

[ANEXO C]

CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE LOS DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE LA S/E MÓVIL IEM 26-1737

Para el diseño de los devanados, usando como premisa las dimensiones del núcleo magnético de la parte activa del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737, se tomaron en cuenta una serie parámetros entre los cuales podemos mencionar:

- Potencia nominal del transformador (30 MVA).
- Tensiones nominales, lado de alta tensión (115 kV) y baja tensión (13,8 kV).
- Frecuencia industrial de trabajo del transformador (60 Hz).

Entre las características fundamentales del núcleo magnético de la parte activa del transformador de la S/E móvil, se utiliza primeramente para el dimensionado del mismo una serie de factores como lo son:

- La tensión por espira del devanado de alta tensión.
- El valor de la inducción magnética o densidad de flujo (B).

Luego de determinar físicamente las dimensiones o distancias características del núcleo magnético, posterior al desencubado de la parte activa y respectivo desarme de la misma, esto con la finalidad de certificar que sean las mismas medidas respecto a las dimensiones de fabricación de todos los componentes más significativos de la parte activa del transformador, debido que el fabricante (Empresa IEM) no suministra las medidas específicas de diseño del núcleo ni de los devanados del transformador.

El núcleo magnético está constituido por una serie de láminas de acero de distintos tamaños, circunscritas en un círculo para ofrecer el máximo factor de espacio para el hierro y mínima relación de espira media para el cobre. Estas láminas están separadas entre sí por un tipo de aislamiento para eliminar las corrientes parásitas que se puedan generar al energizarse y entrar en operación la unidad de transformación. Las variaciones en las dimensiones y forma de construcción del núcleo magnético modifican los parámetros descritos anteriormente, por lo tanto a la hora de diseñar o construir la parte activa de un transformador de potencia de acuerdo a las necesidades del usuario, se debe cumplir a cabalidad con estos parámetros de diseño, antes de proceder a dimensionar los devanados del transformador de potencia.

C.1 Selección de la tensión por espira

Para poder mantener constante la inducción magnética o densidad de flujo (B), la tensión por espira aumenta proporcionalmente a la raíz cuadrada de la potencia aparente, mientras que para mantener constante la tensión por espira de los devanados, la sección transversal o área del núcleo debe variar proporcionalmente con la raíz cuadrada de la potencia aparente, utilizando la siguiente expresión:

$$V = 4,44 * N * f * \Phi_{m\acute{a}x} = 4,44 * N * f * A_{Fe} * B_{m\acute{a}x} \quad (3.1)$$

Dónde: V : Tensión del devanado [V].
 N : Número de vueltas o espiras del devanado [Vuelta].
 f : Frecuencia [Hz].
 $\Phi_{m\acute{a}x}$: flujo magnético máximo por columna [Wb]
 $B_{m\acute{a}x}$: Inducción magnética o densidad de flujo [T o Wb/m²].
 A_{Fe} : Sección transversal neta o área del Hierro [m²].

Para calcular la tensión por espira de un arrollado de una manera aproximada, teniendo en cuenta su relación con la potencia aparente, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{Esp} = k * \sqrt{S_{Nom}} = 0,39 * \sqrt{30000} = 67,549 [V] \quad (3.2)$$

Dónde: V_{Esp} : Tensión presente en cada espira de Devanado [V].
 S_{Nom} : Potencia aparente nominal del transformador de potencia [kVA].
 k : Factor elegido por el usuario (0,39) [1/A].
 Para arrollados de Cobre (Cu): $0,37 < k < 0,45$.
 Para arrollados de Aluminio (Al): $0,32 < k < 0,35$.

Esta forma de cálculo servirá para hacer un primer diseño del resto de los parámetros del transformador, en caso de que los valores obtenidos no cumplan con los requerimientos se deberá revisar el valor de “k”. Como la conexión del transformador es Estrella-Estrella con un desfase de cero grados (YNyn0), se deben calcular las tensiones de fase de los devanados respecto a las tensiones de línea de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{FaseA} = \frac{V_{LLA}}{\sqrt{3}} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66395,281 [kV] \quad (3.3)$$

$$V_{FaseB} = \frac{V_{LLB}}{\sqrt{3}} = \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 7967,434 [kV] \quad (3.4)$$

