

Universidad Carlos III de Madrid  
Escuela Politécnica Superior  
Departamento de Ingeniería Eléctrica



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Estudio de la acoplabilidad de transformadores de potencia**

**TITULACIÓN:** Ingeniería Técnica Industrial, Electricidad

**AUTOR:** Alejandro González Vergara

**TUTOR:** Ángel Ramos Gómez

**Mayo de 2009**

*A los que avivan la llama  
cuando ven que se apaga.*

## **INDICE**

<b><u>OBJETIVO DEL PROYETO</u></b> .....	1
<b><u>CAPITULO I</u></b> – ASPECTOS GENERALES DE UN TRANSFORMADOR .....	3
1.1.- Principio de funcionamiento .....	4
1.2.- Elementos de un transformador .....	5
1.2.1.- Núcleo .....	5
1.2.2.- Arrollamientos .....	6
1.2.3.- Bornas .....	7
1.2.4.- Cuba .....	8
1.2.5.- Protecciones .....	8
1.2.6.- Sistema de refrigeración .....	9
1.3.- Regulación de tensión .....	11
1.3.1.- Tipos de regulación.....	11
1.3.2.- Margen de regulación .....	12
1.3.3.- Cambiador de tomas en carga .....	13
1.4.- Circuito equivalente .....	14
1.5.- Pérdidas de potencia .....	16
1.5.1.- Pérdida de potencia en el núcleo .....	16
1.5.2.- Pérdida de potencia en los arrollamientos .....	18
1.6.- Rendimiento de un transformador .....	19
<b><u>CAPITULO II</u></b> – ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES.....	21
2.1.- Objetivos del acoplamiento de transformadores .....	22
2.2.- Condiciones para el funcionamiento en paralelo de transformadores .....	23
2.3.- Conexión de los transformadores .....	24
2.3.1.- Tipos de conexión de los arrollamientos .....	24
2.3.2.- Índice horario .....	25
2.3.3.- Nomenclatura utilizada para designar el grupo de conexión de los transformadores trifásicos .....	26

2.3.4.- Secuencia de fases .....	27
2.4.- Circuito eléctrico equivalente que presenta el acoplamiento en carga ....	28
2.5.- Circuito eléctrico equivalente que presenta el acoplamiento en vacío ....	30
2.6.- Diagonal de acoplamiento .....	33
<b><u>CAPITULO III</u></b> – POSIBLES CASOS DE ACOPLAMIENTO .....	37
3.1.- Condiciones límite de la operación de transformadores en paralelo .....	38
3.2.- Acoplamiento de transformadores de igual potencia nominal, tensión de cortocircuito y relación de transformación .....	39
3.3.- Acoplamiento de transformadores de igual tensión de cortocircuito, relación de transformación y distinta potencia nominal .....	41
3.4.- Acoplamiento de transformadores de igual potencia nominal, relación de transformación y distinta tensión de cortocircuito .....	42
3.5.- Acoplamiento de transformadores de igual relación de transformación, distinta potencia nominal y tensión de cortocircuito .....	47
3.6.- Acoplamiento de transformadores de igual potencia nominal, distinta tensión de cortocircuito y relación de transformación .....	48
3.7.- Acoplamiento de transformadores de distinta potencia nominal, tensión de cortocircuito y relación de transformación .....	53
<b><u>CAPITULO IV</u></b> – DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL ESTUDIO DEL ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA .....	55
4.1.- Estructura de la aplicación .....	56
4.2.- Pantalla de inicio .....	58
4.3.- Módulo potencia no aprovechada .....	60
4.4.- Módulo corriente de circulación .....	66
4.5.- Módulo acoplamiento de transformadores .....	73
4.6.- Utilidades comunes a todos los módulos .....	80



<b><u>CAPITULO V</u></b> – APLICACIÓN PRÁCTICA: NORMALIZACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE LA RED DE UFD .....	85
5.1.- Red de distribución de Unión Fenosa .....	86
5.2.- Normalización Vigente .....	87
5.3.- Análisis del acoplamiento de los transformadores.....	88
5.3.1.- Método de análisis desarrollado .....	88
5.3.2.- Grupo de tensiones 220 / 132 kV .....	95
5.3.3.- Grupo de tensiones 220 / 66 kV .....	98
5.3.4.- Grupo de tensiones 220 / 45 kV .....	104
5.3.5.- Grupo de tensiones 220 / 15 kV (Zona centro) .....	107
5.3.6.- Grupo de tensiones 220 / 15 kV (Zona norte) .....	111
5.3.7.- Grupo de tensiones 220 / 20 kV (Zona norte) .....	113
5.3.8.- Grupo de tensiones 132 / 66 kV .....	115
5.3.9.- Grupo de tensiones 132 / 45 kV .....	118
5.3.10.- Grupo de tensiones 132 / 15 kV (Zona centro) .....	123
5.3.11.- Grupo de tensiones 132 / 15 kV (Zona norte) .....	125
5.3.12.- Grupo de tensiones 132 / 20 kV (Zona norte) .....	132
5.3.13.- Grupo de tensiones 66 / 15 kV (Zona centro) .....	135
5.3.14.- Grupo de tensiones 66 / 15 kV (Zona norte) .....	138
5.3.15.- Grupo de tensiones 66 / 20 kV (Zona norte) .....	140
5.3.16.- Grupo de tensiones 45 / 15 kV (Zona centro) .....	146
5.4.- Conclusiones y Propuesta de normalización .....	153
<b><u>CAPITULO VI</u></b> – CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS .....	155
<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b> .....	159
<b><u>ANEXOS</u></b>	
ANEXO A.- Información que se conoce de un transformador.....	163
ANEXO B.- Errores cometidos a causa de las hipótesis realizadas sobre la impedancia de cortocircuito .....	197

## **OBJETIVO DEL PROYECTO**

Los objetivos del presente proyecto son:

- El desarrollo de una aplicación informática para el estudio del acoplamiento en paralelo de transformadores de potencia, de forma que, a través de ésta, se obtenga una idea muy próxima a la realidad de como funcionarían dos transformadores dados acoplados en paralelo.
- Determinar si la normalización vigente de la empresa Unión Fenosa Distribución sobre sus transformadores de potencia es adecuada desde el punto de vista de la explotación en paralelo de estos modelos normalizados con los transformadores ya existentes en su red.

Para llegar hasta el diseño y programación de la aplicación, el proyecto parte de un repaso en el Capítulo I de los aspectos más generales de un transformador, de forma que el lector conozca las principales características de este tipo de máquinas.

Seguidamente, en el Capítulo II, se empieza a tratar el acoplamiento de los transformadores, dando a conocer los objetivos que se buscan con este tipo de conexiones en la red, los requisitos que deben cumplir los transformadores para poder ser acoplados y como ha de ser la conexión entre ellos. Además de esto, se presenta el circuito eléctrico equivalente resultante del acoplamiento de dos transformadores y se procede a la resolución de éste.

En muchos casos los transformadores, a pesar de cumplir las condiciones obligatorias para el acoplamiento, no cumplen una serie de condiciones convenientes para que el acoplamiento sea óptimo. Debido a esto se pueden dar distintos casos de acoplamiento que son estudiados en el Capítulo III.

Una vez que se tiene toda esta información sobre el acoplamiento de transformadores se presenta la aplicación informática creada. Ésta se presenta a modo de manual de usuario, de forma que cualquier lector de este proyecto pueda hacer un uso adecuado y provechoso de ella.

Finalizada la programación y el desarrollo de la aplicación informática, se pasa a estudiar la normalización de los transformadores de Unión Fenosa Distribución.

Para ello se recopila la información sobre todos los transformadores de potencia pertenecientes a su red. Estos se separan por grupos de tensiones y una vez que se conocen los tipos de transformadores más representativos de cada uno de ellos se estudian todos los posibles acoplamientos entre los transformadores pertenecientes a un mismo grupo, haciendo uso de la herramienta informática creada.

Al final del proyecto se han incluido dos Anexos. En el primero de ellos se habla de la información que se conoce de un transformador y de los documentos que la recogen. Así el usuario de la aplicación podrá saber donde encontrar los datos que se le piden en el transcurso del funcionamiento de la misma.

A lo largo del proyecto se realizan dos hipótesis, despreciar la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito y tomar constante para todas las tomas del transformador el valor de la tensión de cortocircuito. En el Anexo B se desarrolla un estudio de cada una de las hipótesis para comprobar la magnitud del error que se comete y determinar si es adecuada la realización de éstas.



## Capítulo I

### Aspectos generales de un transformador

Los transformadores son máquinas eléctricas que tienen la función de modificar parámetros de distribución de energía, utilizando para ello principios de inducción electromagnética.

Las aplicaciones de estas máquinas en circuitos eléctricos son diversas, siendo una de las principales, el uso como transformadores de potencia. En este caso, su función es la de modificar los niveles de tensión en los sistemas de transporte y distribución de energía eléctrica. Se caracterizan estos transformadores por tener valores de tensión y frecuencia de entrada razonablemente constantes.

La inclusión de un transformador no implica ganancia de potencia, todo lo contrario, como cualquier máquina genera pérdidas en el sistema.

En el presente capítulo se tratará de describir los aspectos más generales de un transformador, de forma que se pueda tener una visión general de este tipo de máquinas eléctricas y con ello se facilite el entendimiento de los capítulos siguientes y del proyecto en general.



## 1.1.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

El transformador consta de un núcleo ferromagnético, que forma el circuito magnético, y dos arrollamientos, que forman el circuito eléctrico.

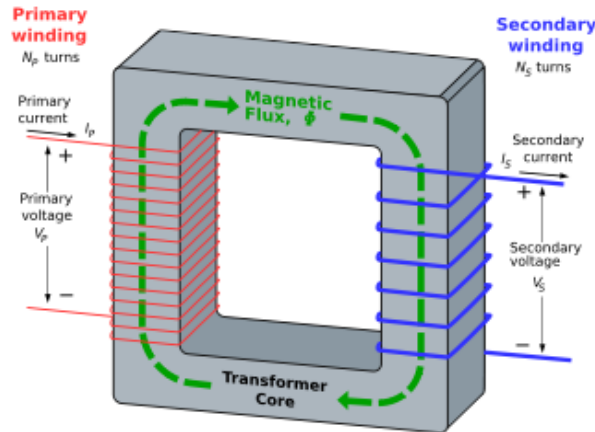


Figura 1.1.1.- Circuitos de un transformador [2]

La corriente alterna entra al transformador por el arrollamiento primario con unos valores determinados de tensión y corriente,  $V$  e  $I$ , y sale por el arrollamiento secundario con otros valores diferentes, manteniendo la frecuencia.

Si el transformador es reductor el arrollamiento primario será el arrollamiento de mayor tensión y el secundario el de menor tensión, y si el transformador es elevador el arrollamiento primario será el de menor tensión y el secundario el de mayor tensión.

La relación entre las tensiones del arrollamiento primario y secundario en vacío, coincide, en el caso de transformadores monofásicos y algunos grupos de conexión trifásicos, con bastante aproximación con la relación existente entre el número de espiras primarias y secundarias. Dicha relación determina la relación de transformación del transformador, punto fundamental de estos equipos.

$$rt = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.1.1)$$

## 1.2.- ELEMENTOS DE UN TRANSFORMADOR

### 1.2.1.- Núcleo

El núcleo de hierro, formado por chapas ferromagnéticas eléctricamente aisladas sometidas a un tratamiento denominado “Carlite”, compone el circuito magnético del transformador. Por dicho núcleo circula el flujo magnético de un arrollamiento a otro.

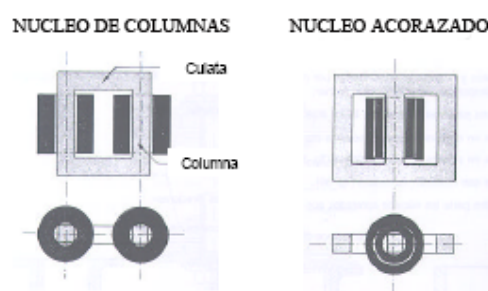
El núcleo está formado por las columnas, partes rodeadas por los arrollamientos, y por las culatas, partes que realizan la unión entre las columnas. Las uniones entre ambas se denominan juntas y deben ser lo más pequeñas posibles para reducir la reluctancia del circuito. Estas uniones se pueden realizar a tope o bien a solape (entrelazadas).

Los núcleos se clasifican en núcleo de columnas o núcleo acorazado.

En el primero existen dos columnas las cuales son rodeadas por los arrollamientos, estos arrollamientos son cilíndricos concéntricos y los flujos son dependientes (Core Type).

El núcleo acorazado se conforma por tres columnas, las laterales quedan libres y la central se rodea por ambos arrollamientos dispuestos de manera alterna. Los flujos son independientes (Shell Type).

Para obtener un mejor aprovechamiento del área interior de los arrollamientos (de sección circular) la sección transversal de las columnas tiene forma de polígono escalonado, con un número de escalones que es tanto mayor cuanto más elevada sea la potencia del transformador.

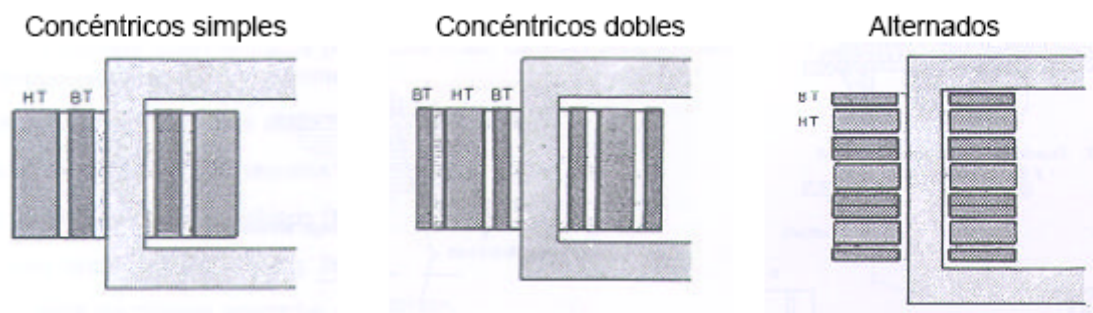


**Figura 1.2.1.-** Tipos de núcleo

### 1.2.2.- Arrollamientos

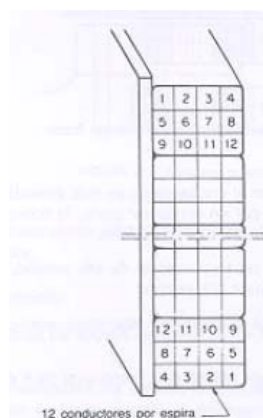
Los arrollamientos conforman el circuito eléctrico del transformador. Se realizan generalmente mediante conductores de cobre, en forma de hilos redondos o pletinas.

Los arrollamientos pueden ser concéntricos o alternados, según sea la disposición de los arrollamientos de B.T (baja tensión) y los de A.T. (alta tensión). En los arrollamientos concéntricos se coloca generalmente más próximo a las columnas el de B.T puesto que es más fácil aislar el de A.T, y entre ambos arrollamientos se coloca un cilindro aislante de cartón o papel baquelizado. En los arrollamientos alternos se suceden alternativamente los arrollamientos de A.T y B.T.



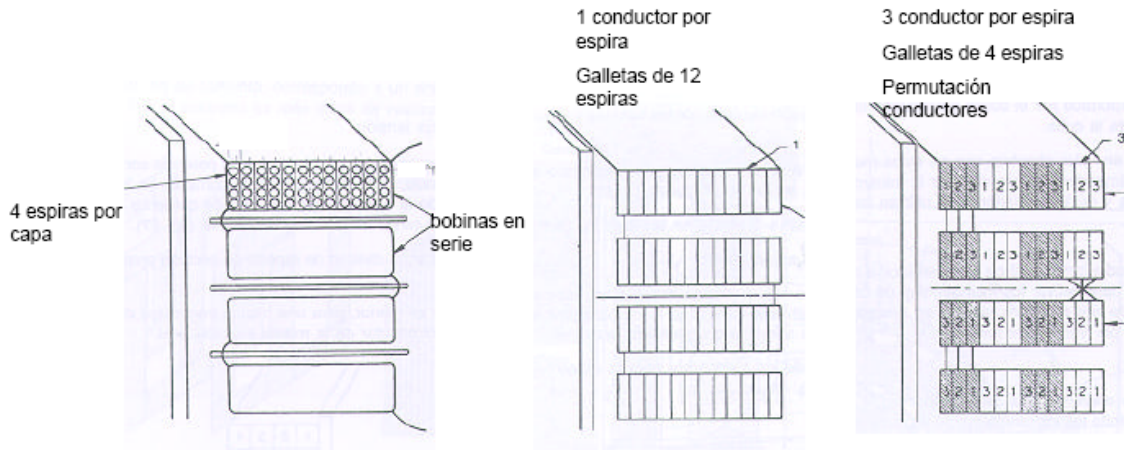
**Figura 1.2.2.-** Tipos de arrollamientos

Arrollamiento de baja tensión: Los conductores se distribuyen en una o más capas de espiras las cuales contienen de 6 a 12 conductores redondos conectados en paralelo y permutados.



**Figura 1.2.3.-** Arrollamiento de baja tensión

Arrollamiento de alta tensión: Los conductores podrán estar conectados mediante bobinas en serie de pocas espiras por capa (4-6) o mediante capas de uno o más conductores en paralelo.



**Figura 1.2.4.-** Arrollamiento de alta tensión

### 1.2.3.- Bornas

Las bornas son las encargadas de conectar el transformador con los conductores y que haya continuidad entre ambos, además de mantener la conexión entre el aislamiento externo y el interno del transformador.

Los parámetros más importantes para su diseño son:

- Tensión nominal
- El nivel de aislamiento (BIL)
- Intensidad nominal
- Línea de fuga requerida



**Figura 1.2.5.-** Bornas

#### 1.2.4.- Cuba

La cuba es la parte del transformador que recubre todas las partes activas del mismo y contiene el aceite en el que están sumergidas dichas partes del mismo. Esta construida con láminas de acero soladas entre sí y reforzadas para poder soportar los esfuerzos mecánicos a los que esta expuesto el transformador durante su operación. El acabado de las láminas se realiza mediante granalla de acero y tres capas de pintura.

#### 1.2.5.- Protecciones

- Protecciones Propias: Su dispositivo de alerta forma parte del transformador

- Termómetro	26-1
- Termostato	26-2
- Imagen térmica	49
- Indicador del nivel de aceite	63-N
- Liberador de presión	63-L
- Relé Buchholz	63-B
- Relé Buchholz-Jansen	63-BJ

- Protecciones Externas:

- Protección diferencial	87
- Protección sobreintensidad	50-51

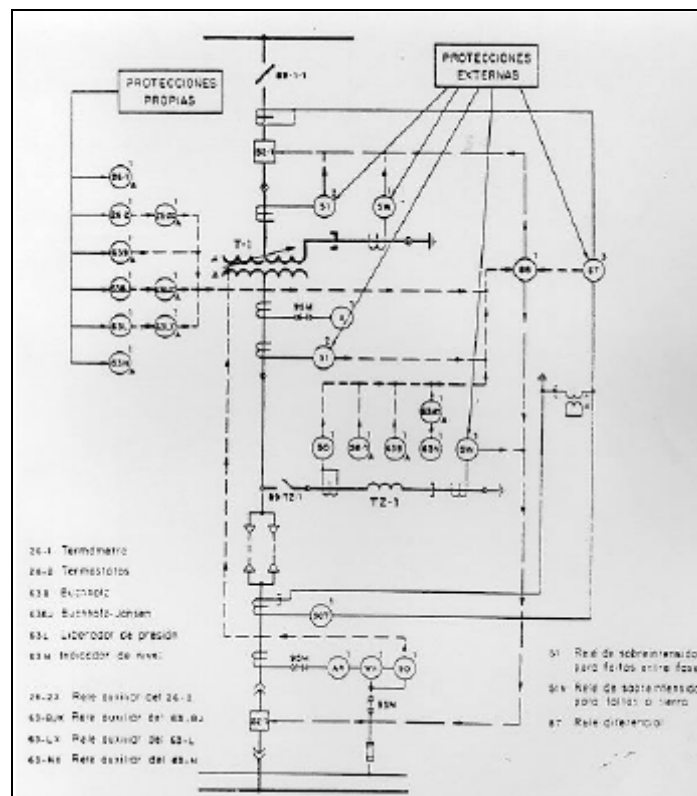
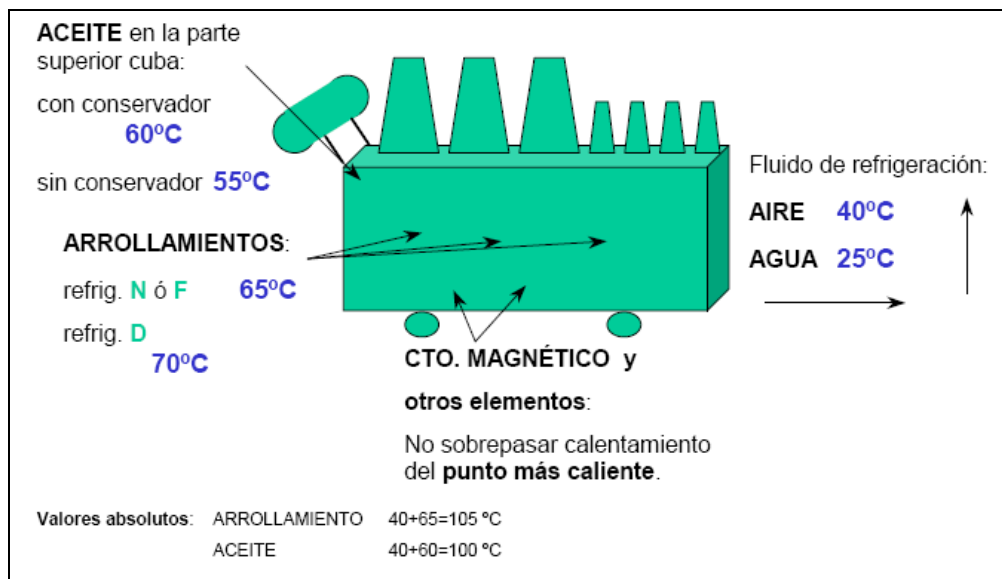


Figura 1.2.6.- Esquema de protecciones de un transformador

### 1.2.6.- Sistema de refrigeración

Durante su operación el transformador genera pérdidas en forma de calor, pérdidas de Joule. Por esto, es necesario un sistema de refrigeración que mantenga al transformador dentro de unos niveles de temperatura aceptables, ya que en el caso de que se den sobre temperaturas en los aislamientos estos verán reducido su tiempo de vida útil de manera considerable.



**Figura 1.2.7.-** Distribución de temperaturas en un transformador

Para la distinción de los tipos de refrigeración la normativa clasifica estos sistemas con un acrónimo de cuatro letras:

1.- Primera letra: Designa el fluido refrigerante primario, que está en contacto con las partes activas del transformador.

- Aire (Air): A
- Aceite (Oil): O
- Agua (Water): W

2.- Segunda letra: Designa el método de circulación del fluido primario.

- Natural: N
- Forzada: F
- Dirigida: D

3.- Tercera letra: Designa el fluido refrigerante secundario.

4.- Cuarta letra: Designa el método de circulación del fluido secundario.



### 1.3.- REGULACIÓN DE TENSION

En las redes de energía eléctrica es necesario poder controlar los niveles de tensión para que el suministro que llega hasta los usuarios finales tenga unas tensiones adecuadas dentro de los límites legales preescritos y de esta forma se garantice la calidad de este. Además también es necesario poder tener un determinado control de tensiones para controlar los flujos de potencia activa y reactiva de la red.

Este control se tiene modificando la relación de transformación de los transformadores del sistema eléctrico. Estos transformadores están provistos de tomas y en función de la toma en la que se encuentre trabajando el transformador variará su número de espiras, y por tanto la relación de transformación.

#### 1.3.1.- Tipos de regulación

##### Regulación en Vacío

En este tipo de regulación no debe circular corriente por el regulador en el momento de la conmutación, por ello el tipo de cambiador de tomas que se utiliza es el cambiador de tomas en vacío.

El principal inconveniente de este tipo de regulación es que es esencial desenergizar el transformador antes de cambiar la toma, lo que significa tener una indisponibilidad del transformador muy alta.

Este tipo de regulación se realiza cuando se hacen ajustes o modificaciones ocasionales.

##### Regulación en carga

En este tipo de regulación si puede circular corriente por el regulador en el momento de la conmutación, de forma que no es necesario interrumpir el servicio. Este tipo de cambiador se puede maniobrar mediante accionamiento manual o motorizado, o bien automáticamente por medio de un relé auxiliar.

Este tipo de regulación se emplea para cambios diarios o de corta duración.



### 1.3.2.- Margen de regulación

El margen de regulación se puede expresar como el tanto por ciento de la tensión nominal que el transformador puede regular.

Si se tiene la placa de características de un transformador 45 / 16,05 kV, y en la tabla que se detalla el número de tomas del transformador y la tensión en cada toma, se ve que en la toma central la tensión es 45 kV y en la toma más baja la tensión es 51,3 kV, el margen de regulación será:

$$\frac{51.3}{45} = 1.14 \rightarrow \text{El margen de regulación es } 14 \%$$

Si en la placa además pone que el transformador tiene 21 tomas, siendo su toma central, en la cual la tensión es la asignada, habrá 10 tomas por encima y por debajo de la toma central que regulen tensión. Si se quiere conocer la tensión que se varía al subir o bajar una toma, bastara con dividir la diferencia entre las tensiones entre una de las tomas extremas y la toma central entre el número de tomas que hay entre ellas.

$$\frac{51.3KV - 45KV}{10} = \frac{6.3KV}{10} = 0,630KV$$

Por lo tanto se tendrá una variación de 630 V cada vez que se varíe una toma.

La forma en la cual vienen expresados estos resultados en la placa de característica de un transformador es:

$$45 \pm 10 \times 0.63 \text{ kV}$$



### 1.3.3.- Cambiador de tomas en carga

De acuerdo al estándar C57.131-1995 del IEEE [3], el cambiador de tomas en carga (*load tap changer*, LTC), se define como “*un equipo con interruptor selector, el cual puede incluir conmutadores para interrumpir la corriente, utilizado para cambiar las tomas de un transformador, cuando éste se encuentra operando y manejando la carga nominal*”. Dicho estándar se refiere a cambiadores de tomas instalados en transformadores de potencia y transformadores reguladores de tensión, de todos los niveles de tensión y de potencia (kVA).

Los principales elementos que componen el cambiador de tomas en carga son:

- Armario de accionamiento o mando.
- Mecanismo de transmisión.
- Selector de tomas y preselector.
- Cabeza de regulador.
- Conmutador o ruptor.

## 1.4.- CIRCUITO EQUIVALENTE

El circuito equivalente de un transformador en carga, representado de la forma más próxima a la realidad es:

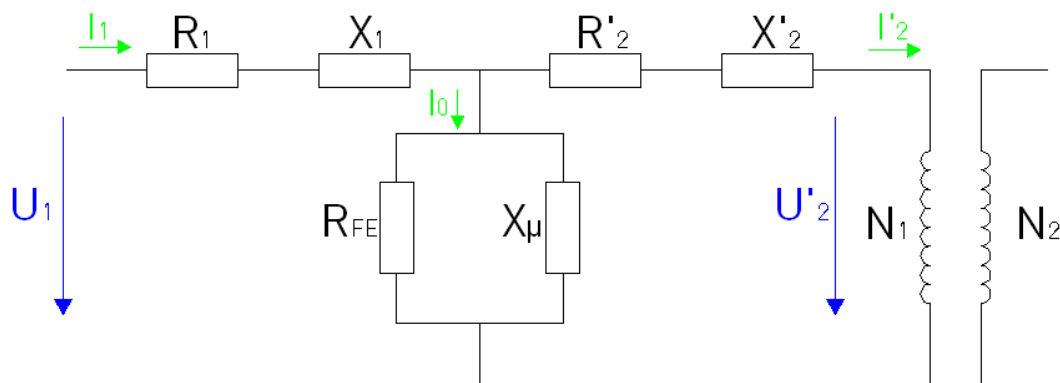


Figura 1.4.1.- Circuito equivalente más próximo a la realidad

Donde:

$R_1$  = Resistencia del primario

$R'_2$  = Resistencia del secundario referida al primario

$X_1$  = Reactancia del primario

$X'_2$  = Reactancia del secundario referida al primario

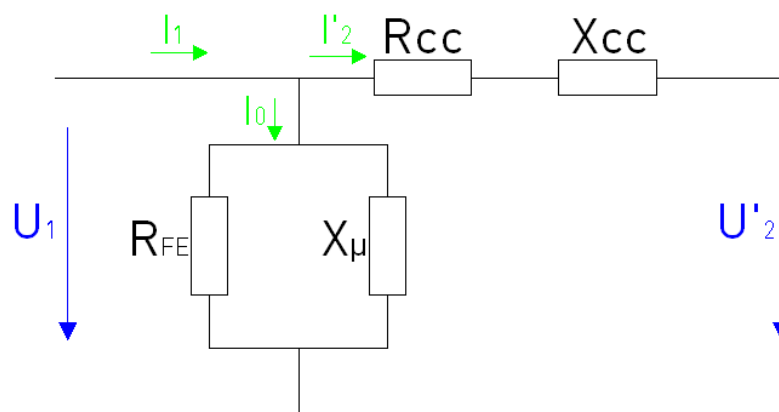
$R_{FE}$  = Resistencia del núcleo magnético

$X_\mu$  = Reactancia del núcleo magnético

El circuito de la figura anterior está referido al primario para evitar trabajar con dos circuitos diferentes, esto se consigue multiplicando o dividiendo, las magnitudes del secundario, entre la relación de transformación:

$$I'_2 = \frac{I_2}{rt} \qquad R'_2 = R_2 \cdot rt^2 \qquad X'_2 = X_2 \cdot rt^2$$

Dado que la caída de tensión en la resistencia y la reactancia del primario son muy pequeñas se podrán despreciar, y trasladando la rama paralelo a la entrada del transformador el circuito equivalente quedaría como muestra la siguiente figura:



**Figura 1.4.2.-** Circuito equivalente del transformador

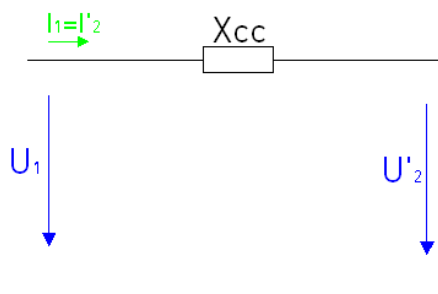
Donde:

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2$$

Como se puede ver  $R_{cc}$  y  $X_{cc}$ , representan la suma de las resistencias y las impedancias de ambos arrollamientos, y se denominan resistencia de cortocircuito y reactancia de cortocircuito puesto que sus valores se pueden obtener mediante el ensayo de cortocircuito.

