

Mantenimiento o revisión preventiva

- Comprobación, limpieza y ajuste de todas las conexiones eléctricas, fijaciones, soportes, guías y ruedas, etc.
- comprobación de los sistemas de sobre-corriente y fuga a tierra

- Limpieza y pintado del chasis, carcasas, depósito y demás elementos externos del transformador susceptibles de óxido o deterioro.”¹¹

“El mantenimiento de contactores

En los contactores de pequeña potencia donde no es posible observar el deterioro de los contactos sin desmontarlos.

Cuando el usuario tiene una correcta planificación de mantenimiento preventivo puede determinar a priori la fecha de inspección o recambio del contactor, de acuerdo a la cantidad de maniobras teóricas de funcionamiento.

Los contactores soportan cómodamente 3 recambios de contactos sin verse afectadas las propiedades mecánicas y dieléctricas según las condiciones de ensayo impuestas en la NORMA IEC 947-1 ITEM.8.3.3.4 y IEC 947 Amendment 2 ANEXO

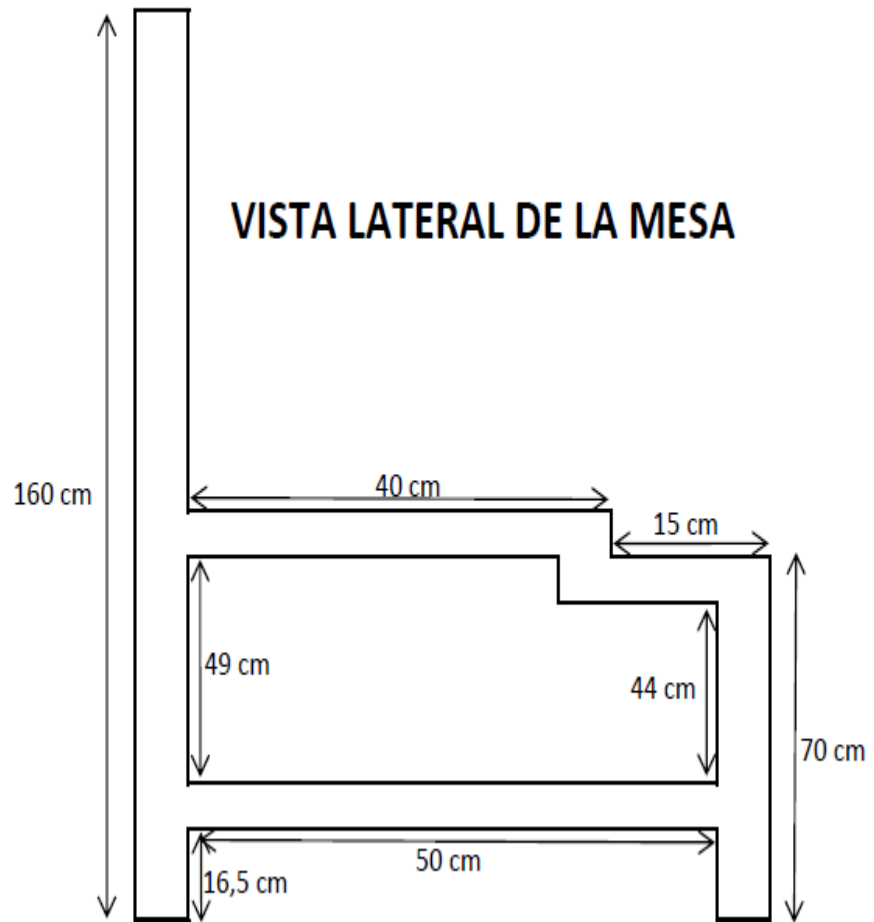
Estos ensayos se realizan sin efectuar limpieza en las piezas aislantes en ninguna de las etapas, para efectos de mantenimiento se realizan tareas como:

- revisión visual sin desarmar
- desarmar en caso de observar contactos en mal estado
- cambiar los contactos y revisar el resto de las partes del contactor
- ajustar completamente
- realizar pruebas al contactor
- mantenimiento de contactores”¹²

¹¹ <http://www.solomantenimiento.com/articulos/mantenimiento-transformadores-electricos.htm>

¹² <http://www.monterosa.com.ar/default.asp?sec=foro&tipo=1&acc=muestra&id=5>

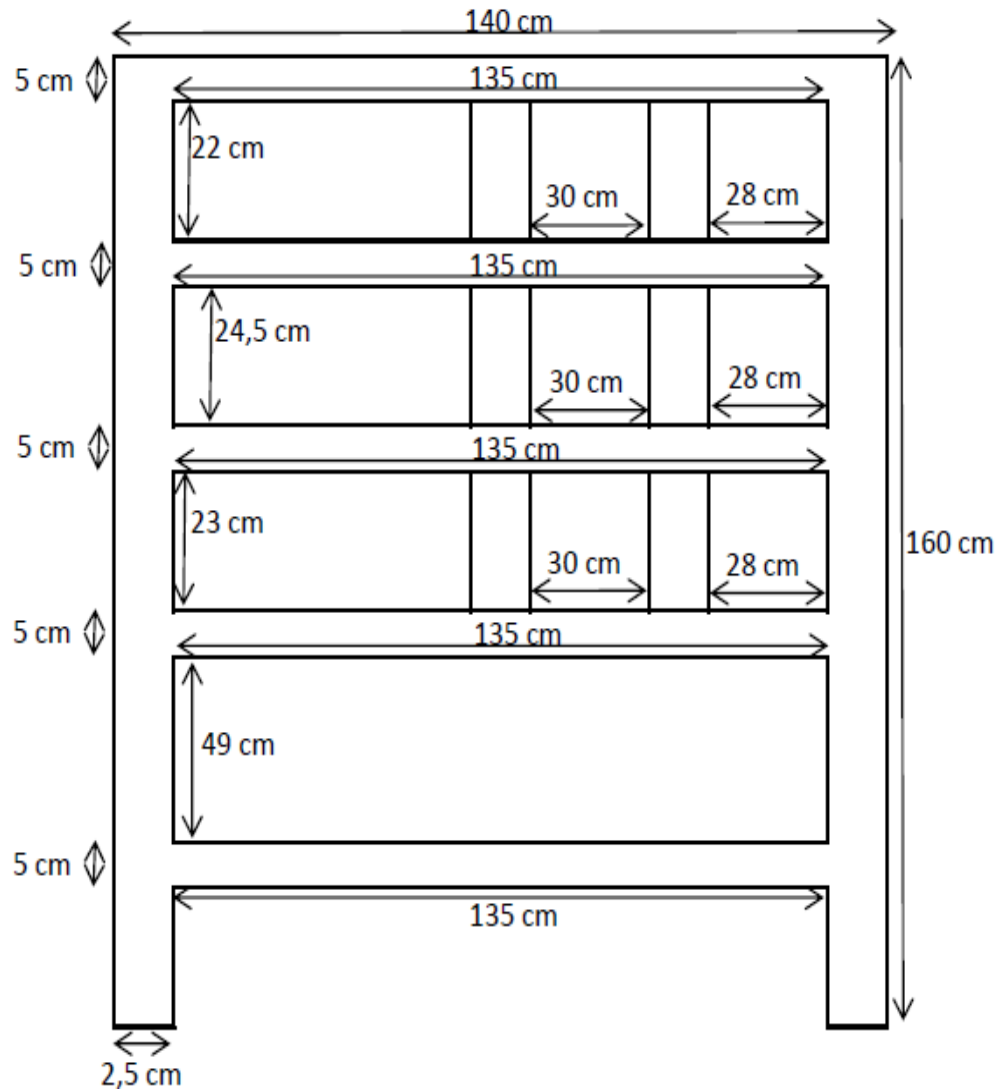
Gráfico 21. Mesa para módulo de transformadores en paralelo