Debido que el fabricante no suministra un factor de dispersión para el flujo, se aproximarán los valores de las tensiones mediante las ecuaciones de relación de tensión, relación de corriente o relación de transformación de un transformador ideal, mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{Alta}}{V_{Baja}} = \frac{N_{Alta}}{N_{Baja}} = \frac{I_{Baja}}{I_{Alta}} \quad (3.5)$$

Dónde: V_{Alta} : Tensión en el lado de alta del transformador (115 kV) [kV].
 V_{Baja} : Tensión en el lado de baja del transformador (13,8 kV) [kV].
 N_{Alta} : Número de vueltas en el lado de alta del transformador [Vueltas].
 N_{Baja} : Número de vueltas en el lado de baja del transformador [Vueltas].
 I_{Alta} : Corriente en el lado de alta del transformador [A].
 I_{Baja} : Corriente en el lado de baja del transformador [A].

$$N_{Baja} = \frac{V_{FaseB}}{V_{Esp}} = \frac{7967,434}{67,549} = 117,949 \approx 118 [Vueltas] \quad (3.6)$$

Seleccionamos 120 Vueltas para el devanado de baja tensión, por lo que el número de espiras para ese devanado será $N_{Baja} = 120$ [Vueltas].

$$N_{Alta} = N_{Baja} * \frac{V_{FaseA}}{V_{FaseB}} = 120 * \frac{66395,281}{7967,434} = 999,999 \approx 1000 [Vueltas] \quad (3.7)$$

Seleccionamos 1000 Vueltas para el devanado de Alta tensión en su posición nominal $N_{Nominal} = 1000$ [Vueltas], por lo que el número de espiras totales tomando en cuenta el devanado de regulación (+ 5%) será $N_{Alta} = 1050$ [Vueltas].

C.2 Selección de la inducción magnética o densidad de flujo y cálculo del flujo magnético máximo

La inducción máxima ($B_{m\acute{a}x}$) está limitada por las condiciones de sobreexcitación y la pendiente de la curva del ciclo de histéresis (B-H) del material (chapa magnética laminada en frío de grano orientado), la cual empeora significativamente a partir de 1,65 T (valor de referencia por norma CADAPE); con

lo que para pequeños incrementos en la inducción, la corriente magnetizante aumenta bastante. En condiciones de sobretensión aumenta la densidad de flujo en el núcleo. Para sobreexcitaciones de un porcentaje determinado ($\alpha\% \leq 5$), una expresión general que se sigue para calcular la inducción máxima es la que se obtiene de la siguiente ecuación:

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{1,6}{\left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)} = \frac{1,6}{\left(1 + \frac{5}{100}\right)} = 1,52381 [T] \quad (3.8)$$

Dónde: $B_{m\acute{a}x}$: Inducción magnética o densidad de flujo magnético.
 α : porcentaje de niveles de sobretensiones o sobreexcitaciones (5%).

Cuando un transformador está sometido a una sobreexcitación (frecuentemente debida a sobretensiones), el núcleo contiene suficiente flujo magnético como para saturarlo. Durante una parte del ciclo el flujo sobrepasa lo permitido por el núcleo y puede producir pérdidas elevadas en las chapas magnéticas. Si la sobretensión es elevada y de larga duración, puede provocar efectos perjudiciales sobre las láminas de acero del núcleo, así como elevadas temperaturas, tanto en los arrollados como en las partes estructurales del transformador, presentando problemas en los aislamientos y en los tornillos que pueden soportar temperaturas menores y pueden resultar seriamente dañados, debido a estos factores se selecciona un factor $\alpha = 5\%$.

C.3 Dimensionamiento del núcleo magnético del transformador

Para una primera elección de la sección del núcleo, es muy útil tomar como referencia los datos de construcciones existentes de la parte activa del transformador. Los ajustes finales tendrán que adaptarse a las condiciones especificadas para cada cálculo de las dimensiones del núcleo.