Si se quiere aproximar el circuito equivalente obtenido al del un transformador ideal, primero se despreciaría la corriente de vacío del transformador frente a  $I_1$  e  $I_2$ , también se puede despreciar el valor de  $R_{cc}$ , puesto que para la mayoría de los transformadores  $X_{cc}/R_{cc} > 20$ . Con esto el circuito simplificado resultante sería el siguiente:



**Figura 1.4.3.-** Circuito equivalente simplificado del transformador

## 1.5.- PÉRDIDAS DE POTENCIA

Parte de la energía resultante de la transformación electromecánica se disipa en forma de calor, esto supone que aparezcan pérdidas de potencia en el transformador. Estas pérdidas afectan al calentamiento de los elementos del transformador lo que supondrá a su vez un calentamiento en el aceite aislante, lo cual supone un riesgo para la máquina en el momento de que sobrepase cierto nivel de temperatura.

El hecho de que se produzcan pérdidas también afecta al rendimiento del transformador, puesto que se trata de que la potencia de salida sea lo más parecida posible a la de entrada, y por tanto el rendimiento del transformador sea próximo a 1.

El transformador presenta unas pérdidas fijas, o pérdidas en el hierro, y unas pérdidas variables, o pérdidas en el cobre.

$$P = P_{Fe} + P_{Cu} \quad (1.5.1)$$

### 1.5.1.- Pérdida de potencia en el núcleo

Las pérdidas de potencia en el núcleo, también conocidas como pérdidas en el hierro, son prácticamente constantes para una tensión de alimentación fija ( $U_{N1}$ ) y causadas por los campos electromagnéticos variables que atraviesan el núcleo del transformador.

Estas pérdidas en el núcleo a su vez están formadas por las pérdidas por histéresis y las pérdidas de Foucault.

$$P_{Fe} = P_{Foucault} + P_{Histeresis} \quad (1.5.2)$$

Las pérdidas de Foucault son provocadas por las corrientes parásitas, debidas a los flujos de dispersión. Para minimizar este tipo de pérdidas es necesario adaptar el diseño constructivo del transformador y obtener un funcionamiento óptimo de la máquina.

Las pérdidas de Foucault en el núcleo de un transformador siguen una relación cuadrática con la densidad de flujo magnético.

$$P_{Foucault} = \frac{1,65 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot t^2}{\rho \cdot d} \cdot m = \sigma_e \cdot (f^2 \cdot B_m^2 \cdot t^2) \cdot m \text{ [W]} \quad (1.5.3)$$

Donde:

f = Frecuencia [Hz]

B<sub>m</sub> = Valor máximo de la densidad de flujo [T]

t = Espesor de las láminas [m]

ρ = Resistividad específica del material [Ω]

d = Densidad [kg/m<sup>3</sup>]

m = masa del núcleo [kg]

σ<sub>e</sub> = 200 – 1000 [m<sup>2</sup>Ω<sup>-1</sup>kg<sup>-1</sup>]

Las pérdidas por histéresis están más influenciadas por las características constructivas del núcleo y se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$P_{Histeresis} = \sigma_h \cdot f \cdot B_m^n \cdot m \text{ [W]} \quad (1.5.4)$$

Donde:

n = Exponente de Steinmetz 1,6 – 1,2

σ<sub>h</sub> = 3x10<sup>-3</sup>-20x10<sup>-3</sup>

El ensayo de vacío permite determinar las pérdidas en el hierro del transformador.

La realización de este ensayo consiste en aplicar al primario del transformador la tensión nominal, estando el secundario en circuito abierto para obtener la potencia absorbida en vacío la cual coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro.

Se medirá la potencia absorbida P<sub>0</sub>, la corriente de vacío I<sub>0</sub> y la tensión secundaria.

$$P_{Fe} = P_0 = V_{1n} I_0 \cos \varphi_0 \quad (1.5.5)$$

### 1.5.2.- Pérdida de potencia en los arrollamientos

Las pérdidas en los arrollamientos constituyen las pérdidas variables del transformador, puesto que estas varían en función del régimen de carga y son debidas a las perdidas en el cobre producidas por el efecto Joule. Se calculan según la siguiente expresión.

$$P_{Cu} = P_{cc} = R_{cc}I^2 \quad (1.5.6)$$

Donde la intensidad y la resistencia serán las correspondientes al arrollamiento en el que se estén calculando las pérdidas.

Las pérdidas en el cobre se obtienen mediante el ensayo de cortocircuito, el cual consiste en cortocircuitar uno de los arrollamientos y por el otro aplicar una tensión que se va elevando gradualmente hasta que circule la corriente asignada de plena carga por los devanados. La potencia absorbida en cortocircuito coincide con las pérdidas en el cobre.

$$P_{cc} = V \cdot I_n \cdot \cos \varphi_{cc} \quad (1.5.7)$$

Donde la corriente será la corriente nominal del devanado en el que se este aplicando tensión.

Como se ha dicho antes, estas pérdidas son variables en función del grado de carga del transformador. Cuando se conocen las pérdidas de cortocircuito a plena carga se pueden calcular las pérdidas para cualquier grado de carga mediante la siguiente expresión:

$$P_{Cu} = C^2 \cdot P_{cc} \quad (1.5.8)$$

Donde:

C = Índice de carga del transformador

P<sub>cc</sub> = Pérdidas obtenidas en el ensayo de cortocircuito a plena carga

## 1.6.- RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR

Como en cualquier máquina eléctrica, el rendimiento es el cociente entre la potencia útil, o potencia obtenida a la salida del secundario, y la potencia total o de entrada en el primario, es decir, la potencia útil más las pérdidas.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \quad (1.6.1)$$

si se suministra una corriente  $I_2$  y tensión  $V_2$  con f.d.p.  $\cos \varphi_2$  se tendrá:

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \quad (1.6.2)$$

El rendimiento de un transformador también puede expresarse en función del grado de carga, para ello bastará con tomar los valores de potencia y pérdidas variables a plena carga y multiplicarlos por el grado de carga del transformador.

$$\eta = \frac{C \cdot V_2 \cdot I_{n2} \cdot \cos \varphi_2}{C \cdot V_2 \cdot I_{n2} \cdot \cos \varphi_2 + P_{Fe} + C^2 \cdot P_{cc}} \quad (1.6.3)$$







## Capítulo II

### Acoplamiento de transformadores

El acoplamiento de dos transformadores en paralelo consiste en conectar eléctricamente sus bornes homólogos entre sí, tanto el arrollamiento de mayor tensión como el arrollamiento de menor tensión. En caso de que los transformadores pertenezcan a diferentes subestaciones o a diferentes parques dentro de una misma subestación, esta conexión se realizara mediante un circuito eléctrico, ya sea subterráneo o aéreo.

En este capítulo se va a tratar los aspectos más importantes del acoplamiento de transformadores. En él se habla de los objetivos buscados cuando se procede a este tipo de conexiones. Se enumeran las condiciones que han de cumplirse para poder llevar a cabo un acoplamiento. Se describen los tipos de conexiones que se pueden realizar en los arrollamientos de los transformadores y la nomenclatura utilizada para su designación. Se resuelven los circuitos eléctricos equivalentes que presenta el acoplamiento, tanto en vacío como en carga. Y por último se define la diagonal de acoplamiento que denota aquellas combinaciones de tomas donde se obtendrán los resultados más eficientes en el funcionamiento en paralelo de estas máquinas.



## 2.1.- OBJETIVOS DEL ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES.

La conexión de transformadores en paralelo se hace necesaria debido a los incrementos de la demanda que superan la capacidad existente o cuando los requerimientos de fiabilidad y continuidad de operación lo exigen. Este es el caso, que si un transformador falla, el otro continuará alimentando la carga sin interrupción.

Un aumento de la demanda supone elevar la potencia de los transformadores y en algunos casos esto supone sobrecargar el transformador, lo que contribuye a un acortamiento de la vida útil de éste. Antes que retirar la unidad antigua y sustituirla por una nueva y de mayor potencia se procede al acoplamiento de varios transformadores en paralelo que en conjunto sean capaces de soportar las cargas máximas que demande el sistema.

Cuando la demanda de energía se reduce temporalmente, resulta más económico operar con un transformador pequeño cerca de su límite de capacidad a plena carga que con 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.

Esto nos lleva a otros dos de los objetivos del acoplamiento, y es que en caso de fallo o en caso de que sea necesario realizar maniobras en el sistema, uno de los transformadores sea capaz de mantener la estabilidad del sistema alimentando las cargas más esenciales que sean demandadas.

Esto conlleva mejorar la fiabilidad de la red y poder realizar una explotación más eficiente aprovechando mejor los recursos que ofrece la red. También favorece el poder realizar un mejor mantenimiento de los equipos y poder dar un mejor servicio a los clientes conectados a la red.

## 2.2.- CONDICIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO EN PARALELO.

Para poder realizar la conexión de transformadores en paralelo se han de cumplir algunas condiciones, unas de carácter obligatorio y otras convenientes. En caso de no cumplirse las condiciones de carácter obligatorio supone cortocircuitos y por tanto la imposibilidad de funcionamiento, mientras que si no se cumplen las condiciones de carácter conveniente el funcionamiento en paralelo no será óptimo ya que se producirán una serie de efectos que se estudiarán en este capítulo.

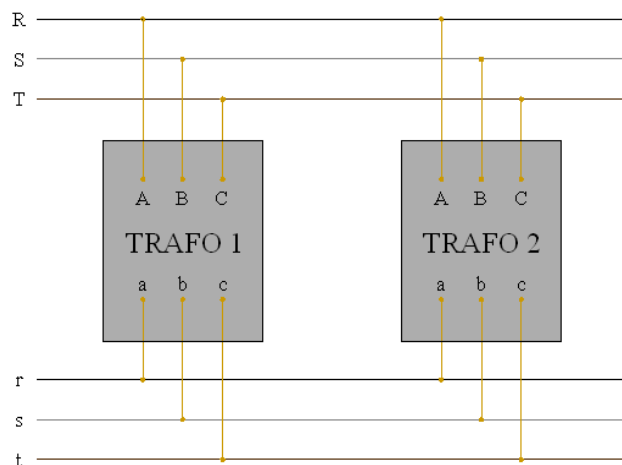
### Condiciones obligatorias:

- Igual índice horario.
- Igual secuencia de fases.

Los transformadores con igual índice horario se pueden acoplarse sin más que conectar los bornes homólogos. Y en ocasiones se pueden conectar transformadores pertenecientes a distintos grupos de conexión permutando en el primario o en el secundario las conexiones entre dos bornas.

### Condiciones convenientes:

- Igual relación de transformación ( en todos los escalones de regulación)
- Igual tensión de cortocircuito, expresada en % o en p.u.



**Figura 2.2.1.-** Acoplamiento de transformadores con mismo índice horario

## 2.3.- CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES.

Como se ha mencionado en las condiciones obligatorias para la conexión de transformadores en paralelo, es fundamental que ambos transformadores tengan mismo índice horario y conexión de las bornas homólogas. La otra condición obligatoria es que tengan la misma secuencia de fases.

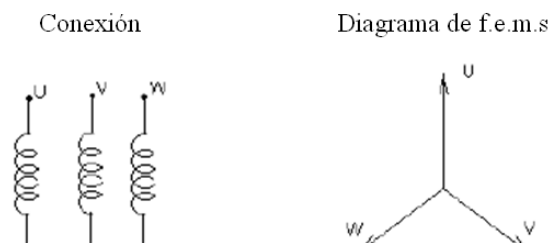
A continuación se explicara en que consiste el conexionado de los transformadores y la nomenclatura que se emplea para designar los grupos de conexión, y también se explicara la necesidad de tener la misma secuencia de fases.

### 2.3.1.- Conexión de los arrollamientos

Las formas que más frecuentemente se emplean para realizar las conexiones de los arrollamientos son:

- Estrella (Con o sin hilo neutro):

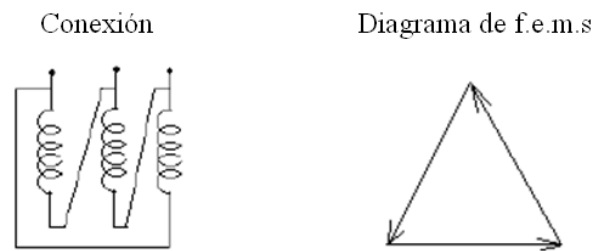
En la conexión estrella se unen en un mismo punto los extremos de los arrollamientos que poseen la misma polaridad.



**Figura 2.3.1.- Conexión estrella**

- Triángulo:

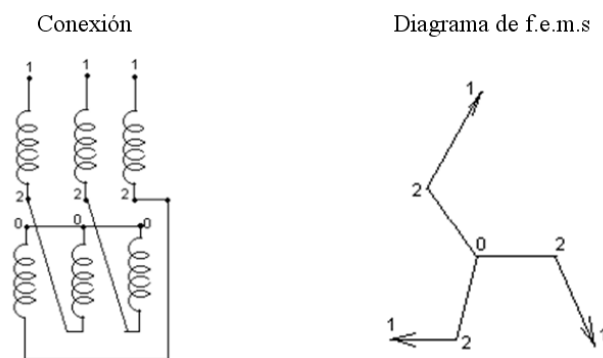
En la conexión triángulo se unen sucesivamente los extremos de polaridad opuesta de cada dos arrollamientos hasta cerrar el circuito.



**Figura 2.3.2.-** Conexión triángulo

– Zig – Zag:

Esta conexión en la práctica solo se emplea en el lado de menor tensión, consiste en subdividir en dos partes iguales los arrollamientos secundarios, una parte se conecta en estrella y luego cada rama se une en serie con las bobinas invertidas de las fases adyacentes, siguiendo un determinado orden cíclico.



**Figura 2.3.3.-** Conexión en zig - zag

### 2.3.2.- Índice horario

El índice horario es la diferencia de ángulo entre la tensión primaria y su correspondiente tensión secundaria. Se expresa según la posición de las agujas del reloj, en el cual la diferencia entre horas son  $30^\circ$ , y donde por convención la tensión primaria tomada como referencia se pone en la hora 12 y la secundaria en el múltiplo de 30 que corresponda. La hora que resulta indica el índice horario, es decir, el desfase entre las tensiones primarias y secundarias.

De esta forma un transformador con índice horario 5, supondrá un desfase entre la tensión primaria y secundaria de  $150^\circ$ .

### 2.3.3.-Nomenclatura utilizada para designar el grupo de conexión de los transformadores trifásicos

La nomenclatura que se utiliza para designar los tipos de transformadores esta compuesta por dos letras y un número.

- La primera letra representa la conexión del arrollamiento de alta tensión y se escribe en mayúscula.
- La segunda letras representa la conexión del arrollamiento de baja tensión y se escribe en minúscula.
- El número representa el índice horario.

Si la conexión es en estrella se representara con Y o y, si es en triangulo D o d y si es en zig-zag Z o z.

Por lo que si se habla de un transformador Yd 11, se deberá entender que el primario del transformador es el lado de alta tensión y esta conectado en estrella, el lado de baja esta conectado en triangulo y tiene un índice horario igual a 11.

Los tipos de conexiones e índices horarios más utilizados se muestran en la siguiente tabla:

Índice de desfase (horario)	Símbolo de acoplamiento o de conexiones	Esquema vectorial		Esquema de conexiones	Relación de transformación (2)
		mayor tensión	menor tensión		
0 (0°)	(3)	D d 0			$\frac{N_1}{N_2}$
		Y y 0			$\frac{N_1}{N_2}$
		D z 0			$\frac{2}{3} \frac{N_1}{N_2}$
5 (150°)	(3)	D y 5			$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
		Y d 5			$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
		Y z 5			$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2}$
6 (180°)	(3)	D d 6			$\frac{N_1}{N_2}$
		Y y 6			$\frac{N_1}{N_2}$
		D z 6			$\frac{2 N_1}{3 N_2}$
11 (135° (-30°))	(3)	D y 11			$\frac{N_1}{\sqrt{3} N_2}$
		Y d 11			$\frac{\sqrt{3} N_1}{N_2}$
		Y z 11			$\frac{2 N_1}{\sqrt{3} N_2}$

Figura 2.3.4.- Tipos de conexión de un transformador trifásico



En un transformador ya construido si se cambia la alimentación de un lado a otro, cambia el desfase de la máquina, si se tiene un Dy11 pasa a Yd1 (pasa de triángulo a estrella y de estrella a triángulo respectivamente con un desfase de  $+30^\circ$ ).

Es importante resaltar que la exigencia de igual índice horario no exige igual grupo de conexión. Debe recordarse que un mismo grupo de conexión tiene en realidad varios índices horarios (dependiendo de la denominación de las bornas), esto significa que un transformador Dyn11 podrá conectarse con un Ynd3 si cumple el resto de condiciones.

Por otra parte, la exigencia de igual índice horario elimina la posibilidad de acoplar en paralelo un transformador Yy con un Yd, dado que estos grupos jamás podrán tener el mismo índice horario.

La norma UNE 20-101-75 (apartado 5.8.1) recomienda la utilización de los desfases 0 y 11 y, dentro de ellos, los acoplamientos (Dy11), (Yd11), (Yz11) y (Yy0).  
[4]

#### 2.3.4.- Secuencia de fases

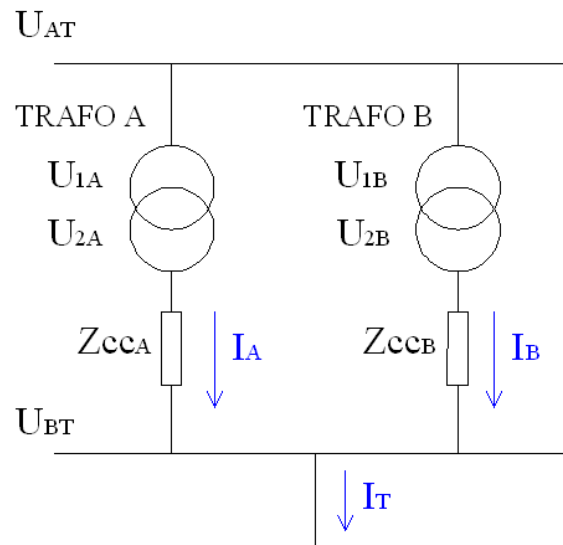
Se llama secuencia de fases al orden de rotación de los vectores. Es la sucesión en el tiempo de los máximos de los parámetros eléctricos tensión o intensidad, en las tres fases de un sistema. A ella corresponde un sentido de rotación del diagrama vectorial.

Los transformadores cuya secuencia sea opuesta, es decir tengan sentido de giro de los diagramas vectoriales opuesto no pueden conectarse en paralelo, porque en un determinado instante coincidirán los vectores de tensión secundaria, aun siendo del mismo grupo de conexión, en el instante siguiente los vectores comienzan a desplazarse y aparecen diferencias de potencial entre las fases homólogas. Por ello es necesario que los transformadores tengan diagramas vectoriales que giren en igual sentido.



## 2.4.- CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE QUE PRESENTA EL ACOPLAMIENTO EN CARGA.

En la siguiente figura se muestra el circuito eléctrico equivalente resultante de acoplar dos transformadores en paralelo, cuando estos están alimentando una carga.



**Figura 2.4.1:** Esquema eléctrico equivalente de funcionamiento en carga.

Donde:

$U_{AT}$ , tensión compuesta aplicada a la barra de mayor tensión

$U_{BT}$ , tensión compuesta en la barra de menor tensión

$U_{1A}$  y  $U_{1B}$ , tensión en el primario de los transformadores

$U_{2A}$  y  $U_{2B}$ , tensión en el secundario de los transformadores

$I_T$ , intensidad demandada por la carga

$I_{A-B}$ , intensidad en el arrollamiento secundario de los transformadores

$Z_{cc A-B}$ , impedancias de cortocircuito de los transformadores

Para conocer la corriente que circula por cada transformador, el circuito eléctrico se resolverá mediante un divisor de intensidad:

$$I_A = \frac{Z_{cc_B}}{Z_{cc_A} + Z_{cc_B}} \cdot I_T \quad I_B = \frac{Z_{cc_A}}{Z_{cc_A} + Z_{cc_B}} \cdot I_T \quad (2.4.1)$$

La corriente que circula por cada transformador queda en función de la corriente total demandada por la carga y de las impedancias de cortocircuito de los transformadores.

El valor de las impedancias de cortocircuito se considerará puramente reactivo, puesto que según el estudio desarrollado en el Anexo B el error cometido al realizar esta hipótesis es tan pequeño que es totalmente admisible para el estudio del acoplamiento. Cuando se tiene transformadores provistos de tomas de regulación el valor de la tensión de cortocircuito varía, se ha hecho la suposición de tomar dicho valor constante para todas las tomas. El error cometido también se estudia en el Anexo B.

La impedancia de cortocircuito vista desde el secundario se calcula como:

$$Z_{cc_{(2)}} = \frac{\varepsilon_{cc} [\%]}{100} \cdot \frac{Un_{(2)}^2}{Sn} = \varepsilon_{cc} (p.u.) \cdot \frac{Un_{(2)}^2}{Sn} \quad (2.4.2)$$

Donde:

$\varepsilon_{cc}$ , es la tensión de cortocircuito.

$Un_{(2)}$ , es la tensión nominal en el secundario del transformador.

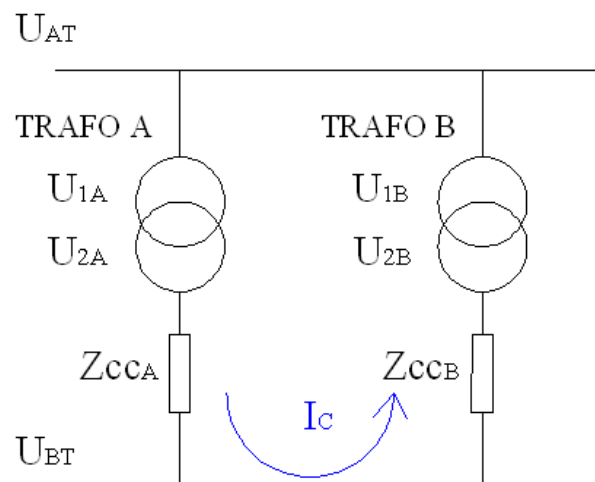
$Sn$ , es la potencia nominal del transformador.

El hecho de que existan diferencias entre los valores de las impedancias de cortocircuito de los dos transformadores provocará que exista una desigualdad en el reparto de la carga.

Esto como se verá en el Capítulo 3, donde se estudiará los distintos casos de acoplamiento posibles, supondrá un desaprovechamiento de potencia en el transformador que menos carga asuma.

## 2.5.- CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE QUE PRESENTA EL ACOPLAMIENTO EN VACÍO.

Cuando se acoplan transformadores con distinta relación de transformación, a la salida de ambos existe una diferencia de tensiones que provoca que recircule corriente entre ellos, esta corriente se denomina corriente de recirculación, la cual se va a analizar a partir del circuito eléctrico equivalente que presenta el acoplamiento en vacío.



**Figura 2.5.1.-** Esquema eléctrico equivalente de funcionamiento en vacío

Donde:

$U_{AT}$ , tensión compuesta aplicada a la barra de mayor tensión

$U_{BT}$ , tensión compuesta en la barra de menor tensión

$U_{1A}$  y  $U_{1B}$ , tensión en el primario de los transformadores

$U_{2A}$  y  $U_{2B}$ , tensión en el secundario de los transformadores

$I_c$ , intensidad de recirculación

$Z_{cc A-B}$ , impedancias de cortocircuito de los transformadores

Para conocer el valor de la corriente de recirculación que aparece en los transformadores, se ha resuelto el circuito equivalente aplicando una malla y refiriendo los valores al secundario. La expresión obtenida es la siguiente:

$$I_c = \frac{\frac{U_{AT}}{\sqrt{3} \cdot r_{t_A}} - \frac{U_{AT}}{\sqrt{3} \cdot r_{t_B}}}{Z_{cc_A} + Z_{cc_B}} \quad (2.5.1)$$

$U_{AT}$  representa el valor de tensión en la barra de alta tensión.

La relación de transformación de un transformador se define como:

$$rt = \frac{U_{1n}}{U_{20}} \quad (2.5.2)$$

Donde:

$U_{1n}$ , representa la tensión aplicada en el primario del transformador.

$U_{20}$ , representa la tensión en el secundario del transformador en vacío.

Si se sustituye en la ecuación 2.5.1 los parámetros por las expresiones 2.4.2 se obtiene:

$$I_c = \frac{\frac{U_{AT}}{\sqrt{3} \cdot r_{t_A}} - \frac{U_{AT}}{\sqrt{3} \cdot r_{t_B}}}{\frac{\varepsilon_{ccA}[\%]}{100} \cdot \frac{Un_{(2)A}^2}{Sn_A} + \frac{\varepsilon_{ccB}[\%]}{100} \cdot \frac{Un_{(2)B}^2}{Sn_B}} = \frac{\frac{U_{AT}}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{1}{rt_A} - \frac{1}{rt_B} \right)}{\frac{\varepsilon_{ccA}[\%]}{100} \cdot \frac{Un_{(2)A}^2}{Sn_A} + \frac{\varepsilon_{ccB}[\%]}{100} \cdot \frac{Un_{(2)B}^2}{Sn_B}} \quad (2.5.3)$$

Por tanto la corriente de recirculación aparecerá cuando existan diferencias entre las relaciones de transformación de los transformadores, y los parámetros que intervienen en el cálculo de la impedancia de cortocircuito solo determinarán que el valor de dicha corriente sea más grande o más pequeño.



La relación de transformación dependerá de las tensiones nominales de los arrollamientos, tanto primario como secundario, y de las características de los cambiadores de tomas:

- Sentido del cambiador de tomas.
- Ubicación, lado de alta tensión o lado de baja tensión.
- Número de tomas.
- Margen de regulación.

La corriente de recirculación se deberá sumar o restar, dependiendo del signo, a las corrientes de los transformadores destinadas a alimentar la carga. De forma que la máquina que aporta la corriente de recirculación (menor  $r_t$ ) tiende a sobrecargarse y la que recibe la corriente de recirculación (mayor  $r_t$ ) tiende a descargarse.

Este efecto, al igual que el desaprovechamiento de potencia por desigualdad en el reparto de las cargas, se estudiará en el siguiente capítulo.

## 2.6.- DIAGONAL DE ACOPLAMIENTO

La proximidad entre las relaciones de transformación favorece que las corrientes de recirculación sean pequeñas, o en el mejor de los casos, inexistentes. Ésto se consigue con ambos transformadores trabajando en tomas muy próximas en el caso de que el sentido del cambiador de tomas en carga de ambos transformadores sea el mismo, o con tomas muy dispares en el caso de que se tenga transformadores cuyo sentido del cambiador de tomas en carga sea distinto.

Si se calcula la corriente de circulación para todas las posibles combinaciones que ofrecen los cambiadores de tomas de dos transformadores, se podrá observar la aparición de una diagonal a lo largo de la cual se obtienen las menores corrientes de recirculación y como a medida que la diferencia entre las tomas va siendo mayor y nos alejamos de dicha diagonal aumenta la corriente de recirculación.

