Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: "*Herramienta computacional para el cálculo de banco de transformadores monofásicos*"

Autor: **Pedro Martínez Arencibia**

Tutores: **MsC. Ing. Alicia Hernández Maldonado**

Ing. Alberto Ramírez González

Santa Clara
2004

"Año del 45 Aniversario del triunfo de la Revolución"

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: "*Herramienta computacional para el cálculo de banco de transformadores monofásicos*"

Autor: **Pedro Martínez Arencibia**
E-mail: arencibia@uclv.edu.cu

Tutores: **MsC. Ing. Alicia Hernández Maldonado**
Dpto. de Electroenergética
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UCLV
E-mail: aliciah@uclv.edu.cu

Ing. Alberto Ramírez González
Dpto. de Electroenergética
Facultad de Ingeniería Eléctrica. UCLV
E-mail: albertor@uclv.edu.cu

Santa Clara
2004
"Año del 45 Aniversario del triunfo de la Revolución"

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de *Eléctrica* autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

_____.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

_____.

Firma del Tutor

_____.

Firma del Jefe de Dpto.
Donde se defiende el trabajo

_____.

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

Pensamiento

Estudiar las fuerzas de la naturaleza, y aprender a mejorarlas, es la manera más derecha de resolver los problemas sociales.

José Martí

Dedicatoria

DEDICATORIA

- *Dedicado a las personas más bellas del mundo, mis padres, los que a base de sudor y sacrificio me han hecho lo que soy*

- *A mis hermanos por la paciencia y el cariño*

- *A mi tío Juan y a Mily por todo lo que aportan en mi andar por la vida*

- *A mi abuelita que desde el cielo me guía cada paso que doy*

- *A mis familiares y amigos por su interés*

- *A Jackie por su inmensa compresión*

Agradecimientos

AGRADECIMIENTOS

- *A mis padres*
- *A mi Familia*
- *A Alicita y a Alberto por su insistencia*
- *A Osleivy y su hermosa familia por haberme acogido como un miembro más*
- *A Maykel y a José Miguel por su paciencia*
- *A mis amigos por los buenos momentos que me han regalado*
- *A Jackie por tener el corazón más grande del mundo y habérmelo abierto*
- *A Luz Clara, Osmany, Zunay y Héctor por su enorme colaboración*
- *Y a todas esas bellas personas que de una forma u otra colaboraron con esta causa*

A todos ustedes Muchas Gracias

Tarea técnica

Trabajo de diploma: Herramienta computacional para el cálculo de banco de transformadores monofásicos

Plan de Trabajo

1. Revisión bibliográfica correspondiente al tema de operación de transformadores monofásicos en paralelo y en bancos trifásicos
2. Establecimiento de la concepción del programa computacional, incluyendo todas las alternativas posibles.
3. Diseñar y probar la base de datos de transformadores monofásicos, de manera que garantice la utilización de sus datos en el programa de computadora
4. Ejecución del diseño del programa computacional en el lenguaje de programación seleccionado.
5. Realización de diferentes pruebas que corroboren la validez de la propuesta.
6. Escritura del informe de trabajo de tesis con todos los requisitos que se exigen.

_____.

Diplomante

_____.

_____.

Tutores

Resumen

RESUMEN

Este trabajo aborda las temáticas principales relacionadas con la operación en bancos de transformadores monofásicos con las conexiones mas difundidas en el sistema de distribución de nuestro país. Su objetivo general es desarrollar un programa en Delphi que permita seleccionar el banco de transformadores adecuado y disponible para la operación monofásica de transformadores en paralelo y para operación trifásica de transformadores monofásicos.

Este informe consta además de la creación de una base de datos en Access capaz de almacenar todos los datos necesarios para el desarrollo del algoritmo de programación. Se presentan ejemplos de corridas de la aplicación los que posibilitan una mejor comprensión de la concesión de esta veloz herramienta de cálculo.

Índice

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 15

CAPÍTULO I. BANCOS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS 19

I.1 Los bancos de transformadores 19

I.2 Bancos de transformadores en paralelo 20

I.2.1 Transformadores con iguales relaciones de voltaje 20
I.2.1.1 Condiciones para la operación en paralelo 21
I.2.1.2 Condiciones para la operación óptima en paralelo 23
I.2.2 Transformadores con relaciones de voltajes diferentes 23
I.2.2.1Transformadores con relaciones de voltaje diferentes e igual relación de transformación 24
I.3 Bancos trifásicos 25

I.3.1 Bancos trifásicos cerrados 26
I.3.1.1 Operación con carga trifásica instalada 26
I.3.1.2 Operación con carga monofásica instalada 33
I.3.1.3 Operación con carga combinada 36
I.3.2 Bancos trifásicos abiertos 38
I.3.2.1 Operación en la conexión delta abierta 39
I.3.2.3 Estrella abierta 42
I.4 Indicadores energéticos del banco 42

I.5 Consideraciones finales del capítulo 43

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GENERALES Y MODOS DE TRABAJO DE LA APLICACIÓN *FASTER* 46

II.1 Delphi como herramienta de programación 46

II.2 Aplicación *Faster* 48

II.2.1 Operación para la búsqueda de transformadores y conformación de bancos 48
II.2.2 Operación de Cálculo de Carga 55
II.2.3 Operación de Selección y Cálculo 59
II.2.4 Acceso a la Base de Datos 62
II.3 Base de Datos 63

II.4 Consideraciones finales del capítulo 64

CONCLUSIONES 66

RECOMENDACIONES 67

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69

Introducción

El bosque sería muy triste si sólo cantaran las aves que mejor lo hacen.

INTRODUCCIÓN

La elección correcta de un banco de transformadores de distribución no es tarea que se pueda tomar a la ligera, por lo que el conocimiento a fondo de estos es indispensable para todo ingeniero eléctrico. Por otra parte, un transformador de distribución fuera de servicio representa un serio problema, pues ello siempre trae consigo un apagón más o menos prolongado de un sector poblacional o industrial.

En ocasiones ocurren fenómenos ambientales o eléctricos que provocan roturas en los transformadores conectados, provocando la pérdida de servicio en lugares que precisan del mismo con la mayor continuidad posible, ya que pueden producirse pérdidas humanas o económicas. Redistribuir la carga entre los transformadores que quedan en servicio o localizar, sin una herramienta de búsqueda, los transformadores que se necesitan para abastecer dicha carga, así como el tipo de conexión para la mayor eficiencia del banco puede tardar un tiempo prolongado, con las afectaciones que ello representa para la economía y para el usuario. Las condiciones antes expuestas conducen al problema de investigación ¿qué acción emprender para lograr una rápida y eficiente selección de bancos de transformadores, así como el cálculo de sus capacidades?

Para dar respuesta a este problema se ejecuta este trabajo de diploma que tiene como principal objetivo desarrollar un programa que permita seleccionar el banco de transformadores adecuado y disponible para la operación monofásica de transformadores en paralelo y para operación trifásica de transformadores monofásicos. Para dar satisfactorio cumplimiento a este se establecen los objetivos específicos siguientes:

1. Analizar las características de la conexión de transformadores monofásicos en paralelo y en bancos trifásicos, en estos últimos analizando todos los tipos de conexiones posibles.
2. Diseñar una base de datos que posibilite el cálculo y selección de transformadores acorde a las exigencias establecidas.
3. Desarrollar un programa de computadoras que realice los cálculos para bancos de transformadores e incluya el análisis de utilización de estos.
4. Realizar pruebas de validez al programa desarrollado que permitan garantizar su correcta concepción.

La implementación de la herramienta computacional ***Faster*** tiene gran importancia debido primeramente a su utilidad práctica, pues de una manera sencilla a través de la interfaz con el usuario pueden entrarse los datos y obtenerse los resultados, luego puede ser utilizado en cualquier organización básica eléctrica (OBE). En segundo lugar porque constituye un recurso didáctico para apoyar el proceso de enseñanza–aprendizaje de la asignatura Máquinas Eléctricas I.

Desde el punto de vista teórico la importancia radica en la concreción de los diferentes procedimientos para el cálculo y selección.

El informe de este trabajo se ha estructurado en resumen, introducción, desarrollo (que es el cuerpo del trabajo), formado por dos capítulos, conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas.

El capítulo I está dedicado al estudio de los transformadores monofásicos y sus modos de conexión. En este se expone la operación monofásica de transformadores en paralelo en sus modalidades posibles. También aborda la operación de transformadores monofásicos en conexiones trifásicas, tanto en bancos abiertos como cerrados, se presentan las expresiones de carga y distribución de carga para los casos de carga monofásica, trifásica balanceada y combinada para la mayoría de las conexiones.

En el capítulo II se describe lo referido a la concepción de la aplicación ***Faster***, así como de la base de datos. Se explican los procedimientos de cálculo desarrollados para dado los requerimientos de la carga determinar todas las posibles variantes de bancos, y dado los transformadores y el tipo de conexión calcular la carga máxima que se puede abastecer. Conjuntamente con la explicación de los procedimientos se describen las ventanas de diálogo para las interfaces de entrada de datos y resultados a partir de ejemplos concretos que demuestran a su vez la validez de la aplicación. Como esta aplicación utiliza una base de datos de transformadores, en este capítulo II se describen las características fundamentales de esta, los parámetros que almacena y cómo el usuario puede interactuar con ella.

La realización de este trabajo requirió la consulta y revisión de diferentes fuentes bibliográficas en el campo de la operación de transformadores y en el campo de la programación. En relación con la operación de transformadores resultaron de gran utilidad los libros *Theory of Alternating-Current Machinery* de *A. Langsdorf, Alternating Current*

Machines de *A. Puchstein, T. Lloyd* y *A. Conrad, An Introduccion to Electrical Machines and Transformers* de *G. McPherson,* así como material inédito del colectivo de la disciplina de Máquinas Eléctricas. Para la programación aportaron en gran medida el Curso Delphi disponible en http://electroweb.cujae.edu.cu/books/libros/programacion/delphi/CursoDelphi.pdf y La Cara Oculta del Delphi de I. Marteens disponible en http://electroweb.cujae.edu.cu/books/libros/programacion/delphi/La%20cara%20oculta%20de%20D4.pdf. Respecto a la base de datos resultó de utilidad *MS Access 97* disponible en la Intranet de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Capítulo I

No importa qué tan hermosas o nobles sean las sendas ajenas, tu tienes necesidad de tu propia luz. Abre tu propio camino, fabrica tu propia lámpara.

CAPÍTULO I. BANCOS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Los transformadores son máquinas eléctricas encargadas de convertir la energía eléctrica de un nivel de voltaje y corriente a otro nivel de voltaje y corriente. Esta característica distintiva es lo que ha posibilitado la transmisión y distribución de dicha energía a prácticamente todos los confines del planeta. [2], [5], [16], [18] Además cuando se trasmite se realiza a tan alto voltaje y tan baja corriente que se garantiza que las pérdidas sean reducidas. Sin lugar a dudas, los transformadores han sido un elemento esencial en el desarrollo alcanzado por la humanidad en los últimos 120 años.

Con relativa frecuencia se acostumbra a conectar transformadores en grupo, formando diferentes conexiones que se denominan genéricamente banco de transformadores.

I.1 Los bancos de transformadores

La conexión de transformadores en banco [3],[7] puede dar respuesta a situaciones problemáticas, como por ejemplo la necesidad de continuidad de servicio, el incremento de la carga en el tiempo, la variabilidad de la carga en el día o una composición combinada de carga monofásica y trifásica y la disponibilidad de transformadores.

Los bancos de transformadores suelen clasificarse en:

- Bancos en paralelo. Estos pueden estar formados por transformadores monofásicos o transformadores trifásicos.
- Bancos de transformadores monofásicos en conexiones trifásicas. Muy utilizados en los sistemas de distribución. También pueden ser usados en transmisión cuando por la capacidad requerida resulta muy difícil el transporte de transformadores trifásicos o para disminuir la potencia de reserva para casos de averías o mantenimiento.

En la conexión de banco de transformadores debe tenerse muy en cuenta dos aspectos primordiales, el primero de estos es garantizar que los voltajes nominales por alta y por baja de los transformadores sean iguales, para aprovechar las capacidades satisfactoriamente y

evitar las corrientes circulantes internas. El segundo aspecto es la conexión acorde a la polaridad para evitar que los transformadores sufran daños térmicos de gran consideración.

En el caso de transformadores trifásicos además de los aspectos señalados, debe garantizarse que la conexión por primario y secundario de ambos transformadores sea la misma, para evitar corrientes circulantes internas por los transformadores.

I.2 Bancos de transformadores en paralelo

La conexión de transformadores en paralelo [7], [13], [17], [19] se hace necesaria, tal como se expresó anteriormente, debido a los incrementos de la demanda que superan la capacidad existente o cuando los requerimientos de confiabilidad y continuidad de operación lo exigen, este es el caso, que si un transformador falla, el otro continuará alimentando la carga sin interrupción.

Cuando la demanda de energía se reduce temporalmente, resulta más económico operar un transformador pequeño cerca de su límite de capacidad a plena carga que un transformador mayor a capacidad reducida. Por lo que, cuando la demanda energética es muy fluctuante resulta más provechoso la instalación de dos o más transformadores en paralelo que utilizar un transformador de gran capacidad. En estas condiciones el sistema es más flexible porque tiene la posibilidad de agregar una parte de los transformadores en paralelo cuando sea necesario.