La fuerza electromotriz (f.e.m.), que se genera en cualquiera de los devanados, viene dada por la ecuación (3.1), por lo cual de esta expresión podemos calcular el flujo magnético máximo ($\Phi_{m\acute{a}x}$) que se genera en una espira del devanado:

$$\Phi_{m\acute{a}x} = \frac{V_{Esp}}{4,44*60} = \frac{67,549}{4,44*60} = 0,25357 [Wb] \quad (3.9)$$

Con el valor del flujo magnético máximo, podemos calcular la sección transversal neta del núcleo, utilizando la siguiente expresión:

$$S_{Fe} = \frac{\Phi_{m\acute{a}x}}{B_{m\acute{a}x}} = \frac{0,25357}{1,52381} = 0,16641 [m^2] \quad (3.10)$$

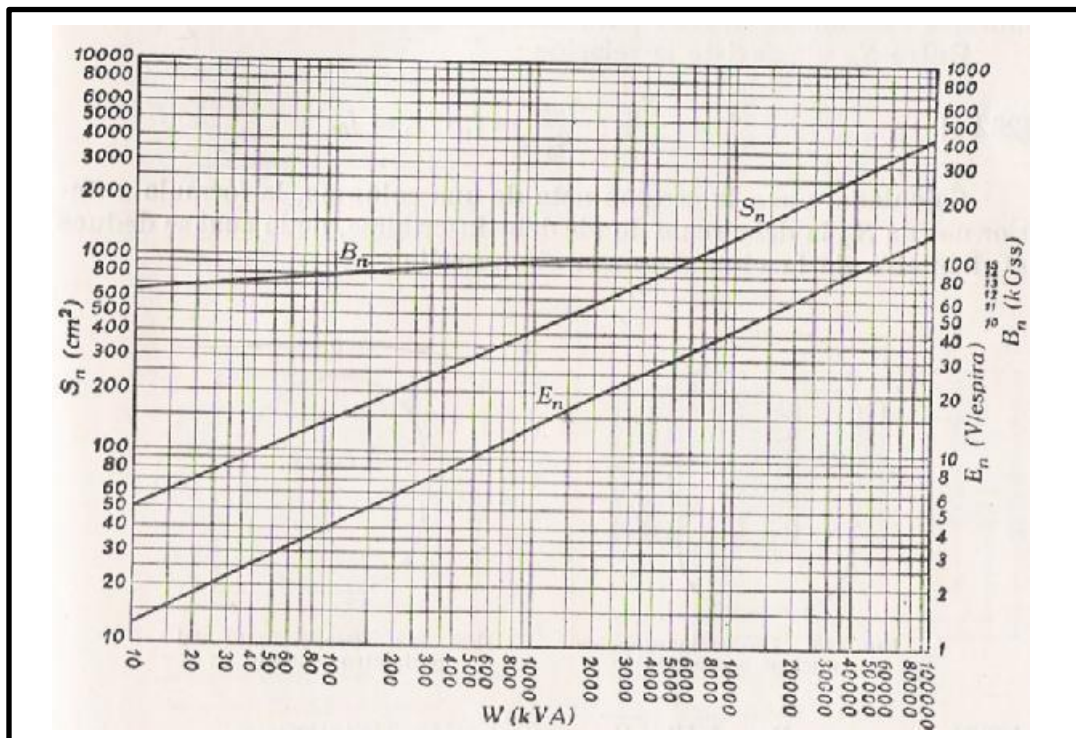


Figura C1. Gráfica para transformadores trifásicos de columnas, Inducción máxima por columna (B_n), tensión por espira (E_n) y sección neta del núcleo (S_n) admisibles.

Fuente: Dasgupta Indranjit, "Power Transformer Quality Assurance",

La Figura C1 permite representar los valores obtenidos previamente de la tensión por espira (V_{Esp}) y la inducción máxima ($B_{m\acute{a}x}$) admisibles en función de la potencia aparente (S_n) y los valores de la sección neta (S_{FeNeta}) asociados.

El núcleo se construye con láminas de acero con un pequeño porcentaje de silicio de unos 0,3 mm de espesor, aisladas la una de la otra mediante un tratamiento químico (denominado Carlite). Por lo tanto la sección bruta del núcleo debe incluir estos componentes aparte del hierro y para ello se define un factor de utilización (f_u) con un valor de 0,935 para chapas fosfatadas.

$$S_{FeNeta} = \frac{S_{Fe}}{f_u} = \frac{0,16641}{0,935} = 0,17797 [m^2] \quad (3.11)$$

La sección del núcleo se dispone o ensambla escalonada por paquetes de diferentes anchos de medidas e inscrita en un círculo, para poder dar a los arrollamientos una forma cilíndrica, que es la más apta para soportar los esfuerzos que se producen a la hora de presentarse un cortocircuito.