En la siguiente figura se muestra la matriz obtenida, al acoplar dos transformadores con el cambiador de tomas en el lado de alta tensión y sentido directo, de 21 tomas y un margen de regulación del 14%.

		TOMAS TRAF0 A																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
TOMAS TRAF0 B	1	0	45	90	137	185	235	285	337	391	446	502	560	620	681	744	810	877	946	1018	1091	1167
	2	45	0	46	93	141	190	241	293	346	401	457	515	575	637	700	765	832	902	973	1047	1123
	3	90	46	0	47	95	144	195	247	300	355	412	470	529	591	654	719	787	856	927	1001	1077
	4	137	93	47	0	48	97	148	200	254	308	365	423	483	544	607	673	740	809	880	954	1030
	5	185	141	95	48	0	49	100	152	205	260	317	375	435	496	559	624	692	761	832	906	982
	6	235	190	144	97	49	0	51	103	156	211	267	325	385	447	510	575	642	712	783	857	933
	7	285	241	195	148	100	51	0	52	105	160	217	275	335	396	459	524	592	661	732	806	882
	8	337	293	247	200	152	103	52	0	53	108	165	223	283	344	407	472	540	609	680	754	830
	9	391	346	300	254	205	156	105	53	0	55	111	169	229	291	354	419	486	555	627	701	777
	10	446	401	355	308	260	211	160	108	55	0	56	114	174	236	299	364	431	501	572	646	722
	11	502	457	412	365	317	267	217	165	111	56	0	58	118	179	242	308	375	444	516	589	665
	12	560	515	470	423	375	325	275	223	169	114	58	0	60	121	184	250	317	386	458	531	607
	13	620	575	529	483	435	385	335	283	229	174	118	60	0	61	125	190	257	326	398	472	548
	14	681	637	591	544	496	447	396	344	291	236	179	121	61	0	63	128	196	265	336	410	486
	15	744	700	654	607	559	510	459	407	354	299	242	184	125	63	0	65	132	202	273	347	423
	16	810	765	719	673	624	575	524	472	419	364	308	250	190	128	65	0	67	136	208	282	358
	17	877	832	787	740	692	642	592	540	486	431	375	317	257	196	132	67	0	69	141	214	291
	18	946	902	856	809	761	712	661	609	555	501	444	386	326	265	202	136	69	0	71	145	221
	19	1018	973	927	880	832	783	732	680	627	572	516	458	398	336	273	208	141	71	0	74	150
	20	1091	1047	1001	954	906	857	806	754	701	646	589	531	472	410	347	282	214	145	74	0	76
	21	1167	1123	1077	1030	982	933	882	830	777	722	665	607	548	486	423	358	291	221	150	76	0

Figura 2.6.1.- Diagonal de acoplamiento de transformadores con cambiadores de tomas de sentido directo.

A continuación se muestra la matriz resultante, al acoplar dos transformadores de las mismas características que en el caso anterior, pero con cambiadores de distinto sentido, uno de sentido directo y otro de sentido inverso.

**TOMAS TRAF0 A**

IC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
<b>1</b>	1167	1123	1077	1030	982	933	882	830	777	722	665	607	548	486	423	358	291	221	150	76	0
<b>2</b>	1091	1047	1001	954	906	857	806	754	701	646	589	531	472	410	347	282	214	145	74	0	76
<b>3</b>	1018	973	927	880	832	783	732	680	627	572	516	458	398	336	273	208	141	71	0	74	150
<b>4</b>	946	902	856	809	761	712	661	609	555	501	444	386	326	265	202	136	69	0	71	145	221
<b>5</b>	877	832	787	740	692	642	592	540	486	431	375	317	257	196	132	67	0	69	141	214	291
<b>6</b>	810	765	719	673	624	575	524	472	419	364	308	250	190	128	65	0	67	136	208	282	358
<b>7</b>	744	700	654	607	559	510	459	407	354	299	242	184	125	63	0	65	132	202	273	347	423
<b>8</b>	681	637	591	544	496	447	396	344	291	236	179	121	61	0	63	128	196	265	336	410	486
<b>9</b>	620	575	529	483	435	385	335	283	229	174	118	60	0	61	125	190	257	326	398	472	548
<b>10</b>	560	515	470	423	375	325	275	223	169	114	58	0	60	121	184	250	317	386	458	531	607
<b>11</b>	502	457	412	365	317	267	217	165	111	56	0	58	118	179	242	308	375	444	516	589	665
<b>12</b>	446	401	355	308	260	211	160	108	55	0	56	114	174	236	299	364	431	501	572	646	722
<b>13</b>	391	346	300	254	205	156	105	53	0	55	111	169	229	291	354	419	486	555	627	701	777
<b>14</b>	337	293	247	200	152	103	52	0	53	108	165	223	283	344	407	472	540	609	680	754	830
<b>15</b>	285	241	195	148	100	51	0	52	105	160	217	275	335	396	459	524	592	661	732	806	882
<b>16</b>	235	190	144	97	49	0	51	103	156	211	267	325	385	447	510	575	642	712	783	857	933
<b>17</b>	185	141	95	48	0	49	100	152	205	260	317	375	435	496	559	624	692	761	832	906	982
<b>18</b>	137	93	47	0	48	97	148	200	254	308	365	423	483	544	607	673	740	809	880	954	1030
<b>19</b>	90	46	0	47	95	144	195	247	300	355	412	470	529	591	654	719	787	856	927	1001	1077
<b>20</b>	45	0	46	93	141	190	241	293	346	401	457	515	575	637	700	765	832	902	973	1047	1123
<b>21</b>	0	45	90	137	185	235	285	337	391	446	502	560	620	681	744	810	877	946	1018	1091	1167

**Figura 2.6.2.-** Diagonal de acoplamiento de transformadores con cambiadores de tomas de distinto sentido.

En ambos casos las combinaciones sombreadas de color verde conforman la diagonal de acoplamiento, combinaciones cuyos valores de corriente de circulación son iguales a 0.

Cuando se acoplen dos transformadores cuyos cambiadores de tomas tengan igual número de tomas, igual margen de regulación y el mismo sentido, la diagonal de acoplamiento la formarán las combinaciones de tomas homologas. Y cuando el cambiador de tomas tenga distinto sentido la diagonal la formarán tomas muy dispares, iniciando y finalizando la diagonal en las combinaciones donde existe mayor diferencia de tomas.

Si los cambiadores de tomas de los transformadores tienen diferentes características la diagonal de acoplamiento dejará de estar formada por combinaciones de tomas homólogas y los valores de corriente de recirculación en las combinaciones de tomas pertenecientes a la diagonal serán distintos de 0.

En la siguiente Figura se muestra la diagonal de acoplamiento de dos transformadores con distinto margen de regulación. Siendo el margen de regulación del Trafo A el 14 % y el del Trafo B el 12 %.

		TOMAS TRAF0 A																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
TOMAS TRAF0 B	1	40	12	17	46	76	107	139	172	205	240	275	312	349	388	428	469	511	554	599	646	694
	2	65	37	8	21	51	82	114	147	180	215	250	287	324	363	403	444	486	530	575	621	669
	3	90	62	34	4	26	57	89	121	155	190	225	262	299	338	377	418	461	504	549	595	643
	4	116	88	60	30	0	31	63	96	129	164	199	236	273	312	352	393	435	478	523	570	617
	5	143	115	86	57	27	4	36	69	103	137	173	209	247	285	325	366	408	452	497	543	591
	6	170	142	113	84	54	23	9	42	75	110	145	182	219	258	298	339	381	425	470	516	564
	7	198	170	141	112	81	50	19	14	48	82	118	154	192	230	270	311	353	397	442	488	536
	8	226	198	170	140	110	79	47	14	19	54	89	126	163	202	242	283	325	368	413	460	508
	9	255	227	199	169	139	108	76	43	10	25	60	97	134	173	213	254	296	339	384	431	478
	10	285	257	228	199	169	138	106	73	40	5	30	67	104	143	183	224	266	310	355	401	449
	11	316	288	259	229	199	168	136	104	70	35	0	36	74	113	152	193	236	279	324	370	418
	12	347	319	290	261	230	199	167	135	101	67	31	5	43	81	121	162	204	248	293	339	387
	13	379	351	322	293	262	231	199	167	133	99	63	27	11	49	89	130	172	216	261	307	355
	14	411	383	355	325	295	264	232	200	166	131	96	59	22	17	56	97	140	183	228	274	322
	15	445	417	388	359	329	298	266	233	200	165	130	93	56	17	23	64	106	150	195	241	289
	16	480	452	423	393	363	332	300	268	234	199	164	128	90	51	12	29	72	115	160	206	254
	17	515	487	458	429	398	367	336	303	269	235	199	163	125	87	47	6	36	80	125	171	219
	18	551	523	494	465	435	404	372	339	306	271	236	199	162	123	83	42	0	44	88	135	183
	19	588	560	532	502	472	441	409	376	343	308	273	236	199	160	120	79	37	6	51	98	145
	20	627	599	570	540	510	479	447	415	381	347	311	275	237	198	159	118	75	32	13	59	107
	21	666	638	609	580	549	518	487	454	420	386	350	314	276	238	198	157	115	71	26	20	68

Figura 2.6.3.- Diagonal de acoplamiento de transformadores con distinto margen de regulación.







## Capítulo III

### Posibles casos de acoplamiento

En la realidad no siempre se tienen las condiciones de acoplamiento deseadas, puesto que se pueden dar casos en los que los transformadores que se quiere acoplar no tengan exactamente iguales las características que influyen para tener un acoplamiento óptimo.

Las diferencias existentes entre los mismos dan lugar a que se pueda tener distintos casos de acoplamiento, en los cuales pueden aparecer distintos efectos que perjudiquen el óptimo funcionamiento en paralelo. Estos posibles casos se van a estudiar en este capítulo, de forma que se conozca los efectos que aparecen en cada uno de ellos y de que forman perjudican estos al acoplamiento.

Antes de que se empiece a hablar de los posibles casos de acoplamiento el comienza con una enumeración de las condiciones límites de operación de transformadores en paralelo.

### 3.1.- CONDICIONES LÍMITE DE LA OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES EN PARALELO.

Cuando no se cumple alguna de las condiciones convenientes que se nombraban en el Apartado 2 del Capítulo II, aparecen corrientes de recirculación y desigualdades en el reparto de la carga. Cualquiera de estas dos situaciones hace que disminuya la eficiencia y reduzca la cantidad máxima de potencia que pueden dar en conjunto.

Los transformadores no deberían operar en paralelo cuando [5]:

- El reparto de carga es tal que uno de ellos esta sobrecargado.
- La corriente de recirculación en uno de los transformadores es mayor al 10% de la corriente nominal de éste.
- La suma de la corriente de recirculación y de la corriente destinada a alimentar la carga supera el valor de la corriente nominal del transformador.

A continuación se van a estudiar seis casos de acoplamiento barajando las distintas posibilidades que se pueden dar en función de las diferencias entre las características de los transformadores que afectan a la calidad del acoplamiento:

- Tensión de cortocircuito.
- Relación de transformación.
- Potencia nominal.

### 3.2.- ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE IGUAL POTENCIA NOMINAL, TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO Y RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN.

Este caso se puede denominar como el caso ideal de acoplamiento, ya que las máquinas acopladas serían máquinas gemelas puesto que tendrían todos sus parámetros iguales. Esto supone que se cumplan todas las condiciones convenientes para el acoplamiento y que por tanto no se tenga ningún efecto que implique desaprovechamiento de potencia.

Dado que todas las máquinas tienen igual relación de transformación se verifica que:

$$I_A \cdot Z_{cc_A} = I_B \cdot Z_{cc_B} = \dots = I_N \cdot Z_{cc_N} \quad (3.2.1)$$

Si se denominan  $I_{n_A}$ ,  $I_{n_B}$  e  $I_{n_N}$  a las intensidades nominales de cada máquina, la expresión 3.1.1 puede modificarse en la forma:

$$\frac{I_A}{I_{n_A}} \frac{I_{n_A} \cdot Z_{cc_A}}{Un} = \frac{I_B}{I_{n_B}} \frac{I_{n_B} \cdot Z_{cc_B}}{Un} = \dots = \frac{I_N}{I_{n_N}} \frac{I_{n_N} \cdot Z_{cc_N}}{Un} \quad (3.2.2)$$

Donde cocientes  $I_i / I_{n_i}$  representan el grado de carga de la máquina  $i$  ( $C_i$ ) y los cocientes  $I_{n_i} \cdot Z_{cc_i} / Un$  representan la tensión de cortocircuito de la máquina  $i$  en magnitudes unitarias (todos los trafos tienen la misma  $Un$ ). Por tanto, puede escribirse:

$$C_A \cdot \mathcal{E}cc\%_A = C_B \cdot \mathcal{E}cc\%_B = \dots = C_N \cdot \mathcal{E}cc\%_N \quad (3.2.3)$$

puesto que en este caso se supone que cumple las condiciones de acoplamiento convenientes, las  $\mathcal{E}cc$  de todos los transformadores han de ser iguales, lo que implica la siguiente igualdad:

$$C_A = C_B = \dots = C_N \quad (3.2.4)$$



Esto último indica que todos los transformadores trabajan con igual grado de carga.

Además la última especificación que se da en el enunciado de este caso de acoplamiento es que los transformadores también son de la misma potencia, por tanto la intensidad de la carga se reparte por igual entre todas las máquinas.

$$I_{c_A} = I_{c_B} = \dots\dots\dots = I_{c_N} \quad (3.2.5)$$



### 3.3.- ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE IGUAL TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO, RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN Y DISTINTA POTENCIA NOMINAL.

La única diferencia de este caso de acoplamiento con el estudiado en el apartado anterior, es la última especificación dada. En el caso anterior los transformadores acoplados eran de la misma potencia y en este caso la potencia nominal de los transformadores es diferente.

Puesto que en este caso las relaciones de transformación y las tensiones de cortocircuito también son iguales se volverán a cumplir las igualdades 3.2.3 y 3.2.4.

En el apartado anterior se definía el grado de carga de la máquina  $i$  ( $C_i$ ) como el cociente  $I_i / I_{n_i}$ . Puesto que en este caso la potencia de los transformadores no es igual, la corriente nominal de estos tampoco lo será.

Sin embargo al ser el grado de carga el mismo para todos los transformadores la corriente de la carga será proporcional al valor de la corriente nominal de cada uno de los transformadores, o lo que es lo mismo a la potencia nominal de estos.

Por tanto, aunque en este caso no circule la misma cantidad de corriente por cada uno de los transformadores, el grado de carga sí será el mismo y por tanto se podrá aprovechar toda la capacidad de los transformadores.

### 3.4.- ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE IGUAL POTENCIA NOMINAL, RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN Y DISTINTA TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO.

En este caso ya se empiezan a dejar de cumplir las condiciones convenientes que se nombraron en el apartado 2.2., referente a la condiciones de funcionamiento en paralelo. La relación de transformación y la potencia serán las mismas para los dos transformadores, pero en este caso la tensión de cortocircuito será diferente. Esto da lugar a desigualdades en el reparto de la carga y provoca que un transformador asuma más carga que el otro. A consecuencia de ello se tendrá un desaprovechamiento de la potencia del transformador que menos carga asume.

Como se expuso en el apartado 2.4, el valor de la corriente que circula por cada uno de los transformadores solo depende de las impedancias de cortocircuito de los transformadores y de la corriente total de la carga. Y las impedancias de cortocircuito, expresada en  $\Omega$ , dependían de las tensiones de cortocircuito, de la tensión nominal del arrollamiento en el que se este resolviendo el circuito y de la potencia nominal del transformador. Puesto que en este caso la relación de transformación y la potencia deben ser las mismas para los transformadores se prestará atención al valor de la tensión de cortocircuito. El transformador que menos carga asume es aquel cuya impedancia de cortocircuito, y por tanto tensión de cortocircuito, es mayor y el transformador que más carga asume es aquel cuya impedancia de cortocircuito, y por tanto tensión de cortocircuito es menor.

Como ya se dijo en el capítulo II el valor de la impedancia de cortocircuito se va a suponer puramente reactivo, puesto que como se desarrolla en el Anexo B el error cometido al realizar esta hipótesis es muy pequeño y por tanto asumible en este estudio.

Si se tiene un transformador concreto, este se puede acoplar con uno que tenga una tensión de cortocircuito menor que el de éste o con otro que tenga una tensión de cortocircuito mayor que la de éste. A continuación se van a estudiar ambos casos.

**Acoplamiento de un transformador con otro que tenga una tensión de cortocircuito menor.**

Se va a denominar como Trafo A al transformador de referencia y Trafo B al transformador cuya tensión de cortocircuito es menor. El transformador que menos carga asume es el Trafo A. La expresión de la corriente de dicho transformador es la siguiente:

$$I_A = \frac{Z_{cc_B}}{Z_{cc_A} + Z_{cc_B}} \cdot I_T \quad (3.4.1)$$

siendo  $I_T$  la corriente que demanda la carga.

Como se puede ver en la expresión, la impedancia de cortocircuito del Trafo B aparece tanto en el numerador como en el denominador. Esto supone que si la impedancia del Trafo B va siendo cada vez más pequeña, la disminución del cociente de las impedancias es constante, lo que provocará que también sea cada vez más pequeña la corriente que circula por el Trafo A.

Puesto que la potencia del transformador se calcula como:

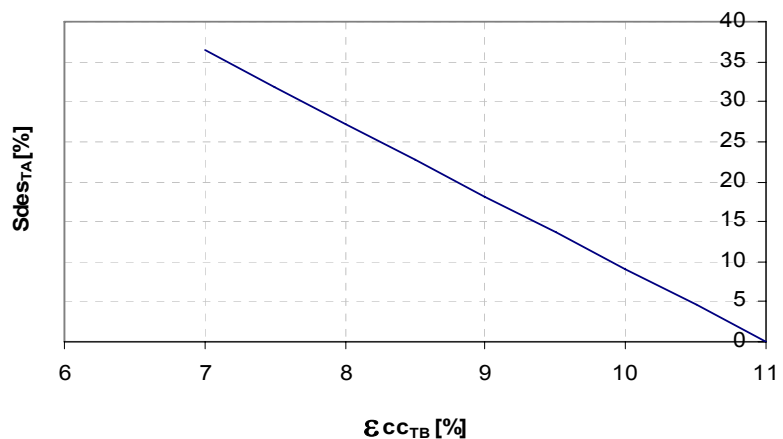
$$S_A = \sqrt{3} \cdot U_{BT} \cdot I_A \quad (3.4.2)$$

Al disminuir la corriente que circula por el Trafo A también se hará más pequeña la potencia.

Sí se tiene un transformador, Trafo A, de 15 MVA, 45 / 16,05 kV y tensión de cortocircuito de 11 %, y se quiere acoplar con otro, Trafo B, de las mismas características, sí se tienen un número de máquinas de estas características cuyos valores de tensión de cortocircuito se encuentran en un rango, entre 7 y 11 %. Se puede observar como evoluciona la potencia desaprovechada del Trafo A en función de los valores que se vayan dando a la tensión de cortocircuito del Trafo B.



$\varepsilon_{CC_{TB}}[\%]$	$S_{des_{TA}}[\%]$
11	0
10,5	4,55
10	9,09
9,5	13,64
9	18,18
8,5	22,73
8	27,27
7,5	31,82
7	36,36



Como se puede observar esta evolución es lineal, la sensibilidad con la que aumenta la potencia desaprovechada es la misma en todos los intervalos, 4,54 % cada aumento de 0,5 % entre la diferencia de las dos tensiones de cortocircuito.

Esta sensibilidad no es la misma para todos los casos, sino que dependerá de la tensión de cortocircuito de los transformadores. Cuanto menor sea la impedancia de cortocircuito del transformador de referencia, Trafo A, y se acople con otros cuya tensión de cortocircuito sea menor que la de éste, mayor será la sensibilidad con la que aumenta la potencia desaprovechada. Para un valor de  $\varepsilon_{CC_{TA}}$  igual a 10 % la sensibilidad con la que se incrementa la potencia desaprovechada, cada incremento de 0,5 % de la diferencia entre las tensiones de cortocircuito de los trafos, es del 5 %. Sin embargo cuanto mayor sea  $\varepsilon_{CC_{TA}}$  menor será la sensibilidad con la que se incrementa la potencia desaprovechada, para un valor de  $\varepsilon_{CC_{TA}}$  del 12 % la sensibilidad con la que se incrementa la potencia desaprovechada, cada incremento de 0,5 % de la diferencia entre las tensiones de cortocircuito de los trafos, es del 4,17 %.

### Acoplamiento de un transformador con otro que tenga una tensión de cortocircuito mayor.

En este caso el Trafo B debe ser el que tenga un valor de tensión de cortocircuito más alto. Esto conlleva a que el transformador que menos carga asuma en este caso sea el Trafo B. La expresión de la corriente de dicho transformador es la siguiente:

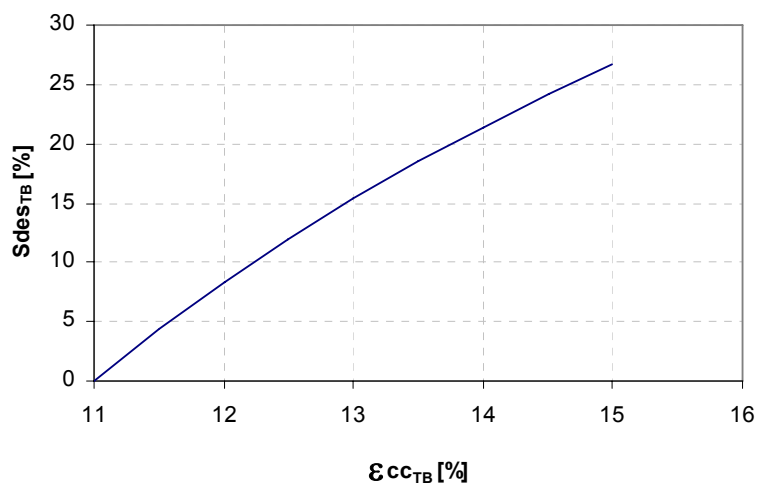
$$I_B = \frac{Z_{CC_A}}{Z_{CC_A} + Z_{CC_B}} \cdot I_T \quad (3.4.3)$$

La impedancia de cortocircuito del Trafo B solo aparece en el denominador. Esto implica que si se va haciendo cada vez más grande el valor de la impedancia de cortocircuito del Trafo B, la evolución del cociente de impedancias de cortocircuito ya no será lineal, el resultado de este cociente será cada vez más pequeño pero esa disminución no será constante.

Esto se puede ver de forma gráfica en la evolución de la potencia desaprovechada a medida que se va incrementando la diferencia entre la tensión de cortocircuito de los dos transformadores acoplados.

Si se retoma el caso del apartado anterior, pero en lugar de ser estar el rango de tensión de cortocircuito del Trafo B entre 7 y 11 %, esta entre 11 y 15 %. La evolución de la potencia desaprovechada en el Trafo B es la siguiente:

$\varepsilon_{CC_{TB}}[\%]$	$S_{des_{TB}}[\%]$
11	0
11,5	4,35
12	8,33
12,5	12
13	15,38
13,5	18,52
14	21,43
14,5	24,14
15	26,67





El resultado gráficamente es muy próximo a una recta, pero no es así. En el primero incremento de 0,5 %, de 11 a 11,5 %, la potencia desaprovechada incrementa un 4,35 %, mientras que para el último incremento, entre 14,5 y 15 % la potencia desaprovechada aumenta un 2,53 %.

Al igual que sucedía en el caso anterior estas sensibilidades no son iguales para todos los casos, y el comportamiento es similar. Cuanto mayor sea el valor de la tensión de cortocircuito del transformador concreto, Trafo A, y se acople con otro cuya tensión de cortocircuito sea mayor que la de éste, la sensibilidad con la que aumenta el desaprovechamiento de potencia será menor.

### 3.5.- ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE IGUAL RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN, DISTINTA POTENCIA NOMINAL Y TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO.

En este caso, al igual que sucedía en el caso del apartado 3.3, aunque los transformadores además de tener distinta tensión de cortocircuito tengan distinta potencia el reparto de la carga será el mismo que si tienen la misma potencia. Es decir, que por el hecho de tener distinta tensión de cortocircuito el reparto de la carga va a desigual. Pero esa desigualdad se va a mantener aunque los transformadores sean de distinta potencia puesto que el reparto de la carga seguirá siendo proporcional a la potencia de cada uno de los transformadores. Por ello el tanto por ciento de potencia desaprovechada será el mismo independientemente de la potencia de los transformadores.

A continuación se va a mostrar como evoluciona el desaprovechamiento de potencia en dos acoplamientos. En el Caso A los dos transformadores son de la misma potencia, 15 MVA, y en el Caso B el Trafo B es de 25 MVA. En ambos casos la relación de transformación de los dos transformadores es la misma 45 / 16,05 kV y para ambos caso la tensión de cortocircuito del Trafo A es 11 %.

Caso A		Caso B	
$\epsilon_{ccTB}[\%]$	Sdes[%]	$\epsilon_{ccTB}[\%]$	Sdes[%]
9	18,18	9	18,18
9,5	13,64	9,5	13,64
10	9,09	10	9,09
10,5	4,55	10,5	4,55
11	0	11	0
11,5	4,35	11,5	4,35
12	8,33	12	8,33
12,5	12	12,5	12
13	15,38	13	15,38

Como se puede observar ambas tablas son idénticas, por tanto en este caso el tener transformadores de diferentes potencias no es un hándicap para el acoplamiento.

### 3.6.- ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE IGUAL POTENCIA NOMINAL, DISTINTA TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO Y RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN.

En este caso tanto la tensión de cortocircuito como la relación de transformación son distintas. Como se vio en apartados anteriores la diferencia entre las tensiones de cortocircuito provocará un desigual reparto de la carga. Al ser diferente la relación de transformación se incumple otra de las condiciones convenientes para tener un acoplamiento óptimo. Esta diferencia da lugar a la aparición de una corriente que circula entre ambos transformadores y que se denomina como “corriente de recirculación”. La expresión que determina el valor de dicha corriente se obtuvo en el apartado 2.5, tras la resolución del circuito eléctrico equivalente en vacío. Dicha expresión es la siguiente:

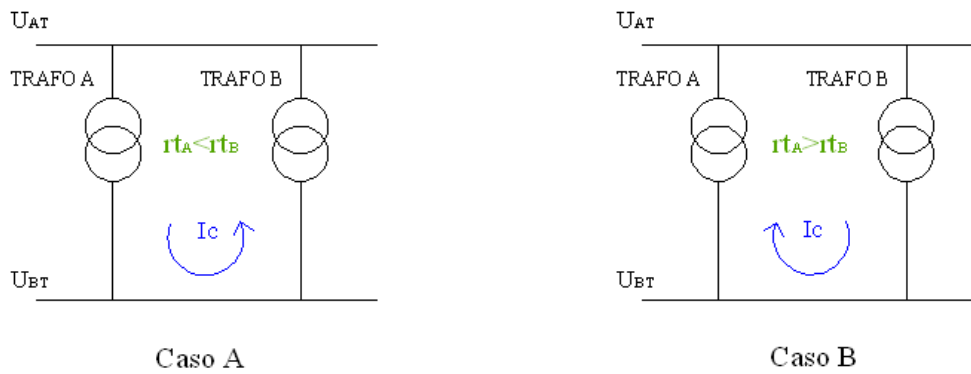
$$I_C = \frac{\frac{U_{AT}}{\sqrt{3} \cdot r_{t_A}} - \frac{U_{AT}}{\sqrt{3} \cdot r_{t_B}}}{Z_{cc_A} + Z_{cc_B}} = \frac{\frac{U_{AT}}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{1}{r_{t_A}} - \frac{1}{r_{t_B}} \right)}{\frac{\varepsilon_{ccA}[\%]}{100} \cdot \frac{Un_{(2)A}^2}{Sn_A} + \frac{\varepsilon_{ccB}[\%]}{100} \cdot \frac{Un_{(2)B}^2}{Sn_B}} \quad (3.6.1)$$

Como se puede ver en la expresión la aparición o no de dicha corriente depende exclusivamente de la diferencia entre las relaciones de transformación. Los factores que aparecen en el denominador solo contribuirán a que el valor sea más grande o más pequeño. Además ésta es totalmente independiente de la carga que se este alimentando.

Otra de las observaciones que se puede hacer en la expresión de la corriente de recirculación es que esta corriente es de carácter reactivo, ya que en el denominador aparece el valor de las dos impedancias de cortocircuito.

Para obtener el valor total de la corriente que circula por cada uno de los transformadores, dependiendo del sentido de la corriente de recirculación, se sumará o restará dicho valor al de la corriente destinada a alimentar la carga.

La corriente de recirculación sale del transformador cuya relación de transformación es menor y llega al transformador cuya relación de transformación es mayor.