La operación en paralelo de transformadores debe efectuarse para un uso más satisfactorio del banco con transformadores que posean iguales voltajes por primario y por secundario. También puede operarse cuando hay una mínima desigualdad entre estos, la cual puede estar producida por los propios valores nominales del transformador o por que no operen en el mismo tap, cuestión esta última debido a manipulación deficiente.

I.2.1 Transformadores con iguales relaciones de voltaje

La operación más habitual de transformadores en paralelo ocurre cuando los voltajes del devanado primario y del secundario de todos los transformadores son idénticos. Sin embargo la distribución de la carga dependerá de otros parámetros que condicionan la operación del banco.

I.2.1.1 Condiciones para la operación en paralelo

Dos transformadores monofásicos operarán en paralelo si se conectan con la misma polaridad. Dos transformadores trifásicos operarán en paralelo si tienen el mismo tipo de devanados (por ejemplo, todos tiene la conexión Y-Δ), están conectados con la misma polaridad, tienen la misma rotación de fase y su desplazamiento angular es el mismo.

Las condiciones mínimas necesarias para que dos transformadores operen en paralelo son:

a) Idénticos voltajes por primario y secundario

b) Conexión acorde a la polaridad

En el esquema de la Figura I.1, puede observase la conexión de dos transformadores en paralelo atendiendo a su polaridad.

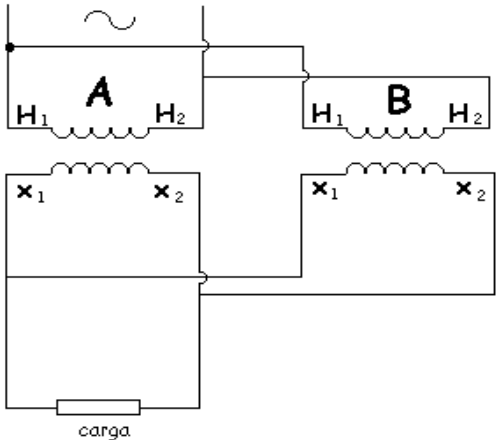


Figura I.1. Transformadores monofásicos conectados en paralelo

La representación circuital simplificada de dos transformadores operando en paralelo se muestra en la Figura I.2.

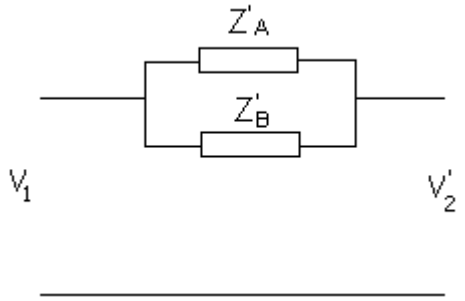


Figura I.2. Circuito equivalente aproximado de dos transformadores operando en paralelo

En el caso en que los transformadores tengan iguales voltajes por ambos devanados puede establecerse que la distribución de la carga en estos, será:

$$\frac{kVA_A}{kVA_B} = \frac{Z_B^{'}}{Z_A^{'}} \qquad \text{(I.1)}$$

También puede ser expresada como

$$\frac{kVA_A}{kVA_B} = \frac{\%Z_B}{\%Z_A}\frac{kVA_{Ano\min ales}}{kVA_{Bno\min ales}} \qquad \text{(I.2)}$$

Donde:

Z_A, Z_B – impedancias de dispersión de los transformadores referidas a primario

$\%Z_A$, $\%Z_B$ – porcentaje de impedancia de los transformadores

$kVA_{Anominales}$, $kVA_{Bnominales}$ – capacidad nominal de los transformadores

kVA_A, kVA_B – carga que asume cada transformador.

La expresión (I.2) pone de manifiesto el hecho de que la carga se distribuirá acorde a los porcentajes de impedancia de los transformadores.

Por otra parte la capacidad efectiva de carga está condicionada por la relación existente entre los parámetros de dispersión de ambos transformadores. Si se cumple que:

$$\left(\frac{R}{X}\right)_A = \left(\frac{R}{X}\right)_B \qquad \text{(I.3)}$$

la carga que puede entregar el banco será

$$kVA_{c\arg a} = kVA_A + kVA_B \qquad \text{(I.4)}$$

En caso contrario la carga a entregar será igual a:

$$kVA_{c\arg a} = \sqrt{kVA_A^2 + kVA_B^2 + 2.kVA_A.kVA_B.\cos\theta} \qquad \text{(I.5)}$$

Donde: $\theta = \tan\left(\frac{X}{R}\right)_A - \tan\left(\frac{X}{R}\right)_B$ (I.6)

Luego la división de la carga, en proporción a las capacidades de KVA de los transformadores en paralelo está determinada por la igualdad de sus voltajes nominales, relación de vueltas en los devanados, porcentaje de impedancias y relaciones de su reactancia a su resistencia.

Si estas condiciones no se cumplen, las corrientes de carga no se pueden dividir proporcionalmente en las capacidades nominales de KVA de los transformadores, y puede surgir una diferencia de fase entre las corrientes de estos, tal como se comprueba en las expresiones (I.2) y (I.5).

I.2.1.2 Condiciones para la operación óptima en paralelo

Para garantizar la óptima operación de transformadores en paralelo, además de cumplirse las condiciones establecidas en I.2.1.1 se deben cumplir las siguientes:

a) Iguales porcentajes de impedancia para que la carga de los transformadores acoplados se reparta de forma equitativa, o sea quedan cargados con igual porcentaje de carga.

b) Iguales relaciones entre la resistencia y la reactancia de dispersión (I.3) lo que garantiza que las corrientes aportada por cada transformador estén en fase y con ello que la capacidad a entregar se corresponda con la suma aritmética de la capacidad de cada transformador (I.4)

I.2.2 Transformadores con relaciones de voltajes diferentes

Cuando los transformadores tienen diferentes voltajes por primario y secundario [7], [13], las expresiones del epígrafe I.2.1.1 no son válidas. En este caso la representación circuital aproximada puede ser, la mostrada en la Figura I.3, donde la diferencia de voltaje se puede representar como una fuente de voltaje constante, que puede poseer polariza diferente a la representada en dependencia de la referencia que se tome.

La distribución de la carga debe calcularse mediante la solución del sistema de ecuaciones siguientes:

$$\frac{V_{1A}}{a_A} = V_2 + I_{2A}.Z''_{2A} \qquad \text{(I.7)}$$

$$I_{carga} = I_{2A} + I_{2B} \quad \text{(I.8)}$$

$$\frac{V_{1B}}{a_B} = V_2 + I_{2B}.Z''_{2B} \quad \text{(I.9)}$$

Donde:

V_{1A}, V_{1B} – voltajes de primario de los transformadores

a_A, a_B – relación de transformación de cada transformador

Z''_{2A}, Z''_{2B} – impedancia de dispersión referida al secundario de cada transformador

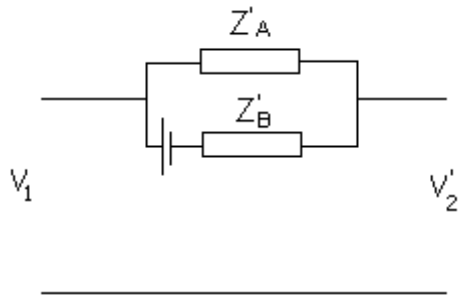


Figura I.3. Transformadores operando en paralelo con diferentes voltajes por primario y secundario

La operación de transformadores con estas características no es aconsejable, debido a la subutilización de las capacidades de estos y al calentamiento de los transformadores. En otras palabras, debido a esta diferencia se origina una corriente de compensación que circula por los transformadores, cuyo valor se obtendría dividiendo el voltaje resultante de la diferencia, por la impedancia de dichos transformadores, de ahí la no recomendable conexión en estas condiciones.

I.2.2.1Transformadores con relaciones de voltaje diferentes e igual relación de transformación

La operación en paralelo de transformadores con diferentes voltajes por primario y por secundario, pero con igual relación de transformación es muy frecuente, sin embargo puede darse esencialmente cuando no existan muchas diferencias dentro de los voltajes, por ejemplo: transformadores de 222/110 V, 230/115 V ,240/120V.

Esta diferencia puede ser mayor lo que implicaría una mayor subutlización del transformador de voltaje más alto.

El procedimiento en estos casos es similar a los transformadores de iguales voltajes por primario y secundario (epígrafe I.2.1), solo que deben tenerse en cuenta, para una satisfactoria operación los aspectos siguientes:

- La fuente de suministro debe ser la adecuada para el transformador de menor voltaje.
- La capacidad del transformador de voltajes más altos se reduce en la misma proporción que se reducen los voltajes, considerando que puede entregar como carga máxima su corriente nominal.

$$kVA = \frac{V_R}{V_N} \times kVA_N \qquad \text{(I.10)}$$

- Para la determinación de la carga de cada transformador que opera en paralelo y por tanto la del banco, en la expresión (I.2) debe sustituirse como capacidad nominal, la obtenida para el voltaje de operación real.

Desde el punto de vista del balance energético tomando como referencia que el transformador entrega su corriente nominal, puede afirmarse que su capacidad nominal se reduce, las pérdidas de cobre son las nominales y las de núcleo se reducen en proporción cuadrática a la reducción del voltaje.

$$P_N = \left(\frac{V_R}{V_N}\right)^2 \times P_{NN} \qquad \text{(I.11)}$$

I.3 Bancos trifásicos

Los bancos de transformadores en conexiones trifásicas son convenientes en los sistemas de distribución donde hay gran combinación de la carga; o sea carga monofásica y trifásica, posibilitando la flexibilidad en la operación. [11], [15], [3]

La transformación trifásica se puede realizar por medio de tres transformadores monofásicos en conexión trifásica o por medio de transformadores trifásicos. Los métodos

de conexión de los devanados para la conexión trifásica son los mismos, ya sea que se usen los tres devanados en un transformador trifásico, o bien tres transformadores monofásicos por separado, en conexión trifásica.

Los bancos de transformadores monofásicos en conexiones trifásicas pueden ser de dos tipos: cerrados (cuando se utilizan tres transformadores monofásicos) y abiertos (cuando se utilizan solo dos transformadores)

I.3.1 Bancos trifásicos cerrados

Para esta transformación, se utilizan tres transformadores monofásicos de igual relación de transformación. Los primarios se conectan a la red trifásica de donde toman la energía y los secundarios alimentan la carga.

Los bancos cerrados se prefieren cuando hay un predominio de la carga trifásica sobre la monofásica o cuando la carga es puramente trifásica, pues la subutilización es menor.

Un transformador trifásico opera de manera similar a tres transformadores monofásicos en una conexión trifásica [6], [19]. Los primarios y secundarios de cualquier transformador trifásico pueden conectarse independientemente en estrella (Y) o en delta (Δ). Esto da lugar a cuatro conexiones posibles para un transformador trifásico o un banco de transformadores monofásicos conectados a una red trifasica: estrella-estrella (Y –Y), estrella-delta (Y –Δ) delta-estrella (Δ–Y) y delta-delta (Δ–Δ).

En lo adelante solo se referirá a las transformaciones trifásicas formadas por tres transformadores monofásicos.

I.3.1.1 Operación con carga trifásica instalada

a) Conexión Y-Δ

Para analizar la operación con carga trifásica balanceada se toma como referencia la conexión Y-Δ, que está muy difundida en nuestros sistemas de distribución. La representación de la conexión Y-Δ de transformadores monofásicos se ilustra en la Figura I.5.

En esta conexión el voltaje primario de línea se relaciona con el voltaje primario de fase mediante $V_{LP} = \sqrt{3} \times V_{FP}$, y el voltaje de línea secundario es igual al voltaje de fase secundario $V_{LS} = V_{FS}$. La relación de voltaje de cada fase es

$$\frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a \tag{I.12}$$

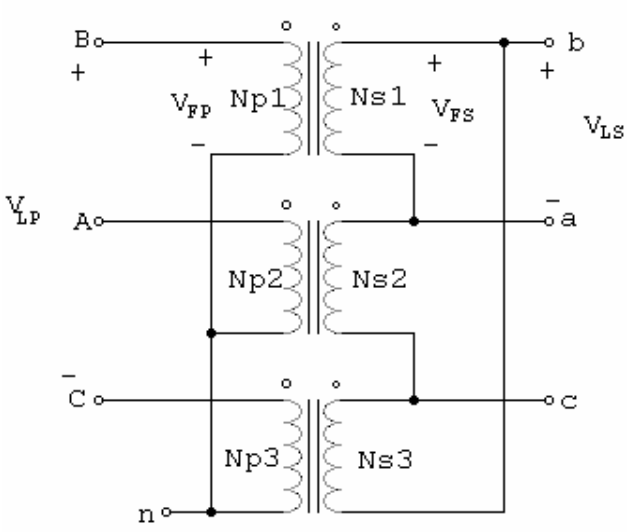


Figura I.5. Conexión Y-Δ

De tal manera que la relación total entre el voltaje de línea en el lado primario del banco y el voltaje de línea en el lado secundario del banco es:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\left(\sqrt{3} \times V_{FP}\right)}{V_{FS}} \tag{I.13}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \left(\sqrt{3} \times a\right) \tag{I.14}$$

La conexión Y-Δ no tiene problema con los componentes del tercer armónico en sus voltajes, ya que ellos se atenúan gracias a la corriente que circula por la delta (Δ). Está conexión también es más estable con relación a las cargas desbalanceadas, puesto que la delta (Δ) redistribuye parcialmente cualquier desbalance que se presente.