En las secciones de núcleo de forma ovaladas, como la del transformador de potencia de la móvil IEM 26-1737, se debe considerar un segundo factor de utilización ($f_{uo} = 0,905$), que proporcionará la relación entre la sección neta del núcleo (S_{FeNeta}), y la sección del óvalo circunscrito (S_o). La Figura C2 muestra este factor para distintos escalonados de ensamblaje del núcleo. La relación entre la sección del núcleo (S_{Fe}), y la del círculo u óvalo circunscrito es la dada por un nuevo factor de utilización (f_o), producto de los dos factores de utilización (f_u y f_{uo}) anteriormente mencionados.

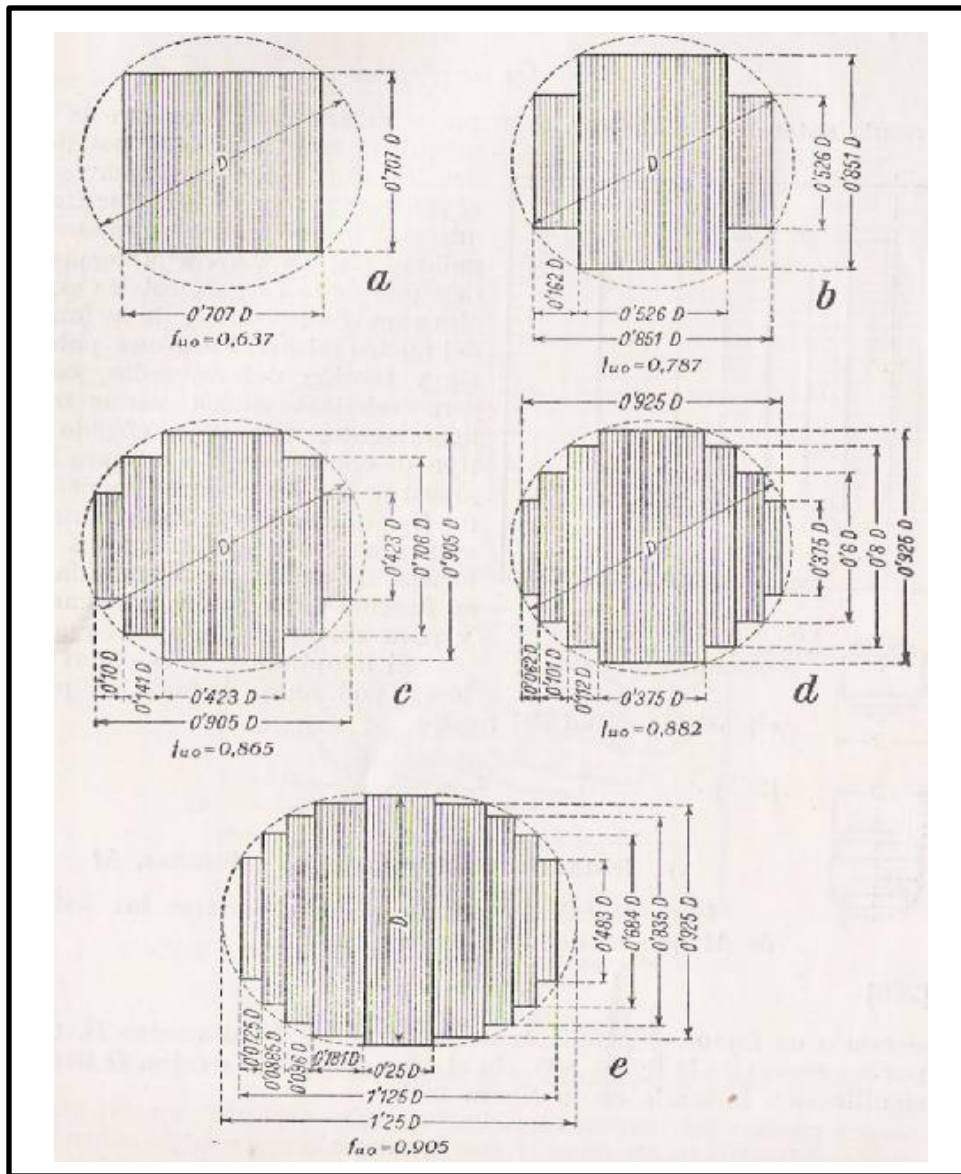


Figura C2. Dimensiones y factor de utilización f_{uo} , de las secciones escalonadas del núcleo.