**Figura 3.6.1.-** Direcciones de la corriente de recirculación

En el caso A:

$$I_A = I_a + I_c \quad (3.6.2)$$

$$I_B = I_b - I_c \quad (3.6.3)$$

y en el caso B:

$$I_A = I_a - I_c \quad (3.6.4)$$

$$I_B = I_b + I_c \quad (3.6.5)$$

Puesto que la corriente de recirculación es puramente reactiva:

En el caso A:

$$I_A = I_{a(re)} + j(I_{a(im)} + I_c) \quad (3.6.6)$$

$$I_B = I_{b(re)} + j(I_{b(im)} - I_c) \quad (3.6.7)$$

y en el caso B:

$$I_A = I_{a(re)} + j(I_{a(im)} - I_c) \quad (3.6.8)$$

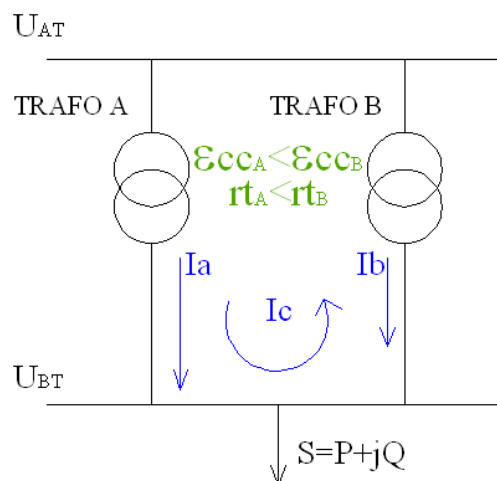
$$I_B = I_{b(re)} + j(I_{b(im)} + I_c) \quad (3.6.9)$$

Por lo general la componente activa de la corriente destinada a alimentar la carga es bastante mayor que la componente reactiva. Y se dice que la corriente de los transformadores que no esta destinada a alimentar la carga no debe ser mayor del 10 % de la corriente asignada. Por ello el peso del valor de la corriente de recirculación en el valor final de la corriente que circula por cada uno de los transformadores será mucho menor que el que tiene la corriente destinada ha alimentar la carga.

De cara a la explotación, la consecuencia que esta corriente tiene es que hace que el transformador del que sale la corriente de recirculación incremente su grado de carga, pudiendo pasar a un estado de sobrecarga en el caso de que el transformador trabaje en niveles de carga próximos a la nominal, y el transformador que recibe la corriente de recirculación se descargue.

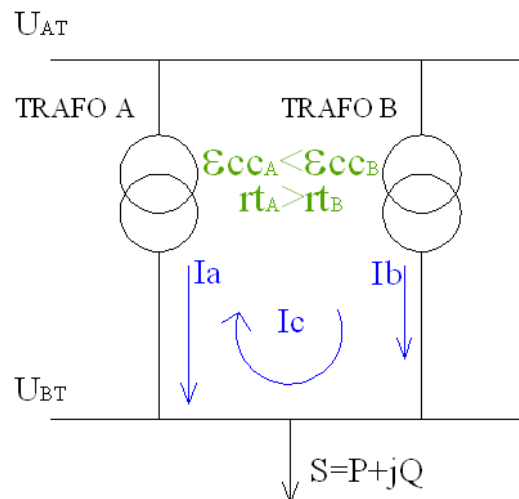
Por tanto la corriente de recirculación contribuye en el valor de la potencia no aprovechada.

Contribuye negativamente cuando del transformador que más carga asume sale la corriente de recirculación, lo cual hace que se cargue antes. Y el transformador que menos carga asume recibe la corriente de recirculación que hace que este se descargue y por tanto la cantidad de potencia desaprovechada en dicho transformador sea mayor.



**Figura 3.6.2.-** Contribución negativa de la corriente de recirculación al desaprovechamiento de potencia.

Y contribuye favorablemente en el caso en el que el transformador que más carga asume recibe la corriente de recirculación, lo que provoca que éste tarde más en llegar al 100% de su capacidad nominal. A su vez el otro transformador puede asumir un poco más de carga, lo que hace que se optimice el valor de potencia desaprovechada en dicho transformador.



**Figura 3.6.3.-** Contribución positiva de la corriente de recirculación al desaprovechamiento de potencia.

En el caso de que la carga no demande nada de potencia reactiva la corriente de recirculación afectará a ambos transformadores. En las ecuaciones 3.6.6 a la 3.6.9 la única componente de la parte imaginaria sería la corriente de recirculación. Y al hacer la suma cuadrática para obtener el módulo de la corriente total que circula por los transformadores dicho valor afecta de la misma manera en todos los casos.

$$|I_A| = \sqrt{(I_{a(re)})^2 + (I_c)^2} \quad (3.6.10)$$

$$|I_B| = \sqrt{(I_{b(re)})^2 + (I_c)^2} \quad (3.6.11)$$



Los transformadores que se estudian en este proyecto están dotados de cambiadores de tomas, por lo general 21 tomas, teniendo una relación de transformación diferente en cada una de las tomas.

Cuando se acoplan dos transformadores de estas características surge la posibilidad de que los mismos puedan trabajar en numerosas combinaciones de tomas. Esto da lugar a la creación de matrices, como las de las figuras 2.6.1 y 2.6.2, donde se pueda comprobar el valor de la corriente de recirculación en cada combinación de tomas.

El hecho de que el valor de la corriente de recirculación sea distinto en cada combinación de tomas supone tener un valor de potencia desaprovechada en cada combinación de tomas. De forma que la potencia no aprovechada variará en función de la combinación de tomas, perteneciente a la diagonal de acoplamiento, en la que estén trabajando los transformadores.

Por lo tanto el efecto que tiene la corriente de recirculación que aparece cuando se acoplan transformares, provistos de cambiadores de tomas, es que hace variar, en función de la combinación de tomas en la que trabajen los transformadores, el valor de potencia no aprovechada obtenido a causa de la diferencia entre la tensión de cortocircuito de ambos. La cuantificación de esta variación se obtendrá una vez que se desarrolle el capítulo de la aplicación práctica, a lo largo del cual se estudiarán numerosos acoplamientos diferentes.

### 3.7.- ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTINTA POTENCIA NOMINAL, DISTINTA TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO Y RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN.

En este caso con respecto al caso anterior, se tiene que la potencia de los transformadores también es diferente. En este caso el tanto por ciento de potencia desaprovechada en función de la potencia de los transformadores.

Esta variación se debe a que el valor de la potencia de los transformadores afecta en el valor de la corriente de recirculación, pero no en el reparto de la carga como ya se vio en los casos de los apartados 3.3 y 3.5

El valor de la potencia en la ecuación 3.6.1 aparece dividiendo en el denominador, por lo que la relación entre la potencia de los transformadores y el valor de la corriente de recirculación será directamente proporcional, si aumenta la potencia de los transformadores aumentará el valor de la corriente de recirculación.

Debido a que esta variación solo afecta a la corriente de recirculación, y como ya se dijo en el apartado anterior este valor tiene un peso pequeño en el valor final de la corriente que circula por los transformadores, las variaciones en el porcentaje de la potencia no aprovechada que se pueden producir de tener dos transformadores de la misma potencia a tener dos transformadores de distinta potencia serán pequeñas, ya que no es recomendable que se acoplen transformadores cuya diferencia de potencia sea muy grande puesto que uno no podría cubrir el fallo del otro.



## Capítulo IV

### **Desarrollo de una aplicación informática para el estudio del acoplamiento de transformadores de potencia.**

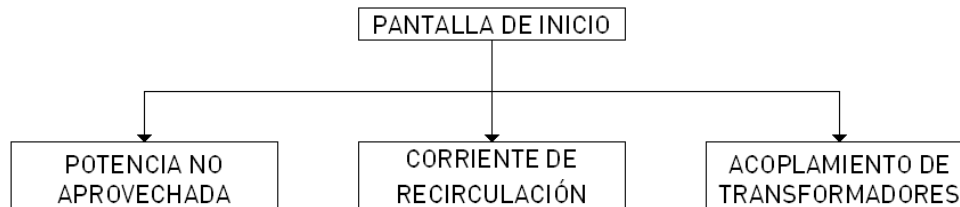
Para realizar estudios sobre el acoplamiento de transformadores en paralelo se ha creado una herramienta informática. Con ella se pretende obtener distintos estudios sobre los principales efectos que se producen cuando se acoplan dos transformadores, potencia no aprovechada por desigualdad en el reparto de carga y recirculación de corriente, y ver como afectan dichos efectos a la explotación en paralelo de estos.

En este capítulo se pretende describir dicha aplicación a modo de manual de usuario. Primero se dará una visión global de la aplicación de forma que el usuario pueda ver fácilmente como esta estructurada y que posibilidades ofrece.

La aplicación se divide en tres módulos. El primero permite estudiar la potencia no aprovechada cuando existen diferencias en el reparto de la carga, pudiendo estudiarse un acoplamiento concreto o el acoplamiento de un tipo de transformador del cual se tenga un número de máquinas con distinta tensión de cortocircuito. En el segundo módulo se estudia la corriente de recirculación para todas las combinaciones de tomas posibles entre dos transformadores, pudiendo conocer para cada una de ellas cual es el reparto de potencias y una estimación aproximada de la potencia máxima que podrían dar ambos transformadores trabajando, en la combinación de tomas elegida. El último módulo estudia el acoplamiento de dos o tres transformadores en paralelo, de forma que pudiendo estudiar las distintas posibilidades de acoplamiento entre los dos o tres transformadores se obtenga la manera de explotación más eficiente.

## 4.1.- ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN

Para obtener una visión global de la aplicación a continuación se va mostrar el flujograma de esta:



**Figura 4.1.1.-** Flujograma de la aplicación

Cuando se inicie la aplicación, el usuario a la primera pantalla que tendrá acceso será a la pantalla denominada como “pantalla de inicio” y esta pantalla a su vez le ofrecerá al usuario poder entrar en otros tres módulos, en los cuales se podrán realizar los distintos estudios sobre los principales efectos que aparecen durante el acoplamiento.

A lo largo del manual se va a explicar todas las pantallas que se presentan ante el usuario, describiendo con detalle su funcionalidad y la posibilidad de estudio que ofrece.

Las pantallas, a excepción de la pantalla de inicio, se pueden dividir en tres áreas:

- Área de petición de datos al usuario
- Área de botones que posibilitan los cálculos
- Área de resultados

A continuación se explica brevemente el contenido de dichas áreas:

- Área de datos: Donde se pide al usuario los datos que debe introducir para poder realizar los cálculos del acoplamiento. Esta área se subdivide a su vez en otras tres áreas más pequeñas correspondientes a los datos que se piden de los transformadores, datos de la tensión en barras del sistema que se desea estudiar y en algunos casos los datos de la carga que los transformadores deben alimentar.
- Área de botones: Este área la conforman los botones correspondientes a los cálculos que realiza el módulo en el cuál se este trabajando, y los botones comunes a todos los módulos de la aplicación, el botón menú principal, el botón nuevo estudio, el botón ver código de colores y el botón salir.
- Área de resultados: Este área esta perfectamente delimitada ya sea por tablas o por los dibujos dentro de los cuales se expresan los resultados obtenidos. En dichas zonas se muestran los resultados que se obtienen de la aplicación y a lo largo de los próximos apartados de explica como deben ser interpretados los resultados obtenidos en cada uno de los módulos.

Existe una serie de utilidades comunes a todas las pantallas. Dichas utilidades se explicarán en el último punto del capítulo. De esta forma el usuario podrá conocer todas las posibilidades que la aplicación le ofrece.

## 4.2.- PANTALLA DE INICIO

Cuando se inicie la aplicación la primera pantalla que se presentara ante el usuario será la siguiente:



**Figura 4.2.1.-** Pantalla de inicio

En dicha pantalla aparecen los botones que darán paso al uso de dicha aplicación. Tres botones correspondientes a lo que se denomina como módulos de la aplicación y el botón salir.

Los módulos que ofrece la aplicación son:

- o Potencia no aprovechada: Ofrece la posibilidad de obtener un estudio sobre la cantidad de potencia que no se aprovecha debido a la desigualdad en reparto de la carga que deben alimentar los transformadores. Posibilitara la elección entre el estudio de dos transformadores concretos, o el estudio de un modelo de



transformador del cual se tienen numerosas máquinas con distintos valores de tensión de cortocircuito.

- Corriente de recirculación: Da la posibilidad al usuario de conocer la recirculación de corriente que se genera al acoplar dos transformadores con distinta relación de transformación. El usuario obtendrá una tabla con todas las posibles combinaciones de tomas de los transformadores. Además para cada una de las tomas se mostrará el sentido de la corriente de recirculación, el reparto de potencias, aparente, activa y reactiva, y una estimación aproximada de la potencia máxima que podrán dar los transformadores en conjunto antes de que alguno de ellos trabaje sobrecargado.
- Acoplamiento de transformadores: Mediante ese módulo el usuario podrá simular el acoplamiento de dos o tres transformadores, obteniendo datos sobre la potencia, índice de carga, rendimientos y todas las componentes de las corrientes que circulan por el circuito. En el caso de que se desee acoplar tres transformadores la aplicación ofrece la posibilidad de estudiar las distintas posibles combinaciones de transformadores para alimentar la carga deseada.



### 4.3.- MÓDULO POTENCIA NO APROVECHADA

El módulo potencia no aprovechada, permite al usuario obtener un estudio sobre el reparto de potencia cuando se acoplan dos transformadores con distinta tensión de cortocircuito.

Este módulo ofrece dos posibilidades de estudio, estudiar dos transformadores concretos con sus correspondientes tensiones de cortocircuito, o estudiar un tipo de transformador del cual se tengan distintos valores de tensión de cortocircuito, ya que la aplicación posibilita estudiar un rango de tensiones de cortocircuito.

El usuario deberá introducir una serie de datos sobre dos transformadores y sobre la tensión en las barras que existiría en el acoplamiento. Posteriormente deberá elegir entre las dos opciones posibles, estudiar un valor concreto o estudiar un rango de valores de tensiones de cortocircuito. Una vez introducidos los datos que se pide en cada una de las opciones aparece la tabla que muestra los resultados obtenidos.

En la figura siguiente se presenta una descripción de la pantalla correspondiente al módulo potencia no aprovechada tras simular un estudio, destacando las distintas partes de esta.

TENSION A	TENSION B	TENSION EN BARRA	ESTUDIO	ESTUDIO	ESTUDIO	ESTUDIO	ESTUDIO	ESTUDIO
0,00	28,28	4,97	10,25	10,00	48,18	100,00	51,82	
0,50	28,71	4,97	10,71	10,00	78,53	100,00	21,47	
0,50	28,59	5,21	11,59	15,00	77,57	100,00	22,43	
0,50	27,27	2,93	12,27	15,00	81,82	100,00	18,18	
2,00	27,76	2,28	12,76	15,00	86,54	100,00	13,46	
10,00	28,44	1,28	13,44	15,00	91,71	100,00	8,29	
10,00	27,28	0,88	14,28	15,00	95,48	100,00	4,52	
11,00	30,00	0,00	15,00	15,00	100,00	100,00	0,00	
11,50	29,26	0,65	15,00	15,26	100,00	95,65	4,35	
12,00	28,76	1,25	15,00	13,76	100,00	91,67	8,33	
12,00	28,80	1,00	15,00	13,80	100,00	88,00	12,00	
15,00	27,47	2,21	15,00	12,47	100,00	84,62	15,38	
15,00	27,22	2,78	15,00	12,22	100,00	81,68	18,32	
15,00	26,79	3,21	15,00	11,79	100,00	78,57	21,43	
15,00	26,28	3,72	15,00	11,28	100,00	75,04	24,96	
15,00	26,00	4,00	15,00	11,00	100,00	73,08	26,92	

Figura 4.3.1.- Descripción de la pantalla del módulo potencia no aprovechada.

## DATOS PEDIDOS AL USUARIO

En este apartado se va a describir los datos que se piden al usuario, clasificando estos en datos de los transformadores y tensión en las barras. Para su explicación se presenta un zoom sobre la pantalla descrita anteriormente en la Figura 4.3.1 para la fácil comprensión y ubicación de estos.

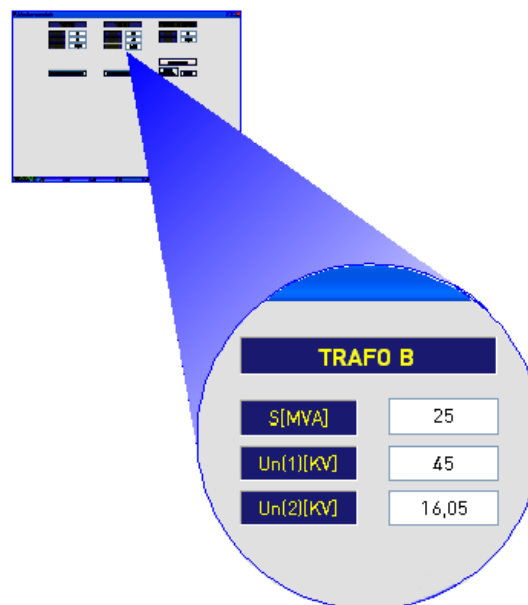
### Datos de los transformadores

En la siguiente tabla se muestran los datos de los transformadores que se solicitan al usuario. En ella se muestra el dato pedido, la unidad en que debe ser introducido y la descripción de lo que representa dicho dato.

DATO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
S	MVA	Potencia del transformador
Un(1)	kV	Tensión en el primario
Un(2)	kV	Tensión en el secundario

**Tabla 4.3.1.-** Datos de los transformadores pedidos al usuario.

A continuación se mostrara una figura en la cual se muestra una extracción en forma de zoom sobre los datos de los dos transformadores.



**Figura 4.3.2.-** Zoom sobre los datos de los transformadores

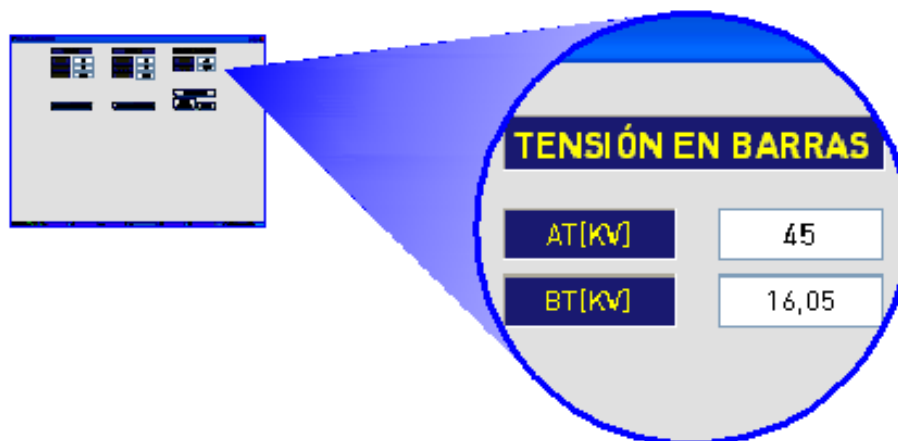
### Tensión en las barras

Para finalizar la inserción de datos, al usuario se le pide que introduzca la tensión en las barras.

Al igual que para los datos de los transformadores, y para evitar confusiones, en la siguiente tabla se describirán los datos pedidos.

DATO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
AT	kV	Tensión en la barra de alta tensión
BT	kV	Tensión en la barra de baja tensión

**Tabla 4.3.2.-** Datos de las tensiones en las barras.



**Figura 4.3.3.-** Zoom sobre la tensión en barras

### **BOTONES DE ESTUDIO**

Como se dijo anteriormente, al usuario se le dan dos opciones, o estudiar un valor concreto de  $U_{cc}$  o estudiar un rango de valores. Para hacer efectiva la elección bastara con pulsar el botón correspondiente.



**Figura 4.3.4.-** Botones de estudio

Tras hacer clic en los botones, lo primero que se pedirán serán los datos de las tensiones de cortocircuito de los transformadores. En el caso de elegir estudiar una  $U_{cc}$  concreta se pedirán las tensiones de cortocircuito de los dos transformadores, mientras que si se elige estudiar un rango de  $U_{cc}$  se pedirá el valor de la tensión de cortocircuito del trafo A, los valores máximo y mínimo del rango de tensiones de cortocircuito del trafo B y el intervalo entre los valores.

A medida que se van rellenando los datos pedidos una vez que se hace clic en cualquiera de los botones, estos van apareciendo en la pantalla principal. En la siguiente figura se muestra el aspecto de la pantalla antes de hacer la elección y después de haber elegido la opción “Estudiar rango de  $U_{cc}$ ” y haber introducido todos los datos que se piden.

(a)

TRAFO A		TRAFO B	
S[MVA]	15	S[MVA]	25
$U_n(1)$ [KV]	45	$U_n(1)$ [KV]	45
$U_n(2)$ [KV]	16,05	$U_n(2)$ [KV]	16,05
ESTUDIAR $U_{cc}$ CONCRETA		ESTUDIAR RANGO DE $U_{cc}$	

(b)

TRAFO A		TRAFO B	
S[MVA]	15	S[MVA]	25
$U_n(1)$ [KV]	45	$U_n(1)$ [KV]	45
$U_n(2)$ [KV]	16,05	$U_n(2)$ [KV]	16,05
$U_{cc}$ [%]	11	$U_{cc}$ [%] min	7
		$U_{cc}$ [%] max	15
		Intervalo	0,5
ESTUDIAR $U_{cc}$ CONCRETA		ESTUDIAR RANGO DE $U_{cc}$	

**Figura 4.3.5.-** (a) Pantalla antes de la elección (b) Pantalla después de la elección

## TABLA DE RESULTADOS

Seguidamente se va a realizar una descripción de la tabla de resultados. En las Figuras 4.3.6 y 4.3.7 se muestra la tabla de resultados obtenida tras los distintos estudios que se pueden hacer en este módulo de la aplicación.

Ucc TB [%]	S max [MVA]	S des [MVA]	S TA [MVA]	S TB [MVA]	C TA [%]	C TB [%]	S des [%]
13	36,15	3,85	15,00	21,15	100,00	84,62	15,38

Figura 4.3.6.- Tabla de resultados del estudio de Ucc concreta

Ucc TB [%]	S max [MVA]	S des [MVA]	S TA [MVA]	S TB [MVA]	C TA [%]	C TB [%]	S des [%]
7	24,55	5,45	9,55	15,00	63,64	100,00	36,36
7,5	25,23	4,77	10,23	15,00	68,18	100,00	31,82
8	25,91	4,09	10,91	15,00	72,73	100,00	27,27
8,5	26,59	3,41	11,59	15,00	77,27	100,00	22,73
9	27,27	2,73	12,27	15,00	81,82	100,00	18,18
9,5	27,95	2,05	12,95	15,00	86,36	100,00	13,64
10	28,64	1,36	13,64	15,00	90,91	100,00	9,09
10,5	29,32	0,68	14,32	15,00	95,45	100,00	4,55
11	30,00	0,00	15,00	15,00	100,00	100,00	0,00
11,5	29,35	0,65	15,00	14,35	100,00	95,65	4,35
12	28,75	1,25	15,00	13,75	100,00	91,67	8,33
12,5	28,20	1,80	15,00	13,20	100,00	88,00	12,00
13	27,69	2,31	15,00	12,69	100,00	84,62	15,38
13,5	27,22	2,78	15,00	12,22	100,00	81,48	18,52
14	26,79	3,21	15,00	11,79	100,00	78,57	21,43
14,5	26,38	3,62	15,00	11,38	100,00	75,86	24,14
15	26,00	4,00	15,00	11,00	100,00	73,33	26,67

Figura 4.3.7.- Tabla de resultados del estudio de rango de Ucc

Al usuario en ningún momento se le piden datos sobre la carga que se desea colgar de los transformadores, esto se debe a que **los cálculos se han realizado para la máxima carga que pueden dar los transformadores con uno de ellos trabajando al 100% de su índice de carga** y el otro siempre por debajo de este valor. De esta forma se puede conocer la potencia máxima que pueden dar en conjunto sin que ninguno de ellos trabaje en sobrecarga.

Tras esta aclaración se muestra una tabla especificando los resultados que se obtienen en cada columna, detallando la unidad en la que son expresados y una breve descripción de lo que representan:

RESULTADOS	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
S max	MVA	Potencia máxima que pueden dar los transformadores
S des	MVA	Potencia no aprovechada
S TA	MVA	Potencia que carga el TRAF0 A
S TB	MVA	Potencia que carga el TRAF0 B
C TA	%	Índice de carga del TRAF0 A
C TB	%	Índice de carga del TRAF0 B
S des	%	Potencia no aprovechada en % del transformador que no se carga por completo

**Tabla 4.3.3.-** Descripción del contenido de la tabla de resultados.

En la tabla, las casillas de la última columna aparecen de distintos colores, esto se debe al criterio establecido para determinar si el acoplamiento entre los transformadores se considera bueno o no.

El código de colores es el siguiente:

- Color Verde: La potencia desaprovechada es menor del 10 % de la potencia nominal del transformador que no se carga por completo. El acoplamiento será bueno.
- Color Amarillo: La potencia desaprovechada esta entre el 10 y el 25 % de la potencia nominal del transformador que no se carga por completo. El acoplamiento será regular.
- Color Rojo: La potencia desaprovechada es mayor del 25 % de la potencia nominal del transformador que no se carga por completo. El acoplamiento será malo.

#### 4.4.- MÓDULO CORRIENTE DE RECIRCULACIÓN

El módulo corriente de recirculación permite realizar un estudio sobre la corriente que recircula por los transformadores cuando estos son acoplados y existen diferencias en las relaciones de transformación.

Para dicho estudio se calcula una matriz que muestra el valor de la corriente de recirculación para todas las posibles combinaciones de tomas en las que pueden trabajar los transformadores.

Las combinaciones de tomas que conforman la diagonal de acoplamiento aparecerán sombreadas de distinto color que el resto. Y este color dependerá del índice de carga de los transformadores.

Haciendo clic sobre una celda de la matriz se podrá saber el sentido de la corriente de recirculación, la potencia que dará cada uno de los transformadores, tanto potencia aparente como potencia activa y reactiva, y una estimación de la potencia máxima que podrán dar ambos transformadores en conjunto.

Datos de la carga

Tensión en barras

Sentido de la corriente de recirculación

Datos de los trafos

Matriz de resultados

Resultados del reparto de potencia

Botón Calcular Matriz

Botón Ver código de colores

Botón Nuevo Estudio

Botón Menú Principal

Botón Salir

Figura 4.4.1.- Pantalla del módulo corriente de recirculación

El uso de este módulo es muy sencillo y parecido al descrito en el apartado anterior, bastara con introducir los datos que se piden de los transformadores, de la carga que se desea alimentar y de la tensión en las barras, hacer clic en el botón calcular matriz para obtener la matriz de resultados, y posteriormente hacer clic en cada celda para obtener más información sobre esa combinación de tomas.

## DATOS PEDIDOS AL USUARIO

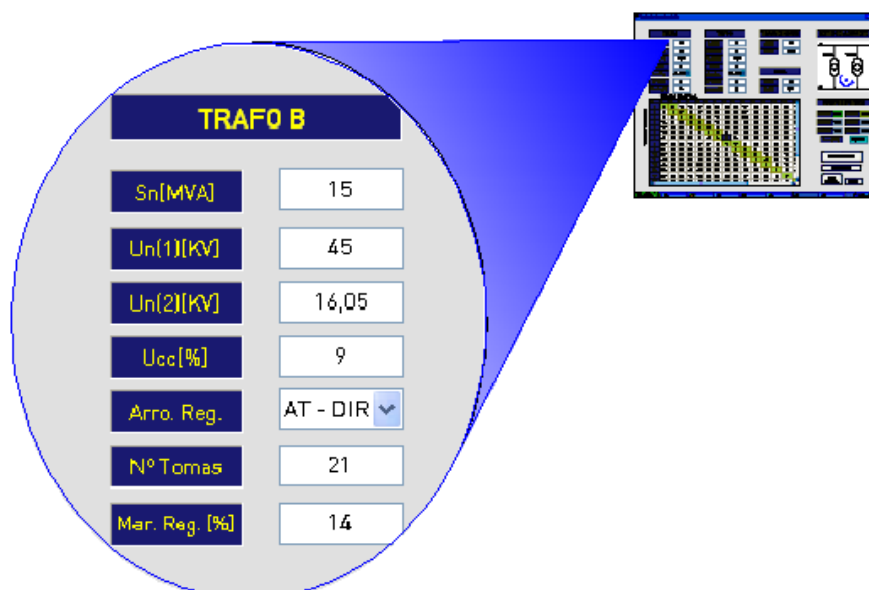
### Datos de los transformadores

A continuación se va a describir todos los datos que se piden al usuario sobre los transformadores que se desea acoplar. Estos se describen en la siguiente tabla:

DATO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
S	MVA	Potencia del transformador
Un(1)	kV	Tensión en el primario
Un(2)	kV	Tensión en el secundario
Ucc	%	Tensión de cortocircuito
Arro. Reg.		Tipo de cambiador de tomas en carga.
Nº Tomas		Número de tomas del cambiador de tomas en carga
Mar. Reg.	%	Margen de regulación del cambiador de tomas en carga

**Tabla 4.4.1.-** Datos de los transformadores pedidos al usuario

En la Figura 4.4.2 se muestra un zoom sobre la parte de la pantalla del módulo de corriente de recirculación correspondiente a los datos que se piden de los transformadores. Este zoom se realiza sobre los datos pedidos del TRAF0 B pero se podría haber realizada sobre cualquiera de los datos pedidos de cualquiera de los dos transformadores, puesto que los datos pedidos para ambos transformadores son los mismos.