Esta conexión se usa con frecuencia para alimentar cargas trifásicas grandes de un sistema trifásico de alimentación conectado en estrella. Tiene la limitante de que para alimentar cargas trifásicas combinada con cargas monofásicas, estas últimas entre línea y neutro, no dispone del neutro.

Por otra parte, tiene la ventaja relativa de que la impedancia de los tres transformadores no necesita ser la misma en esta conexión.

Si carga es puramente trifásica (K_3), la capacidad mínima a instalar por cada transformador será de un tercio de la carga trifásica, tal como puede constatarse en el esquema de la Figura I.6.

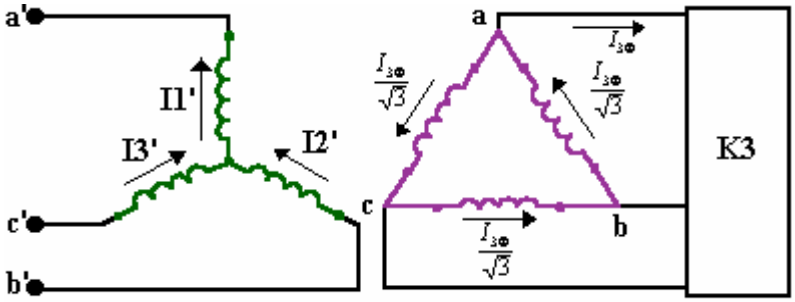


Figura I.6. Esquema de conexión de la carga trifásica al banco Y-Δ.

Cumpliéndose que:

$$kVA_{Transf} = \frac{1}{3} K_3 \qquad \text{(I.15)}$$

b) Conexión Δ- Δ

Un esquema de la conexión Δ-Δ se muestra en la Figura I.7. En este tipo de conexión debe tenerse especial cuidado al formar las conexiones primarias y secundarias, pues sino se hace atendiendo a la polaridad, puede provocarse la circulación de una corriente de gran magnitud entre los devanado de transformadores, que puede llevar a dañarlos seriamente.

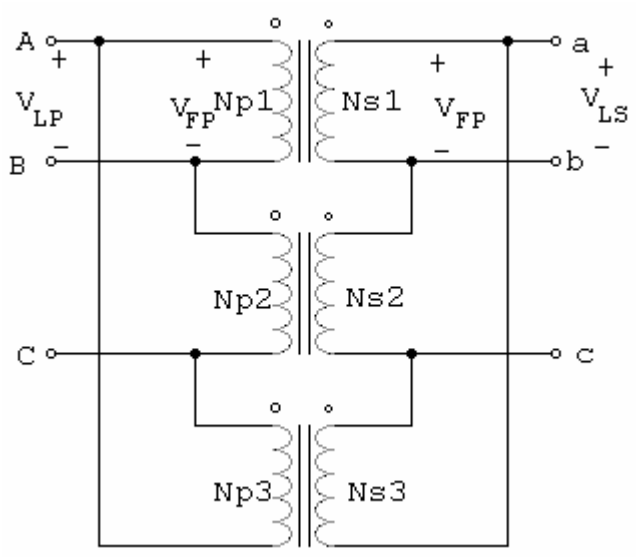


Figura I.7. Conexión Δ-Δ

En esta conexión se cumple que:

$$V_{LP} = V_{FP} \tag{I.16}$$

$$V_{LS} = V_{FS} \tag{I.17}$$

Por lo que la relación entre los voltajes de línea primario y secundario, la relación de transformación, es

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{V_{FS}} = a \tag{I.18}$$

Esta conexión pude ser utilizada alimentar sistemas de alumbrado monofásicos y carga de potencia trifásica simultáneamente, siempre que se distribuya la carga monofásica equitativamente entre las diferentes fases y se usen transformadores idénticos. Si la carga monofásica se conecta solo a uno de los transformadores las corrientes por estos serán desiguales y habrá una subutilización del banco.

Para el banco Δ-Δ, si se abastece una carga trifásica balanceada y los transformadores poseen impedancias de dispersión iguales se cumple cada transformador lleva un tercio de

dicha carga, similar al banco Y-Δ. En la Figura I.8 se muestra un esquema de conexión de dicho banco con carga trifásica balanceada.

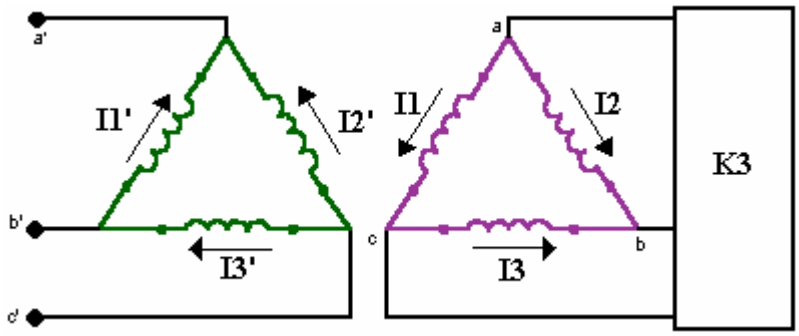


Figura I.8. Esquema de conexión de la carga trifásica al banco Δ-Δ.

En caso contrario, cuando las impedancias de dispersión son diferentes debe determinarse el porcentaje de carga que lleva cada transformador, pues en estos casos la impedancia de dispersión incide directamente sobre la distribución de la carga.

c) Conexión Δ-Y

La conexión del banco Δ-Y con tres transformadores monofásicos se ilustra en la Figura I.9.

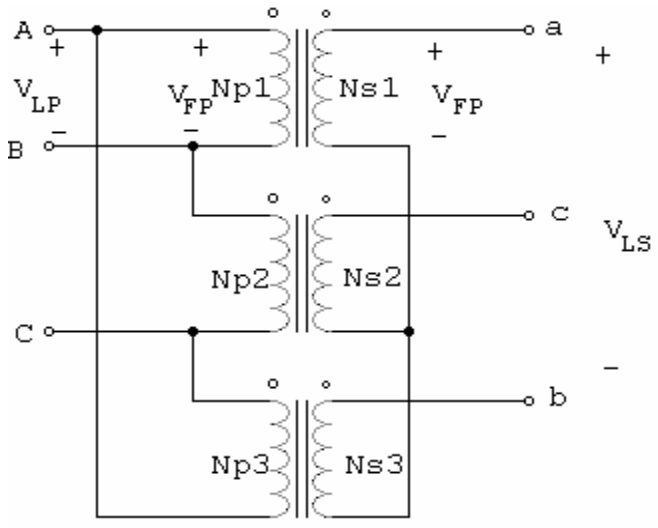


Figura I.9.Conexión Δ-Y

En esta conexión, el voltaje de línea primario es igual al voltaje de fase primario, $V_{LP}=V_{FP}$, en tanto que los voltajes secundarios se relacionan por $V_{LS} = \sqrt{3} \times V_{FS}$, por tanto la relación de voltaje línea a línea de esta conexión es

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{FP}}{\sqrt{3} \times V_{FS}} \tag{I.19}$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{I.20}$$

Esta conexión tiene las mismas ventajas y el mismo desplazamiento de fase que el transformador Y -Δ. Solo que en este caso el voltaje secundario se adelanta al voltaje primario.

Se usa en los sistemas de transmisión en los que es necesario elevar tensiones de generación. En sistemas de distribución industrial, su uso es conveniente debido a que se tiene acceso a dos tensiones distintas, de fase y línea.

d) Conexión Y-Y

La conexión Y-Y de los transformadores se muestra en la Figura I.10.

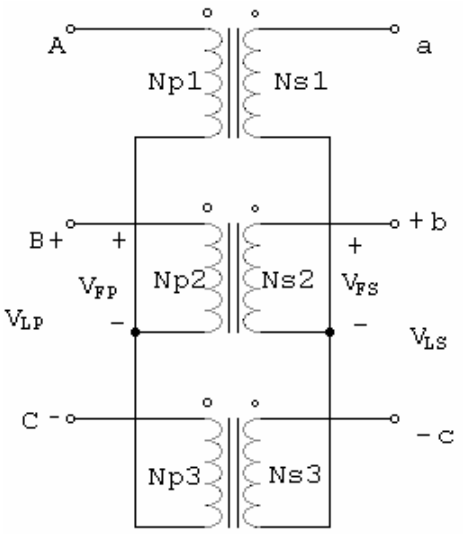


Figura I.10. Conexión Y-Y

En una conexión Y-Y, el voltaje primario de cada fase se expresa por $V_{FP}=V_{LP} / \sqrt{3}$. El voltaje de fase secundario se relaciona, entonces, con el voltaje de la línea en el secundario por $V_{LS} = \sqrt{3} \times V_{FS}$. Por tanto, la relación de transformación en el transformador es

$$V_{LP} / V_{LS} = (\sqrt{3} \times V_{FP}) / (\sqrt{3} \times V_{FS}) = a \qquad \text{(I.21)}$$

Se emplea en sistemas con tensiones muy elevadas, ya que disminuye la capacidad de aislamiento. Esta conexión tiene dos serias desventajas:

- Si las cargas en el circuito del transformador están desbalanceadas, entonces los voltajes en las fases del transformador se desbalancearán seriamente.
- No presenta oposición a los armónicos impares (especialmente el tercero). Debido a esto la tensión del tercer armónico puede hacer que el voltaje resultante de fase sea mucho mayor que el nominal.

Estos inconvenientes pueden resolverse aplicando alguna de las dos técnicas que se esbozan seguidamente:

- Conectar sólidamente a tierra el neutro primario de los transformadores. Esto permite que los componentes adicionales del tercer armónico, puedan manifestarse mediante la circulación de una corriente por el neutro, en lugar de causar gran aumento en los voltajes. El neutro también proporciona retorno a cualquier corriente desbalanceada en la carga.
- Agregar un tercer devanado (terciario) conectado en delta al grupo de transformadores. Esto posibilita la circulación corriente por la delta que atenúan significativamente los componentes del tercer armónico del voltaje, de manera similar a como sucede en el banco Y-Δ. Esta técnica puede usarse en transformadores trifásicos no así en los bancos que se forman con transformadores monofásicos.

De estas técnicas de corrección, la primera es la más factible para usarse en bancos con transformadores monofásicos.

I.3.1.2 Operación con carga monofásica instalada

a) Conexión Estrella-Delta

El esquema de conexión de carga monofásica a un banco de transformadores con conexión estrella-delta se muestra en la Figura I.11.

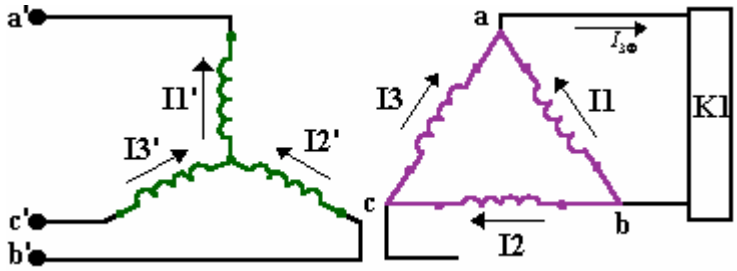


Figura I.11 .Esquema de conexión de la carga monofásica al banco Y-Δ

En la Figura I.11 se constata que circulan corrientes por cada devanado secundario (: I_1, I_2, I_3), haciendo por tanto circular corriente por los devanados primarios ($I_1^{'}$, $I_2^{'}$, $I_3^{'}$).

La corriente por la carga ($I_{1\Phi}$) puede determinarse por la contribución de los secundarios de los transformadores:

$$I_2 = I_3 (1) \tag{I.22}$$

$$I_\Phi = I_2 + I_1 (2) \tag{I.23}$$

$$I_\Phi = I_3 + I_1 \tag{I.24}$$

En el primario del banco, si no hay conexión al neutro se cumple: $I_1^{'} = I_2^{'} + I_3^{'}$ Pero:

$$I_2^{'} = \frac{I_2}{a} \quad , I_1^{'} = \frac{I_1}{a} \quad , \quad I_3^{'} = \frac{I_3}{a} \tag{I.25}$$

Luego

$$\frac{I_1}{a} = \frac{I_2}{a} + \frac{I_3}{a} \Rightarrow I_1 = I_2 + I_3 \quad (I.26) \Rightarrow I_1 = 2 I_2 = 2 I_3 \quad (I.27)$$

Siendo

$$I_2 = I_3 = \frac{I_1}{2} \tag{I.28}$$

Sustituyendo (I.25) en (I.22) queda

$$I_{1\Phi} = \frac{3}{2} I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{2}{3} I_{1\Phi} \tag{I.29}$$

Sustituyendo (I.25) en (I.22) se tiene

$$I_{1\Phi} = I_2 + 2I_2 = 3I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{1}{3} I_{1\Phi} \tag{I.30}$$

Por lo que se puede constatar que el transformador que tiene conectado la carga monofásica lleva 2/3 de la carga y cada uno de los otros dos lleva 1/3 de la carga 1Φ conectada.

Obsérvese que los (KVA) instalado son (4/3) de los (KVA) demandados por la carga 1Φ, luego hay que instalar un 33% mas de capacidad en el banco, que la que realmente necesita la carga. Es por esto, que mientras la carga predominante sea la monofásica no es conveniente la instalación de este tipo de banco.

Otro aspecto importante es que la distribución de la carga por los trasformadores no depende de la impedancia de dispersión de estos.

b) Conexión Δ -Δ

Para el banco Δ-Δ, en la Figura I.12 se muestra el esquema de conexión para carga monofásica.