Fuente: Dasgupta Indranjit, "Power Transformer Quality Assurance",

De la Figura C2, se puede obtener el valor del factor de utilización para secciones escalonadas del núcleo siendo este de 0,905. Con esta magnitud podemos calcular el factor de utilización para secciones de núcleos ovaladas, de acuerdo a lo expresado en la siguiente ecuación.

$$f_0 = f_u * f_{uo} = 0,935 * 0,905 = 0,84618 \text{ [Adimensional]} \quad (3.12)$$

De la ecuación 3.13 se obtiene la sección del círculo S_0 , donde debería inscribirse una columna de sección aproximada S_{Fe} , a partir de esta sección S_0 , se deduce el diámetro de la circunferencia circunscrita, siendo esta:

$$S_0 = \frac{S_{FeNeta}}{f_0} = \frac{0,17797}{0,84618} = 0,21032 \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.13)$$

Para secciones ovaladas con apilamiento de las láminas del núcleo magnético, el factor de apilamiento dado para este tipo de núcleos es 0,98 ($f_a = 0,98$). Por lo tanto el diámetro de la circunferencia circunscrita de la columna se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$D_{Circ} = f_a * \sqrt{S_0} = 0,98 * \sqrt{0,21032} = 0,44944 \text{ [m]} \approx 045 \text{ [m]} \quad (3.14)$$

La sección del yugo o culata (S_y), cuyo perímetro no afecta las dimensiones de los devanados. Para reducir las pérdidas en vacío su sección se hace un poco mayor que la de las columnas, entre el 10% y el 15%, se toma el mayor valor (15%) para realizar los cálculos de la sección del yugo o culata del núcleo, mediante la siguiente expresión:

$$S_y = 1,15 * S_{Fe} = 1,15 * 0,16641 = 0,19137 \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.15)$$

C.4 Dimensionamiento de los devanados del transformador

Las pletinas de los arrollamientos se seleccionan según la corriente que vaya a circular por ellos. Mientras que para calcular el tamaño de un conductor se debe tener en cuenta tanto el material del arrollado como la densidad de corriente. Para comenzar con una selección preliminar de la densidad de corriente (J) se tomará el valor de $J = 3 \text{ [A/mm}^2\text{]}$ de acuerdo al tipo de material que es Cobre (Cu). Debido que el fabricante no suministra información sobre esta variable, ni el cliente CORPOELEC diseño una densidad de corriente determinada. Para obtener las corrientes nominales que circularan por los devanados al este entrar en operación las calculamos mediante las siguientes ecuaciones:

$$I_{FaseA} = \frac{S_n}{3 \cdot V_{FaseA}} = \frac{30 \text{ MVA}}{3 \cdot 66,395281 \text{ kV}} = 150,613 \text{ [A]} \quad (3.16)$$

$$I_{FaseB} = \frac{S_n}{3 \cdot V_{FaseB}} = \frac{30 \text{ MVA}}{3 \cdot 7,967434 \text{ kV}} = 1255,109 \text{ [A]} \quad (3.17)$$

C.4.1 Devanado de baja tensión

Para transformadores de potencia, los conductores que se seleccionan para el lado de baja tensión son en su mayoría pletinas y sus medidas pueden calcularse a partir del área (A_{CondB}) del conductor disponible de la forma siguiente:

$$A_{CondB} = \frac{I_{Baja}}{J} = \frac{1255,109}{3} = 418,37 \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.18)$$

$$D_{CondB} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{CondB}}{\pi}} * 10^{-3} = 23,08 \text{ [mm]} \quad (3.19)$$

Después de calcular el diámetro del conductor (D_{CondB}) de la manera indicada anteriormente, éste debe ser revisado en las tablas estandarizadas de conductores. Como el diámetro del conductor es superior a $3,5 \text{ mm}^2$, se debe seleccionar una pletina rectangular de área equivalente, en lugar de un conductor redondo, ya que se conseguirán mejores resultados (factor de relleno), para la selección de la dimensión de las pletinas a utilizar, las diferentes secciones se expresan en la Tabla C1.

Tabla C1. Dimensiones normalizadas y secciones netas para pletinas de Cobre (Cu) desnudas.