**Figura 4.4.2.-** Zoom datos pedidos en los transformadores



Además de los datos mostrados en la tabla anterior, como se puede ver en la Figura 4.4.2 al usuario se le pide que indique en que arrollamiento se encuentra el cambiador de tomas y el sentido de este, para ello, la aplicación permite al usuario la elección entre cuatro tipos de arrollamientos de regulación:

- AT – DIR: Cambiador de tomas situado en el arrollamiento de alta tensión y de sentido directo.
- AT – INV: Cambiador de tomas situado en el arrollamiento de alta tensión y de sentido inverso.
- BT – DIR: Cambiador de tomas situado en el arrollamiento de baja tensión y de sentido directo.
- BT – INV: Cambiador de tomas situado en el arrollamiento de baja tensión y de sentido inverso.

El criterio establecido para determinar el sentido de los cambiadores de tomas de los transformadores se explica en el Anexo A, en su apartado A.1.1. En él además de establecer los criterios, se muestra la parte de la placa de características a partir de la cual se puede determinar el sentido del cambiador de tomas.

#### Tensión en las barras

Al igual que en el módulo potencia no aprovechada al usuario también se le pide que introduzca la tensión en las barras del sistema que quiere calcular.

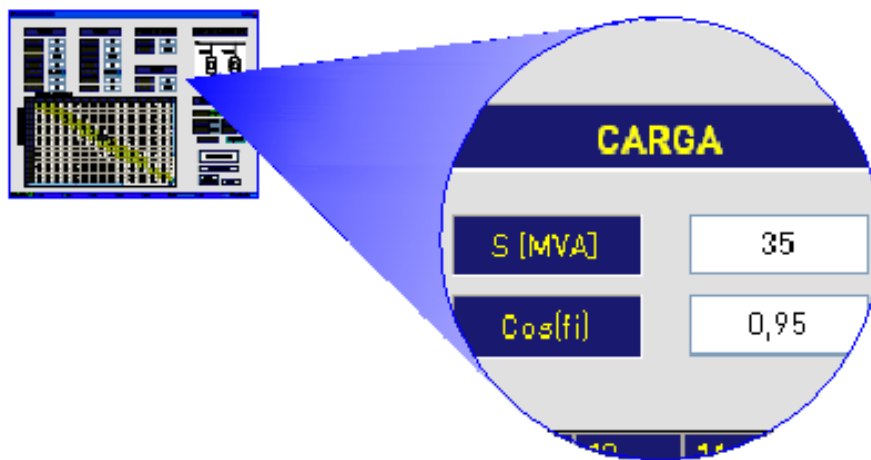
<b>DATO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
AT	kV	Tensión en la barra de alta tensión
BT	kV	Tensión en la barra de baja tensión

**Tabla 4.4.2.-** Tensión en las barras.

### Datos de la carga

De la carga únicamente se piden dos datos, la potencia que va a demandar y el factor de potencia o  $\cos(\varphi)$ .

Al igual que en los recuadros de los datos de los transformadores, cada dato va seguido de la unidad en la que se debe introducir. Como se puede ver en la siguiente figura, la potencia (S) va seguida de la unidad en la que se desea sea introducida (MVA).



**Figura 4.4.3.-** Zoom sobre los datos de la carga.

## MATRIZ DE RESULTADOS

Tras hacer clic en el botón Calcular matriz se mostrara en la pantalla la siguiente tabla:

Ic	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	38	76	116	157	198	241	285	331	377	425	474	524	576	
2	38	0	39	78	119	161	204	248	293	339	387	436	487	539	
3	76	39	0	40	80	122	165	209	254	301	348	397	448	500	
4	116	78	40	0	41	82	125	169	215	261	309	358	408	460	
5	157	119	80	41	0	42	85	129	174	220	268	317	368	420	
6	198	161	122	82	42	0	43	87	132	179	226	275	326	378	
7	241	204	165	125	85	43	0	44	89	136	183	233	283	335	
8	285	248	209	169	129	87	44	0	45	92	139	189	239	291	
9	331	293	254	215	174	132	89	45	0	46	94	143	194	246	
10	377	339	301	261	220	179	136	92	46	0	48	97	147	199	
11	425	387	348	309	268	226	183	139	94	48	0	49	100	152	
12	474	436	397	358	317	275	233	189	143	97	49	0	51	103	
13	524	487	448	408	368	326	283	239	194	147	100	51	0	52	
14	576	539	500	460	420	378	335	291	246	199	152	103	52	0	
15	630	592	554	514	473	431	389	345	299	253	205	156	106	54	

Figura 4.4.4.- Matriz de resultados

En dicha tabla se muestra la corriente circulación para todas las posibles combinaciones de tomas que pueden darse.

Además de esto se dibuja la diagonal de acoplamiento sombreando aquellas combinaciones de tomas que cumplen con las condiciones puestas por UFD en su sistema SCADA, respecto al inadecuado reparto de reactiva:

$$\left| \frac{Q_A}{S_{n_A}} - \frac{Q_B}{S_{n_B}} \right| < 0.09 \quad (4.4.1)$$

El código de colores establecido para las combinaciones sombreadas, en función de los índices de carga de los transformadores, es:

- Color Verde: Los dos transformadores trabajan por debajo del 90 % de su índice de carga.
- Color Verde-Amarillo: Uno de los transformadores trabaja por debajo del 90 % de su índice de carga y el otro transformador ente el 90 y 100 %.

- Color Amarillo: Los dos transformadores trabajan entre el 90 y el 100 % de su índice de carga.
- Color Naranja: Uno de los transformadores trabaja ente el 90 y 100 % de su índice de carga y el otro supera el 100 %.
- Color Rojo: Los dos transformadores superan el 100 % de su índice de carga.

Para conocer el sentido de la corriente de circulación se deberá hacer clic sobre aquella celda para la cual se desee conocer dicha información. Tras hacer clic en la celda, en el dibujo de la parte superior derecha situado bajo el título “sentido de la corriente”, se mostrara el sentido que adopta la corriente tal como se aprecia en la siguiente figura:

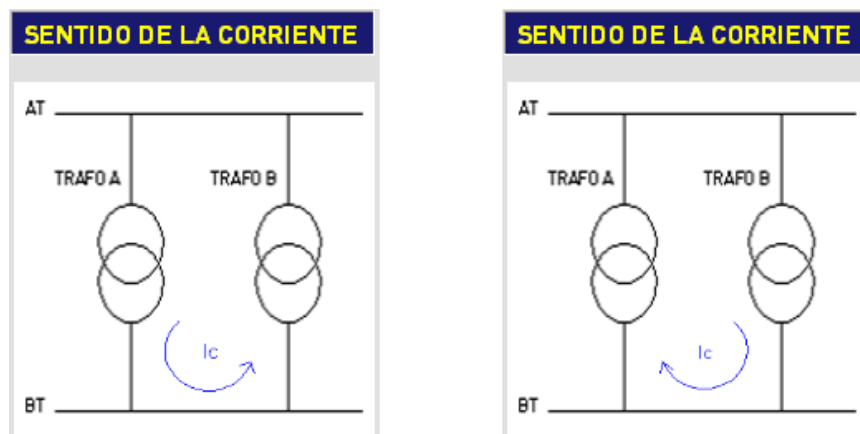


Figura 4.4.5.- Sentidos de la corriente de recirculación

En la figura se pueden ver los dos posibles sentidos que puede tomar la corriente, en el caso de que no exista corriente de recirculación, es decir, en la tabla de resultados aparezca un 0, en el dibujo no aparecerá nada.

## REPARTO DE POTENCIA

Cuando se hace clic en una de las celdas de la matriz, además de aparecer el sentido de la corriente de recirculación para dicha combinación de tomas, se rellenan todas las celdas correspondientes al reparto de potencia entre los transformadores, de forma que se obtienen los datos de la potencia que suministrará cada uno de los transformadores acoplados, desglosándose en potencia aparente, activa y reactiva.

Además de estos datos sobre las potencias suministradas, se ofrece un dato aproximado de la potencia máxima que podrán dar los transformadores en conjunto sin que ninguno de los dos trabaje sobrecargado, para la combinación de tomas elegida.

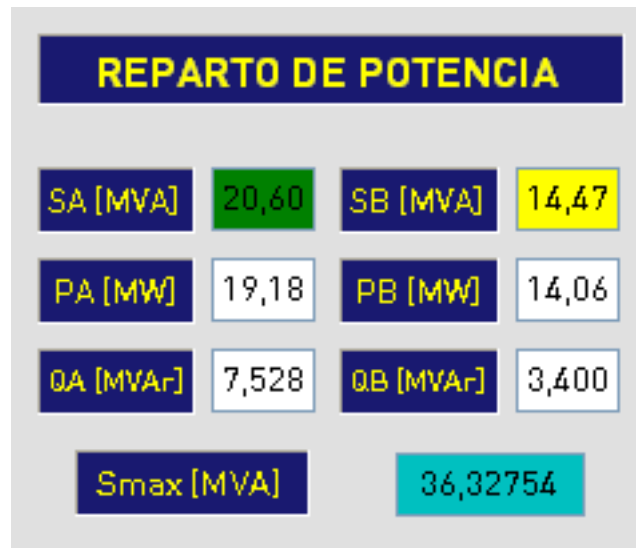


Figura 4.4.6.- Reparto de potencia en los transformadores

Como se puede ver en la Figura 4.4.6 las casillas de la potencia aparente aparecen de distinto color. También se ha establecido un código de colores para estas casillas en función del índice de carga de los transformadores:

- Color Verde: si el transformador trabaja por debajo del 90 % de su índice de carga.
- Color Amarillo: si el transformador trabaja entre el 90 y el 100 % de su índice de carga.
- Color Rojo: si el transformador trabaja por encima del 100 % de su índice de carga.

#### 4.5.- MÓDULO ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES

El tercer y último módulo de la aplicación se encarga del estudio completo del acoplamiento de transformadores en paralelo. Mostrando resultados de las potencias, rendimientos e índices de carga de cada transformador, y de las corrientes de los transformadores, tanto de las destinadas a alimentar la carga como las de recirculación.

En dicho módulo se podrá simular el acoplamiento de dos o de tres transformadores. Además en el caso de que se tengan tres transformadores, se ofrece la posibilidad de estudiar las cuatro posibles opciones de acoplamiento que se dan, dando la posibilidad al usuario ver como se comportan los transformadores en cada una de ellas y elegir para una carga dada cual es la forma de explotación más eficiente.

La forma de utilizar este módulo es exactamente la misma que los dos anteriores, al usuario se le piden los datos de los transformadores, de la tensión en barras y los datos de la carga que desea alimentar, y una vez que el usuario haga clic en cualquiera de los cuatro botones de acoplamiento posibles los resultados se mostraran en pantalla, en el área destinado para ello.

En la siguiente figura se muestra una descripción de la pantalla del módulo acoplamiento de transformadores, remarcando mediante círculos las distintas áreas que componen esta pantalla.

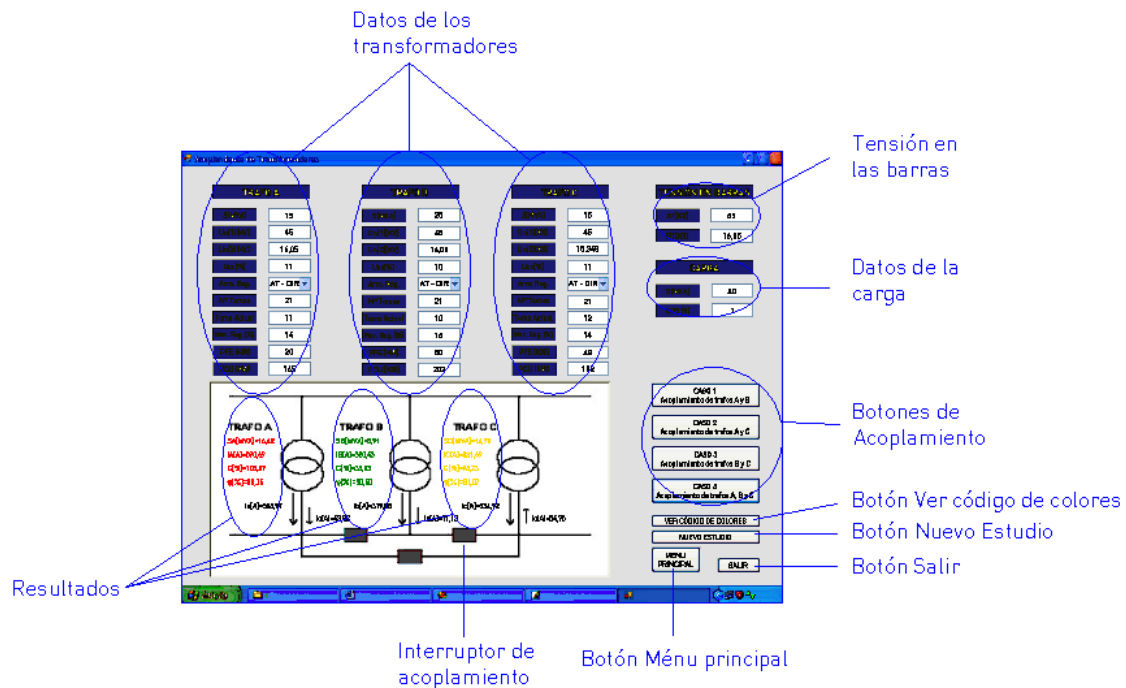


Figura 4.5.1- Descripción de la pantalla del módulo acoplamiento de transformadores.

## DATOS PEDIDOS AL USUARIO

### Datos de los transformadores

En la aplicación aparecen los datos correspondientes a tres transformadores, denominados como TRAFIO A, TRAFIO B y TRAFIO C. Entre los datos que se piden sobre estos tres transformadores no existe ninguna diferencia. En la Figura 4.5.2 se muestra en detalle los datos que se piden para el TRAFIO B.

TRAFO B	
S [MVA]	25
Un(1) [kV]	45
Un(2) [kV]	16,05
Ucc [%]	10
Arro. Reg.	AT - DIR
Nº Tomas	21
Toma Actual	10
Mar. Reg. [%]	14
PFE [kW]	57
PCU [kW]	202

Figura 4.5.2.- Zoom sobre los datos de los transformadores.

Como se puede apreciar en la figura, siempre se adjunta al lado del dato la unidad en la que este debe de ser introducido para obtener unos resultados coherentes, puesto que dichas unidades son las que se han empleado durante la programación. Cualquier diferencia existente entre las unidades en las que se piden los datos y las unidades en las que se rellenan los cuadros provocara que los resultados obtenidos no sean verídicos.

En la siguiente tabla se detalla con más claridad los datos pedidos para evitar errores, debido a la utilización de algunas abreviaturas:

DATO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
S	MVA	Potencia del transformador
Un(1)	kV	Tensión en el primario
Un(2)	kV	Tensión en el secundario
Ucc	%	Tensión de cortocircuito
Nº Tomas		Número de tomas del cambiador de tomas en carga
Toma Actual		Toma en la que opera el cambiador de tomas en carga
Mar. Reg.	%	Margen de regulación del cambiador de tomas en carga
PFE	kW	Pérdidas en el hierro
PCU	kW	Pérdidas en el cobre

Tabla 4.5.1.- Datos de los transformadores pedidos al usuario.



Al igual que en el módulo de corriente de circulación al usuario se le pide que indique el arrollamiento en el que se encuentra el cambiador de tomas en carga y el sentido de este, manteniendo las cuatro mismas posibilidades que se ofrecen al usuario en el módulo corriente de recirculación.

Todos los datos pedidos se pueden encontrar en las placas de características de los transformadores y en caso de no encontrarse alguno de ellos como las pérdidas tanto en el hierro como en el cobre, que en algunas placas no vienen recogidas, se pueden obtenerse de los protocolos de ensayo de dichos transformadores.

#### Datos de la carga

Los datos de la carga que se deben introducir serán los mismos que para el módulo de la corriente de recirculación.

<b>DATO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
S	MVA	Potencia demandada por la carga
Cos ( $\varphi$ )		f.d.p de la carga

**Tabla 4.5.2.-** Datos de la carga.

#### Tensión en las barras

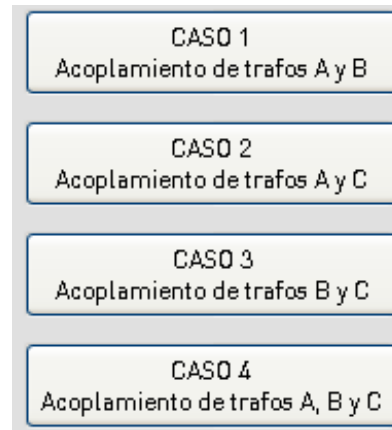
Como en los dos módulos descritos anteriormente, en este caso también se solicita al usuario que introduzca la tensión en las barras del sistema para poder realizar el estudio del acoplamiento.

<b>DATO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
AT	kV	Tensión en la barra de alta tensión
BT	kV	Tensión en la barra de baja tensión

**Tabla 4.5.3.-** Datos de las tensiones en las barras.

## BOTONES DE ACOPLAMIENTO

Para el estudio del acoplamiento se dan cuatro posibilidades, estas cuatro posibilidades se corresponden con los cuatro botones de acoplamiento que aparecen en la pantalla y se muestran a continuación en detalle.



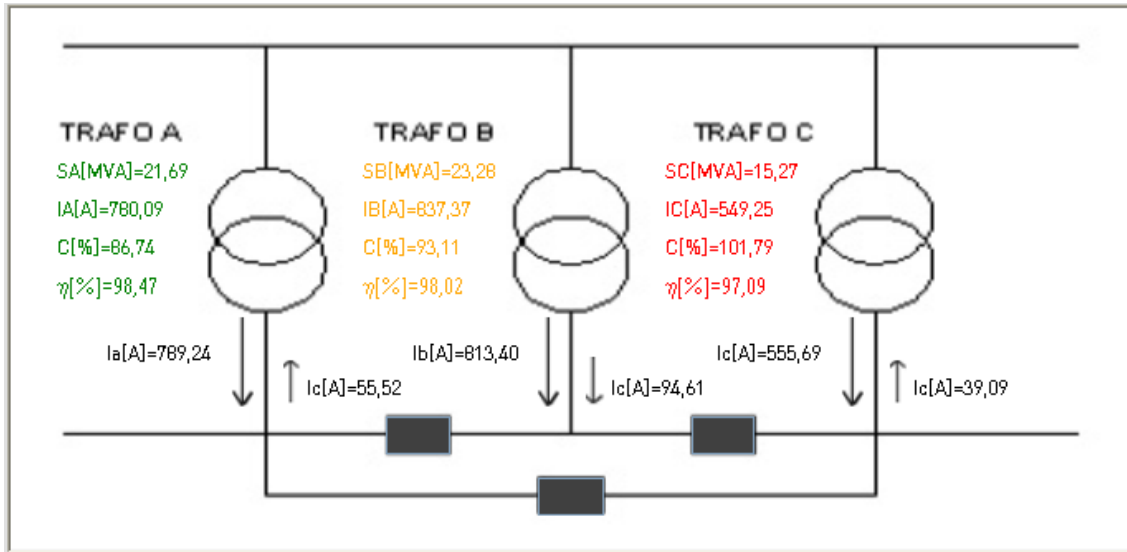
**Figura 4.5.3.-** Botones de acoplamiento.

Estos botones son completamente independientes y permiten calcular el acoplamiento entre los transformadores especificados dentro del botón.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados que se obtienen, tras pulsar cualquiera de los cuatro botones de acoplamiento, se muestran en la parte inferior de la pantalla, sobre el esquema de los tres transformadores.

En la siguiente figura se muestra como se presentan los resultados obtenidos cuando se pulsa el botón de acoplamiento correspondiente al caso 4, el cual calcula el acoplamiento de los tres transformadores.



**Figura 4.5.4.-** Resultados obtenidos.

Como se puede ver en la Figura 4.5.4 los resultados de los transformadores se muestran de distintos colores. Esto se debe a que al igual que en los casos anteriores también se ha establecido un código de colores para designar el estado de cada transformador en función del grado de carga en el que trabajen.

- Color Verde: El transformador trabaja por debajo del 90 % de su índice de carga.
- Color Amarillo: El transformador trabaja entre el 90 y 100 % de su índice de carga.
- Color Rojo: El transformador trabaja por encima del 100 % de su índice de carga.

En la siguiente tabla se muestra una descripción sobre el conjunto de datos que se muestran en la pantalla. En este caso se elige el TRAFO A para esta descripción.

RESULTADOS	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
SA	MVA	Potencia que aporta el TRAFO A
IA	A	Corriente total que circula por el TRAFO A
C	%	Índice de carga del TRAFO A
n	%	Rendimiento del TRAFO A
Ia	A	Corriente que circula en por el TRAFO A para alimentar la carga
Ic	A	Corriente de recirculación

**Tabla 4.5.4.-** Descripción de los resultados obtenidos en el modulo de acoplamiento.

Como se puede apreciar en la tabla se describen tres corrientes, las denominadas como  $I_a$  e  $I_c$  son las componentes que forman la corriente total  $I_A$ .

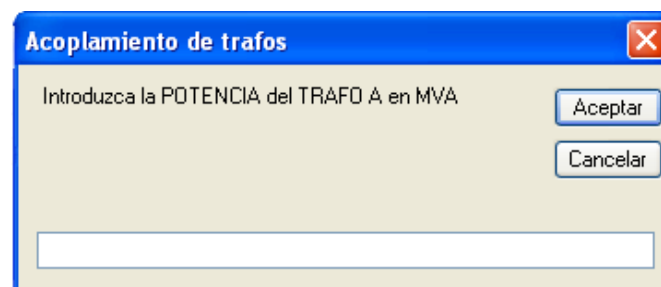
Estas componentes de la corriente total se muestran acompañadas de unas flechas para determinar el sentido de dichas corrientes. Para  $I_a$  la flecha siempre tendrá la misma dirección, con la punta de flecha mirando hacia abajo, ya que esta corriente es la encargada de alimentar la carga. Sin embargo la flecha que describe el sentido de la  $I_c$  puede tomar dos direcciones, punta de flecha hacia abajo o hacia arriba, ya que el sentido de la corriente de circulación si que puede variar en función de las relaciones de transformación de los transformadores que están siendo acoplados.

Para tener una percepción más visual de los transformadores que están acoplados en cada caso se han dibujado los interruptores de acoplamiento, de tal forma que en caso de que el interruptor esta cerrado, la cajita que representa dicho interruptor aparece de color gris oscuro, mientras que si se mantiene abierto el interruptor aparece vacía.

## 4.6.-UTILIDADES COMUNES A TODOS LOS MÓDULOS DE LA APLICACIÓN

### **CUADRO DE PETICIÓN DE DATOS**

En el caso de que el usuario olvide introducir alguno de los datos pedidos, debido a la gran cantidad de datos requeridos, la aplicación mostrara el siguiente mensaje.



**Figura 4.6.1.-** Cuadro para la petición de datos

En el mensaje se muestra una frase en la que se marca en mayúsculas las palabras que se consideran clave para que no se produzca ningún error al introducir dicho dato. Estas palabras son el dato, en la figura mostrada la POTENCIA, el transformador al que pertenece dicho dato, en este caso el TRAF0 A, y la unidad en la que debe ser introducido el dato, en este caso en MVA.

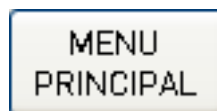
En la parte de abajo se facilita un cuadro para poder introducir el dato pedido, que automáticamente se cargara en la celda correspondiente de la pantalla principal.

Este mensaje solo aparecerá en el caso en el que tras hacer clic en cualquiera de los botones de la aplicación, destinados bien sea al cálculo de tablas o al cálculo de acoplamiento, no estén todas las casillas rellenas. El cuadro de petición de datos aparecerá para todos aquellos datos que falten por rellenar.

### **BOTÓN MENÚ PRINCIPAL**

Se habilita la posibilidad de volver a la pantalla de inicio desde cualquiera de los módulos para ofrecer al usuario la posibilidad de moverse por cualquiera de éstos sin necesidad de reiniciar la aplicación cada vez que se desee cambiar de módulo.

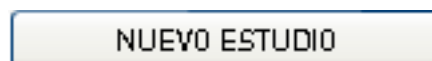
Para ello se ha programado un botón denominado como “botón menú principal”, cuyo aspecto es el que se presenta en la siguiente figura.



**Figura 4.6.2.-** Botón Menú Principal

### **BOTÓN NUEVO ESTUDIO**

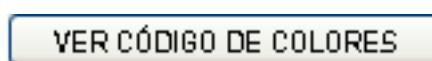
Otro botón que se encuentra en todas las pantallas de los módulos, es el botón “Nuevo Estudio”. Su función es limpiar la pantalla de todos los datos introducidos por el usuario y todos los resultados obtenidos en el estudio en curso. De manera que si se desea empezar un nuevo estudio no sea necesario salir de la aplicación y volver a entrar en ella.



**Figura 4.6.3.-** Botón Nuevo Estudio

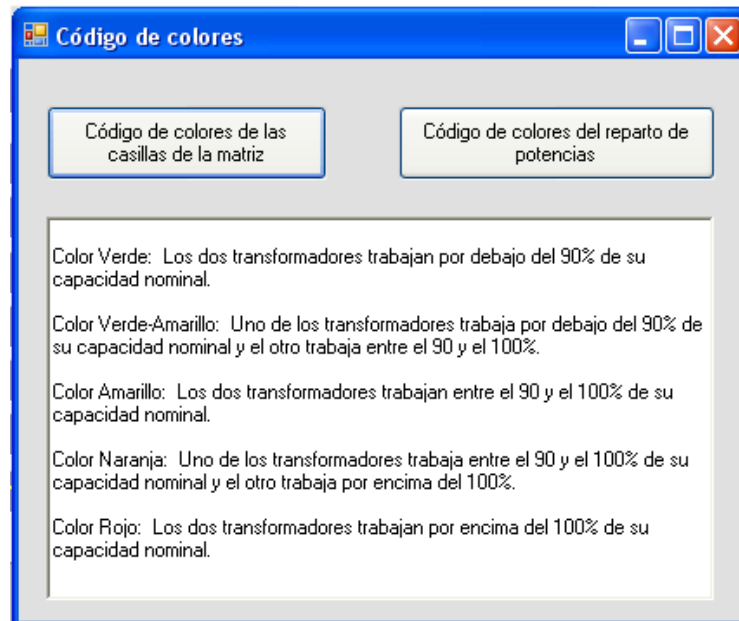
### **BOTÓN VER CÓDIGO DE COLORES**

El botón “Ver código de colores” también está habilitado en los tres módulos de la aplicación.



**Figura 4.6.4.-** Botón Ver código de colores

Cuando se hace click en el botón “Ver código de colores” aparece una nueva ventana, como la de la Figura 4.6.5. En ella se muestra el código de colores empleado, en los resultados del módulo en el que se este trabajando. La figura corresponde a la ventana Código de colores del módulo Corriente de recirculación tras hacer clic en el botón “Código de colores de las casillas de la matriz”.



**Figura 4.6.5.-** Ventana Código de colores.

## AYUDA

Puesto que en todas las pantallas existen muchas abreviaturas, tanto en los datos pedidos al usuario como en los resultados que se muestran por pantalla, se habilitan mensajes de ayuda. Estos mensajes aparecen cuando se deja el cursor quieto encima de las etiquetas que piden los datos de los transformadores o encima de las tablas de resultados. En la siguiente figura se muestra el mensaje de ayuda que aparece cuando se deja el cursor quieto encima de la etiqueta “Sn [MVA]” que aparece debajo del título “TRAFO A”

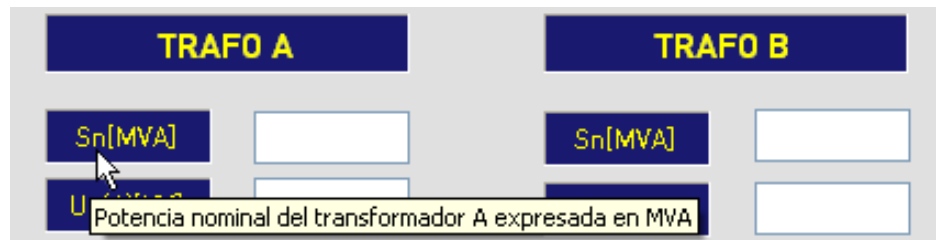


Figura 4.6.6.- Ayuda.