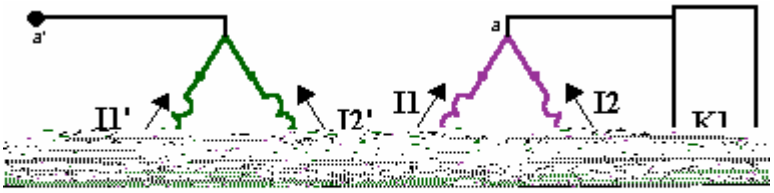


Figura I.12 .Esquema de conexión de la carga monofásica al banco Δ-Δ

corrientes $(I_{AB})_{1\Phi}$ e $(I_{AB})_{3\Phi}$ es igual a $60-(\theta_3+30)+\theta_1=30-\theta_3+\theta_1$ luego la carga total que lleva el transformador de alumbrado será:

$$I_{TA}=\frac{1}{kV_L}\sqrt{K_1^2+\frac{K_3^2}{3}+\frac{2.K_1.K_3}{\sqrt{3}}.\cos(30+\theta_1-\theta_3)} \tag{I.58}$$

Si se multiplican por kV_L ambos miembros de la ecuación se obtiene la expresión de la capacidad del transformador.

$$kVA_{TA}=\sqrt{K_1^2+\frac{K_3^2}{3}+\frac{2.K_1.K_3}{\sqrt{3}}.\cos(30+\theta_1-\theta_3)} \tag{I.59}$$

Suponiendo igualdad de factor de potencia para las cargas trifásicas y monofásicas la expresión anterior se simplifica más, quedando:

$$kVA_{TA}=\sqrt{K_1^2+\frac{K_3^2}{3}+K_1.K_3} \tag{I.60}$$

Estas expresiones para determinar la capacidad de los transformadores son válidas para los dos tipos de banco abierto.

I.3.2.2 Estrella abierta

El banco estrella abierta surge de eliminar un elemento en el banco Y-Δ, este banco se comporta de manera similar al banco delta abierta, por tanto todas las expresiones obtenidas anteriormente son válidas para este.

I.4 Indicadores energéticos del banco

Entre los indicadores energéticos a considerar en la operación de banco de transformadores están la eficiencia del banco y la utilización de este en relación con la potencia que está suministrando, lo cual está íntimamente relacionado con el estado de carga de cada transformador. Resulta de interés además el factor de potencia, que en este trabajo lo determina la carga que se abastezca.

En general, la eficiencia de cualquier máquina eléctrica, se calcula como:

$$\eta = \frac{Pot.Salida}{Pot.Entrada} = \frac{Pot.Salida}{Pot.Salida + \text{Pérdidas}} \tag{I.61}$$

En función de la capacidad de un transformador la eficiencia puede expresarse mediante la expresión siguiente:

$$\eta = \frac{kVAsalida \times F.Potencia}{kVAsalida \times F.potencia + Perd.Nucleo + Perd.Cobre} \tag{I.62}$$

Para un buen aprovechamiento del transformador debe propiciarse que trabajen en condiciones nominales o muy próximas a estas y con un factor de potencia alto, en la Figura I.18, puede observarse la dependencia de la eficiencia del transformador con el estado de carga y el factor de potencia.

Como vemos a medida que aumenta el factor de potencia, aumenta también la eficiencia para un mismo estado de carga, de aquí la importancia de tener en nuestras redes de distribución un factor de potencia lo más elevado posible.

Otro indicador de interés es el coeficiente de utilización del transformador que relaciona qué porcentaje de carga entrega respecto a la nominal.

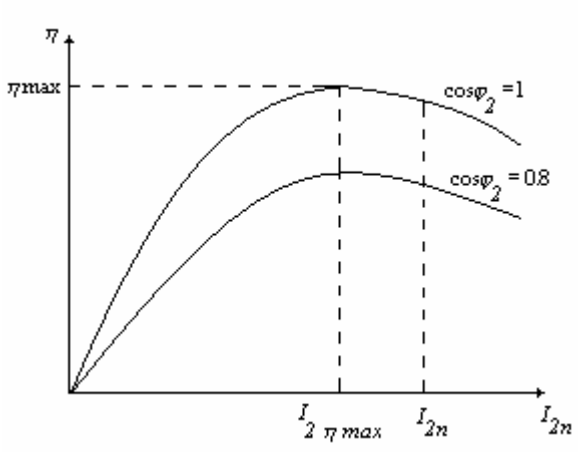


Figura I.18.Gráfica de Eficiencia vs. Corriente nominal

I.5 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se han abordado las temáticas principales relacionadas con la operación en bancos de transformadores monofásicos. Esto ha posibilitado establecer las expresiones

para el cálculo de la capacidad de los transformadores bajo diferentes tipos de conexión, así como sus ventajas y desventajas.

Las conexiones trifásicas tratadas son de las más difundidas en los sistemas de distribución de nuestro país. La formulación matemática de la carga de cada transformador sirve de base para el desarrollo del algoritmo de programación.

Capítulo II

Los seres humanos no nacen para siempre el día en que sus madres los alumbran, sino que la vida los obliga a parirse a si mismos una y otra vez

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GENERALES Y MODOS DE TRABAJO DE LA APLICACIÓN ***FASTER***

A partir de los procedimientos de cálculos establecidos en el capítulo I, se desarrolla un programa en Delphi que posibilita la conformación de bancos a partir de la carga que pueden abastecer los transformadores para una conexión preestablecida o dados los transformadores estimar la carga que pueden entregar. Esto es válido tanto para operación en paralelo de transformadores monofásicos, como para bancos trifásicos. Esta aplicación se denominó ***Faster***. En este se capítulo describe la concepción del programa, los cuatro modos de operaciones implementados y las características de la base de datos diseñada.

II.1 Delphi como herramienta de programación

La aplicación ha sido realizada íntegramente con Delphi *7*, ya que resulta un compilador idóneo para realizar potentes aplicaciones con las facilidades de uso y herramientas que caracterizan a los entornos de programación modernos [9], [12]. Si se compara Delphi con otras herramientas de programación puede afirmarse que básicamente Delphi aúna la potencia y rapidez de ejecución de que carece *Visual Basic* con la facilidad de la programación visual de las herramientas tipo RAD (*Rapid Application Development*) de que carece C++.

Delphi es algo más que el sucesor del famoso *Pascal* 7.0 de *Borland*. Dispone no sólo de un compilador muy rápido (más que la gran mayoría de los compiladores de C++, como ya era tradicional en Turbo Pascal), sino también de potentes herramientas para la creación visual de aplicaciones, de completas herramientas para la creación y manejo de bases de datos, aplicaciones multimedia, enlace DDE, OLE, creación de DLLs, VBX, etc.[14]

Las propiedades más importantes y destacadas que caracterizan al lenguaje de programación Delphi son:

- Las aplicaciones pueden colocarse de forma muy sencilla en la pantalla según el principio de módulos. Para ello se dispone de una paleta dotada de una gran variedad de componentes, algo así como los bloques de construcción de cada programa. Esta paleta es denominada por Borland VCL (*Visual Component Library*), o biblioteca de componentes visuales. Tiene un aspecto similar a Visual Basic, o aunque el aspecto externo indica la misma facilidad de uso que Visual Basic, el corazón del sistema Delphi es mucho más potente.
- A diferencia de otras herramientas de desarrollo visuales (Visual Basic, Toolbook, etc.) con Delphi es posible crear nuevos componentes que pueden incorporarse en la paleta con los componentes ya existentes y que pueden ser utilizados de la misma forma. La VCL puede estructurarse libremente y así adaptarse totalmente a las situaciones propias de programación.
- Delphi no solo dispone de componentes para la sencilla creación de entornos de aplicaciones como cuadros de lista, conmutadores o cuadros de diálogo terminados, sino que cubre con sus componentes muchos temas de la programación bajo *Windows*. Se incluyen entre los mismos un completo centro de control para la creación de aplicaciones multimedia, así como una gran variedad de componentes que actúan "debajo" del entorno, como tipos de listado muy variados y contenedores generales de datos. Uno de los aspectos más destacados lo constituye los componentes que Borland ha incluido en Delphi para el desarrollo de completas aplicaciones de bases de datos. No está limitado a un formato de datos determinado, sino que se tiene acceso a cincuenta formatos de datos diferentes a través de controladores suministrados por terceros (IDAPI y ODBC). Entre éstos se encuentran todos los estándares importantes de bases de datos en el área del PC como XBase, Paradox, Access, etc. Pero también es posible acceder de forma muy cómoda a servidores de bases de datos de otros sistemas (por ejemplo UNIX) por medio del SQL (*Structured Query Language*) que constituye un estándar de lenguaje de uso general para consultar y modificar datos administrados por servidores especiales de bases de datos como Oracle, Sybase, Informix o Adabas.

II.2 Aplicación *Faster*

El programa implementado permite el cálculo de las más usadas combinaciones de conexión trifásica de transformadores monofásicos para alimentar cargas trifásicas balanceadas, monofásicas y combinadas. También posibilita el cálculo de la carga máxima que puede entregar un banco. Para darle mayor versatilidad a la aplicación se diseñó una base de datos de transformadores que entre sus características fundamentales está la de adicionar y extraer datos de los transformadores de dicha base sin necesidad de acceder directamente a esta.

Las operaciones que realiza esta aplicación en Delphi son las siguientes:

1. Búsqueda de transformadores y conformación de bancos
2. Cálculo de Carga
3. Selección y Cálculo
4. Acceso a la base de Datos

Cada operación de estas posee un conjunto de módulos propios que interactúan entre ellos.

II.2.1 Operación para la búsqueda de transformadores y conformación de bancos

Esta operación conocidos los kVA de la carga, el tipo de carga, el factor de potencia, el voltaje de línea por primario y el voltaje en los terminales de la carga, inicia un proceso de búsqueda en la base de datos de todas las posibles combinaciones de bancos de transformadores monofásicos, factibles de formarse acorde con las características de la carga. El procedimiento permite formar bancos cerrados, bancos abiertos o en paralelo, según sea el caso. En este procedimiento además se calcula el porcentaje de impedancia de cada transformador y la eficiencia de cada banco.

La operación de búsqueda de transformadores y conformación de bancos está compuesta por cinco módulos, los cuales son:

- Módulo de entrada de datos
- Módulo de cálculo
- Módulo de búsqueda y almacenamiento

- Módulo de resultados

En la Figura II.1 se muestra una representación de cómo interactúan estos módulos.

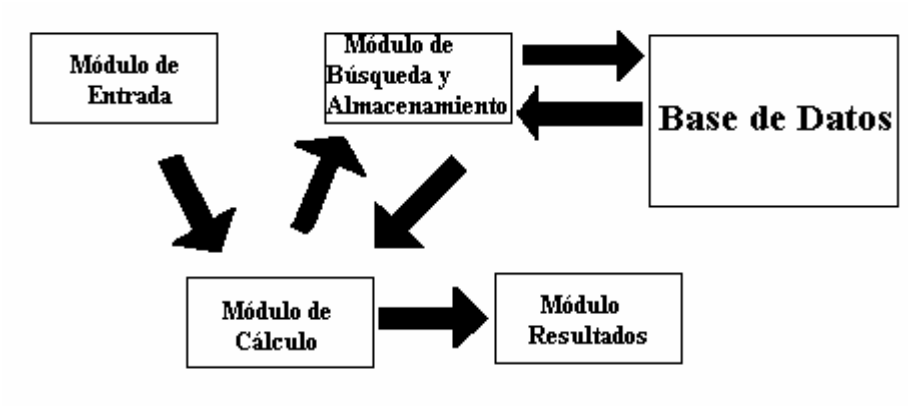


Figura II.1 Esquema de enlace de los módulos para la operación de búsqueda de bancos

Mediante el módulo de entrada que es la interfaz con el usuario, se suministra al módulo de cálculo los datos necesarios de la carga para así generar entre otras, las condiciones de voltaje y potencia de los transformadores disponibles en la base de datos, que mediante el módulo de búsqueda se localizan y se almacenan en una base de datos temporal. Con los transformadores almacenados en la base de datos temporal se vuelve al módulo de cálculo y se calcula el porcentaje de utilización de cada uno, así como la eficiencia de todos los bancos conformados. Debe señalarse que entre las restricciones de selección de transformadores está la condición de que no operen sobrecargados.

Según son realizados los cálculos, el módulo de resultados se encarga de mostrarlos en un ambiente visual donde el usuario puede seleccionar el banco de transformadores conveniente o sencillamente el de mayor eficiencia.

Un ejemplo de cómo ejecutar la operación de búsqueda de bancos puede resumirse de la forma siguiente:

Al correr la aplicación ***Faster***, la primera forma que aparece es la que se muestra en la Figura II.2.

Al activar el botón **Inicio** aparece otra forma que brinda una breve reseña del programa y al aceptar esta aplicación en el botón correspondiente aparece la primera ventana del módulo

de entrada de datos (ver Figura II.3) en la cual se debe escoger el tipo de carga que se va a alimentar, teniendo en cuenta que si la carga es monofásica, los transformadores se pueden conectar en banco trifásico o en paralelo. En este caso se ha escogido la opción de conectar una carga monofásica mediante un banco trifásico.

Debe señalarse que en el extremo superior derecho de la ventana de diálogo representada en la Figura II.3 aparece un botón que da acceso a la base de datos. Lo relacionado con este botón se explicará más adelante.