Ancho (mm)	Espesor (mm)																	
	0,80	0,90	1,00	1,12	1,25	1,40	1,60	1,80	2,00	2,24	2,50	2,80	3,15	3,55	4,00	4,50	5,00	5,60
2,00	1,463	1,626	1,785	2,025	2,285	2,585												
2,24	1,655	1,842	2,025	2,294	2,585	2,921	3,369											
2,50	1,863	2,076	2,285	2,585	2,910	3,285	3,785	4,137										
2,80	2,103	2,346	2,585	2,921	3,285	3,705	4,265	4,677	5,237									
3,15	2,383	2,661	2,935	3,313	3,723	4,195	4,825	5,307	5,937	6,693								
3,55	2,703	3,021	3,335	3,761	4,223	4,755	5,465	6,027	6,737	7,589	8,326							
4,00	3,063	3,426	3,785	4,265	4,785	5,385	6,185	6,837	7,637	8,597	9,451	10,65						
4,50	3,463	3,876	4,285	4,825	5,410	6,085	6,965	7,737	8,637	9,717	10,70	12,05	13,03					
5,00	3,863	4,326	4,785	5,385	6,036	6,785	7,785	8,637	9,637	10,64	11,95	13,45	15,20	17,20				
5,60	4,343	4,866	5,385	6,057	6,785	7,625	8,745	9,717	10,84	12,018	13,45	15,13	17,09	19,33	21,54			
6,30	4,903	5,496	6,085	6,841	7,660	8,606	9,865	10,96	12,24	13,75	15,20	17,09	19,30	21,62	24,34	27,49		
7,10		6,216	6,885	7,737	8,660	9,725	11,15	12,42	13,84	15,54	17,20	19,33	21,82	24,60	27,54	31,09	34,64	
8,00			7,785	8,745	9,785	10,99	12,59	14,04	15,64	17,56	19,45	21,85	24,65	27,85	31,14	35,14	38,14	43,94
9,00				9,865	11,04	12,39	14,19	15,84	17,64	19,60	21,95	24,65	27,80	31,40	35,14	39,64	44,14	49,54
10,00					12,29	13,79	15,79	17,64	19,64	22,04	24,45	27,45	30,95	34,95	39,14	44,14	49,14	55,14
11,20						15,47	17,71	19,80	22,04	24,73	27,45	30,81	34,73	39,21	43,94	49,54	55,14	61,86
12,50							19,79	22,14	24,64	27,64	30,70	34,45	38,83	43,83	49,14	55,39	61,64	69,14
14,00								24,84	27,64	31,00	34,45	38,65	43,55	49,15	55,14	62,14	69,14	77,54
16,00									31,64	35,48	39,45	44,25	49,85	56,25	63,14	71,14	79,14	88,74

Fuente: Dasgupta Indranjit, “*Power Transformer Quality Assurance*”,

Basándonos en la Tabla C1, se utilizarán pletinas rectangulares debido que el área de la sección del conductor supera los $3,5 \text{ mm}^2$. Como conductor se utilizara un arreglo de cable transpuesto, para poder abarcar el área obtenida por lo que se elegirán tres (3) pletinas, respetando el diseño del fabricante y las distancias internas respectivas con las siguientes dimensiones: 14 mm de ancho y 4 mm de espesor, la cual brinda un área efectiva de $55,14 \text{ mm}^2$, calculando el área total que brinda el arreglo de las 3 pletinas se obtiene:

$$A_{PletinaB} = 3 * 55.14 = 165,42 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.20)$$

$$J_B = \frac{I_{Baja}}{A_{PletinaB}} = \frac{1255,109}{165,42} = 7,5874 \left[\frac{A}{\text{mm}^2} \right] \quad (3.21)$$

En vista de que el devanado terciario se eliminara de la configuración del diagrama de conexión del transformador de la S/E móvil IEM, la cual ahora estará dada por el siguiente arreglo YNyn0, se procedió a tomar las medidas en físico de este arrollado para en su lugar colocar un cilindro de cartón aislante de alta resistencia, para incorporar en el espacio que ocupaba dicho devanado, el cual experimentaba las siguientes medidas en lo que respecta a altura ($H_{DevD} = 1350 \text{ mm}$), de espesor ($Esp_{DevD} = 60 \text{ mm}$), separación entre columna del núcleo y devanado terciario ($Sep_{DevColumn} = 60 \text{ mm}$), siendo sus diámetros internos (D_{IntD}) y externos (D_{ExtD}), estos datos son importantes para los cálculos referentes a las características eléctricas y mecánicas de los demás devanados.

$$D_{IntD} = D_{Circ} + Esp_{DevD} = 0,45 + 0,06 = 0,51 \text{ [m]} \approx 510 \text{ [mm]} \quad (3.22)$$

$$D_{ExtD} = D_{IntD} + Esp_{DevD} = 0,51 + 0,05 = 0,57 \text{ [m]} \approx 560 \text{ [mm]} \quad (3.23)$$