## FINALIZAR APLICACIÓN

La aplicación se puede finalizar desde cualquiera de las cuatro pantallas que la componen, pantalla de inicio y las tres pantallas correspondientes a los módulos, para ello se han habilitado dos opciones:

- En la parte superior derecha de la pantalla principal se muestra los tres botones clásicos de Windows entre los que se encuentra el aspa que permite cerrar la ventana y por tanto finalizar la aplicación.
- Además de esta posibilidad se ha creado un botón denominado como “botón salir” cuya única función es finalizar la aplicación.



Figura 4.6.7.- Opciones para finalizar la aplicación







## **Capítulo V**

### **Aplicación práctica:**

### **Normalización de los transformadores de la red de UFD.**

NOTA: EL CONTENIDO DE ESTE CAPÍTULO, POR CONTENER INFORMACIÓN CONFIDENCIAL SOBRE LA EMPRESA UNIÓN FENOSA DISTRIBUCIÓN, HA SIDO EXTRAÍDO. SOLO SE HA INCLUIDO EL CONTENIDO DEL MISMO EN LAS COPIAS ENTREGADAS AL TRIBUNAL CALIFICADOR DEL PRESENTE PROYECTO.



## Capítulo VI

### Conclusiones y desarrollos futuros.

Se ha logrado desarrollar una aplicación informática que permita estudiar el acoplamiento de transformadores y se ha comprobado la utilidad de la misma tras la realización de numerosos estudios de acoplamiento para la consecución del otro objetivo del proyecto, determinar si la normalización vigente de Unión Fenosa Distribución sobre es transformadores de potencia es adecuada desde el punto de vista de la explotación en paralelo, llegando a la conclusión de ésta mejoraría si se realizasen cambios en los modelos de determinados grupos de tensiones, los cuales han sido reflejados en una propuesta de normalización.

Para poder comenzar con el diseño y desarrollo de la herramienta informática se empieza por el estudio de los aspectos más importantes del acoplamiento. Mostrándose especial interés sobre como deben de hacerse las conexiones entre estas máquinas y que condiciones deben cumplirse. El hecho de, además de tener unas condiciones obligatorias, tener una serie de condiciones convenientes hace que se puedan dar distintos casos de acoplamiento en función del cumplimiento o no de estas. Conocidas dichas condiciones y resueltos los circuitos de acoplamiento se obtiene los efectos producidos por el incumplimiento de las mismas:

- Diferencias entre las tensiones de cortocircuito → Desigualdad en el reparto de la carga.
- Diferencias entre las relaciones de transformación → Aparición de corrientes de recirculación.

Una vez conocido esto y estudiados los distintos casos de acoplamiento que se pueden dar, se llega a la conclusión de que estos efectos suponen un desaprovechamiento de parte de la potencia del transformador que menos carga asuma.

Tras todo lo estudiado y concluido, la aplicación informática se diseña en base a los efectos ya mencionados anteriormente, dedicando un módulo a cada uno de ellos, y focalizando los resultados obtenidos sobre el desaprovechamiento de potencia producido. Ello hace que tras el uso de la misma se obtenga un estudio detallado del comportamiento de dos transformadores determinados acoplados en paralelo.

Además se ha incluido un modulo que permite el estudio del acoplamiento de tres transformadores, pudiendo estudiar las distintas opciones de acoplamiento posible entre los mismos y valorar cual de ellas es la más adecuada para la alimentación de una carga determinada.

La aplicación informática ha sido desarrollada en el lenguaje de programación Visual Basic 2005, una de las versiones más recientes de Visual Basic.NET, mediante los conocimientos adquiridos en dos manuales de aprendizaje [8] y [9] y la búsqueda de comandos en una página web [10].

Para el estudio de la normalización de los transformadores de potencia de Unión Fenosa Distribución se desarrolla un método de estudio en el cual se incluye el uso de la herramienta informática y se definen los criterios de calificación de los acoplamientos.

El estudio se realiza de cada uno de los 15 grupos de tensiones definidos en la normalización vigente, se analizan todos los posibles acoplamientos entre los transformadores más representativos de cada uno de ellos y se valora los posibles cambios que se pueden hacer en los modelos normalizados para mejorar la explotación en paralelo de los mismos.

Para completar y finalizar el proyecto se incluyen dos anexos al final de éste.

En el primero de ellos, Anexo A, se recogen y describen los documentos en los que se puede obtener la información necesaria sobre un transformador para completar los datos que se piden en los distintos módulos de la aplicación. Con ello se pretende hacer más fácil el uso de ésta por parte del usuario.

Para facilitar el estudio del acoplamiento de transformadores se hacen dos hipótesis, lo que supone que se comentan errores en el estudio. En el Anexo B, se ha estudiado el error cometido tras la realización de cada una de las hipótesis, comprobando que éstos son pequeños y que por tanto se pueden hacer dichas suposiciones sin riesgo de que los resultados obtenidos en los estudios realizados disten mucho de la realidad.

## Desarrollos futuros

Una manera de conseguir que la herramienta informática sea más potente es hacer que ésta pueda almacenar los datos de los transformadores que se estudian mediante la interconexión con bases de datos de Access u hojas de Excel. De forma que tras el primer estudio ya no sea necesario introducir los datos del transformador en el resto de estudios que se hagan sobre él, y simplemente buscando el nombre con el que quedo registrado el transformador se carguen directamente todos sus datos.

En el transcurso del proyecto se han realizado dos hipótesis, despreciar la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito y tomar constante para todas las tomas de regulación el valor de la tensión de cortocircuito. Esto supone una disminución en la exactitud de los resultados ya que la realización de hipótesis implica cometer errores, aunque estos sean pequeños como se puede comprobar en el Anexo B. Estudiar la forma de evitar esos errores sin que ello implique la necesidad de utilizar un gran número de datos de los transformadores potenciaría la precisión en los resultados de salida de la aplicación.



También se pueden añadir más criterios para valorar los acoplamientos, como tener en cuenta el número de pares de tomas admisibles y el margen de regulación en situación de acoplamiento, o más módulos de estudio que posibiliten otros estudios de acoplamiento, como la posibilidad de acoplar transformadores pertenecientes a distintas subestaciones teniendo en cuenta las impedancias de las líneas de conexión.



## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Fraile Mora, Jesús. **“Máquinas Eléctricas”** Madrid. McGraw-Hill.2003
  
- [2] <http://es.wikipedia.org/wiki/Transformadores>
  
- [3] IEEE standard requirements for load tap changers. **IEEE Std C57.131-1995**
  
- [4] Ras Oliva, Enrique. **“Transformadores de potencia de medida y de protección”** Séptima edición renovada. Marcombo.1991.
  
- [5] Schneider Electric USA. **Loading Considerations When Paralleling Transformers. Application Guide.**2007
  
- [6] Ramos Gómez, Angel. **“Gestión de Redes Eléctricas”**. Apuntes
  
- [7] Documentación de la Oficina Técnica de Operación de Unión Fenosa Distribución.
  
- [8] Petroustos, Evangelous. **“La biblia de VISUAL BASIC.NET”** Anaya. 2002
  
- [9] Halvorson, Michael. **“Aprenda ya VISUAL BASIC 2005”** McGraw-Hill. 2007
  
- [10] <http://msdn.microsoft.com>
  
- [11] **Norma UNE-EN 60076-1** / Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR. 1998.
  
- [12] Franklin, A.D. y Franklin, D.P. **“The J&P Transformer Book: a practical technology of the power transformer”** Butterworths.1983





- [13] E. Tom Jauch **“Proposed Transformer Paralleling Guide for IEEE Transformer Committee”**.2007



---

# ***ANEXOS***

---



## ANEXO A

### INFORMACIÓN QUE SE CONOCE DE UN TRANSFORMADOR

La información disponible sobre un transformador se encuentra fundamentalmente en dos documentos, la placa de características y el protocolo de ensayos.

La placa de características recoge todos los datos del transformador necesarios para que el usuario pueda realizar un uso adecuado de éste, mientras que el protocolo de ensayos recoge los resultados obtenidos tras una serie de ensayos realizados al transformador durante el periodo de recepción por el cliente para la verificación del cumplimiento de las especificaciones solicitadas.

Este Anexo recoge una descripción de ambos documentos, apoyándose en la normativa vigente sobre transformadores de potencia [11] y mostrando el formato en el que estos son presentados al usuario y el contenido detallado de cada uno de ellos.

Además de esto, el presente Anexo también recoge el proceso de cálculo realizado para obtener las componentes de la impedancia de cortocircuito de los transformadores empleados en los estudios del Anexo B, a partir de los datos recogidos en los documentos anteriormente mencionados.

## A.1.- PLACA DE CARACTERÍSTICAS

Según la norma UNE-EN 60076-1 (aparatado 7), cada transformador llevará una placa de características de material resistente a la intemperie, fijada en un lugar visible y que recoja las indicaciones enumeradas a continuación. Las inscripciones sobre la placa estarán marcadas de forma indeleble.

La información que debe aparecer en todos los casos es la siguiente:

- a) Tipo del transformador (por ejemplo, transformador, autotransformador, etc)
- b) Número de la norma.
- c) Nombre del fabricante.
- d) Número de serie del fabricante.
- e) Año de fabricación.
- f) Número de fases.
- g) Potencia asignada (en kVA o MVA).
- h) Frecuencia asignada (en HZ).
- i) Tensiones asignadas (en V o kV) y extensión de tomas.
- j) Corrientes asignadas (en A o kA).
- k) Símbolo de acoplamiento.
- l) Impedancia de cortocircuito, valor medido expresado en tanto por ciento.
- m) Tipo de refrigeración.
- n) Masa total.
- o) Masa del aceite aislante.

Si el transformador tiene más de un régimen asignado, según las diferentes conexiones de los arrollamientos previstos en su construcción, los regímenes asignados complementarios se indicarán en la placa de características, o se colocarán placas de características separadas para cada régimen.

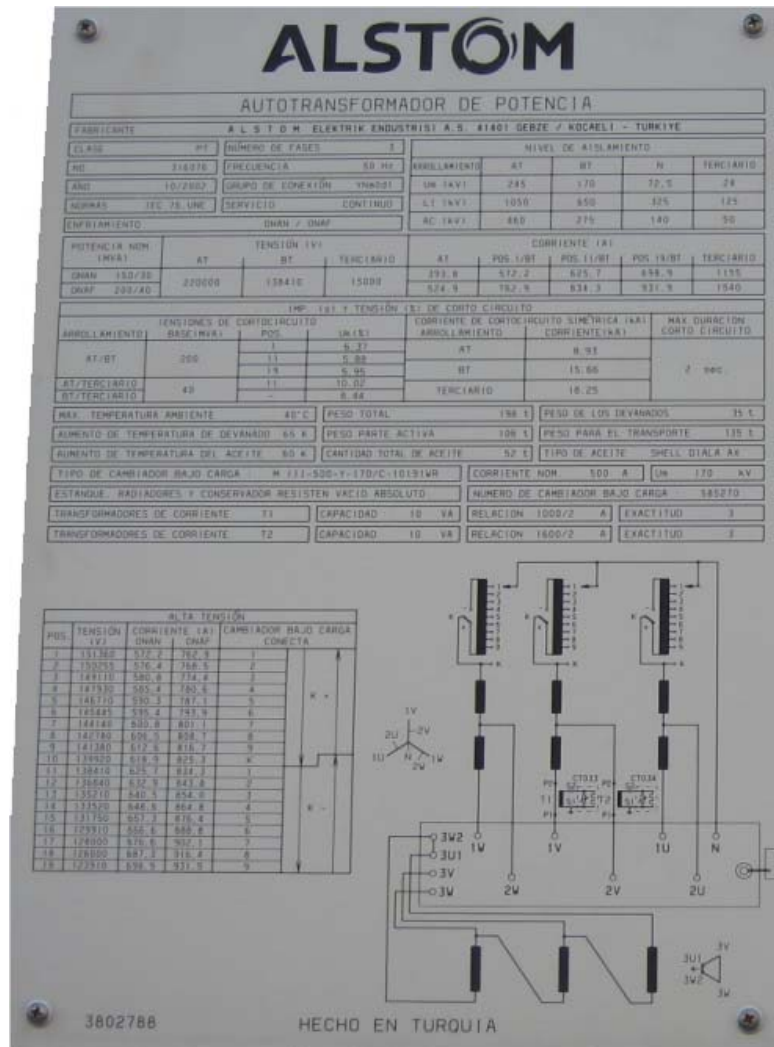


Figura A.1.1.- Placa de características de un transformador

## TENSIÓN Y CORRIENTE EN LAS DIFERENTES TOMAS DE REGULACIÓN.

La tensión y corriente resultantes en cada una de las tomas del transformador se presentan en una tabla, en la cual se muestran para cada posición o tomas del transformador, como varía la posición del selector y del inversor, lo cual facilita poder estudiar el sentido del cambiador de tomas, viendo como varía la tensión a medida que se varía la posición.

Además de mostrar los valores de tensión y corriente del arrollamiento en el cual se encuentran situadas las tomas de regulación, en el caso de la siguiente figura en el arrollamiento de alta tensión, en la tabla también se muestran los valores de tensión y corriente del arrollamiento de baja tensión y del arrollamiento terciario, si existe.

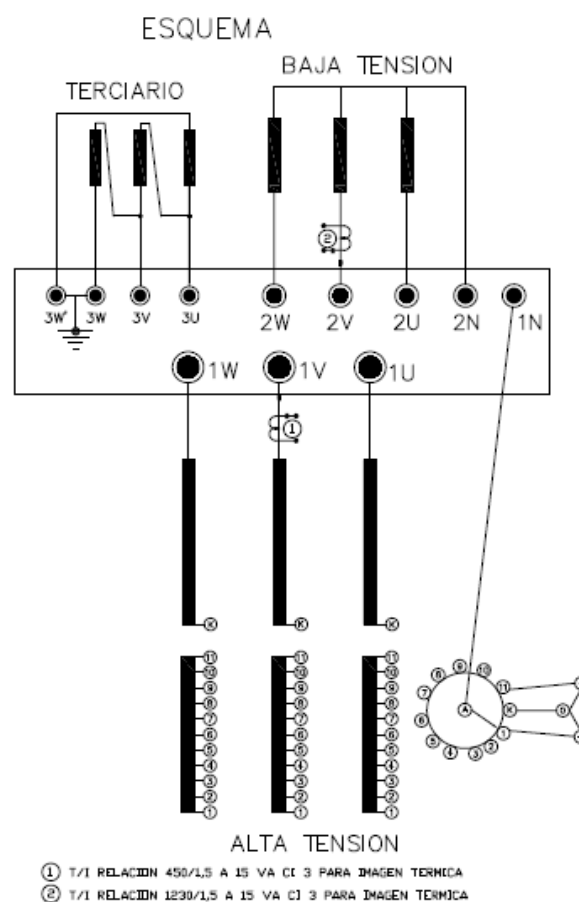
CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO								
ALTA TENSION: LINEA EN: 1U-1V-1W; NEUTRO EN: 1N				BAJA TENSION: LINEA EN: 2U-2V-2W; NEUTRO EN: 2N				
POS	POSICION INVERSOR	POSICION SELECTOR	VOLTIOS	AMPERIOS		VOLTIOS		
				112500 kVA	150000 kVA		AMPERIOS	
						112500 kVA	150000 kVA	
1		1	264500	245,6	327,4	71000	914,8	1219,8
2		2	261050	248,8	331,7			
3		3	257600	252,1	336,2			
4		4	254150	255,6	340,8			
5		5	250700	259,1	345,4			
6		6	247250	262,7	350,3			
7		7	243800	266,4	355,2			
8		8	240350	270,2	360,3			
9		9	236900	274,2	365,6			
10		10	233450	278,2	371			
11A		11	230000	282,4	376,5			
11B		K	230000	282,4	376,5			
11C		1	230000	282,4	376,5	19950	1085,2	1447
12		2	226550	286,7	382,3			
13		3	223100	291,1	388,2			
14		4	219650	295,7	394,3			
15		5	216200	300,4	400,6			
16		6	212750	305,3	407,1			
17		7	209300	310,3	413,8			
18		8	205850	315,5	420,7			
19		9	202400	320,9	427,9			
20		10	198950	326,5	435,3			
21		11	195500	332,2	443			

Figura A.1.2.- Tabla de tensión y corriente en cada toma de regulación.

## ESQUEMA DE CONEXION

En el esquema de conexión se muestra que tipo de conexión tiene cada arrollamiento del transformador, estrella, triangulo o zig-zag, y si alguno de los arrollamientos esta conectado a tierra.

También se muestra el esquema de conexión del cambiador de tomas. En la siguiente figura se puede observar como el transformador tiene 11 escalones de regulación y el cambiador de tomas tiene un preselector de tipo inversor.



**Figura A.1.3.-** Esquema de conexión de los arrollamientos del transformador.



### A.1.1.- Criterios establecidos para el sentido de los cambiadores de tomas

El cambiador de tomas de un transformador puede ser de sentido directo o de sentido inverso. Para determinar el sentido se establece una serie de criterios en función de cómo varíe la tensión en el secundario del transformador cuando se sube o se baja una toma en el cambiador. Para ver dicha variación de tensión es necesario observar en la placa de características del transformador la tabla de tensión y corrientes para las distintas tomas del transformador.

#### A.1.1.1.- Sentido directo

Se considera que el cambiador de tomas de un transformador es de sentido directo cuando al subir una posición (ej. Pasar de la toma 1 a la toma 2) aumenta la tensión resultante en el secundario del transformador.

A continuación se va a mostrar, tanto para el caso de que el cambiador de tomas este ubicado en el lado de alta tensión como para el caso de que el cambiador este ubicado en el lado de baja tensión, un fragmento de placa de características donde se puede ver la relación existente entre la posición del cambiador de tomas y la tensión en dicha toma. Seguidamente para comprobar el sentido del cambiador se desarrollará una secuencia de cálculos para ver como varía la tensión obtenida en el secundario del transformador.

#### Lado de alta tensión (AT)

El fragmento de placa de características de la siguiente figura muestra la relación existente entre la posición del cambiador de tomas y la tensión y corriente en dicha posición. La placa pertenece a un transformador cuyo cambiador de tomas esta ubicado en el lado de alta tensión, de sentido directo, provisto de 21 tomas, margen de regulación del 14 % y una relación de transformación 45 / 15,348 kV.

Pos.	Contacto realizado		Tensión (V)	Corriente (A)		Pos.	Contacto realizado		Tensión (V)	Corriente (A)	
	Inversor	Selector		ONAN	ONAN		Inversor	Selector		ONAN	ONAN
1	3 - 4	2 - 14	51300	281.4	12	3 - 14	2 - 13	44370	325.3		
2		2 - 13	50670	284.9	13		2 - 12	43740	330.0		
3		2 - 12	50040	288.4	14		2 - 11	43110	334.8		
4		2 - 11	49410	292.1	15		2 - 10	42480	339.8		
5		2 - 10	48780	295.9	16		2 - 9	41850	344.9		
6		2 - 9	48150	299.8	17		2 - 8	41220	350.2		
7		2 - 8	47520	303.7	18		2 - 7	40590	355.6		
8		2 - 7	46890	307.8	19		2 - 6	39960	361.2		
9		2 - 6	46260	312.0	20		2 - 5	39330	367.0		
10		2 - 5	45630	316.3	21		2 - 4	38700	373.0		
11A		2 - 4									
11B	3 - 4   3 - 14	2 - 3	45000	320.8							
11C	3 - 14	2 - 14									

**Figura A.1.4:** Parte de la placa de características correspondiente a la relación entre posición del regulador, tensión y corriente.

Mediante las siguientes expresiones se puede comprobar rápidamente que efectivamente el sentido del cambiador de tomas es directo, puesto que a medida que subimos tomas en el cambiador la tensión en el secundario empieza a aumentar:

$$\begin{aligned} \text{Toma 1} \rightarrow U_{(2)} &= \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{45KV}{\frac{51,3KV}{15,348KV}} = \frac{45KV}{3,34} = 13,46KV \\ \text{Toma 2} \rightarrow U_{(2)} &= \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{45KV}{\frac{50,67KV}{15,348KV}} = \frac{45KV}{3,30} = 13,63KV \\ \text{Toma 3} \rightarrow U_{(2)} &= \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{45KV}{\frac{50,04KV}{15,348KV}} = \frac{45KV}{3,26} = 13,80KV \end{aligned}$$

### Lado de baja tensión (BT)

Si por el contrario lo que se tiene es un transformador con el cambiador de tomas en el lado de baja tensión, en cuya placa de características, mostrada en la figura A.1.5, se puede ver la siguiente relación entre las tomas del cambiador y la tensión de las mismas:

POSICION Sentido de conexión +    ○	S E L E C T O R										CONMUTAD.		CONTACTOR			TENSION ENTRE BORNAS				
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	1'x/x1	1'x/x	A	B	C	D	B.T.			
	u	v	w	u	v	w	u	v	w	u	v	w	u	v	w	u	v	w	U	V
1								⊕	⊕	+			○	○	○		13.636	45.000		
2								⊕	⊕	+			○	○	○		13.850			
3								⊕	⊕	+			○	○	○		14.064			
4					⊕	⊕	+						○	○	○		14.278			
5					⊕	⊕	+						○	○	○		14.492			
6				⊕	⊕	+							○	○	○		14.706			
7			⊕	⊕	+								○	○	○		14.920			
8	⊕	⊕	+										○	○	○		15.134			
9	⊕	⊕	+							⊕	⊕		○	○	○		15.348			
10	+									⊕	⊕	+	○	○	○		15.348	45.000		
11								⊕	⊕	+			○	○	○		15.348			
12								⊕	⊕	+			○	○	○		15.562			
13								⊕	⊕	+			○	○	○		15.776			
14								⊕	⊕	+			○	○	○		15.990			
15					⊕	⊕	+						○	○	○		16.204			
16				⊕	⊕	+							○	○	○		16.428			
17			⊕	⊕	+								○	○	○		16.632			
18	⊕	⊕	+										○	○	○		16.846			
19	+	+											⊕	⊕	○		17.060	45.000		

**Figura A.1.5.-** Parte de la placa de características correspondiente a un transformador con el cambiador de tomas en carga en el lado de BT y de sentido directo.

Las características del transformador cuya placa de características se muestra en la figura anterior son las siguientes: 19 tomas, margen de regulación de 11,13 % y una relación de transformación 45/15,348 kV.

Se determina que el sentido es directo, pues como se comprueba a continuación, utilizando las mismas expresiones que para el lado de AT, cada vez que se sube una toma en el cambiador aumenta la tensión en el secundario

$$\begin{aligned} \text{Toma 1} \rightarrow U_{(2)} &= \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{45KV}{\frac{45KV}{13,63KV}} = \frac{45KV}{3,30} = 13,63KV \\ \text{Toma 2} \rightarrow U_{(2)} &= \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{45KV}{\frac{45KV}{13,84KV}} = \frac{45KV}{3,25} = 13,84KV \\ \text{Toma 3} \rightarrow U_{(2)} &= \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{45KV}{\frac{45KV}{14,05KV}} = \frac{45KV}{3,20} = 14,05KV \end{aligned}$$

### A.1.1.2.- Sentido inverso

Se considera que el cambiador de tomas de un transformador es de sentido inverso cuando al subir una posición disminuye la tensión resultante en el secundario del transformador.

Al igual que en el caso del cambiador de tomas de sentido directo, se muestran a continuación partes de placas de características de transformadores con este tipo de cambiadores de tomas y se desarrolla secuencias de cálculo para corroborar el sentido de estos.

#### Lado de alta tensión (AT)

Parte de la placa de características que muestra la relación entre la posición del cambiador de tomas y la tensión en cada toma, de un transformador con el cambiador de tomas ubicado en el lado de alta tensión y de sentido inverso:

CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO						
ALTA TENSION 25000 KVA CONMUTADOR JANSEN N° 45876				BAJA TENSION 25.000 KVA		
POSICION	SELECTOR	INVERSOR	TENSION	INTENSIDAD	TENSION	INTENSIDAD
21	1	.	61300	281		
20	2	.	50670	286		
19	3	.	50040	288		
18	4	.	49410	292		
17	5	.	48780	295		
16	6	.	48150	299		
15	7	.	47520	304		
14	8	.	46890	308		
13	9	.	46260	312		
12	10	.	45630	318		
11e	11	.	45000	321		
11b	K	.	45000	321	15300	940
11a	1	.	45000	321		
10	2	.	44370	325		
9	3	.	43740	330		
8	4	.	43110	335		
7	5	.	42480	340		
6	6	.	41850	345		
5	7	.	41220	350		
4	8	.	40590	356		
3	9	.	39960	361		
2	10	.	39330	367		
1	11	.	38700	373		

Figura A.1.6.- Parte de la placa de características correspondiente a un transformador con el cambiador de tomas en carga en el lado de AT y de sentido inverso.

La placa pertenece a un transformador con una relación de transformación 45 / 15,348 kV, con un cambiador de tomas de 21 posiciones activas, cuyo margen de regulación es del 14 %.

Para corroborar que dicho sentido se corresponde con el criterio establecido se va a calcular la tensión en el secundario del transformador para tomas consecutivas y poder ver de esta manera la evolución de la tensión en el secundario.

$$\begin{aligned} \text{Toma 1} \rightarrow U_{(2)} &= \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{45KV}{\frac{38,7KV}{15,348KV}} = \frac{45KV}{2,52} = 17,84KV \\ \text{Toma 2} \rightarrow U_{(2)} &= \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{45KV}{\frac{39,33KV}{15,348KV}} = \frac{45KV}{2,56} = 17,56KV \\ \text{Toma 3} \rightarrow U_{(2)} &= \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{45KV}{\frac{39,96KV}{15,348KV}} = \frac{45KV}{2,60} = 17,28KV \end{aligned}$$

Como se puede apreciar, la tensión en el secundario disminuye a medida que se van subiendo tomas, por tanto es correcto considerar el cambiador de tomas de este transformador de sentido inverso.

### Lado de baja tensión (BT)

Como en el caso anterior, a continuación se mostrará la placa de características de un transformador cuyo cambiador de tomas se encuentra en el arrollamiento de baja tensión y según el criterio descrito anteriormente el cambiador es de sentido inverso.

REGULADOR BAJO CARGA																			
Pos. del inversor	K+									K-									
Pos. del selector	1	2	3	4	5	6	7	8	9	K	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pos. normales mando	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Baja tension en vacio V.	151.360	150.255	149.110	147.930	146.710	145.445	144.140	142.780	141.380	139.920	138.410	136.840	135.210	133.520	131.750	129.910	128.000	126.000	123.910

**Figura A.1.7.-** Parte de la placa de características de un transformador con el regulador baja en el lado de baja tensión y de sentido inverso.

Las características del transformador al que pertenece la placa de características que se muestra en la figura A.1.7 son las siguientes: 19 tomas, margen de regulación de 11,13 % y una relación de transformación 220/139,92 kV.

Una vez más se va a comprobar que se cumple el criterio establecido, viendo la evolución de la tensión en el secundario en función de la toma en la que se encuentre el regulador.

$$\text{Toma 1} \rightarrow U_{(2)} = \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{220KV}{1,45} = \frac{45KV}{1,45} = 151,36KV$$

$$\text{Toma 2} \rightarrow U_{(2)} = \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{220KV}{1,46} = \frac{220KV}{1,46} = 150,25KV$$

$$\text{Toma 3} \rightarrow U_{(2)} = \frac{U_{AT}}{rt} = \frac{220KV}{1,47} = \frac{220KV}{1,47} = 149,11KV$$

La tensión en el secundario disminuye a medida que aumentamos toma, por tanto, el cambiador de tomas del transformador será de sentido inverso.

## A.2.- PROTOCOLO DE ENSAYOS

El protocolo de ensayos es un documento de carácter técnico en el cual se recogen los resultados obtenidos en la realización de distintos ensayos al transformador.

Estos ensayos se realizan sobre el transformador fabricado para así poder asegurar un nivel mínimo de garantía respecto al correcto funcionamiento del equipo antes de que este sea conectado a la red.

Los ensayos se realizan durante la recepción técnica del transformador para verificar las especificaciones técnicas definidas por la compañía que compra el equipo y evalúan un correcto diseño y fabricación del mismo.

A continuación se va enumerar los tipos de ensayos que se realizan al transformador y al final de este apartado se mostrara el protocolo de ensayo de un transformador perteneciente a Unión Fenosa.

### **TIPOS DE ENSAYOS**

Los tipos de ensayos que se realizan a un transformador según norma la UNE - EN 60076-1 (apartado 10) durante su recepción técnica son:

- Ensayos de rutina o individuales.
- Ensayos tipo o de diseño.
- Ensayos especiales.