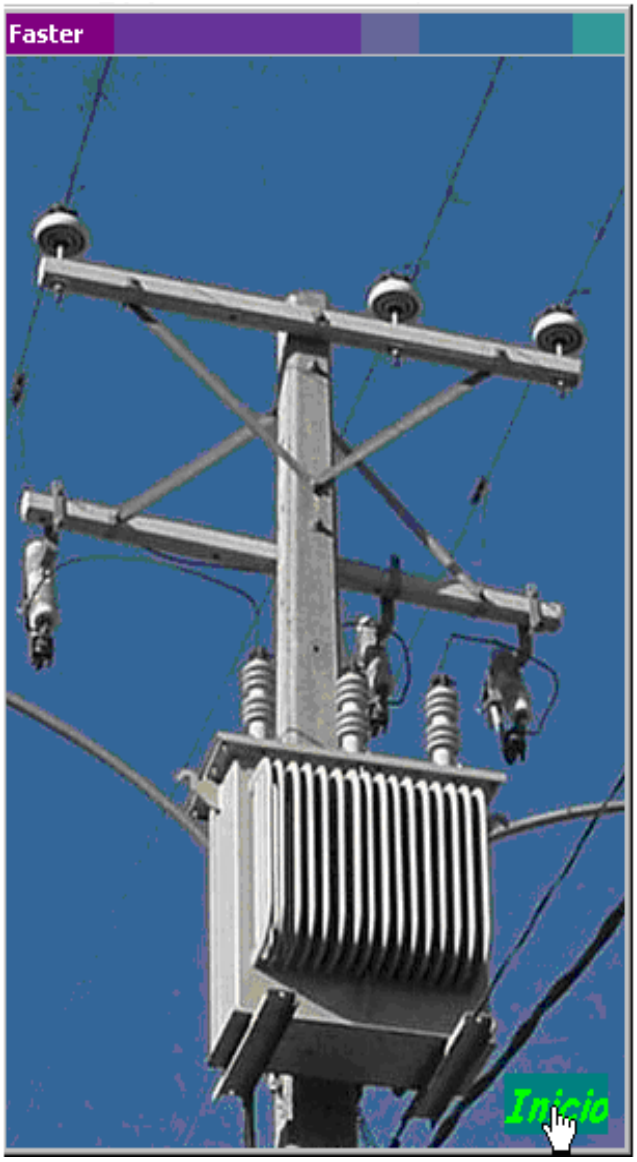


Figura II.2 Ventana modal del ***Faster***

Como parte del módulo de entrada de datos, la siguiente forma permite seleccionar el tipo de conexión trifásica a la que se desea conectar la carga, así como establecer si el banco será cerrado o abierto (Figura II.4).

Se debe tener en cuenta que en todas la ventanas de diálogo aparece el botón **Salir**, que tiene como función abandonar la aplicación.

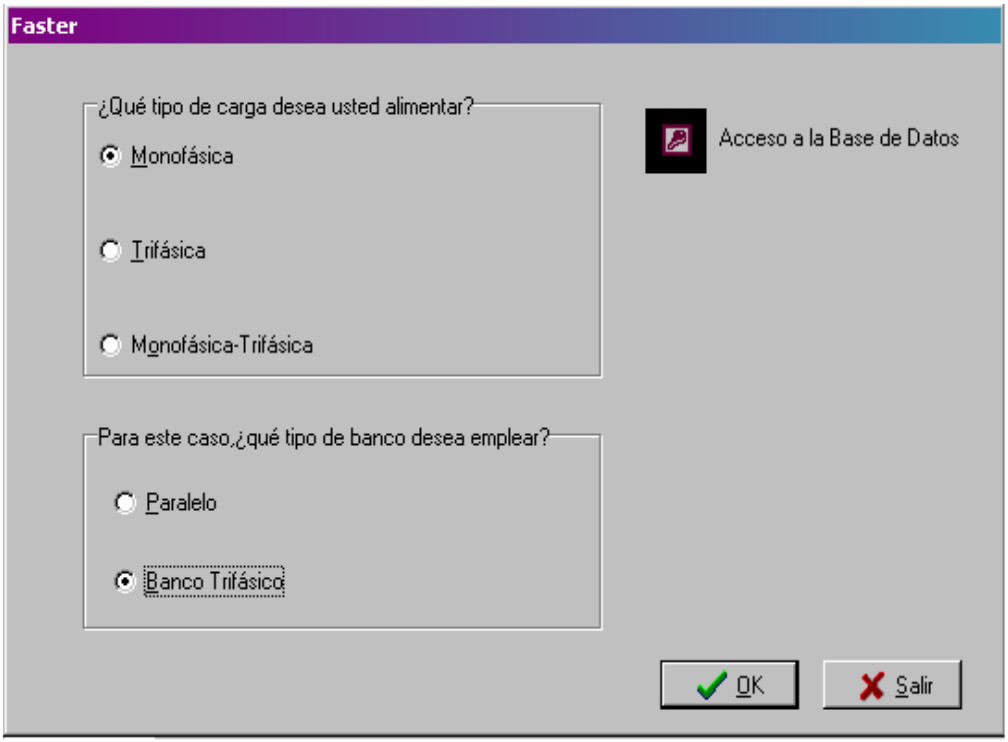


Figura II.3 Ventana de selección de la carga

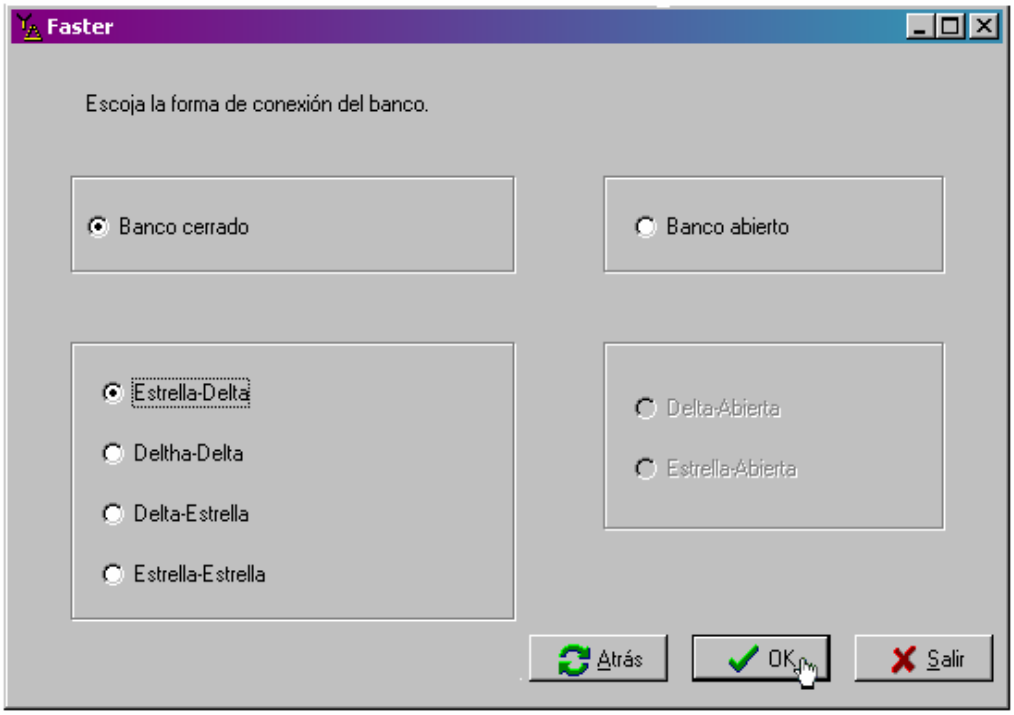


Figura II.4 Ventana de selección del tipo de conexión

Una vez aceptada la selección del tipo de banco, casi instantáneamente se abre la última ventana de este módulo para que se entren al programa los datos de la carga monofásica que se desea abastecer. Para este caso se dan los datos siguientes:

- kVA de la carga =40 kVA
- Factor de potencia = 0.7
- Voltaje de Línea =4.16 kV
- Voltaje de alimentación de la carga =120 V

En la Figura II.5 se muestra la ventana de diálogo donde se entran los datos antes mencionados. Puede observarse que en el extremo izquierdo superior aparecen tres paletas que son indicativas de las operaciones fundamentales de esta operación.

Si se activa el botón **Calcular** el módulo cálculo comienza su operación para satisfacer las condiciones iniciales establecidas, que consiste en la realización de los cálculos correspondientes y la posterior búsqueda de los transformadores en la base de datos.

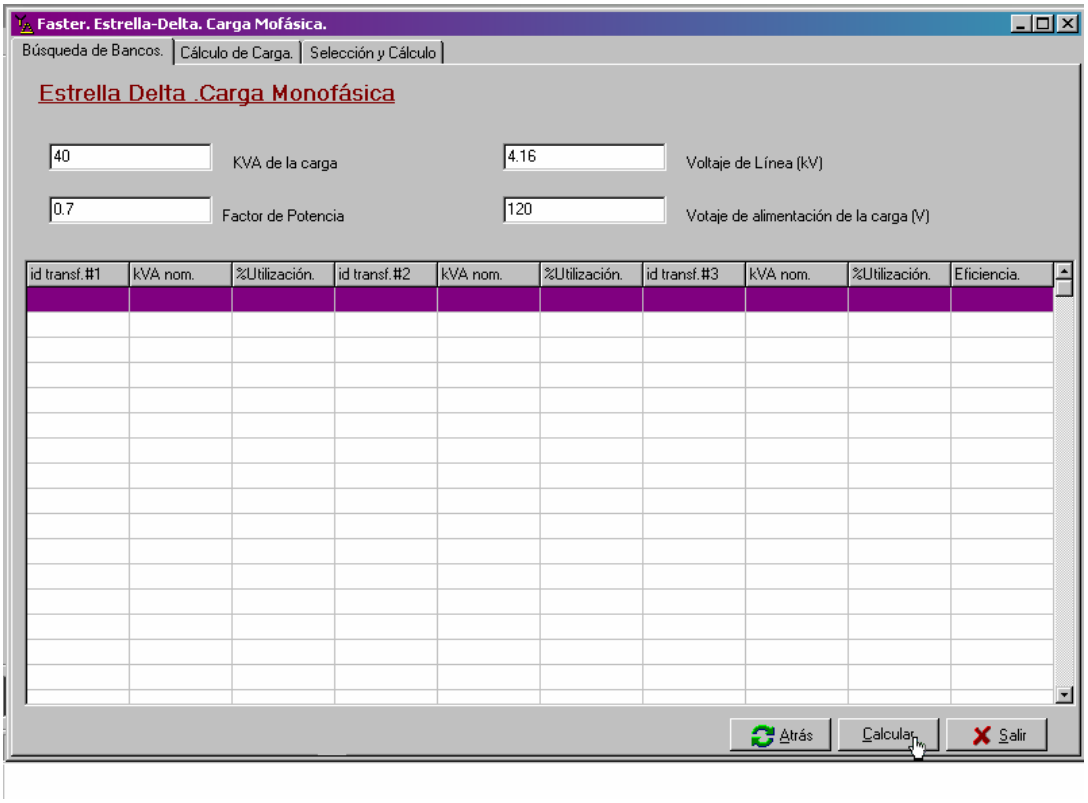


Figura II.5 Ventana de cálculo de la operación de búsqueda de transformadores y conformación de bancos

Para el ejemplo que nos ocupa, las condiciones que establece el módulo de cálculo son las siguientes:

- $kVA_{T.A} \geq \frac{2}{3} \times kVA_{1\Phi} = 26.66 \ \ kVA$
- $kVA_{T.F} \geq \frac{1}{3} \times kVA_{1\Phi} = 13.33 \ \ kVA$
- $V_1 = \frac{4.16kV}{\sqrt{3}} \approx 2400 \ \ V$
- $V_2 = 120 \ \ V$

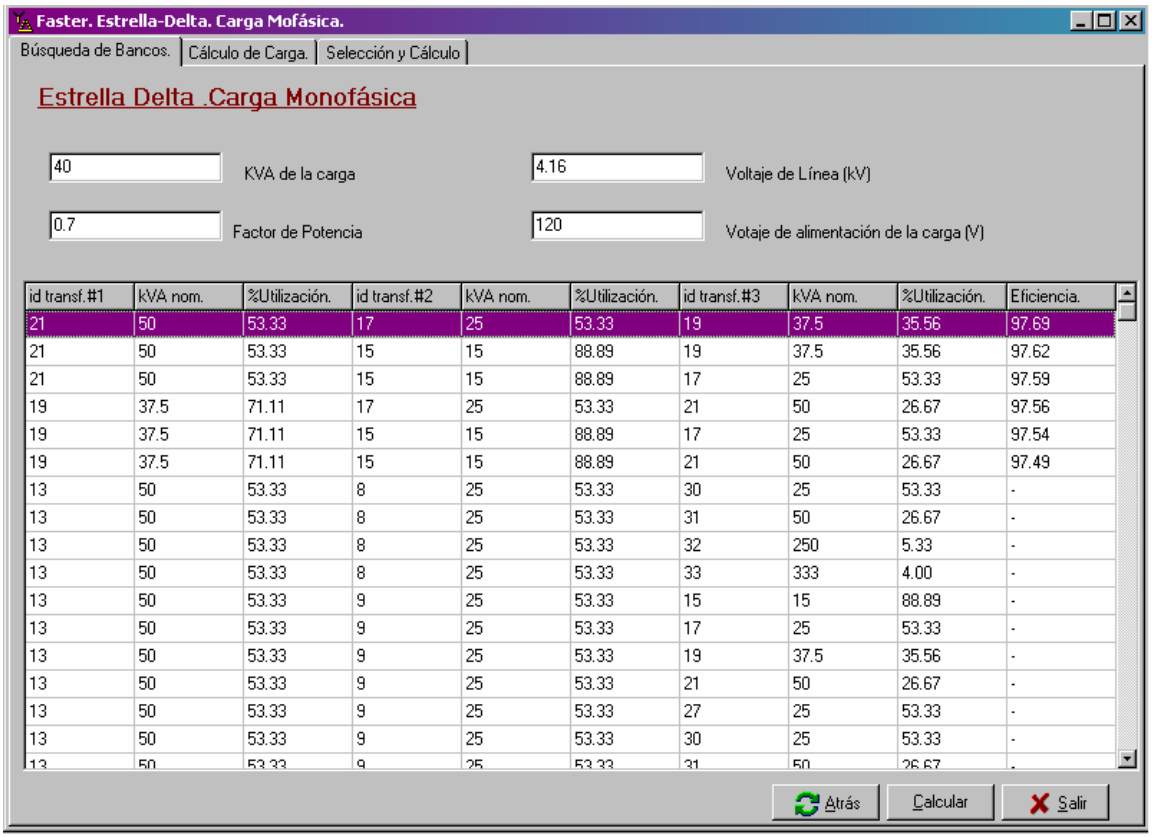
Con esta información se entra al módulo de búsqueda que identifica los transformadores que cumplen con las condiciones establecidas y posteriormente los almacena en una base de datos temporal.