Tomando en cuenta las medidas de la parte activa de la S/E móvil, por diseño se seleccionan 40 discos para el devanado de baja tensión ($N_{DiscosB} = 40$), lo cual ahora nos indica que el devanado de baja tensión está conformado por 120 Vueltas ($N_{Baja} = 120 \text{ [Vueltas]}$), tomando las medidas de las pletina utilizadas por el fabricante siendo estas ancho ($Anch_{CondB} = 14 \text{ mm}$), espesor ($Esp_{CondB} = 4 \text{ mm}$) y el área ($A_{PletB} = 55.14 \text{ mm}^2$) siendo estos los datos fundamentales de las mismas, otros factores que se asumen, es la distancia entre el devanado terciario (Ahora cilindro de cartón de alta resistencia) y el devanado de baja, la cual se procedió a medir ($Dist_{DevTercBaja} = 0,06 \text{ m} = 60 \text{ mm}$) y el espesor del papel aislante que recubre el conductor se tomará de 2 mm ($Esp_{Papel} = 0,002 \text{ m} = 2 \text{ mm}$). Para el arreglo de las

hélices o hebras que conforman el devanado de baja tensión (13,8 kV), se utilizará un arreglo de tres (3) pletinas rectangulares unidas mediante un cable transpuesto con las especificaciones anteriores. Con estos datos procedemos a calcular los diámetros interno y externo del mismo, mediante las siguientes ecuaciones:

$$D_{IntB} = D_{ExtD} + Dist_{DevTercBaja} = 0,56 + 0,06 = 0,62 [m] \approx 620 [mm] \quad (3.24)$$

$$D_{ExtB} = D_{IntB} + \left(2 * \frac{N_{Baja}}{N_{DiscoB}} * (Esp_{CondB} + Esp_{Papel}) \right) = 0,69789 [m] \approx 700 [mm] \quad (3.25)$$

Para poder calcular la altura del devanado de baja tensión, se realizó medición de la separación vertical entre el arreglo transpuesto de pletinas conductoras siendo este de 5 mm ($h_{CondB} = 5$ mm), la cual se tomara el doble en la parte superior e inferior de los discos del arrollado, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$H_{CondB} = N_{DiscoB} * (2 * Anch_{CondB} + Esp_{Papel}) + (N_{DiscoB} - 2) * h_{CondB} + 2 * h_{CondB} \quad (3.26)$$

$$H_{CondB} = 1,35109 [m] \approx 1351,09 [mm]$$

Siendo la altura del devanado de baja tensión: $H_{CondB} = 1350$ [mm]

C.4.2 Devanado de alta tensión

De la misma manera que se calculó el conductor del devanado de baja tensión, se procederá a realizar los cálculos del conductor de alta tensión, para esto primeramente calculamos el área del conductor, de la siguiente manera:

$$A_{Conda} = \frac{I_{Alta}}{J} = \frac{150,613}{3} = 50,204 [m^2] \quad (3.27)$$

$$D_{Conda} = \sqrt{\frac{4 * A_{Conda}}{\pi}} * 10^{-3} = 7,99 [mm] \quad (3.28)$$

De acuerdo al área del conductor obtenida, se procedió a elegir por diseño de los devanados unas pletinas con las siguientes especificaciones, Ancho ($Anch_{Conda} = 7,1$ mm) y espesor ($Esp_{Conda} = 1$ mm), la cual brinda un área efectiva de ($A_{PletA} = 6,885$ mm²), con esta sección de área de pletina, se debe realizar un arreglo de cable transpuesto, para poder abarcar el área obtenida, por lo que se elegirán trece (13) pletinas con las dimensiones antes expuestas ($A_{PletinaA} = 13 * 6,885 = 89,505$ [mm²]) y con esto poder calcular la densidad de corriente que predominara en las mismas, esto se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$J_A = \frac{I_{Alta}}{A_{PletinaA}} = \frac{150,613}{89,505} = 1,68274 \left[\frac{A}{mm^2} \right] \quad (3.29)$$