#### Ensayos de rutina

Son ensayos aplicados a cada transformador individual que se recepciona. En ellos se incluye la siguiente lista de ensayos:

- Medida de la resistencia de los arrollamientos.
- Medida de la relación de transformación e índice horario.



- Medida de las pérdidas en carga y corriente de vacío.
- Ensayo de vacío.
- Ensayo de tensión soportada.
- Ensayos en carga de cambiadores de tomas y ensayos dieléctricos en equipos auxiliares.

### Ensayos tipo

Estos ensayos se realizan sobre un transformador que puede servir como representativo de otros de similares aspectos constructivos. En esta clase de ensayos se incluyen los siguientes:

- Ensayos de impulso tipo rayo.
- Ensayos de calentamiento.
- Medida de impedancia homopolar.
- Medida de niveles de ruido.

### Ensayos especiales

Son ensayos que cubren el resto de especificaciones descritas por el cliente que no son reflejadas en los ensayos de rutina o tipo. El cliente puede decidir si algunos de ellos deben ser ensayos de rutina o cuales tipo o simplemente mantenerse como ensayo especial.

- Ensayos de tensión inducida con medida de descargas parciales.
- Ensayos de Respuesta en Frecuencia (FRA).
- Ensayos de impulso tipo maniobra.
- Medida de armónicos en la corriente de vacío.
- Medida de la resistencia de aislamiento.
- Ensayo de capacidad y tangente de delta.





A parte de la división de los ensayos según sean de rutina, tipo o especiales también se pueden clasificar según el tipo de ensayo como se describe a continuación:

Ensayos funcionales:

- Medida de la resistencia de arrollamientos.
- Medida de la relación de transformación e índice horario.
- Medida de pérdidas de potencia y tensión de cortocircuito.
- Medida de las pérdidas de vacío y corriente de vacío.

Ensayos dieléctricos:

- Ensayo de impulso tipo rayo.
- Ensayo de impulso tipo maniobra.
- Ensayo de tensión soportada.
- Ensayo de tensión inducida y medida de descargas parciales.

Ensayo de calentamiento.

Otros ensayos:

- Medida de impedancia de secuencia homopolar.
- Medida de ruido.
- Ensayo del regulador.
- Ensayo de circuitos auxiliares.
- Medida de armónicos de vacío.
- Medida de resistencia de aislamiento.
- Medida de capacidad y tangente de delta.
- Ensayo FRA



## **EXTRACTO DEL PROTOCOLO DE ENSAYOS DE UN TRANSFORMADOR**

A continuación se muestra un extracto de tres páginas del protocolo de ensayos de un transformador perteneciente a Unión Fenosa Distribución.

En la primera página se describe el material ensayado, el nombre del cliente, las características nominales de la máquina, frecuencia, grupo de conexión, regulación de tensión y la firma de las dos partes implicadas, EFACEC y Unión Fenosa Distribución.

En la siguiente página primero se muestra la norma de fabricación. A partir de ahí se empiezan a mostrar los resultados obtenidos de los ensayos de rutina que continúan hasta la tercera página del extracto mostrado.

En la última página se muestra los resultados obtenidos en el ensayo de Resistencia de los Arrollamientos, donde se muestra el valor de la resistencia medido entre terminales para cada uno de los arrollamientos del transformador. En el arrollamiento primario además de mostrarse el valor en la toma central también se muestra para las tomas extremas. En la esquina superior derecha de la página se muestra la temperatura del aceite cuando se hizo el ensayo.



EFACEC ENERGIA, MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS ELÉCTRICOS, S.A. PORTUGAL

DIRECÇÃO DE GRANDES TRANSFORMADORES  
CONTROLE DA QUALIDADE  
LABORATÓRIOS FERREIRA DIAS

\*\*\*\*\*  
RELACION DE ENSAYOS - CE: 05.2078  
\*\*\*\*\*

DESCRIPCION DEL MATERIAL ENSAYADO:

Transformador trifásico tipo Core, ODAF1/ODAF2

PROJ. N°.: V8010142B

TFO. N°.: C-0142B

CLIENTE: UNION FENOSA DISTRIBUCIÓN, S.A. ESPAÑA

ORDEN : -

CARACTERISTICAS NOMINALES

	AT	BT	TERC. (*)
POTENCIA NOMINAL (kVA)	17500/25000	17500/25000	5830/8330
TENSION NOMINAL (V)	45000	16050	5000
INTENSIDAD NOMINAL (A)	224.5/320.8	629.5/899.3	673.5/961.2
CONEXION	YN	yn	d

FRECUENCIA (Hz) : 50

(\*) ARROLLAMIENTO TERCIARIO DE COMPENSACIÓN.

GRUPO DE CONEXION : YNyn0 (d11)

REGULACION DE LA TENSION : En bajo carga en el devanado de AT (21 pos.), para ±1.4%

RECEPCIONARIO:

Ing. Eduardo Iraburu



EFACEC Fecha: 2005-09-29

UNION FENOSA distribución Fecha: 2005-09-29

Aseguramiento de Calidad Red AT

CE: 05.2078

Página 1 de 22



EFACEC ENERGIA, MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS ELÉCTRICOS, S.A. PORTUGAL

DIRECÇÃO DE GRANDES TRANSFORMADORES  
CONTROLE DA QUALIDADE  
LABORATORIOS FERREIRA DIAS

\*\*\*\*\*

## R E L A C I O N D E E N S A Y O S - CE: 05.2078

\*\*\*\*\* RESULTADOS DE LOS ENSAYOS \*\*\*\*\*

## 1 - NORMAS DE FABRICACION:

CEI 60076 (2000)

## 2 - ENSAYOS DE RUTINA:

## 2.1 - Relación de transformacion y grupo de conexión:

Los valores se encuentran de acuerdo con las normas y el grupo de conexión verificado ha sido: YNyn0 (d11).

## 2.2 - Ensayo en vacio:

## 2.2.1 - Pérdidas en vacio (W):

	Garantizada	Tolerancia (%)	Valor limite	Valor medido
1.0 x Un	12000	15	13800	11400
1.1 x Un	20000	15	23000	18600

## 2.2.2 - Intensidad de la corriente (%): ( Base 25 MVA )

	Garantizada	Tolerancia (%)	Valor limite	Valor medido
1.0 x Un	0.3	30	0.39	0.07
1.1 x Un	2.4	30	3.12	0.64

## 2.3 - Ensayo de rigidez dieléctrica:

El transformador ha sido sometido a los ensayos de rigidez dieléctrica de armonia con las normas.

## 2.4 - Ensayo en corto-circuito: AT/BT

## 2.4.1 - Pérdidas en corto-circuito (W):

Base	Pos.Camb.	Garantizada	Tolerancia (%)	Valor limite	Valor medido
25 MVA	11	220000	15	253000	206700
"	1	-	-	-	204200
"	21	-	-	-	274300

## 2.4.2 - Tensión de corto-circuito (%):

Base	Pos.Camb.	Garantizada	Tolerancia (%)	Valores limite	Valor medido
25 MVA	11	14.0	± 7.5	15.1 13.0	13.8
"	1	14.8	± 10	16.3 13.3	14.9
"	21	13.5	± 10	14.9 12.2	13.4

EFACEC Fecha: 2005-09-29

CLIENTE Fecha: 2005-09-29

CE: 05.2078

Pagina 2 de 22



EFACEC ENERGIA, MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS ELÉCTRICOS, S.A. PORTUGAL

DIRECÇÃO DE GRANDES TRANSFORMADORES  
CONTROLE DA QUALIDADE  
LABORATÓRIOS FERREIRA DIAS

\*\*\*\*\*

R E L A C I O N D E E N S A Y O S - CE: 05.2078

\*\*\*\*\* RESULTADOS DE LOS ENSAYOS \*\*\*\*\*

2.4.3 - Impedancia de corto-circuito (Ohm):

Base	Pos.Camb.	Garantizada	Tolerancia (%)	Valores limite	Valor medido
45000 V	11	-	-	- -	11.2
51300 V	1	-	-	- -	15.6
38700 V	21	-	-	- -	8.04

2.5 - Pérdidas totales (W): AT/BT

Base	Pos.Camb.	Garantizada	Tolerancia (%)	Valor limite	Valor medido
25 MVA	11	232000	10	255200	218100

2.6 - Ensayo en corto-circuito: AT/TERC

2.6.1 - Pérdidas en corto-circuito (W):

Base	Pos.Camb.	Garantizadas	Tolerancia (%)	Valor limite	Valor medido
8.33 MVA	11	-	-	-	49900
"	1	-	-	-	49800
"	21	-	-	-	56400

2.6.2 - Tensión de corto-circuito (V):

Base	Pos.Camb.	Garantizada	Tolerancia (%)	Valores limite	Valor medido
8.33 MVA	11	-	± -	- -	8.22
"	1	-	± -	- -	8.56
"	21	-	± -	- -	8.13

2.6.3 - Impedancia de corto-circuito (Ohm):

Base	Pos.Camb.	Garantizada	Tolerancia (%)	Valores limite	Valor medido
45000 V	11	-	-	- -	20.0
51300 V	1	-	-	- -	27.0
38700 V	21	-	-	- -	14.6

EFACEC

Fecha: 2005-09-29

CLIENTE

Fecha: 2005-09-29



EFACEC ENERGIA, MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS ELÉCTRICOS, S.A. PORTUGAL

DIRECÇÃO DE GRANDES TRANSFORMADORES  
CONTROLE DA QUALIDADE  
LABORÁTORIOS FERREIRA DIAS

\*\*\*\*\*

RELACION DE ENSAYOS - CE: 05.2078

\*\*\*\*\* RESISTENCIAS DE LOS DEVANADOS \*\*\*\*\*

Aparatos de medida: Multimetros FLUKE 8842A										Temp. del aceite: 37.0 °C
AT										
Posición del Cambiador	1U1N			1V1N			1W1N			Rm
	U (V)	I (A)	R	U (V)	I (A)	R	U (V)	I (A)	R	
	-	75		-	75		-	75		
	a x ---	a x ---	Ohm	a x ---	a x ---	Ohm	a x ---	a x ---	Ohm	Ohm
	-	30		-	30		-	30		
1	14.197	16.950	0.335	14.073	16.891	0.333	14.096	17.034	0.331	0.333
11	13.614	19.296	0.282	13.490	19.203	0.281	13.450	19.334	0.278	0.280
21	14.228	17.006	0.335	14.088	16.881	0.334	14.032	16.983	0.330	0.333
BT										
Posición del Cambiador	2U2N			2V2N			2W2N			Rm
	U (V)	I (A)	R	U (V)	I (A)	R	U (V)	I (A)	R	
	-	75		-	75		-	75		
	a x ---	a x ---	Ohm	a x ---	a x ---	Ohm	a x ---	a x ---	Ohm	Ohm
	-	30		-	30		-	30		
-	1.5550	19.295	0.0322	1.5367	19.203	0.0320	1.5469	19.346	0.0320	0.0321
TERC.										
Posición do Cambiador	3U13U2			3V13V2			3W13W2			Rm
	U (V)	I (A)	R	U (V)	I (A)	R	U (V)	I (A)	R	
	-	75		-	75		-	75		
	a x ---	a x ---	Ohm	a x ---	a x ---	Ohm	a x ---	a x ---	Ohm	Ohm
	-	30		-	30		-	30		
-	1.4304	19.294	0.0297	1.4266	19.203	0.0297	1.4553	19.370	0.0301	0.0298
EFACEC      Fecha: 2005-09-29 <i>Carlos Almeida</i> CLIENTE      Fecha: 2005-09-29										
CE: 05.2078					Pagina 8 de 22					

### A.3.- CÁLCULO DE LAS COMPONENTES DE LA IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO

Para estudiar los errores que se cometen a causa de las hipótesis realizadas, Anexo B, es necesario conocer el valor de las componentes de la impedancia de cortocircuito de los transformadores que se emplearán en dicho estudio.

El proceso de cálculo seguido hasta llegar a obtener las componentes de la impedancia de cortocircuito, a partir de la información obtenida de las placas de características y en los protocolos de ensayo de los transformadores, se muestra a continuación mediante un caso práctico, en el cual se calculan las componentes de la impedancia de cortocircuito del transformador 1 de la subestación de Santa Teresa.

#### Trafo 1 de la subestación Santa Teresa

- Datos del transformador:

$S_n = 30\text{MVA}$

Grupo de tensiones = 132/16,05 kV

Margen de regulación = 12%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	U <sub>cc</sub> [%]
1	10,5
11	10,1
21	10,3

- Cálculo de la impedancia de cortocircuito referida al secundario:

$$Z_{cc_2} = \frac{U_{cc}[\%]}{100} \cdot \frac{Un^2[KV]}{Sn[MVA]}$$

NºToma	Z <sub>cc<sub>2</sub></sub> [Ω]
1	<b>0,9016</b>
11	<b>0,8672</b>
21	<b>0,8844</b>

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 29,5°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W	
1	1,25	1,25	1,25	0,625
11	1,08	1,09	1,08	0,545
21	1,25	1,25	1,25	0,625

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W	
16,05	0,00956	0,00961	0,00967	0,0048

- Cálculo del valor de las resistencias a una temperatura de 75°C, temperatura más cercana a la que se encuentran los arrollamientos cuando el transformador esta en funcionamiento. Para calcular dicho valor, según la norma UNE-EN 60076-1 (anexo E), se emplea la siguiente expresión:

$$R_{75^\circ} = R_{29,5^\circ} \cdot \frac{C + \Theta_2}{C + \Theta_1} = R_{29,5^\circ} \cdot \frac{235 + 75}{235 + 29,5}$$

Donde:

$\Theta$  representa la temperatura en °C

C es una constante en función del tipo de material. IEC especifica que:

C= 235 para el cobre

C= 225 para el aluminio

NºToma	Rcc a 29,5 $\Omega$ ]	Rcc a 75°C [ $\Omega$ ]
1	0,625	<b>0,7325</b>
11	0,545	<b>0,6387</b>
21	0,625	<b>0,7325</b>
Sec.	0,0048	<b>0,0056</b>

- Se refiere el valor de la resistencia del primario al secundario:

$$R'_1 = \frac{R_1}{rt^2}$$

NºToma	rt	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$R'_1$ [ $\Omega$ ]
1	147,84/16,05	0,7325	<b>0,00863</b>
11	132/16,05	0,6387	<b>0,00944</b>
21	116,16/16,05	0,7325	<b>0,01398</b>



- Cálculo de la resistencia de cortocircuito, referida al secundario:

$$R_{cc_2} = R_1' + R_2$$

NºToma	R <sub>1</sub> ' [Ω]	R <sub>2</sub> [Ω]	R <sub>cc<sub>2</sub></sub> [Ω]
1	0,00863	0,0056	<b>0,01423</b>
11	0,00944	0,0056	<b>0,01504</b>
21	0,01398	0,0056	<b>0,01958</b>

- Reactancia de cortocircuito:

$$|Z_{cc_2}|^2 = R_{cc_2}^2 + X_{cc_2}^2 \Rightarrow X_{cc_2} = \sqrt{Z_{cc_2}^2 - R_{cc_2}^2}$$

NºToma	Z <sub>cc<sub>2</sub></sub> [Ω]	R <sub>cc<sub>2</sub></sub> [Ω]	X <sub>cc<sub>2</sub></sub> [Ω]	X <sub>cc<sub>2</sub></sub> /R <sub>cc<sub>2</sub></sub>
1	0,9016	0,01423	<b>0,9014</b>	63,34
11	0,8672	0,01504	<b>0,8670</b>	56,78
21	0,8844	0,01958	<b>0,8841</b>	45,15

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{cc_{2(1)}} &= R_{cc_{2(1)}} + jX_{cc_{2(1)}} = 0,01423 + j0,9014[\Omega] \\ \bar{Z}_{cc_{2(11)}} &= R_{cc_{2(11)}} + jX_{cc_{2(11)}} = 0,01504 + j0,8670[\Omega] \\ \bar{Z}_{cc_{2(21)}} &= R_{cc_{2(21)}} + jX_{cc_{2(21)}} = 0,01958 + j0,8841[\Omega] \end{aligned}$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el resto de transformadores empleados en el Anexo B.

**GRUPO DE TENSIONES 220/15 kV (Zona Centro)**Trafo 1 de la subestación Simancas

- Datos del transformador:

$S_n = 60 (30+30) \text{ MVA}$

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 230/ 16,05 – 16,05 kV

Margen de regulación = 15%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%] BT 1	Ucc [%] BT 2
1	15,76	15,81
11	15,17	15,22
21	15,28	15,34

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 32,5°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	2,9673	2,9756	2,9733	1,4860	1,7221
11	2,3123	2,3192	2,3164	1,1580	1,3420
21	2,9665	2,9710	2,9756	1,4855	1,7215

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]		Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
		U-V	U-W	V-W		
BT 1	16,05	0,01577	0,01577	0,01587	0,0079	0,0091
BT 2	16,05	0,01575	0,01584	0,01595	0,0079	0,0091

- Calculo de la impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ] BT1	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ] BT 2
1	1,3522	1,3578
11	1,3026	1,3069
21	1,3111	1,3172

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma		$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}/R_{cc_2}$
BT 1	1	1,3532	0,0155	1,3531	87,29
	11	1,3026	0,01569	1,3025	83,01
	21	1,3111	0,02076	1,3109	63,14
BT 2	1	1,3575	0,01552	1,3574	87,46
	11	1,3069	0,01572	1,3068	83,12
	21	1,3172	0,02078	1,3170	63,37

### Trafo 2 de la subestación Simancas

- Datos del transformador:

$S_n = 60 (30 + 30)$  MVA

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 230 / 16,05 - 16,05 kV

Margen de regulación = 15%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%] BT 1	Ucc [%] BT 2
1	15,75	15,94
11	15,15	15,37
21	15,28	15,54

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 24,3°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	2,9204	2,9258	2,9344	1,4634	1,6991
11	2,2810	2,2844	2,290	1,1425	1,3265
21	2,9224	2,9260	2,9344	1,4638	1,6995

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [kV]		Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
		U-V	U-W	V-W		
BT 1	16,05	0,01555	0,01581	0,01578	0,0078	0,0091
BT 2	16,05	0,01604	0,01571	0,01602	0,0079	0,0092



- Calculo de la impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ] BT1	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ] BT 2
1	1,3524	1,3687
11	1,3008	1,3197
21	1,3120	1,3343

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}/R_{cc_2}$	
BT 1	1	1,3524	0,01550	<b>1,3523</b>	<b>87,24</b>
	11	1,3008	0,01569	<b>1,3007</b>	<b>82,89</b>
	21	1,3120	0,02518	<b>1,3117</b>	<b>52,10</b>
BT 2	1	1,3687	0,01558	<b>1,3686</b>	<b>87,85</b>
	11	1,3197	0,01577	<b>1,3196</b>	<b>83,68</b>
	21	1,3343	0,02526	<b>1,3341</b>	<b>52,82</b>

## GRUPO DE TENSIONES 132/45 kV

### Trafo 3 de la subestación Illescas II

– Datos del transformador:

$S_n = 60\text{MVA}$

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 132 / 45 kV

Margen de regulación = 12%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%]
1	10,5
11	9,93
21	9,63

– Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 24,2°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	0,8104	0,8128	0,8127	0,406	0,4855
11	0,7440	0,7427	0,7413	0,3715	0,4445
21	0,8107	0,8091	0,8089	0,405	0,4845

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [kV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
45	0,0844	0,0845	0,0844	0,0422	0,0505

– Calculo de la impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]
1	3,5437
11	3,3513
21	3,2501

– Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}/R_{cc_2}$
1	3,5437	0,0954	3,5424	37,12
11	3,3513	0,1031	3,3497	32,51
21	3,2501	0,1232	3,2477	26,39

Trafo 5 de la subestación Aranjuez

- Datos del transformador:

$S_n = 30 \text{ MVA}$

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 132 / 45 kV

Margen de regulación = 12%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%]
1	11,9
11	11,31
21	11,07

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 24,3°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	2,3833	2,3840	2,3858	1,1921	1,4345
11	2,0625	2,0618	2,0645	1,0314	1,2412
21	2,4049	2,4082	2,4088	1,2036	1,4484

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
45	0,1977	0,1976	0,1976	0,0988	0,1188

- Calculo de la impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]
1	8,0325
11	7,6342
21	7,4722

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2} / R_{cc_2}$
1	8,0325	0,2517	8,0285	31,89
11	7,6342	0,263	7,6296	29,02
21	7,4722	0,3361	7,4646	22,23

## GRUPO DE TENSIONES 132/15 kV (Zona Centro)

### Trafo 5 de la subestación Aranjuez

- Datos del transformador:

$S_n = 30$  MVA

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 132 / 16,05 kV

Margen de regulación = 12%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%]
1	11,7
11	11,1
21	11,2

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 24,3°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	1,373	1,375	1,372	0,686	0,8219
11	1,195	1,196	1,189	0,596	0,7149
21	1,374	1,377	1,374	0,687	0,8231

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
16,05	0,0102	0,0104	0,0103	0,0052	0,0062

- Calculo de la impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]
1	1,0046
11	0,9531
21	0,9617

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}/R_{cc_2}$
1	1,0046	0,0158	1,0044	63,56
11	0,9531	0,0167	0,9529	57,05
21	0,9617	0,0219	0,9614	43,89

## GRUPO DE TENSIONES 66/20 KV (Zona Norte)

### Trafo 1 de la subestación Lalin

- Datos del transformador:

$S_n = 25 \text{ MVA}$

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 66 / 21 kV

Margen de regulación = 10%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%]
1	10,3
11	9,79
21	9,72

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 22,5°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	0,409	0,412	0,410	0,205	0,248
11	0,367	0,369	0,368	0,184	0,222
21	0,410	0,411	0,411	0,205	0,249

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
21	0,0324	0,0325	0,0326	0,0162	0,0196

- Impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]
1	<b>1,8169</b>
11	<b>1,7269</b>
21	<b>1,7146</b>

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}/R_{cc_2}$
1	1,8169	0,0403	1,8164	45,07
11	1,7269	0,042	1,7263	41,10
21	1,7146	0,0507	1,7138	33,80



### Trafo 1 de la subestación Negreira

- Datos del transformador:

$S_n = 15 \text{ MVA}$

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 66 / 21 kV

Margen de regulación = 10%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%]
1	9,18
11	8,82
21	8,68

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 23°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	0,7536	0,7588	0,7545	0,3771	0,4558
11	0,6907	0,6948	0,6901	0,3460	0,4174
21	0,7537	0,7599	0,7542	0,3780	0,4565

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
21	0,0672	0,0669	0,067	0,0340	0,0403

- Impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]
1	<b>2,6989</b>
11	<b>2,5930</b>
21	<b>2,5519</b>

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2} / R_{cc_2}$
1	2,6989	0,0784	2,6977	34,409
11	2,5930	0,0825	2,5916	31,41
21	2,5519	0,0973	2,5500	26,20

**GRUPO 45/15 kV (Zona Centro)**Trafo 1 de la subestación Paseo de Recoletos

- Datos del transformador:

$S_n = 25 \text{ MVA}$

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 45 / 16,05 kV

Margen de regulación = 14%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%]
1	10,32
11	9,12
21	8,92

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 15°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	0,274	0,273	0,274	0,136	0,170
11	0,218	0,218	0,218	0,109	0,135
21	0,185	0,185	0,185	0,0925	0,115

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
16,05	0,0244	0,0246	0,0244	0,0122	0,0152

- Impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]
1	1,0633
11	0,9397
21	0,9191

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}/R_{cc_2}$
1	1,0633	0,0319	1,0628	33,31
11	0,9397	0,0325	0,9391	28,89
21	0,9191	0,0351	0,9184	26,16

Trafo 2 de la subestación Paseo de Recoletos

- Datos del transformador:

$S_n = 25 \text{ MVA}$

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 45 / 16,05 kV

Margen de regulación = 14%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%]
1	10,35
11	9,16
21	8,95

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 15°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	0,275	0,276	0,275	0,137	0,171
11	0,218	0,219	0,219	0,109	0,136
21	0,186	0,186	0,186	0,093	0,115

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
16,05	0,0245	0,0247	0,0245	0,0123	0,0153

- Impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]
1	1,0664
11	0,9438
21	0,9222

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}/R_{cc_2}$
1	1,0634	0,0321	1,0659	33,30
11	0,9438	0,0326	0,9432	32,9
21	0,9222	0,0352	0,9215	34,65

### Trafo 2 de la subestación Las Mercedes

- Datos del transformador:

$S_n = 25 \text{ MVA}$

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 45 / 16,05 kV

Margen de regulación = 14%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%]
1	10,3
11	9,1
21	8,89

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 20°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	0,283	0,282	0,282	0,141	0,172
11	0,225	0,224	0,225	0,112	0,137
21	0,191	0,191	0,191	0,095	0,116

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
16,05	0,0249	0,0249	0,0249	0,0125	0,0151

- Impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]
1	<b>1,0613</b>
11	<b>0,9376</b>
21	<b>0,9160</b>

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}/R_{cc_2}$
1	1,0613	0,0320	1,060	33,12
11	0,9376	0,0324	0,9370	29
21	0,9160	0,0352	0,9153	26

### Trafo 2 de la subestación Villaverde

- Datos del transformador:

$S_n = 25 \text{ MVA}$

Tensiones nominales ( $U_{n1} / U_{n2}$ ) = 45 / 16,05 kV

Margen de regulación = 14%

Nº Tomas = 21

Grupo de conexión: YNyn0

Tensión de cortocircuito en función de la toma:

NºToma	Ucc [%]
1	10,32
11	9,12
21	8,91

- Resistencias obtenidas del protocolo de ensayo. Medidas a una temperatura de 20°C.

Arrollamiento primario:

NºToma	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
1	0,302	0,300	0,300	0,150	0,174
11	0,237	0,236	0,236	0,118	0,137
21	0,202	0,201	0,201	0,101	0,117

Arrollamiento secundario:

TENSIÓN [KV]	Resistencia entre terminales [ $\Omega$ ]			Resistencia media por fase [ $\Omega$ ]	Resistencia media por fase a 75°C [ $\Omega$ ]
	U-V	U-W	V-W		
16,05	0,0261	0,0261	0,0261	0,01305	0,0151

- Impedancia de cortocircuito referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]
1	<b>1,0633</b>
11	<b>0,9397</b>
21	<b>0,9180</b>

- Componentes de la impedancia de cortocircuito, referida al secundario:

NºToma	$Z_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$R_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}$ [ $\Omega$ ]	$X_{cc_2}/R_{cc_2}$
1	1,0633	0,0322	1,0628	33
11	0,9397	0,0326	0,9391	29
21	0,9180	0,0352	0,9173	26

## ANEXO B

### ERRORES COMETIDOS A CAUSA DE LAS HIPÓTESIS REALIZADAS SOBRE LA IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO

A lo largo del proyecto se han realizado dos hipótesis con el fin de facilitar los cálculos y obtener resultados lo más próximos a la realidad posibles en los estudios de acoplamiento de transformadores,

La primera hipótesis ha sido considerar despreciable la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito. Como se puede comprobar en el anexo anterior el cociente  $X_{cc}/R_{cc}$  es superior a 20 en todos los casos.

En la placa de características de los transformadores y en la base de datos de instalaciones de UFD los valores que se dan son los de las tensiones de cortocircuito en %. Por este motivo, y para que sea más fácil para el usuario de la aplicación informática encontrar los datos que ésta le pide, se decide realizar dicha hipótesis.

La segunda hipótesis realizada a sido tomar constante para todas las tomas el valor de la reactancia de cortocircuito expresada en tanto por ciento, tomando como valor de referencia el de la toma central de los transformadores.

Los factores que pueden variar en la fórmula de la reactancia en tanto por ciento, debido a la presencia de tomas de regulación, son la corriente, el número de espiras, los voltios por espira, y la longitud axial del arrollamiento. El valor de la reactancia en tanto por ciento es directamente proporcional a los dos primeros términos e inversamente proporcional a los dos siguientes. La expresión para el cálculo de la misma es [12]:

$$Z_{cc}[\%] = \frac{7,9 \cdot IN \cdot M_w \cdot f}{\frac{V}{N} \cdot l} \left( a + \frac{b_1 + b_2}{3} \right) \times 10^{-7}$$

Donde:

$IN$  = Amperios-vuelta totales del arrollamiento del lado de alta o de baja.

$M_w$  = Longitud media por espira del arrollamiento del lado de alta o baja.

$f$  = frecuencia en hercios.

$V/N$  = Voltios-espira del arrollamiento del lado de alta o de baja.

$l$  = Longitud axial del arrollamiento más corto.

$a$  = distancia radial entre los hilos de cobre desnudos de los arrollamientos de alta y baja.

$b_1$  = Anchura radial de los hilos de cobre desnudos del arrollamiento del lado de baja.

$b_2$  = Anchura radial de los hilos de cobre desnudos del arrollamiento del lado de alta.

Para que los resultados sean coherentes los valores de longitud deben estar expresados en mm.