El módulo de cálculo, a través de un ciclo anidado busca todas las combinaciones posibles entre estos transformadores siempre, y cuando se cumpla que el transformador de alumbrado tenga una capacidad mayor e igual a dos tercios de la potencia activa de la carga

y el transformador de fuerza tenga una capacidad mayor e igual a un tercio de la potencia activa de la carga; calcula además, el porcentaje de utilización de cada elemento, así como la eficiencia del banco.

El módulo de resultados se encarga de mostrar en una tabla, ubicada en la parte media, de la ventana de diálogo, los valores de las magnitudes calculadas. En la Figura II.6 pueden observarse las magnitudes mencionadas anteriormente. En la primera columna de la izquierda identificada por **Id.tranf.#1**, se muestra el número que le corresponde a cada transformador en la base de datos. La columna siguiente, nombrada **kVA nom**, indica la magnitud de la capacidad nominal de este elemento, expresada en kVA. El campo que aparece a continuación, nombrado **%Utilización**, muestra el valor del porcentaje de utilización del transformador para la carga especificada, este último campo da la información del estado de carga del transformador respecto al nominal. Estas columnas se repiten, en este caso, dos veces más, debido a que se han conformado bancos de tres transformadores. En resumen aparecen en pantalla las tres columnas descritas anteriormente para cada transformador que constituye el banco.

La última columna, denominada **Eficiencia**, como su nombre lo indica, da el resultado de la eficiencia del banco. El orden en que se presentan los bancos lo establece la columna **Eficiencia** de manera descendente, posibilitando esto una fácil selección del mejor banco en cuanto a este parámetro. También puede observarse en la Figura II.6 que en esta columna aparecen celdas con el signo (-), esto indica que no existen datos suficientes para calcular tan importante parámetro, esto ocurre la mayoría de las veces cuando faltan los datos de las pruebas de cortocircuito y circuito abierto de al menos uno de los tres elementos.



id transf.#1	kVA nom.	%Utilización.	id transf.#2	kVA nom.	%Utilización.	id transf.#3	kVA nom.	%Utilización.	Eficiencia.
21	50	53.33	17	25	53.33	19	37.5	35.56	97.69
21	50	53.33	15	15	88.89	19	37.5	35.56	97.62
21	50	53.33	15	15	88.89	17	25	53.33	97.59
19	37.5	71.11	17	25	53.33	21	50	26.67	97.56
19	37.5	71.11	15	15	88.89	17	25	53.33	97.54
19	37.5	71.11	15	15	88.89	21	50	26.67	97.49
13	50	53.33	8	25	53.33	30	25	53.33	-
13	50	53.33	8	25	53.33	31	50	26.67	-
13	50	53.33	8	25	53.33	32	250	5.33	-
13	50	53.33	8	25	53.33	33	333	4.00	-
13	50	53.33	9	25	53.33	15	15	88.89	-
13	50	53.33	9	25	53.33	17	25	53.33	-
13	50	53.33	9	25	53.33	19	37.5	35.56	-
13	50	53.33	9	25	53.33	21	50	26.67	-
13	50	53.33	9	25	53.33	27	25	53.33	-
13	50	53.33	9	25	53.33	30	25	53.33	-
13	50	53.33	9	25	53.33	31	50	26.67	-

Figura II.6 Ventana de resultados

II.2.2 Operación de Cálculo de Carga

Como su nombre lo indica esta operación calcula a partir de los datos de entrada de los transformadores, la carga máxima que el banco puede suministrar. Vale señalar que esos datos deben ser de transformadores escogidos aleatoriamente por el usuario y por tanto siempre se exige la entrada de estos.

Esta operación está compuesta por varios módulos, los cuales permiten el desarrollo de la aplicación con mayor orden y rapidez. Estos módulos son:

- Módulo de Entrada
- Módulo de cálculo
- Módulo de resultados

Las relaciones de dependencia entre estos módulos se ilustran en la Figura II.7

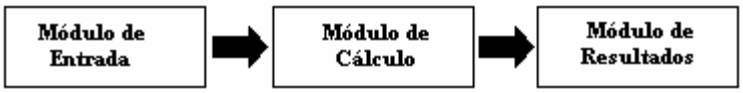


Figura II.7 Esquema de enlace de los módulos para la operación de cálculo de carga

Con un procedimiento similar al del Epígrafe II.2.1, en este procedimiento el módulo de entrada permite la inserción de datos de los elementos del banco, se los transfiere al módulo de cálculo, donde se ejecutan diversas operaciones para finalmente ser mostrados los resultados por el módulo de resultados.

Para una mejor comprensión de este procedimiento se ejemplifica con el caso siguiente:

Al ejecutar la aplicación ***Faster*** se repiten todos los pasos de la operación descrita en el Epígrafe II.2.1, solo que en este caso en vez de seleccionar carga monofásica se escoge carga trifásica, y se selecciona un banco estrella –delta (Y-Δ), de manera tal que aparece en la aplicación la misma ventana que en el epígrafe anterior solo que con las casillas en blanco (ver Figura II.8). Si se manda a ejecutar la aplicación **Cálculo de Carga**, aparece una ventana tal como se muestra en la Figura II.9, que indica los datos que hay que entrar para cada transformador.

Luego de entrados los valores de los transformadores para formar el banco, el módulo de cálculo, si se activa el botón **Calcular,** realiza las operaciones siguientes:

1. Compara el valor de los kVA nominales de cada elemento y toma el de menor capacidad que será el que limite el valor de la carga máxima que va a suministrar dicho banco.

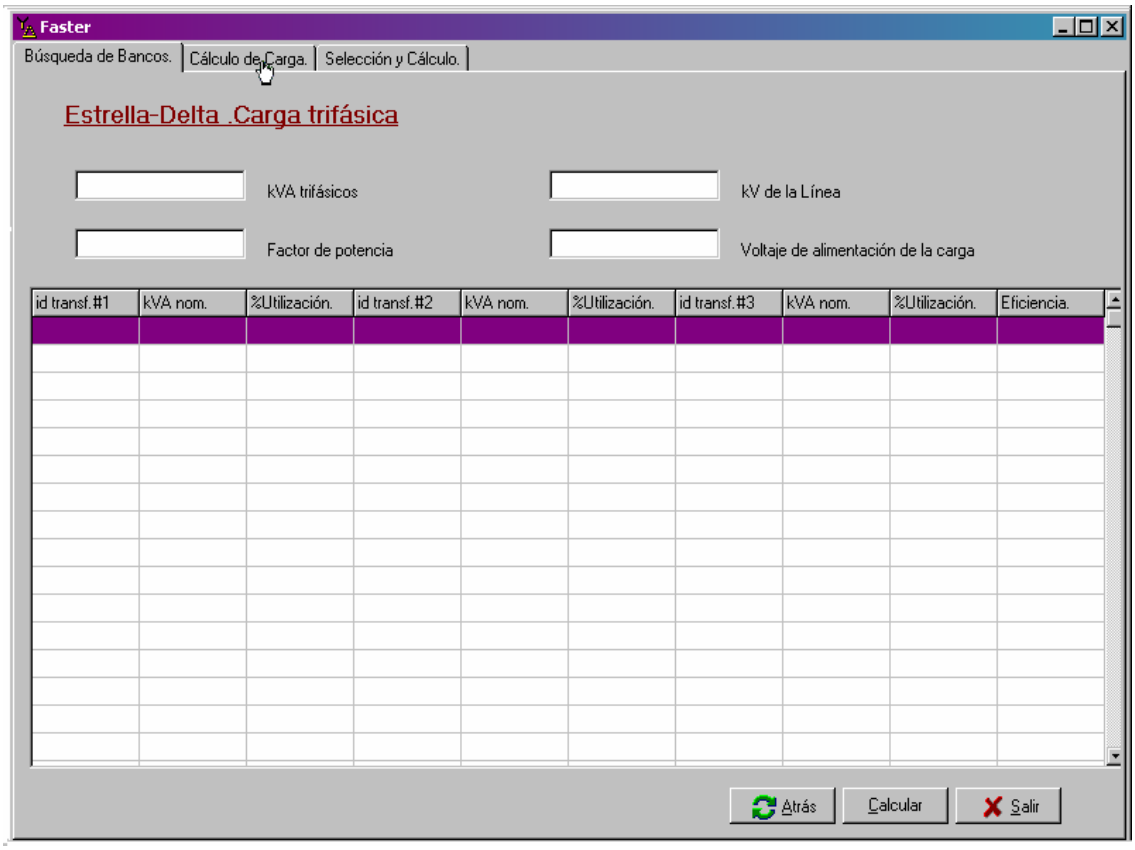


Figura II.8 Ventana de cálculo de la operación de búsqueda de transformadores y conformación de bancos

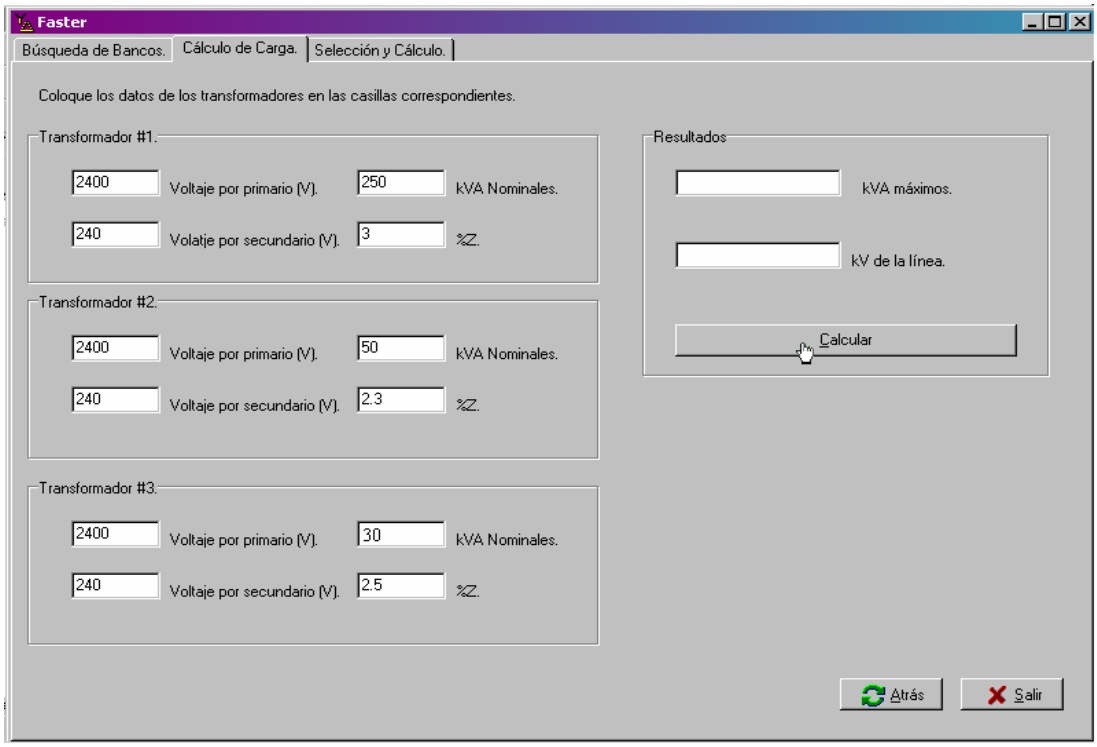


Figura II.9 Ventana de cálculo de la operación de Cálculo de Carga

2. Posteriormente ejecuta sucesivamente, las ecuaciones que se muestran

   - $kVA_{MAX} = 3 \times kVA_N$ Estos kVA nominales son los del transformador de menor capacidad.

     Y como el de menor capacidad es el #3 (ver Figura II.9)

     $kVA_{MAX} = 90 \ kVA$

   Luego:

   - $kV_{LINEA} = \dfrac{\sqrt{3} \times V_1}{1000}$ Donde V_1=2400 V

     Entonces

     $kV_{LINEA} = 4.16 \ kV$

3. Finalmente el módulo de resultados se encarga de mostrar los resultados en la sección derecha de la ventana mostrada en la Figura II.10.