Fuente: Diseño de los estudiantes responsables del proyecto.

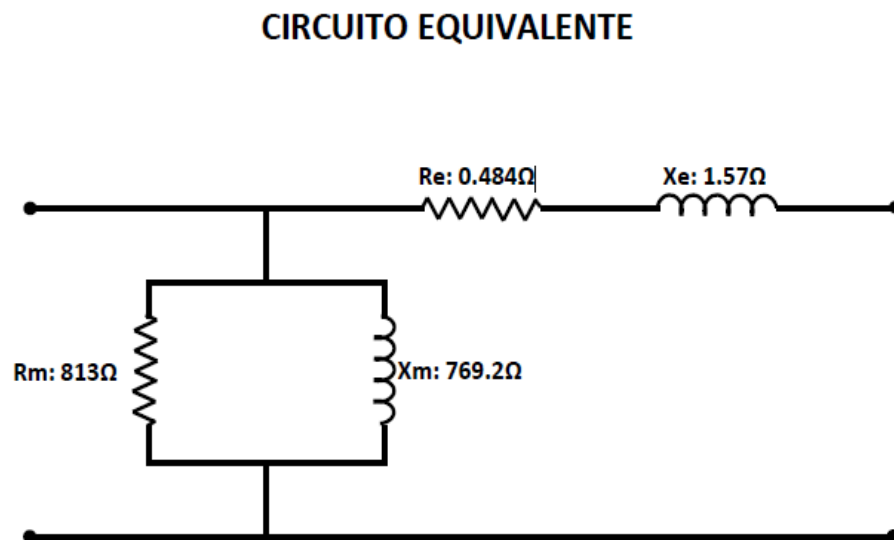
Gráfico 22. Mesa para módulos de transformadores en paralelo

VISTA FRONTAL DE LA MESA



Fuente: Diseño de los estudiantes responsables del proyecto.

Gráfico 23. Circuito equivalente y cálculos del transformador de 2kva



Fuente: Diseño de los estudiantes responsables del proyecto.

2KVA

$$V_p = 220 \text{ v}$$

$$V_s = 220/127 \text{ v}$$

$$Z_2 = 86 \# 10$$

$$Z_1 = 157 \# 10$$

CONDUCTANCIA:

$$G_c = \frac{1}{R_c}$$

SUSCEPTANCIA:

$$Q_M = \frac{1}{X_M}$$

ADMITANCIA TOTAL:

$$Y_E = G_c - jB_M$$

$$Z = \frac{1}{R_c} - j \frac{1}{X_M}$$

$$|Y_E| = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \frac{\text{Corriente de excitacion (vacío)}}{\text{Voltaje de excitacion (vacío)}}$$

$$\text{FACTOR DE POTENCIA} = \cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc} \sqrt{3}}$$