En el presente anexo se va a calcular el error cometido al realizar ambas hipótesis. Este error se calcula tanto para el valor de la corriente que circula por cada uno de los transformadores destinada a alimentar la carga como para el valor de la corriente de recirculación que aparece debido a las diferencias entre las relaciones de transformación.

## B.1.- ERROR COMETIDO AL DESPRECIAR LA PARTE RESISTIVA DE LA IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO

### B.1.1.- ERROR COMETIDO EN EL VALOR DE LAS CORRIENTES QUE CIRCULAN POR LOS TRANSFORMADORES

#### **DESARROLLO DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL ERROR**

Primero, recordar la ecuación que determina la corriente que circula por cada transformador:

$$I_A = I_T \cdot \frac{Z_{cc_B}}{Z_{cc_A} + Z_{cc_B}} \quad ; \quad I_B = I_T \cdot \frac{Z_{cc_A}}{Z_{cc_A} + Z_{cc_B}} \quad (\text{B.1.1})$$

A continuación se va a desarrollar la ecuación que determine el error que se comete en la trafo A al despreciar la resistencia de cortocircuito.

Para ello se va a comparar el resultado que se obtiene cuando se desarrolla la ecuación con los valores de la impedancia de cortocircuito puramente reactiva y cuando se tiene en cuenta la parte resistiva.

#### Ecuación para el trafo A:

$I_A'$  representa el valor de la corriente que circula por el transformador A cuando se desprecia la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito, por tanto la impedancia de cortocircuito será completamente reactiva:

$$Z_{cc'_A} = jX_{cc'_A} \quad Z_{cc'_B} = jX_{cc'_B} \quad (\text{B.1.2})$$

$I_A$  representa el valor de la corriente que circula por el transformador A cuando se tiene en cuenta la resistencia de cortocircuito.

$$\frac{I_A'}{I_A} = \frac{I_T \cdot \frac{jX_{cc'_B}}{jX_{cc'_A} + jX_{cc'_B}}}{I_T \cdot \frac{R_{cc_B} + jX_{cc_B}}{R_{cc_A} + jX_{cc_A} + R_{cc_B} + jX_{cc_B}}} = \frac{\frac{jX_{cc'_B}}{j(X_{cc'_A} + jX_{cc'_B})}}{\frac{R_{cc_B} + jX_{cc_B}}{R_{cc_A} + jX_{cc_A} + R_{cc_B} + jX_{cc_B}}} = \quad (\text{B.1.3})$$



$$= \frac{\frac{Xcc'_B}{Xcc'_A + Xcc'_B}}{\frac{Rcc_B + jXcc_B}{Rcc_A + jXcc_A + Rcc_B + jXcc_B}} = \frac{Xcc'_B(Rcc_A + Rcc_B) + jXcc'_B(Xcc_A + Xcc_B)}{(Xcc'_A + Xcc'_B) \cdot (Rcc_B + jXcc_B)} \quad (B.1.4)$$

se separa la componente real de la componente imaginaria

$$= \frac{Xcc'_B(Rcc_A + Rcc_B) + jXcc'_B(Xcc_A + Xcc_B)}{Rcc_B(Xcc'_A + Xcc'_B) + jXcc_B(Xcc'_A + Xcc'_B)} \quad (B.1.5)$$

El resultado de esta ecuación tiene parte real y parte imaginaria. Por ello, a continuación se va a desarrollar la expresión para obtener el módulo del error cometido.

$$\frac{|I_A'|}{|I_A|} = \frac{\sqrt{(Xcc'_B(Rcc_A + Rcc_B))^2 + (Xcc'_B(Xcc_A + Xcc_B))^2}}{\sqrt{(Rcc_B(Xcc'_A + Xcc'_B))^2 + (Xcc_B(Xcc'_A + Xcc'_B))^2}} \quad (B.1.6)$$

Una vez obtenida la ecuación para el trafo A se va a determinar la ecuación que obtiene el error para el trafo B cuando se desprecia la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito, siguiendo el mismo procedimiento que para el trafo A.

#### Ecuación para el trafo B:

De forma análoga, el módulo del error cometido en el caso de la corriente del trafo B se calculara, según la siguiente expresión, como:

$$\frac{|I_B'|}{|I_B|} = \frac{\sqrt{(Xcc'_A(Rcc_A + Rcc_B))^2 + (Xcc'_A(Xcc_A + Xcc_B))^2}}{\sqrt{(Rcc_A(Xcc'_A + Xcc'_B))^2 + (Xcc_A(Xcc'_A + Xcc'_B))^2}} \quad (B.1.7)$$

## CASO PRÁCTICO REAL

Seguidamente se va a poner en práctica el uso de estas ecuaciones para calcular el error que se cometería al desprestigiar la parte resistiva de la componente de cortocircuito cuando se acoplen los dos transformadores del grupo de tensiones 132 / 16,05 KV cuyas componentes de la impedancia de cortocircuito han sido calculadas en el Anexo A.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las componentes de la impedancia de cortocircuito de dichos transformadores, que posteriormente se introducirán en las expresiones desarrolladas para el cálculo de los errores cometidos al desprestigiar la parte resistiva de la impedancia de cortocircuito.

	Trafo A: T1- Santa Teresa	Trafo B: T2 - Aranjuez
X <sub>cc</sub> ' [Ω]	0,8672	0,9531
R <sub>cc</sub> [Ω]	0,0150	0,0167
X <sub>cc</sub> [Ω]	0,8670	0,9529

**Tabla B.1.1**

Si se sustituyen en la expresión B.6 las incógnitas por los parámetros descritos en la tabla anterior, se obtiene el error cometido en el valor de la corriente que circula por el trafo A.

$$\frac{|I_a'|}{|I_a|} = \frac{\sqrt{(0,9531 \cdot (0,01504 + 0,0167))^2 + (0,9531 \cdot (0,8670 + 0,9529))^2}}{\sqrt{(0,0167 \cdot (0,8672 + 0,9531))^2 + (0,9529 \cdot (0,8672 + 0,9531))^2}} = 0,999988 \quad (\text{B.1.8})$$

El valor de la corriente tomada para la realización de los cálculos en los estudios de acoplamiento sería el 99,9988 % del valor real de corriente que circularía por el transformador A.

Por tanto el error cometido por defecto sería del 0,0012 %.

A continuación se calculará el error cometido en el valor de la corriente que circula por el trafo B. Para ello en la expresión B.7 se sustituirán las incógnitas por los valores de la tabla anterior.

$$\frac{|I_B|}{|I_B|} = \frac{\sqrt{(0,8672 \cdot (0,01504 + 0,0167))^2 + (0,8672 \cdot (0,8670 + 0,9529))^2}}{\sqrt{(0,01504 \cdot (0,8672 + 0,9531))^2 + (0,8670 \cdot (0,8672 + 0,9531))^2}} = 1,000012 \quad (\text{B.1.9})$$

El valor de la corriente tomada para la realización de los cálculos en los estudios de acoplamiento sería el 100,0012 % del valor real de corriente que circularía por el transformador B.

Por tanto el error cometido por exceso sería del 0,0012 %.

La corriente nominal en el secundario de ambos transformadores es 1079,15 A, si se multiplica dicho valor por los errores calculados anteriormente, se obtiene que los errores cometidos cuando por los transformadores circule su corriente nominal serán 0,013 A.

Errores tan pequeños serán totalmente admisibles en los estudios de acoplamiento de transformadores.

## VALORACIÓN DEL ERROR COMETIDO

En la siguiente tabla se muestran los errores que se cometerían al acoplar transformadores de otros grupos de tensión.

En ella se muestran el grupo de tensión al que pertenecen los transformadores, la designación TA o TB seguida del nombre de la subestación en la que están ubicados con la subestación a la que pertenecen y el número de transformador designado dentro de dicha subestación. Seguido de esta información se muestra la columna con los errores cometidos para cada uno de los transformadores en tanto por ciento.

GRUPO	TRAFOS	$\delta$ [%]
230/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 Simancas	0,000005
	TB: T2 Simancas	0,000004
132/45 kV	TA: T3 Illescas II	0,0000042
	TB: T1 Villasequilla	0,00049
132/15 kV (Zona Centro)	TA: T2 SantaTeresa	0,0012
	TB: T5 Aranjuez	0,0012
66/20 kV (Zona Norte)	TA: T1 Lalin	0,0014
	TB: T1 Negreira	0,0004
45/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 P. de Recoletos	0,000062
	TB: T2 P. de Recoletos	0,000062
45/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 Las Mercedes	0,00030
	TB: T2 Villaverde	0,00030

**Tabla B.1.2.**

Como se puede observar en la tabla todos los errores son realmente pequeños, esto nos lleva a considerar que estos errores serán admisibles y que por tanto no afectarán a las conclusiones que se extraigan del estudio de acoplamiento de dichos transformadores.



### B.1.2.- ERROR COMETIDO EN EL VALOR DE LA CORRIENTE DE RECIRCULACIÓN

A continuación se estudiará el error cometido en la corriente de circulación, para ello nuevamente se desarrollara una ecuación que permita calcular dicho error. Al igual que en el apartado anterior, una vez conocida la expresión para el cálculo del error se desarrolla un caso práctico y se estudia el error cometido en distintos grupos de tensión.

#### **DESARROLLO DE UNA ECUACION PARA EL CÁLCULO DEL ERROR**

Primero recordar la ecuación que determina el valor de la corriente de recirculación:

$$I_c = \frac{U_1 \left( \frac{1}{r_{t_A}} - \frac{1}{r_{t_B}} \right)}{Z_{cc_A} + Z_{cc_B}} \quad (\text{B.1.10})$$

Se van a comparar las ecuaciones de la corriente de recirculación, considerando y sin considerar el valor de la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito, de forma que se pueda obtener el error que se comete al suponer dicha componente resistiva nula.

En el siguiente desarrollo  $I_c'$  representa el valor de la corriente de recirculación cuando se desprecia la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito de los transformadores, por tanto las impedancias de cortocircuito de ambos transformadores serán completamente reactivas:

$$Z_{cc'_A} = jX_{cc'_A} \quad Z_{cc'_B} = jX_{cc'_B} \quad (\text{B.1.11})$$

$I_c$  representa el valor de la corriente que recircula por los transformadores cuando se tiene en cuenta la resistencia de cortocircuito.

$$\frac{Ic'}{Ic} = \frac{\frac{U_1 \left( \frac{1}{rt_A} - \frac{1}{rt_B} \right)}{\sqrt{3}}}{\frac{jXcc'_A + jXcc'_B}{Rcc_A + Rcc_B + j(Xcc_A + Xcc_B)}} = \frac{(Rcc_A + Rcc_B) + j(Xcc_A + Xcc_B)}{j(Xcc'_A + Xcc'_B)} \quad (B.1.12)$$

De la expresión resultante se obtiene un número con parte real y parte imaginaria.

Para conocer el módulo del error cometido se emplea la siguiente expresión:

$$\frac{|Ic'|}{|Ic|} = \frac{\sqrt{(Rcc_A + Rcc_B)^2 + (Xcc_A + Xcc_B)^2}}{\sqrt{(Xcc'_A + Xcc'_B)^2}} = \frac{\sqrt{(Rcc_A + Rcc_B)^2 + (Xcc_A + Xcc_B)^2}}{Xcc'_A + Xcc'_B} \quad (B.1.13)$$

Finalmente la expresión para el cálculo del error cometido en el valor de la corriente de recirculación es:

$$\frac{|Ic'|}{|Ic|} = \frac{\sqrt{(Rcc_A + Rcc_B)^2 + (Xcc_A + Xcc_B)^2}}{Xcc'_A + Xcc'_B} \quad (B.1.14)$$

## CASO PRÁCTICO REAL

Siguiendo el caso práctico del apartado anterior, se va a calcular el error cometido en el valor de la corriente de recirculación cuando se acoplan los dos transformadores del grupo de tensiones 132/16,05 kV elegidos, cuyos parámetros han sido calculados en el Anexo A.

Nuevamente se muestra la tabla con los valores de las componentes de la impedancia de cortocircuito que se introducirán en la expresión B.1.14 para obtener el error cometido en la corriente de recirculación.

	Trafo A: T1- Santa Teresa	Trafo B: T2 - Aranjuez
Xcc' [ $\Omega$ ]	0,8672	0,9531
Rcc [ $\Omega$ ]	0,0150	0,0167
Xcc [ $\Omega$ ]	0,8670	0,9529

**Tabla B.1.3.**

Cálculo del error cometido:

$$\frac{|Ic'|}{|Ic|} = \frac{\sqrt{(0,01504 + 0,0167)^2 + (0,8670 + 0,9529)^2}}{0,8672 + 0,9531} = 0,999932 \quad (\text{B.1.15})$$

El valor de la corriente de recirculación tomada para la realización de los cálculos en los estudios de acoplamiento sería el 99,9932 % del valor real de corriente que recircularía por los transformadores.

Por tanto el error cometido por defecto sería del 0,0068 %.

El error cometido como se puede apreciar es muy pequeño, por lo que se podrá considerar admisible cuando se estudie el acoplamiento de estos transformadores.

## VALORACIÓN DEL ERROR COMETIDO

En la tabla que se muestra a continuación, se expresa el error cometido en el valor de corriente de recirculación cuando se acoplan dos transformadores. Estos valores han sido extraídos del estudio de acoplamiento de transformadores de distintos grupos de tensiones con el fin de poder comprobar si la hipótesis es válida para todos los grupos de tensión.

GRUPO	TRAFOS	$\delta$ [%]
230/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 Simancas	0,00042
	TB: T2 Simancas	
132/45 kV	TA: T3 Illescas II	0,0009
	TB: T1 Villasequilla	
132/15 kV (Zona Centro)	TA: T2 Santa Teresa	0,00468
	TB: T5 Aranjuez	
66/20 kV (Zona Norte)	TA: T1 Lalin	0,0047
	TB: T1 Negreira	
45/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 P. de Recoletos	0,004
	TB: T2 P. de Recoletos	
45/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 Las Mercedes	0,0039
	TB: T2 Villaverde	

**Tabla B.1.4.**

Como se puede apreciar en la tabla anterior todos los valores de los errores obtenidos son muy pequeños por lo que serán totalmente admisibles para el estudio de acoplamiento de transformadores.

### B.1.3.- CONCLUSIONES

El hecho de que se cometan errores tan pequeños, tanto en la corriente que circula por los transformadores como en la corriente que recircula entre ellos cuando se acoplan en paralelo, al comparar el valor de estas considerando y sin considerar la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito, permite que sea admisible la realización de la hipótesis de considerar despreciable el valor de la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito, pasando a ser considerada reactiva pura, con el fin de facilitar los cálculos realizados durante el estudio de acoplamiento de transformadores.



## B.2.- ERROR COMETIDO AL SUPONER CONSTANTE LA IMPEDANCIA DE CORTOCIRCUITO PARA TODAS LAS TOMAS DE LOS TRANSFORMADORES

### B.2.1.- ERROR COMETIDO EN EL VALOR DE LAS CORRIENTES QUE CIRCULAN POR LOS TRANSFORMADORES

#### **ECUACIONES EMPLEADAS PARA EL CÁLCULO DEL ERROR**

Considerando despreciable la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito de los transformadores, y partiendo de las ecuaciones que determinan el reparto de corriente en los transformadores acoplados, se obtienen las siguientes expresiones para el cálculo del error cometido al considerar constante para todas las tomas de los transformadores el valor de la impedancia de cortocircuito:

- Error cometido en la corriente que circula por el Trafo A:

$$\frac{|I_A'|}{|I_A|} = \frac{Z_{cc_{B(11)}} \cdot (Z_{cc_{A(ext)}} + Z_{cc_{B(ext)}})}{Z_{cc_{B(ext)}} \cdot (Z_{cc_{A(11)}} + Z_{cc_{B(11)}})} \quad (\text{B.2.1})$$

- Error cometido en la corriente que circula por el Trafo B:

$$\frac{|I_B'|}{|I_B|} = \frac{Z_{cc_{A(11)}} \cdot (Z_{cc_{A(ext)}} + Z_{cc_{B(ext)}})}{Z_{cc_{A(ext)}} \cdot (Z_{cc_{A(11)}} + Z_{cc_{B(11)}})} \quad (\text{B.2.2})$$

En este caso los valores que se introducen en las ecuaciones, para obtener el error que se comete al tomar constante para todas las tomas la impedancia de cortocircuito son:

- $Z_{ccA(11)}$  y  $Z_{ccB(11)}$  : valores de la impedancia de cortocircuito en la toma central, denotada con el subíndice 11 ya que este número de toma coincide con la toma central de la mayoría de los transformadores de este estudio.
- $Z_{ccA(ext)}$  y  $Z_{ccB(ext)}$  : valores de la resistencia de cortocircuito en las tomas extremas, tanto en la toma más baja como en la toma más alta. En la gran mayoría de los casos se corresponderán con las tomas 1 y 21.

## CASO PRÁCTICO REAL

En este apartado, el caso práctico se desarrolla sobre transformadores del grupo de tensiones 66/20 kV (Zona Norte).

Se calcula, para ambos transformadores, el error que se comete al suponer la tensión de cortocircuito constante cuando los transformadores trabajan en las tomas extremas, al ser ambos transformadores de 21 tomas dichas tomas son la 1 y la 21.

En la siguiente tabla se muestran los valores de las componentes de la impedancia de cortocircuito de ambos transformadores para la toma central, toma 11, y para las tomas extremas expresada en ohmios. Estos datos también se pueden consultar en el Anexo A, en su apartado A.3.

	Trafo A: T1- Lalin			Trafo B: T1 - Negreira		
	Toma 1	Toma 11	Toma 21	Toma 1	Toma 11	Toma 21
Zcc [ $\Omega$ ]	1,8169	1,7269	1,7146	2,6989	2,5930	2,5519

**Tabla B.2.1.**

Los valores expresados en la tabla anterior se sustituyen primero en la expresión B.19 para obtener el error cometido en la corriente que circula por el trafo A y posteriormente en la expresión B.20 para obtener el error cometido en la corriente que circula por el trafo B.

Error cometido en la corriente que circula por el trafo A:Toma 1:

$$\frac{|I_A'|}{|I_A|} = \frac{2,5930 \cdot (1,8169 + 2,6989)}{2,6989 \cdot (1,7269 + 2,5930)} = 1,0043 \quad (\text{B.2.3})$$

Toma 21:

$$\frac{|I_B'|}{|I_B|} = \frac{2,5930 \cdot (1,7146 + 2,5519)}{2,5519 \cdot (1,7269 + 2,5930)} = 1,0035 \quad (\text{B.2.4})$$

Como se puede ver en ambas tomas se comete un error por exceso de medida, tomando el 100,43 % en una y el 100,35 % en la otra, del valor real de corriente, lo que supone cometer errores de 0,43 y 0,35 % respectivamente.

La corriente nominal en el secundario del transformador A, T1 de la subestación de Lalin, es 687,32 A. Cuando circule dicha corriente y el transformador este trabajando en la toma 1 el error cometido será de 2,95 A, y en el caso de que este trabajando en la toma 21 de 2,40 A.

Error cometido en la corriente que circula por el trafo B:Toma 1:

$$\frac{|I_A'|}{|I_A|} = \frac{1,7269 \cdot (1,8169 + 2,6989)}{1,7169 \cdot (1,7269 + 2,5930)} = 0,9935 \quad (\text{B.2.5})$$

Toma 21:

$$\frac{|I_B'|}{|I_B|} = \frac{1,7269 \cdot (1,7146 + 2,5519)}{1,7146 \cdot (1,7269 + 2,5930)} = 0,9947 \quad (\text{B.2.6})$$

En este caso los errores se cometen por defecto de medida, tomando el 99,35 y el 99,47 % del valor real de la corriente que circula por el transformador B para el

estudio del acoplamiento de estos transformadores. Lo que supone cometer errores del 0,64 y del 0,53 %.

En el caso del transformador B, T2 de la subestación de Negreira, la corriente nominal en el secundario es 412,39A. Cuando circule dicha corriente y el transformador este trabajando en la toma 1, el error cometido será de 2,64 A, mientras que si el transformador esta trabajando en la toma 21 el error que se comete será de 2,18 A.

Tanto para el caso del transformador A como para el caso del transformador B los errores cometidos al tomar constante para todas las tomas el valor de la impedancia de cortocircuito serán admisibles durante el estudio del acoplamiento de estos, puesto que no afectarán a las conclusiones que se extraigan de dicho estudio.

## VALORACIÓN DEL ERROR COMETIDO

En la siguiente tabla se muestran los errores cometidos cuando se estudia el acoplamiento de transformadores de otros grupos de tensiones.

En ella se muestra el error, expresado en tanto por ciento, que se comete cuando los transformadores operan en las dos tomas extremas, así como el error cometido, en Amperios, cuando por el secundario de los transformadores circule su corriente nominal.

GRUPO	TRAFOS	Toma 1 $\delta$ [%]	Toma 21 $\delta$ [%]	$I_{n2}$ [A]	Toma 1 $\delta$ [A]	Toma 21 $\delta$ [A]
230/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 Simancas	0,077	0,11	1079,16	0,83	1,18
	TB: T2 Simancas	0,076	0,10	1079,16	0,82	1,07
132/45 kV	TA: T3 Illescas II	0,15	0,28	753,07	1,12	2,10
	TB: T1 Villasequilla	0,35	0,64	376,53	1,31	2,40
132/15 kV (Zona Centro)	TA: T2 SantaTeresa	0,65	0,51	1079,15	7,01	5,50
	TB: T5 Aranjuez	0,72	0,55	1079,15	7,76	5,93
66/20 kV (Zona Norte)	TA: T1 Lalin	0,43	0,35	687,32	2,95	2,40
	TB: T1 Negreira	0,65	0,53	412,39	2,64	2,18
45/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 P. de Recoletos	0,072	0,048	900	0,65	0,43
	TB: T2 P. de Recoletos	0,073	0,05	900	0,65	0,45
45/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 Las Mercedes	0,018	0,0028	900	0,16	0,025
	TB: T2 Villaverde	0,018	0,0028	900	0,16	0,025

Tabla B.2.2.

Los errores cometidos son mayores en todos los casos cuando ambos transformadores trabajan en la toma 1 que cuando trabajan en la toma 21. Estos errores, todos menores al 1 %, siguen siendo errores que se podrán considerar admisibles para el estudio de acoplamiento de los transformadores.

## B.2.2.- ERROR COMETIDO EN EL VALOR DE LA CORRIENTE DE RECIRCULACIÓN

### **ECUACIÓN QUE DETERMINA EL ERROR COMETIDO**

Para llegar a la expresión que permite estudiar el error cometido en el valor de la corriente de recirculación se parte de la ecuación que determina el valor de dicha corriente y se compara el valor que se obtendría, considerando y sin considerar constante el valor de la impedancia de cortocircuito para todas las tomas. Tomando como puramente reactivas las impedancias de cortocircuito de los transformadores se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{|Ic'|}{|Ic|} = \frac{Z_{cc_{A(ext)}} + Z_{cc_{B(ext)}}}{Z_{cc_{A(11)}} + Z_{cc_{B(11)}}} \quad (B.2.7)$$

Donde:

- $Z_{cc_{A(11)}}$  y  $Z_{cc_{B(11)}}$ : valores de la impedancia de cortocircuito en la toma central.
- $Z_{cc_{A(ext)}}$  y  $Z_{cc_{B(ext)}}$ : valores de la resistencia de cortocircuito en las tomas extremas, generalmente 1 y 21.

Al igual que en el estudio del error cometido en las corrientes que circulaban por los transformadores, se calculara el error para el caso de que ambos transformadores estén trabajando en sus toma extremas, tanto para la tomas más alta como para la toma más baja, puesto que en dichas combinaciones de tomas serán en las que se obtenga el mayor error cometido.

## CASO PRÁCTICO REAL

El cálculo del error cometido en el valor de la corriente de recirculación se va a realizar nuevamente sobre los transformadores elegidos del grupo de tensiones 66/20 KV (Zona Norte). Para ello en la siguiente tabla se muestra el valor de las componentes de la impedancia de cortocircuito tanto para las tomas extremas, tomas 1 y 21, como para la toma central, toma 11:

	Trafo A: T1- Lalin			Trafo B: T1 - Negreira		
	Toma 1	Toma 11	Toma 21	Toma 1	Toma 11	Toma 21
Zcc [ $\Omega$ ]	1,8169	1,7269	1,7146	2,6989	2,5930	2,5519

**Tabla B.2.3.**

Sustituyendo los valores de la tabla en la ecuación B.2.7, se obtiene:

Error cuando ambos transformadores trabajan en la Toma 1:

$$\frac{|I_c'|}{|I_c|} = \frac{1,8169 + 2,6989}{1,7269 + 2,5930} = 1,0453 \quad (\text{B.2.8})$$

En el caso de que ambos transformadores estuviesen trabajando en la toma 1, el error que se cometería en el valor de la corriente de recirculación tomada para los estudios de acoplamiento sería de un 4,53%.

Error cuando ambos transformadores trabajan en la Toma 21:

$$\frac{|I_c'|}{|I_c|} = \frac{1,7146 + 2,5519}{1,7269 + 2,5930} = 0,9876 \quad (\text{B.2.9})$$

Y en el caso de que ambos transformadores estuviesen trabajando en la toma 21, el error que se cometería en el valor tomado de la corriente de recirculación sería de un 1,24%.

En este caso los errores cometidos son bastante mayores que los obtenidos para los valores de las corrientes que circulan por los transformadores.

## VALORACIÓN DEL ERROR COMETIDO

Para obtener mayor información sobre el error cometido en el valor de la corriente de recirculación, se va a calcular dicho error en el acoplamiento de transformadores de diversos grupos de tensiones.

En la siguiente tabla se muestra el error cometido en el cálculo de la corriente de recirculación para distintos casos de acoplamiento. En ella, además de mostrar el grupo al que pertenecen los transformadores, se muestra el error cometido cuando los dos transformadores estén trabajando a la vez en sus tomas extremas, expresado en tanto por ciento y en Amperios.

Los errores se han calculado para los casos en los que ambos transformadores trabajen en la toma 1 o en la toma 21, en los casos reales estudiados para estas tomas el valor de las corrientes de recirculación sería nulo, por ello para cuantificar el error en amperios se va a tomar el valor de la corriente de recirculación de las combinaciones de tomas siguientes:

- Transformador A: Toma 1 y Transformador B: Toma 2
- Transformador A: Toma 21 y Transformador B: Toma 20

Ya que el error cometido para estas combinaciones de tomas será muy próximo al cometido cuando ambos transformadores trabajan en las mismas toma extremas.

GRUPO	TRAFOS	Toma 1 $\delta$ [%]	Toma 21 $\delta$ [%]	Ic[A] TA:1 TB:2	Ic[A] TA:21 TB:20	Toma 1 $\delta$ [A]	Toma 21 $\delta$ [A]
230/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 Simancas	3,88	0,75	41	73	1,59	0,30
	TB: T2 Simancas						
132/45 kV	TA: T3 Illescas II	5,37	2,40	23	36	1,23	0,86
	TB: T1 Villasequilla						
132/15 kV (Zona Centro)	TA: T2 SantaTeresa	5,76	2,43	49	78	2,82	1,89
	TB: T5 Aranjuez						
66/20 kV (Zona Norte)	TA: T1 Lalin	4,53	1,24	23	34	1,04	0,42
	TB: T1 Negreira						
45/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 P. de Recoletos	13,07	2,24	54	92	7,05	2,06
	TB: T2 P. de Recoletos						
45/15 kV (Zona Centro)	TA: T1 Las Mercedes	12,8	2,63	54	92	6,912	2,41
	TB: T2 Villaverde						

Tabla B.2.4.

Como se puede ver en la tabla, los errores cometidos son más altos en todos los casos que los obtenidos en las corrientes que circulan por los transformadores, especialmente para el de los transformadores del grupo 45/15 kV (Zona Centro) cuando ambos trabajan en la toma 1.

### B.2.3.- CONCLUSIONES

El error cometido en el valor de las corrientes que circulan por los transformadores es pequeño, en todos los casos menor del 1 %, por tanto estos errores serán admisibles en el estudio de acoplamiento de transformadores.

El error cometido en el valor de la corriente de recirculación es bastante mayor que los anteriores, especialmente cuando ambos transformadores trabajan en la toma 1.

La corriente de recirculación tiene argumentos elevados (impuestos por las impedancias de cortocircuito que se pueden considerar puramente reactivas) y las intensidades de carga suelen tener argumentos mucho menores (impuestos por el factor de potencia de la carga), las sumas vectoriales dan unas intensidades resultantes cuyo módulo puede variar con respecto a las intensidades que alimentan la carga.

Por tanto, el error que se cometerá, tanto en el valor de la corriente final que circula por cada transformador como en las estimaciones de potencia realizadas, será más próximo al valor del error que se comete en las corrientes que alimenta la carga.

Debido a esto se asume en el estudio de acoplamiento de transformadores el error cometido al suponer constante para todas las tomas de los transformadores el valor de la impedancia de cortocircuito.