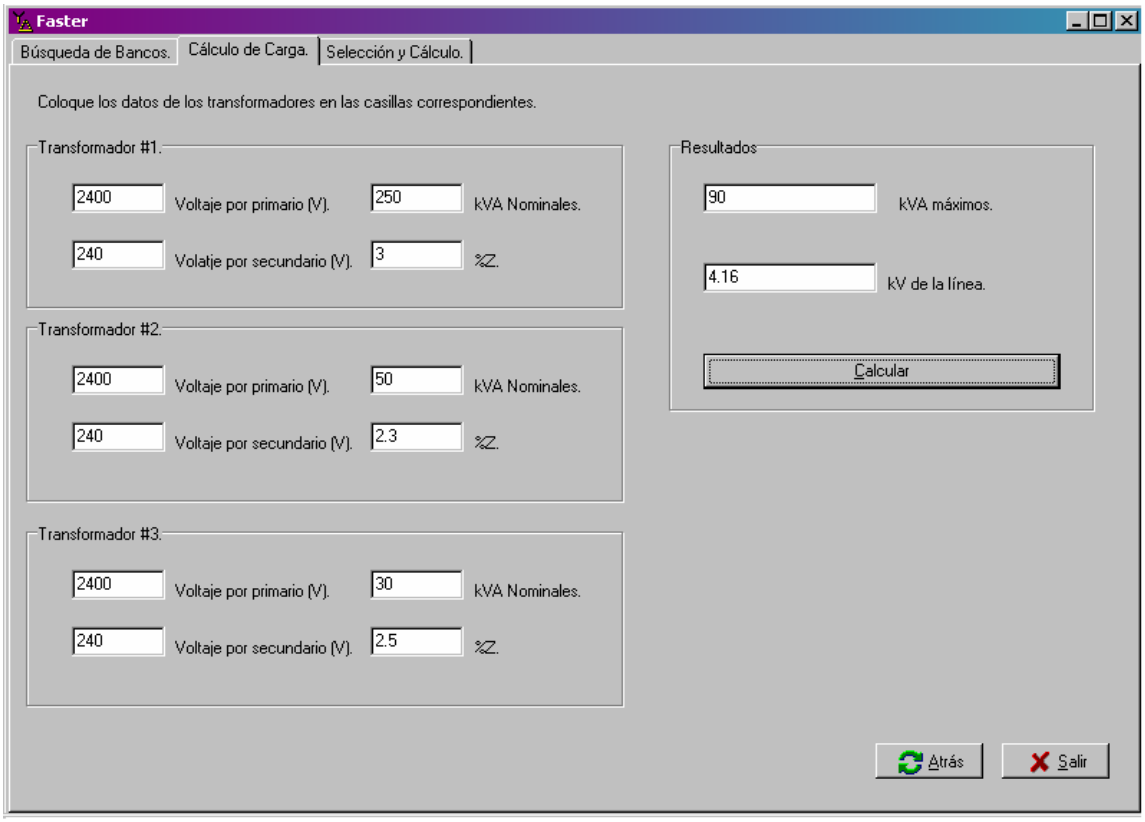


Figura II.10 Ventana de resultado de la operación de Cálculo de Carga

De esta manera se puede calcular de una forma rápida y eficiente todas las cargas máximas, ya sean trifásicas o monofásicas que se deseen alimentar. Esto se puede hacer con cualquier tipo de conexión. Como se puede comprobar, este proceso es totalmente a la inversa del explicado en el epígrafe anterior.

II.2.3 Operación de Selección y Cálculo

Esta operación hace exactamente los mismos cálculos que la operación Cálculo de Carga solo que en este caso se permite seleccionar los transformadores directamente de la base de datos. Está compuesta por tres módulos, solo el módulo de cálculo es el mismo que en la operación Cálculo de Carga, los dos restantes son propios de esta operación. Estos son:

- Módulo de Entrada
- Módulo de Cálculo
- Módulo de Resultados

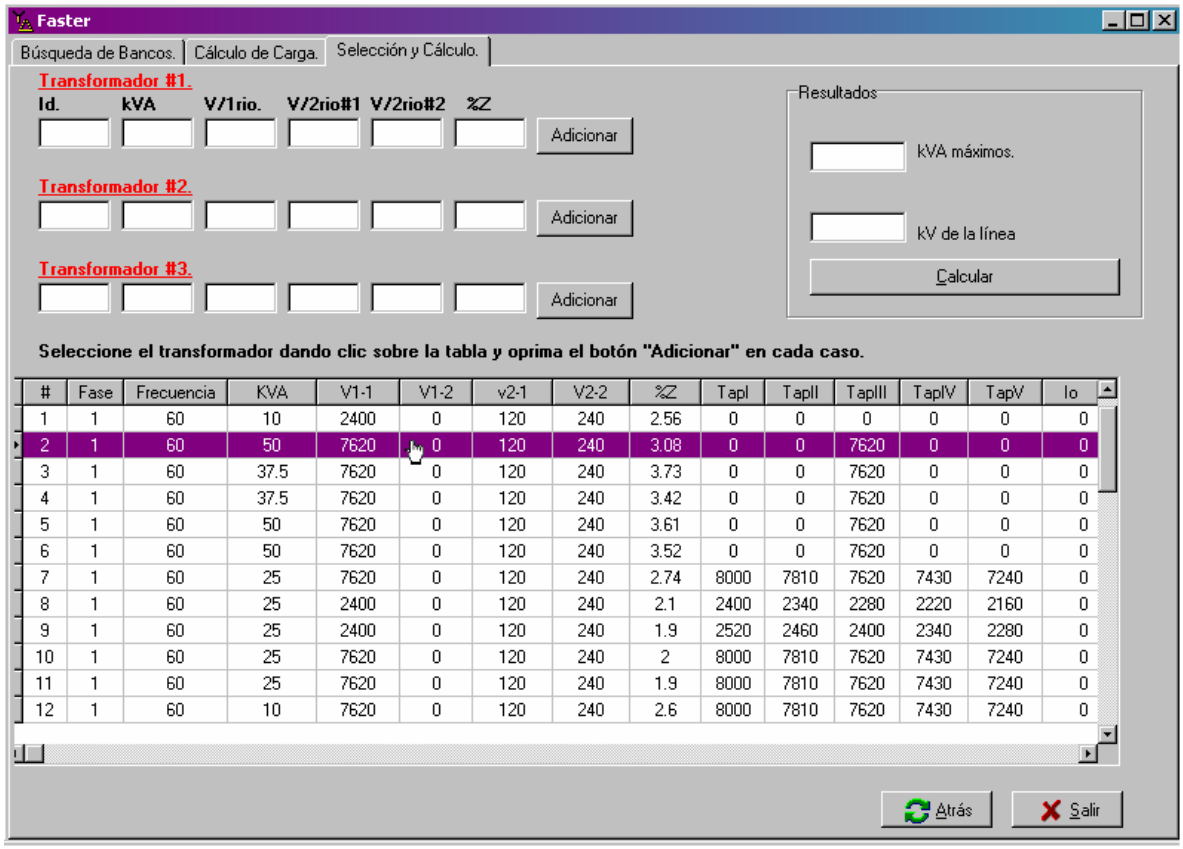
Las interacciones entre estos módulos se muestran en el esquema de la Figura II.11.

A través del módulo de entrada, el cual en este caso tiene incluido un módulo interno de selección, se seleccionan los elementos del banco que se quieren conectar para determinar qué carga pueden entregar. Los datos de los transformadores seleccionados se pasan al módulo de cálculo y se realizan exactamente las mismas operaciones que en el epígrafe anterior. Finalmente, el módulo de resultados se encarga de mostrarlos.

Figura II.11Esquema de enlace de los módulos para la operación de Selección y Cálculo

De manera similar a como se ha procedido en epígrafes anteriores se ilustra con un ejemplo cómo se lleva a cabo esta operación. Si se selecciona alimentar una carga trifásica desde una conexión estrella –delta, ejemplo similar al tomado en el Epígrafe II.2.2 con el

propósito de comprobar la similitud entre estas dos operaciones, se arriba a la ventana de diálogo representada en Figura II.8. Posteriormente debe activarse la paleta **Selección y Cálculo**, apareciendo un nuevo formato en la ventana de diálogo, tal como se muestra en la Figura II.12



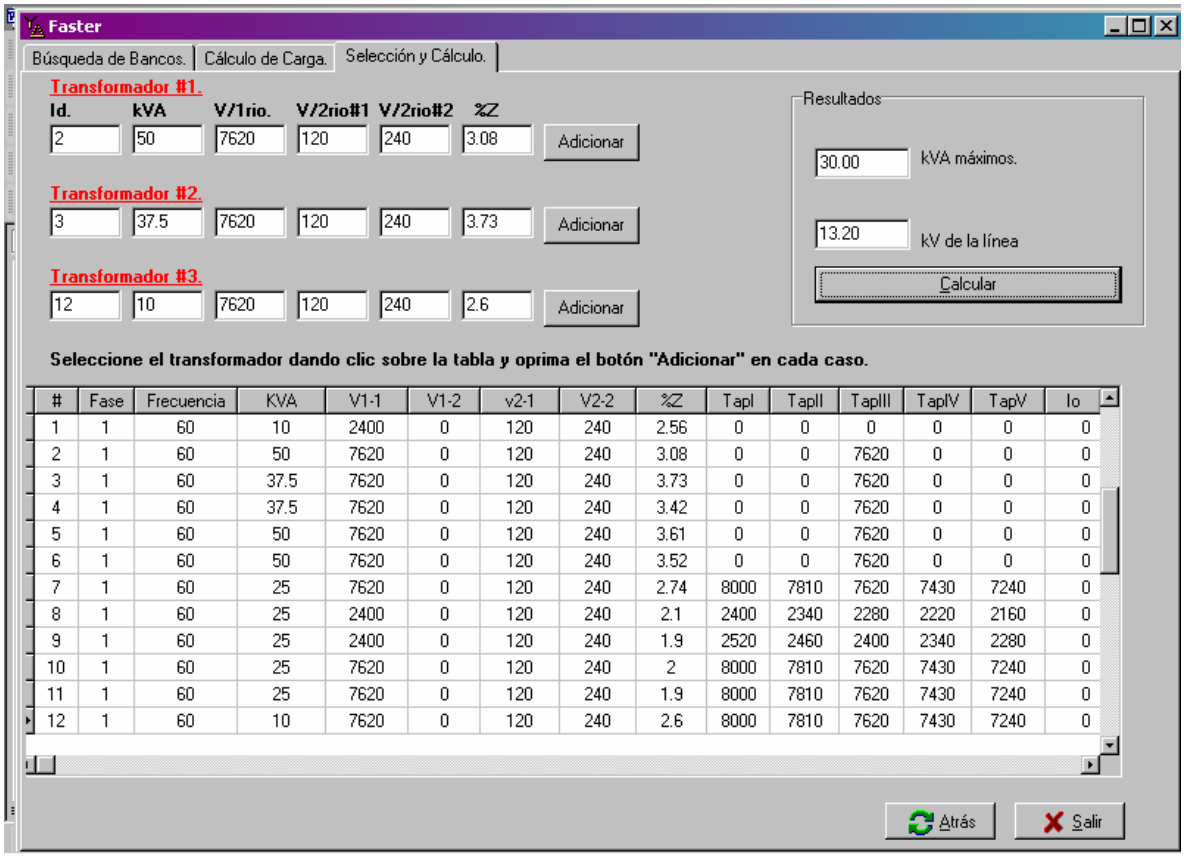
#	Fase	Frecuencia	KVA	V1-1	V1-2	v2-1	V2-2	%Z	TapI	TapII	TapIII	TapIV	TapV	Io
1	1	60	10	2400	0	120	240	2.56	0	0	0	0	0	0
2	1	60	50	7620	0	120	240	3.08	0	0	7620	0	0	0
3	1	60	37.5	7620	0	120	240	3.73	0	0	7620	0	0	0
4	1	60	37.5	7620	0	120	240	3.42	0	0	7620	0	0	0
5	1	60	50	7620	0	120	240	3.61	0	0	7620	0	0	0
6	1	60	50	7620	0	120	240	3.52	0	0	7620	0	0	0
7	1	60	25	7620	0	120	240	2.74	8000	7810	7620	7430	7240	0
8	1	60	25	2400	0	120	240	2.1	2400	2340	2280	2220	2160	0
9	1	60	25	2400	0	120	240	1.9	2520	2460	2400	2340	2280	0
10	1	60	25	7620	0	120	240	2	8000	7810	7620	7430	7240	0
11	1	60	25	7620	0	120	240	1.9	8000	7810	7620	7430	7240	0
12	1	60	10	7620	0	120	240	2.6	8000	7810	7620	7430	7240	0

Figura II.12 Ventana de cálculo de la operación de selección y cálculo

Se puede observar que en la parte inferior de la ventana de diálogo aparecen organizados por el número asignado en la base de datos todos los transformadores de esta. Para la selección de cada transformador se debe posicionarse sobre el elemento deseado, que en el caso representado en la Figura II.12 es el elemento 2, se activa el botón **Adicionar** de cualquiera de los tres transformadores posibles, quedando insertado los datos necesarios de este. Se procede de igual manera para los demás transformadores. Una vez seleccionados los tres transformadores se procede a activar el botón **Calcular**, mediante esta acción se le transfieren al módulo de cálculo los datos necesarios para el procesamiento y se realizan

exactamente los mismos pasos que en la aplicación correspondiente al epígrafe anterior. Para este ejemplo los resultados son:

$kVA_{MAX} = 30\ kVA$ y los $kV_{LINEA} = 13.20\ kV$. En la Figura II.13, se ilustra cómo queda la ventana de dialogo de esta aplicación después de ejecutados todos los procedimientos.