P_{oc} = Potencia en vacío

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc} \sqrt{3}}$$

$$|Y_E| = \frac{I_{oc} \sqrt{3}}{V_{oc}} * \cos \theta$$

$$\theta = \frac{160}{220 * 0.23 * \sqrt{3}} = 46.79^\circ$$

$$|Y_E| = \frac{0.23 \sqrt{3}}{220} \cos 46.79^\circ$$

$$= 0.0018 \cos 46.79^\circ$$

$$= 0.0018 \cos (-46.79^\circ) + | \text{Sen}(-46.79^\circ) |$$

$$= 0.001135 - 10.0013$$

$$R_m = 813 \Omega$$

$$X_m = 769.2 \Omega$$

$$FP = \frac{P_{sc}}{V_{sc} I_{sc} \sqrt{3}}$$

$$FP = \frac{40}{15 \cdot 5.24 \cdot \sqrt{3}} = 0.293$$

$$\Theta = 72.96^\circ$$

$$Z_s = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle -\Theta$$

$$Z_{SG} = \frac{15}{5.24 \cdot \sqrt{3}} \angle -72.96^\circ$$

$$= 1.652 \angle -72.96^\circ$$

$$= 1.652 (\cos(-72.96^\circ) + i \sin(-72.96^\circ))$$

$$= 0.454 - i 1.57$$

$$R_{eq} = 0.484 \Omega$$

$$X_{eq} = 1.57 \Omega$$

FLUJO MAGNÉTICO

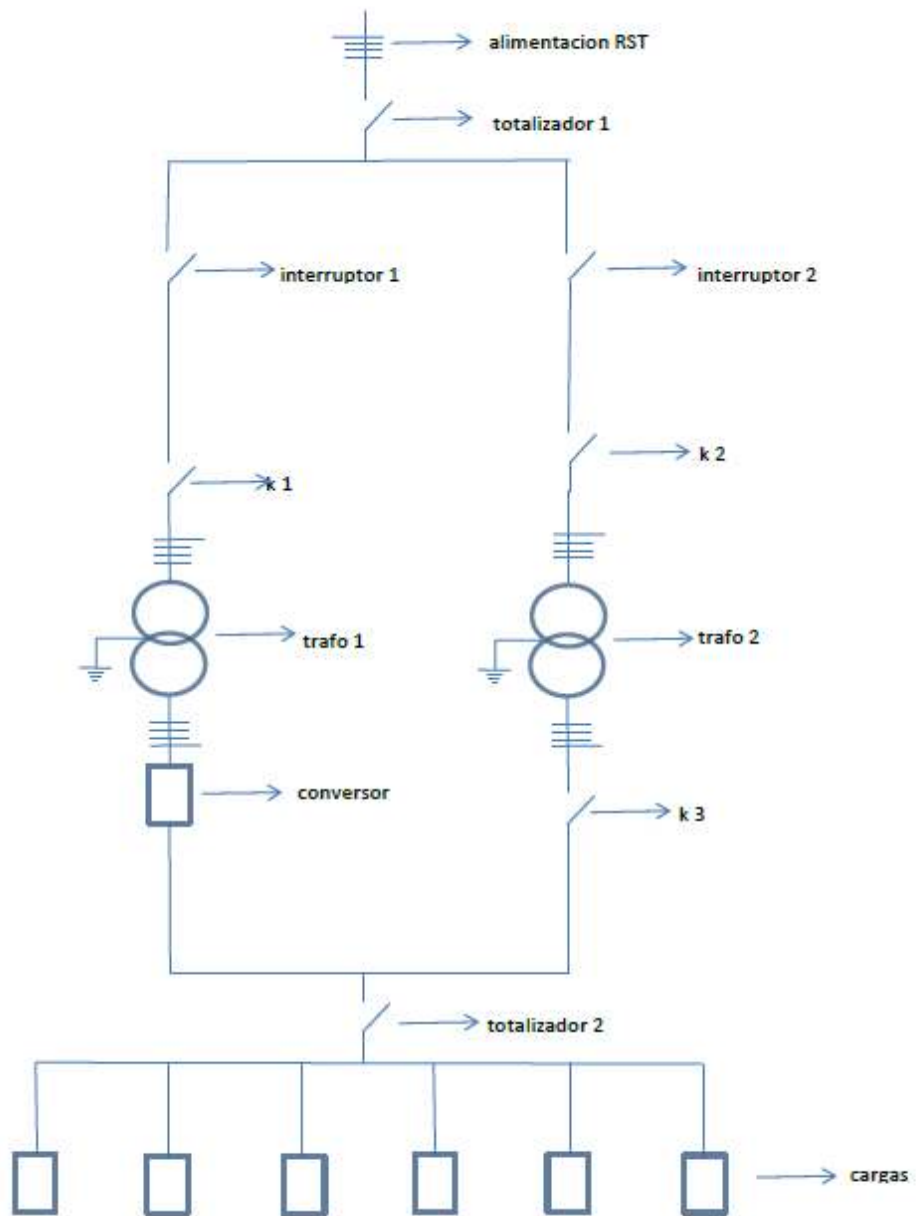
$$\Theta = \beta \cdot S$$

$$\beta = 1 \text{ Tesla} = \frac{1 \text{ Wb}}{\text{m}^2}$$

$$S = 90 \text{ cm}^2 = 0.009 \text{ m}^2$$

$$\Theta = 0.009 \text{ Wb}$$

Gráfico 24. Diagrama unifilar del prototipo de transformadores en paralelo



Fuente: Diseño de los estudiantes responsables del proyecto.

Gráfico 25. Diagrama de potencia

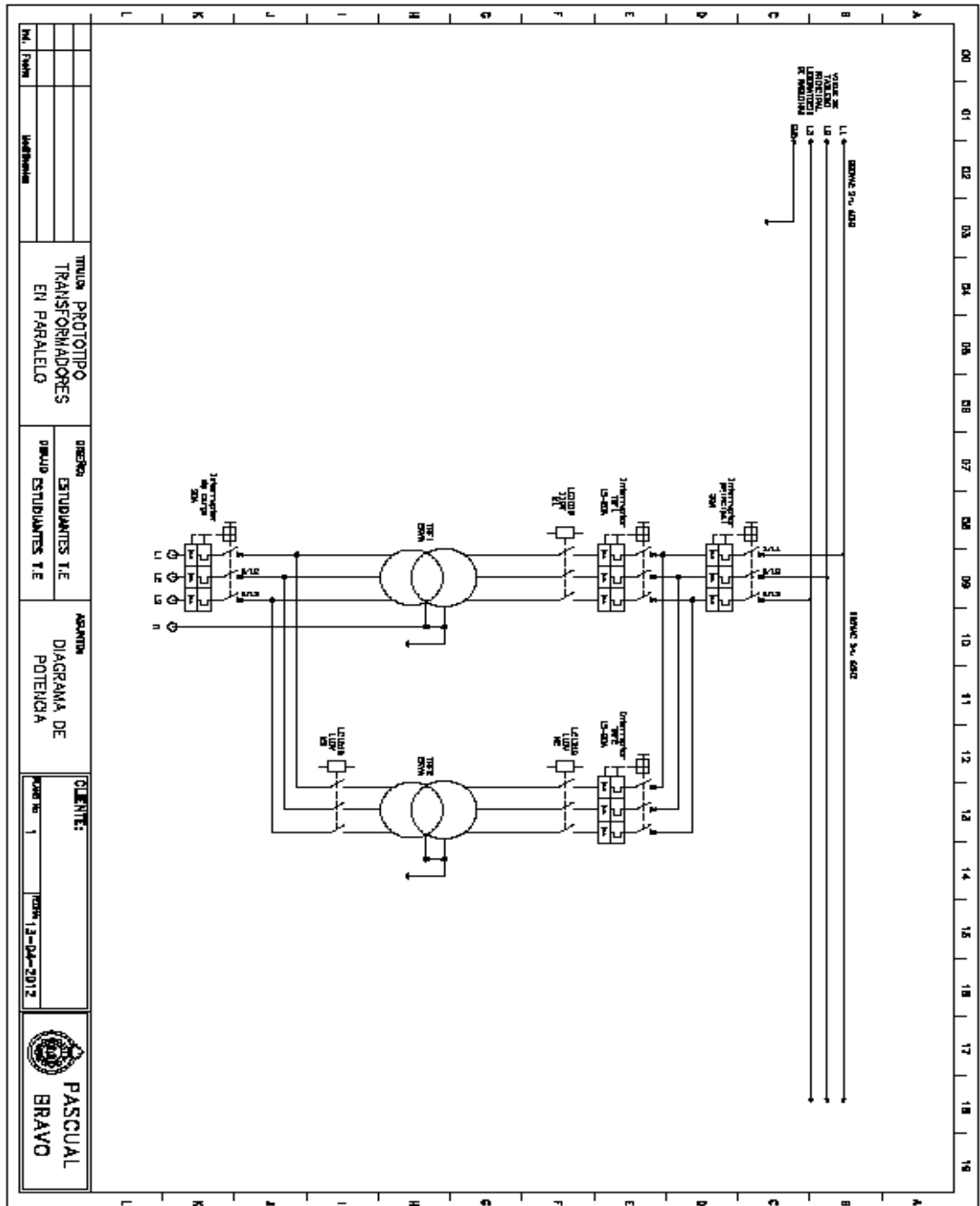


Gráfico 26. Diagrama unifilar

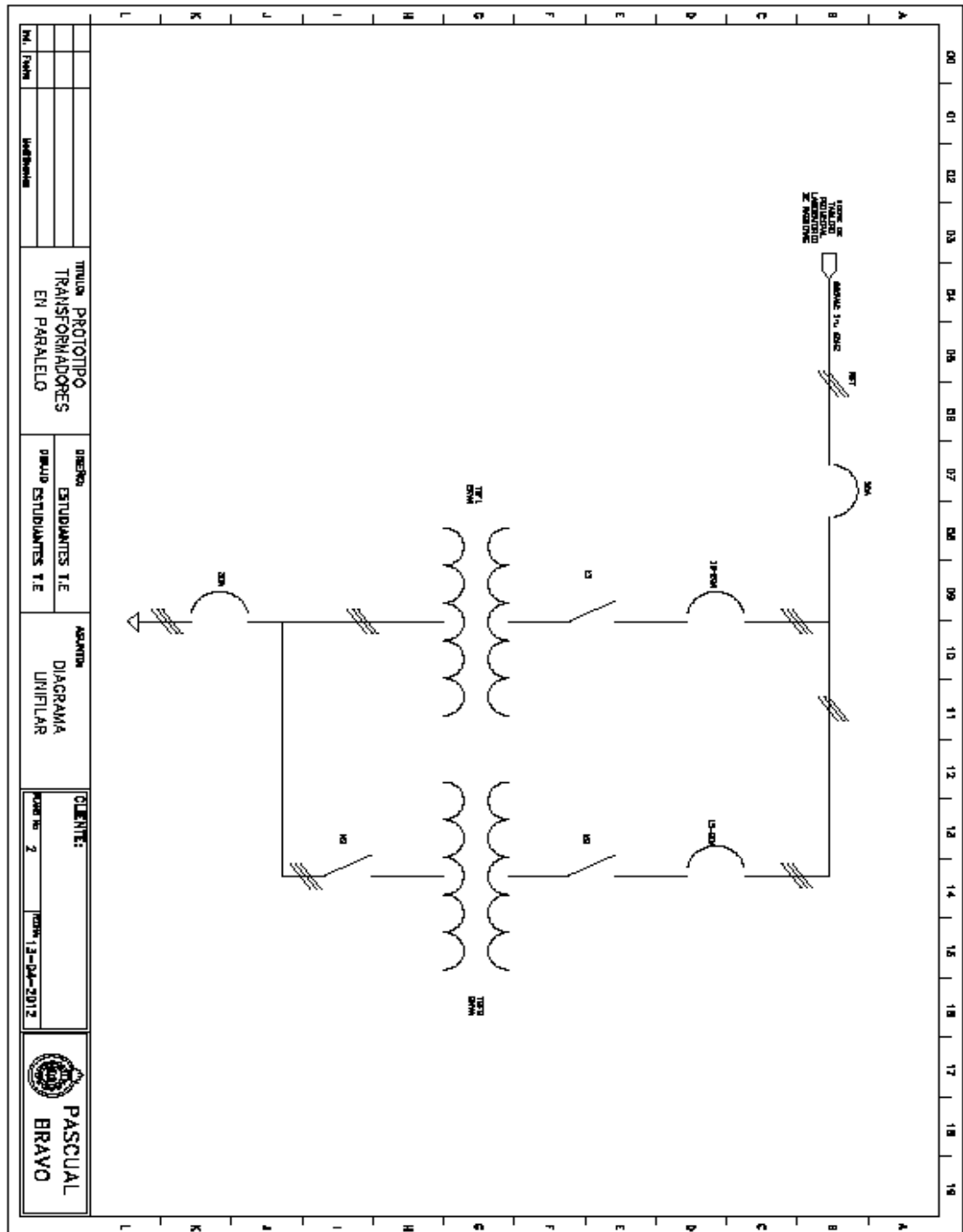
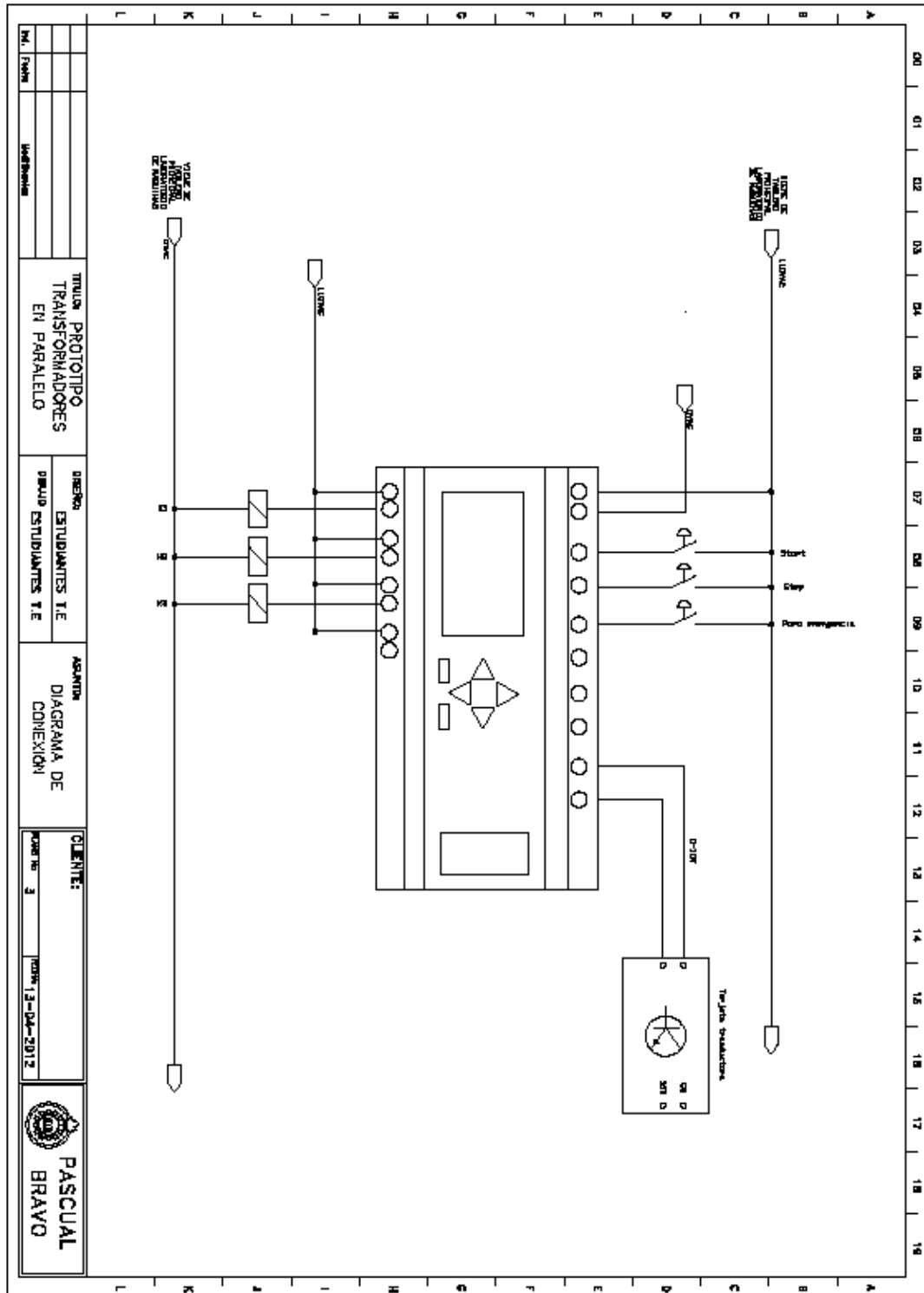