#	Fase	Frecuencia	KVA	V1-1	V1-2	v2-1	V2-2	%Z	TapI	TapII	TapIII	TapIV	TapV	Io
1	1	60	10	2400	0	120	240	2.56	0	0	0	0	0	0
2	1	60	50	7620	0	120	240	3.08	0	0	7620	0	0	0
3	1	60	37.5	7620	0	120	240	3.73	0	0	7620	0	0	0
4	1	60	37.5	7620	0	120	240	3.42	0	0	7620	0	0	0
5	1	60	50	7620	0	120	240	3.61	0	0	7620	0	0	0
6	1	60	50	7620	0	120	240	3.52	0	0	7620	0	0	0
7	1	60	25	7620	0	120	240	2.74	8000	7810	7620	7430	7240	0
8	1	60	25	2400	0	120	240	2.1	2400	2340	2280	2220	2160	0
9	1	60	25	2400	0	120	240	1.9	2520	2460	2400	2340	2280	0
10	1	60	25	7620	0	120	240	2	8000	7810	7620	7430	7240	0
11	1	60	25	7620	0	120	240	1.9	8000	7810	7620	7430	7240	0
12	1	60	10	7620	0	120	240	2.6	8000	7810	7620	7430	7240	0

Figura II.13 Ventana de resultados de la operación de Selección y Cálculo

Como puede apreciarse en este caso, también el transformador de menor capacidad es el que limita la capacidad de la carga.

De esta forma quedan explicadas las tres operaciones principales de este programa, o sea las que llevan un mayor rigor matemático y un más alto nivel de programación.

II.2.4 Acceso a la Base de Datos

Otra operación que realiza este programa es la de acceder a una base de datos en Access, que es la que almacena todos los datos de los transformadores. Esta base de datos está conectada al Delphi a través de una *ADOConection.* [14]

El botón de la derecha de la Figura II.3 que tiene como símbolo el del Microsoft Access, posibilita acceder a la forma Base de Datos que es la encargada de realizar las operaciones de adición y extracción de datos. En la Figura II.14 se muestra la ventana donde se pueden realizar las operaciones antes mencionadas.

Faster. Base de Datos

Adicione o extraiga los tranformadores que desee de la base de datos

Insert record

#	ID	Fase	Frecuencia	KVA	V1-1	V1-2	V2-1	V2-2	%Z	TapII	TapIII	TapIV	TapV
1	12678588	1	60	10	2400	0	120	240	2.56	0	0	0	0
2	6587878	1	60	50	7620	0	120	240	3.08	0	0	7620	0
3	6768778	1	60	37.5	7620	0	120	240	3.73	0	0	7620	0
4	9678090	1	60	37.5	7620	0	120	240	3.42	0	0	7620	0
5	456777	1	60	50	7620	0	120	240	3.61	0	0	7620	0
6	78658	1	60	50	7620	0	120	240	3.52	0	0	7620	0
7	6756756	1	60	25	7620	0	120	240	2.74	8000	7810	7620	7430	7240
8	78989955	1	60	25	2400	0	120	240	2.1	2400	2340	2280	2220	2160
9	58568758	1	60	25	2400	0	120	240	1.9	2520	2460	2400	2340	2280
10	565888	1	60	25	7620	0	120	240	2	8000	7810	7620	7430	7240
11	234567	1	60	25	7620	0	120	240	1.9	8000	7810	7620	7430	7240
12	67676781	1	60	10	7620	0	120	240	2.6	8000	7810	7620	7430	7240
13	46536	1	60	50	2400	0	120	240	2.67	2400	2340	2280	2220	2160
14	655467	1	60	10	7620	0	120	240	2.42	0	0	0	0	0
15	67455	1	60	15	2400	0	120	240	3	0	0	0	0	0
16	456547	1	60	15	2400	0	240	480	3	0	0	0	0	0
17	6767676	1	60	25	2400	0	120	240	3	0	0	0	0	0
18	786678	1	60	25	2400	0	240	480	3	0	0	0	0	0
19	87678	1	60	37.5	2400	0	120	240	3.5	0	0	0	0	0
20	58678	1	60	37.5	2400	0	240	480	3.5	0	0	0	0	0

Atrás Salir

Figura II.14 Ventana de acceso a la base de datos

Al desplazar el *mouse* sobre la barra de control que aparece en la parte superior de la ventana **Base de Datos,** se observa que indica la operación de cada botón, en este caso

Insert record, que tiene como función adicionar o insertar un record o una fila, donde se pueden insertar los datos de un nuevo transformador. La fila se inserta al final de la tabla.
Para extraer o restar datos de una fila entera se selecciona la fila y se oprime el botón ***Delete record* (-)**, que realiza la función de eliminar los datos del transformador.
Para modificar los valores de cualquier casilla solo se tiene que posicionar el *mouse* sobre ella, dar clic y proceder a cambiar el valor. Los demás botones de la tabla se utilizan para el desplazamiento sobre la misma, excepto el último a la derecha, que su función es refrescar los valores de la base.

II.3 Base de Datos

La base de datos como se ha mencionado en los epígrafes anteriores está realizada sobre Microsoft Access [1], [8], [10] y presenta los campos que señalamos a continuación:

- Número de orden (#)
- Número de serie (ID)
- Fase
- Frecuencia
- kVA nominales
- Voltaje por primario 1 (V1-1)
- Voltaje por primario 2 (V1-2)
- Voltaje por secundario 1 (V2-1)
- Voltaje por secundario 2 (V2-2)
- % de Impedancia (%Z)
- Tap I
- Tap II
- Tap III
- Tap IV
- Tap V
- Corriente de vacío (Io)
- Pérdidas de núcleo (Po)

- Corriente de cortocircuito (Icc)
- Pérdidas de cobre (Pcc)
- Voltaje de cortocircuito (Vcc)
- Fabricante del transformador
- Ubicación del transformador

Cada parámetro tiene una gran importancia a la hora de la conexión de los transformadores en bancos. La base de datos está diseñada de forma tal que los campos indispensables para los cálculos que realiza la aplicación ***Faster*** no se puedan dejar en blanco.

Las casillas Voltaje por primario 1 (V1-1), Voltaje por secundario 1 (V2-1) y Voltaje por primario 2 (V1-2), Voltaje por secundario 2 (V2-2) son para llenar en el caso de transformadores que posean dos voltajes nominales tanto en primario como en secundario. En el caso de un solo voltaje nominal por ambos lados, los datos se almacenarán en las primeras casillas nombradas en este párrafo. Las restantes casillas prácticamente con su propia denominación se identifican el dato que se introduce.

La casilla **Ubicación** tiene gran importancia práctica. Seguramente alguien puede preguntarse ¿Para qué se necesita conocer la ubicación del transformador? Imagine que hay un sector poblacional que se ha quedado sin servicio eléctrico y en la OBE de Santa Clara solo hay un transformador en el almacén y usted necesita dos más para completar el banco. Mediante dicho campo se puede conocer en qué lugar se pueden hallar más transformadores para conectar la carga y restablecer el servicio a la población.

II.4 Consideraciones finales del capítulo

Este capítulo ha estado relacionado con la concepción e implementación de la aplicación ***Faster***, la forma en que se presenta la información y las interfaces de comunicación con el usuario, posibilitando esto una mejor comprensión de los procedimientos de cálculo desarrollados. Teniendo en cuenta, que este programa se realizó con el objetivo de la búsqueda y conformación de bancos trifásicos, así como el cálculo de cargas a partir de los transformadores, se puede decir que es una herramienta potente a la hora de ganar en rapidez y exactitud en los momentos donde el tiempo se convierte en el mayor enemigo. La base de datos con sus propias características le aporta versatilidad a la aplicación.

Conclusiones

Lo importante no es el fin del camino, sino el camino. Quien viaja demasiado aprisa se pierde la esencia del viaje

CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo ha posibilitado arribar a las conclusiones siguientes:

- La conexión de transformadores monofásicos en paralelo puede darse bajo condiciones óptimas de operación donde hay un aprovechamiento mejor del banco, en condiciones no tan favorables que son las caracterizadas solamente por relaciones de voltajes primario y secundario idénticas y en condiciones donde los voltajes por primario y secundario son diferentes con desigual relación de transformación o con igual relación de transformación. En esta última condición de operación hay una subutilización del banco que en ocasiones conlleva a la circulación de corrientes internas por los devanados.

- La conformación de bancos trifásicos con transformadores monofásicos da lugar a diferentes tipos de conexiones y modos de operación, entre los tipos de conexiones más difundidas en el sistema de distribución de nuestro país se encuentran la conexión delta-delta, estrella-delta y los bancos abiertos. Estas conexiones pueden abastecer cargas trifásicas balanceadas, monofásicas y combinadas, las que condicionan el aprovechamiento de las capacidades instaladas en el banco.

- Mediante la implementación de algoritmos de programación en Delphi 7 se desarrolló la aplicación ***Faster*** que posibilita la conformación de bancos, el cálculo de las capacidades de cada elemento de este, su porcentaje de utilización y la eficiencia. Estos cálculos se efectúan para todos los bancos posibles cuando se abastecen cargas trifásicas balanceadas, monofásicas y combinadas. También puede calcular la carga máxima que puede entregar un banco determinado, dado los datos de los transformadores que lo forman. Estos procedimientos organizados en diferentes módulos garantizan una operación satisfactoria de la aplicación.

- La interfaz de entrada de datos y de resultados del programa ***Faster*** resulta muy amigable. La interfaz de resultados aporta todos los datos necesarios para la selección del banco que se desee.

- Se diseñó una base de datos que calcula y selecciona transformadores acorde a las exigencias establecidas, permitiendo almacenar los parámetros más importantes de

cada transformador, como son: capacidad, voltajes por primario y secundario, y porcentaje de impedancia, así como los datos de pruebas y su ubicación. Se implantaron un conjunto de operaciones desde y con la base de datos que aportan versatilidad a la aplicación.

RECOMENDACIONES

Para estudios posteriores se debe tener en cuenta la profundización tanto en el modo teórico, como a la hora de la programación, sobre los siguientes contenidos:

- Conexión de transformadores en paralelo con relaciones de voltaje diferentes e igual relación de transformación.
- Conexión de transformadores en paralelo con relaciones de voltaje iguales e igual relación de transformación
- Conexión estrella-estrella para los diferentes tipos de carga
- Conexión delta-estrella para los diferentes tipos de carga
- Conexión delta-delta para carga trifásica balanceada con transformadores diferentes.

Referencias Bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aprenda Microsoft Access 97 como si Estuviera en Primero. Disponible en la Intranet de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.
2. Apuntes de Máquinas Eléctricas. (2004, Marzo, 29). Transformadores. [Online]. Disponible en: http://zeus.dci.ubiobio.cl/electricidad/transformadores/default.htm
3. Conexión de Transformadores. (2004, Marzo, 29). [Online]. Disponible en: http://www.doschivos.com/new/cnxndeltaU.htm
4. Curso Delphi (2004, enero, 12). [Online]. Disponible en http://electroweb.cujae.edu.cu/books/libros/ programacion/delphi/CursoDelphi.pdf
5. Ivanov - Smolenski, A. V. Máquinas Eléctricas. En 3 tomos. Editorial MIR Moscú, (1984): 1200 pp.
6. Kostenko M., Piotrovsky L. Máquinas Eléctricas. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, (1968): 713 pp.
7. Langsdorf, A. *Theory of Alternating-Current Machinery* Segunda *E*dición. Edición Revolucionaria, (1968): 666 pp.
8. *Manual MS Access 97.* Disponible en la Intranet de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.
9. Marteens, I. La Cara Oculta del Delphi(2004, febrero, 20). [Online]. Disponible en http://electroweb.cujae.edu.cu/books/libros/programacion/delphi/La%20cara%20oculta%20de%20D4.pdf.
10. Martínez, D. Acceso a Base de Datos en Delphi. [Online]. Disponible en http://electroweb.cujae.edu.cu/books/libros/programacion/delphi/Tutorial%201/Cap005.html
11. McPherson G., Laramore, R. D. An Introduction to Electrical Machines and Transformers. Second Edition. Reimpreso en Cuba. 571 pp.
12. Programación: Tutorial Borland Delphi. (2004, febrero, 20). [Online]. Disponible en: http://www.arrakis.es/~ppriego/delphi/delphi.htm
13. Puchstein, A., et al. Alternating Current Machines. Edición Revolucionaria, (1968): 721 pp.

14. Robaina, I. Ado y Delphi. (2004, abril, 8). [Online].Disponible en http://electroweb.cujae.edu.cu/books/libros/programacion/delphi/ADO.pdf
15. Syed A. Nasar. Teoría y Problemas de Máquinas Eléctricas. Serie de Compendios SCHAUM. McGraw-Hill, México, (1987): 208 pp.
16. Transformadores de dos arrollamientos. (2004, Marzo, 29). [Online]. Disponible en http://www.ing.unlp.edu.ar/sispot/libros/cme/vol-06/1cap11/cm-11b.htm
17. Transformadores en Paralelo. (2004, Marzo, 29). [Online]. Disponible en: http://members.tripod.com/JaimeVp/Electricidad/paralelo01.HTM
18. Transformadores. (2004, Marzo, 17). [Online]. Disponible en: http://alipso.com/monografias/transforma/
19. Voldek A. I. Máquinas Eléctricas. En 2 tomos. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, (1985): 431 pp.