Gráfico 27. Diagrama de conexión del logo



7. CONCLUSIONES

- Se cumple con el objetivo principal de implementar el modulo de transformadores en paralelo automatizados con un sistema de operación sencillo.
- Es un modulo practico, didactico y demostrativo que se puede utilizar en la industria.
- Es un modulo compacto que trae beneficios a los estudiantes de tecnologia e ingenieria electrica que aporta al conocimiento de todos.
- El modulo de transformadores en paralelo es una fuente generadora de conocimiento en el ambito electrico, donde se aplican varias ramas de la electricidad como lo son logica cableada y programada, calidad de la energia, protecciones, dispositivos electronicos, maquinas electricas, etc.

8. RECOMENDACIONES

- Inicialmente se recomienda realizar un uso adecuado y responsable del modulo.
- Verificar que todos los componentes del modulo esten en buen estado para el funcionamiento.
- Verificar que la alimentacion del modulo sea de 220 voltios trifasico y las lineas de tierra de cada equipo.
- Realizar constantemente inspecciones visuales antes, durante, y despues del uso del modulo.
- Dejar el modulo en condiciones iniciales.
- Si se va a trasladar el modulo se deben desconectar los transformadores con la herramienta adecuada para no afectar las piezas de sujeccion y dejarlos conectados como se encontraban inicialmente.
- El modulo no se debe ubicar en lugares humedos , tampoco se deben colocar alimentos sobre el, ni se deben colocar piezas ,metalicas sobre los transformadores por precaucion; el modulo no se debe exponer a temperaturas mayores a 40° C.
- Cuando se vaya a utilizar el modulo los transformadores deben estar tapados mientras esten energizados.

- No colocar cargas mayores a la capacidad de los transformadores.
- A futuro si se van a realizar modificaciones al modulo se debe tomar como referencia la parte inicial del modulo tal y como esta.
- Se recomienda a futuro instalar un medidor multifuncional, medidores de corriente y voltaje para obtener una inspeccion visual sobre el comportamiento del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- BOYLESTAD Robert. L, Análisis Introductorio de Circuitos. México: Editorial Prentice Hall, 1998.
- CHAPMAN, Stephen J, Máquinas eléctricas. México: 4° edición, McGraw Hill companies Inc., 2007
- CHAPMAN, Stephen J; revisión técnica Martínez, José Demetrio y Morón Juan Yedra. Bogotá: McGraw Hill, 1987
- ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. El ABC de las máquinas eléctricas-1 transformadores. México: Limusa noriega editores, 2004, cap. 1.
- FITZGERALD, A. E, KINGSLEY, STEPHEN, UMANS, D, Máquinas Eléctricas. México: McGraw Hill. 2002.
- LOGO!314 Manual de producto, 04/2011, A5E03556176-01
- MOELLER, Werr, Electrotecnia general y aplicada, Barcelona: Editorial Labor, 1972.
- RAS, Enrique Oliva, Transformadores de potencia, de medida y de protección. Barcelona, Marcombo- Boixareu, 1994.
- RODRÍGUEZ POZUETA, Miguel Ángel, Transformadores en paralelo, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Cantabria.

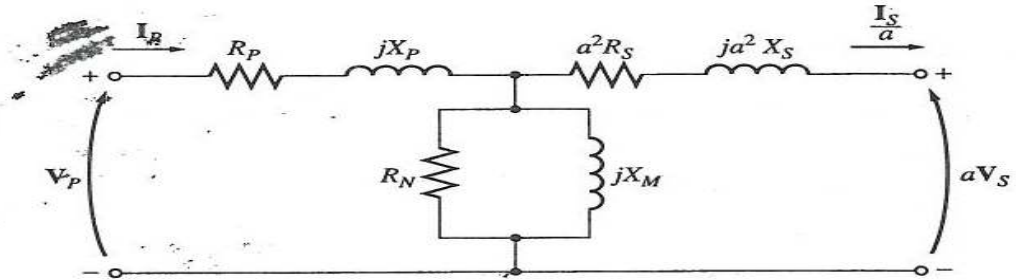
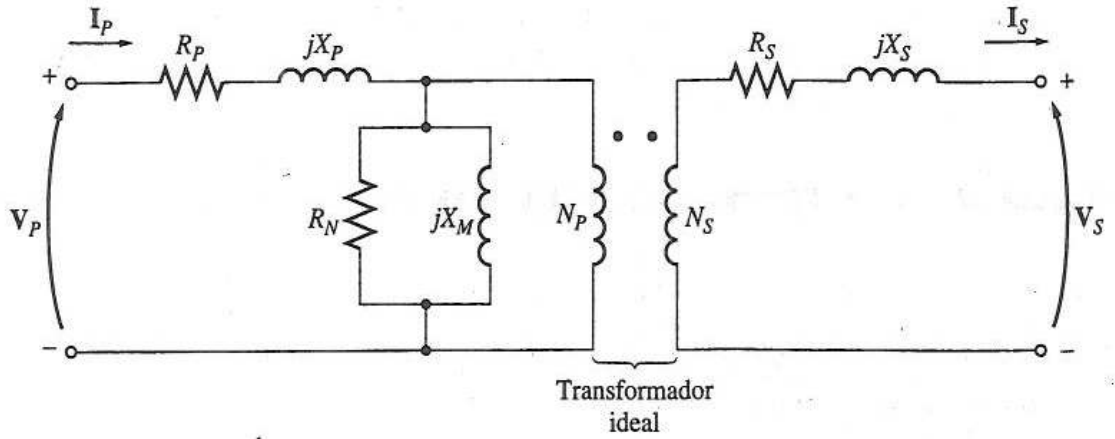
CIBERGRAFÍA

- ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. El ABC de las máquinas eléctricas-1 transformadores, México; Limusa noriega editores, 2004, cap. 1.
- <http://www.mitecnologico.com/Main/LeyDeFaraday>
- BOYLESTAD, Robert. L, Análisis Introductorio de Circuitos, Editorial Prentice Hall, México, 1998.
- <http://www.mitecnologico.com/Main/LeyDeJoule>
- FITZGERALD, A. E, KINGSLEY, STEPHEN, UMANS, D, Máquinas Eléctricas. Mc Graw Hill. 2002.
- FITZGERALD, A. E, KINGSLEY, STEPHEN, UMANS, D, Máquinas Eléctricas. Mc Graw Hill. 2002.
- CHAPMAN, Stephen J, Máquinas eléctricas 4° edición, McGraw Hill companies Inc. México, 2007
- RAS, Enrique Oliva, Transformadores de potencia, de medida y de protección. Barcelona, Marcombo- Boixareu, 1994.
- CHAPMAN, Stephen J; revisión técnica Martínez, José Demetrio y Morón Juan Yedra. Bogotá: McGraw Hill, 1987
- MOELLER, Werr, Electrotecnia general y aplicada, Barcelona: Editorial Labor, 1972

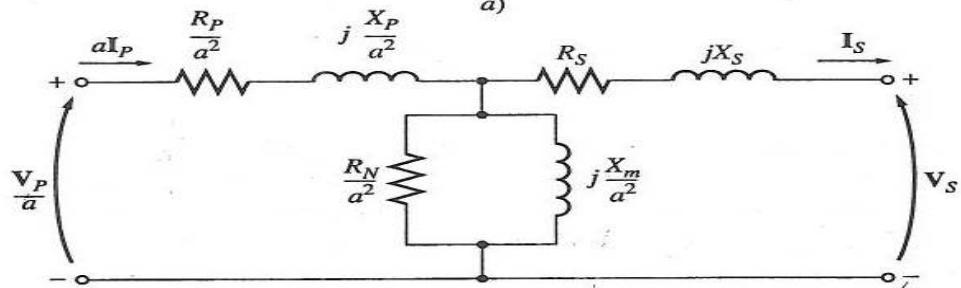
- CHAPMAN, Stephen J; revisión técnica Martínez, José Demetrio y Morón Juan Yedra. Bogotá: McGraw Hill, 1987
- <http://www.solomantenimiento.com/articulos/mantenimientotransformadores-electricos.htm>
- <http://www.monterosa.com.ar/default.asp?sec=foro&tipo=1&acc=muestra&iid=5>

ANEXOS

Anexo A. Modelo de un transformador real



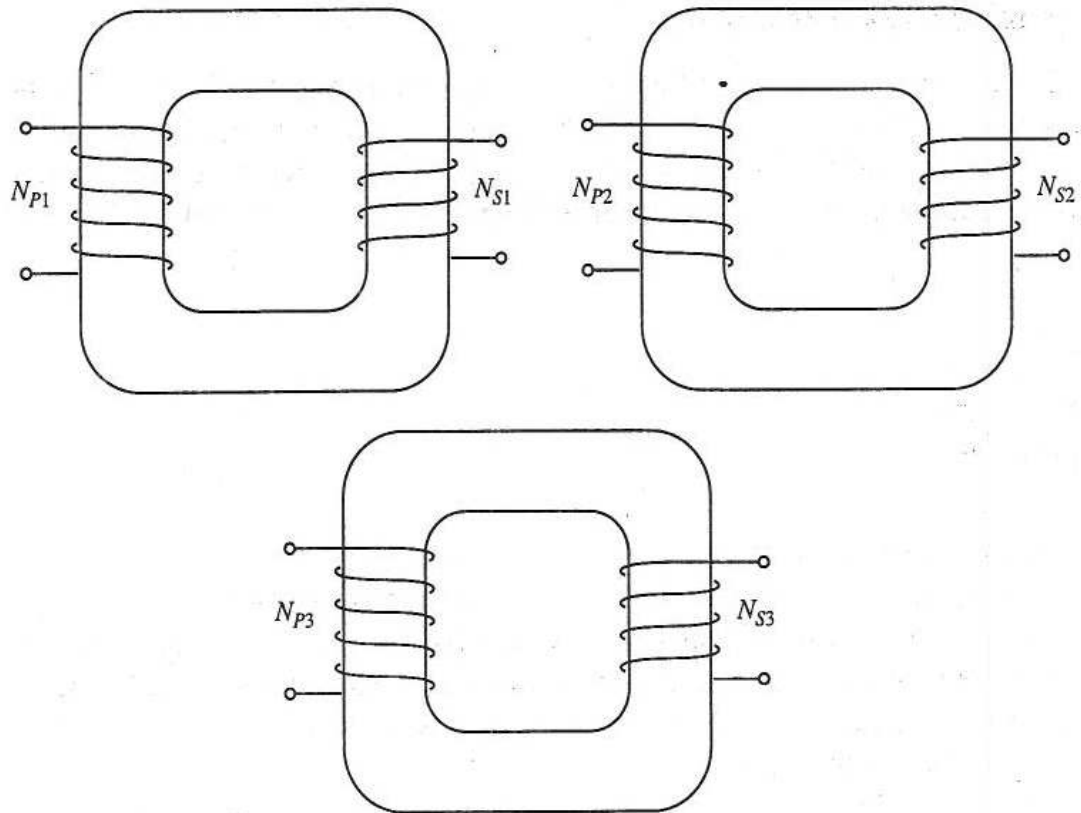
a)



b)

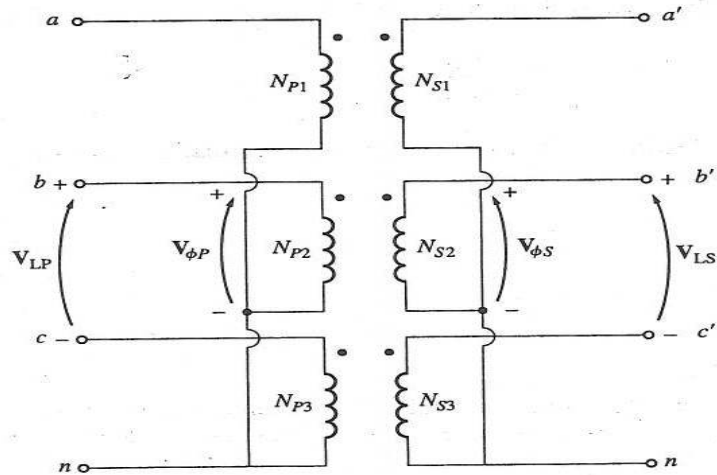
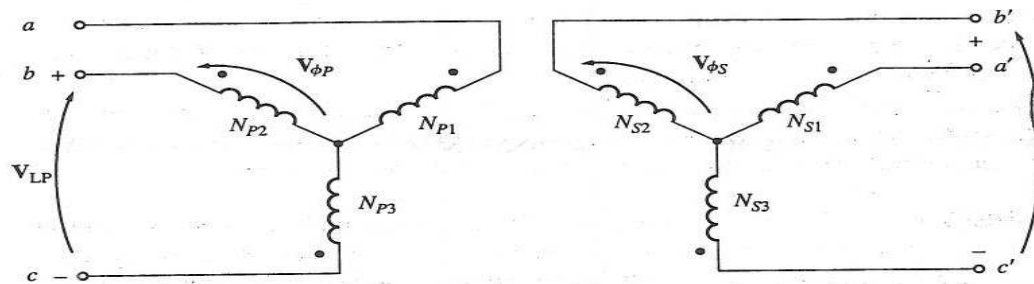
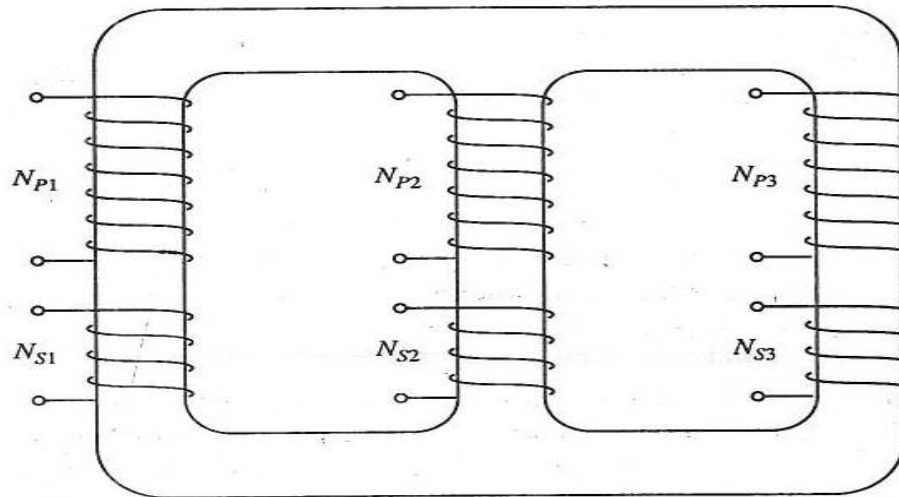
a) modelo de un transformador referida a su nivel de voltaje primario. b) modelo de un transformador referido a su nivel de voltaje referido al secundario

Anexo B. Banco trifásico de transformador compuesto por tres transformadores



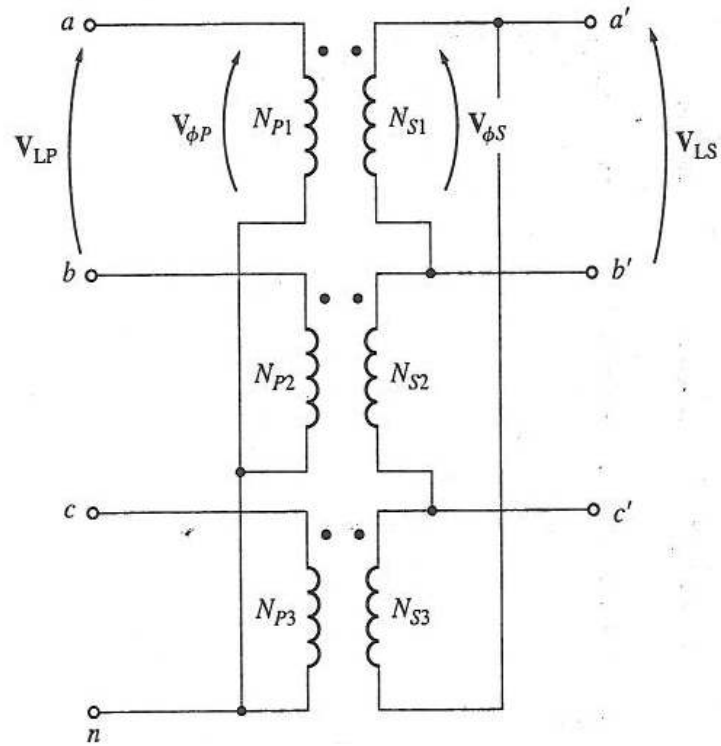
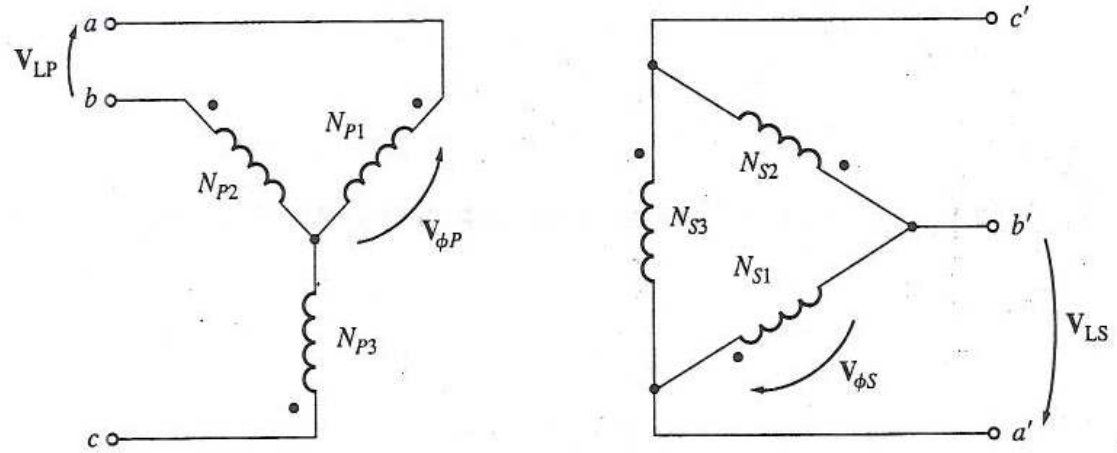
Transformador trifásico construido sobre núcleo de res columnas.

**Anexo C. Diagrama de conexión y cableado de un transformador trifásico Y-
Y, Y-D, D-Y, D-D.**

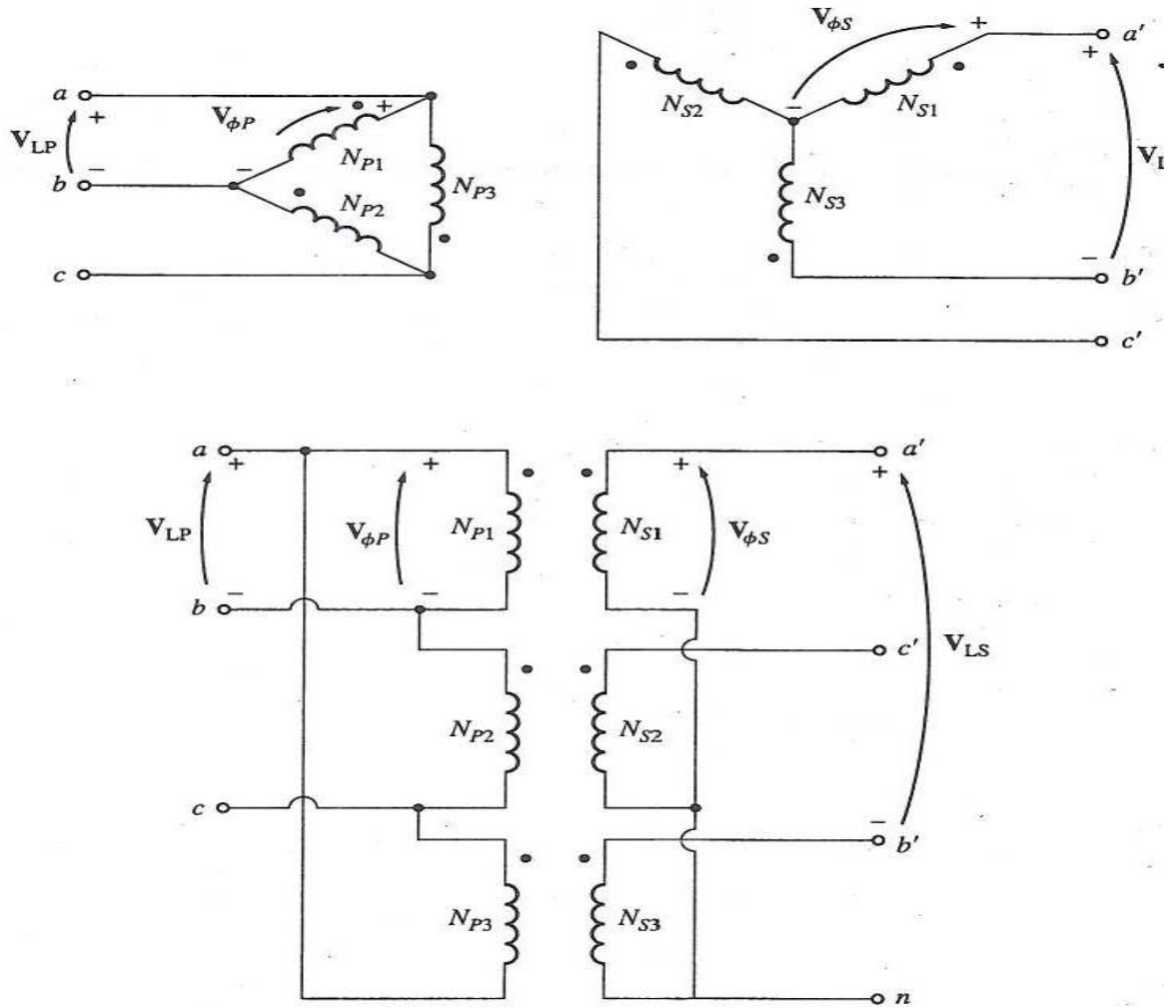


a)

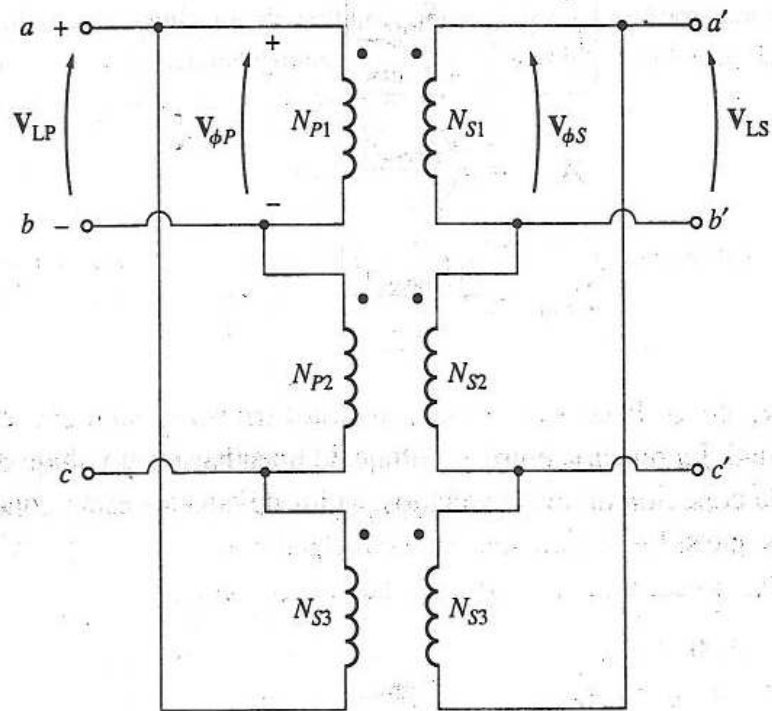
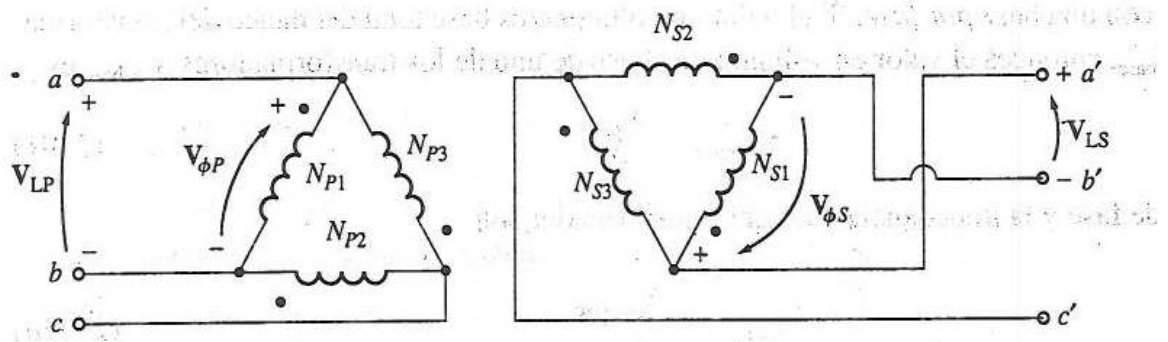
Anexo D. Conexión Y-D



Anexo E. Conexión D-Y



Anexo F. Conexión D-D



Anexo G. Transformador de corriente