Al igual que para el devanado de baja tensión, se tomó en cuenta las medidas aproximadas de la parte activa de la S/E móvil, se elige un número de 75 discos para este devanado de alta tensión ($N_{DiscosA} = 75$), otros factores que se asumen, es la distancia entre devanados, que se midió físicamente y resulto ser de 70 [mm] ($Dist_{DevAltaBaja} = 0,7$ [m] = 70 [mm]) y el espesor del papel aislante que recubre el conductor se asumirá de 1,2 [mm] ($Esp_{Papel} = 0,0012$ [m] = 1,2 [mm]). Con estos datos procedemos a calcular los diámetros interno y externo del devanado de alta tensión, mediante las siguientes ecuaciones:

$$D_{IntA} = D_{ExtB} + Dist_{DevAltaBaja} = 0,70 + 0,07 = 0,77 [m] \approx 770 [mm] \quad (3.30)$$

$$D_{ExtA} = D_{IntA} + \left(2 * \frac{N_{Alta}}{N_{DiscoA}} * (Esp_{Conda} + Esp_{Papel}) \right) = 0,84299 [m] \approx 850,00 [mm] \quad (3.31)$$

Para el cálculo de la altura del devanado de alta tensión, se asume la separación vertical entre pletinas conductoras de 4 mm ($h_{CondA} = 4 \text{ mm}$), la cual se tomara el doble en la parte superior e inferior del arrollado, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$H_{CondA} = N_{DiscoA} * (2 * Ancho_{CondA} + Esp_{Papel}) + (N_{DiscoA} - 2) * h_{CondA} + 2 * h_{CondA} \quad (3.32)$$

$$H_{CondA} = 1.35175 [m] \approx 1350 [mm]$$

Para obtener la altura de la ventana del núcleo, se procede a incrementar la altura de los devanados en un 10% o por encima de esta tolerancia, como se muestra a continuación:

$$H_{Vent} = 1,10 * H_{CondA} = 1,48693 [m] \approx 1500 [mm] \quad (3.33)$$

Por lo que el fabricante asume como altura de la ventana una distancia de 1500 [mm], dejando una tolerancia de 11,11% de distancia de altura de la ventana respecto a la altura de los devanados.

$$H_{Vent} = 1,1111 * H_{CondA} = 1,500 [m] = 1500 [mm] \quad (3.34)$$

Para el obtener la medida entre columnas del núcleo magnético del transformador, con los resultados obtenidos y tomando como dato la distancia de separación o aislamiento entre fases ($Dist_{EntreFases} = 0,05 [m] = 50 [mm]$), se procede a aplicar la siguiente expresión:

$$Dist_{EntreColumn} = D_{ExtA} + Dist_{EntreFases} = 0,85 + 0,05 = 0,90 [m] \approx 900 [mm] \quad (3.35)$$

C.5 Peso del núcleo magnético

Para realizar el cálculo del peso total que tendrá el núcleo, se deben evaluar una serie de variables como lo es la superficie que ocupa el yugo o culata, así como las dimensiones que experimentara al aplicarle los factores de apilamiento pertinentes al igual que se realizó con la columnas, por lo que las ecuaciones que nos permiten obtener los diferentes resultados se presentan a continuación:

$$S_{Yugo} = \frac{S_y}{f_u} = 0,20467 [m^2] \quad (3.36)$$

La sección donde se inscribe el yugo se calcula mediante la siguiente formula:

$$S_{YugoInsc} = \frac{S_y}{f_o} = 0,22615 [m^2] \quad (3.37)$$

Aplicando el mismo factor de apilamiento que se le incorporo en los cálculos de las columnas ($f_a = 0,98$), se puede obtener el diámetro del yugo o culata, mediante la siguiente ecuación:

$$D_{Yugo} = f_a * \sqrt{S_{YugoInsc}} = 0.45034 [m] \approx 450 [mm] \quad (3.38)$$

El material por el cual está compuesto el yugo o culata y las columnas (Acero-Silicio 3%), presenta las siguientes propiedades:

- Espesor de las láminas: $Esp_{Lam} = 0,3 \text{ mm}$.
- Densidad: $Dens = 7650 \text{ Kg/m}^3$.
- Resistividad efectiva: $\rho_{Efect} = 0,0103 \text{ } \Omega/\text{m}$.

Con estos datos podemos calcular la masa aproximada del núcleo del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737, aplicando la siguiente ecuación:

$$M_N = (3 * H_{Vent} + 2 * 1,125 * D_{Circ}) * S_{FeNeta} * f_u * Dens + (4 * D_{EntreColumn} + 2 * 1,125 * D_{Yugo}) * S_{Yugo} * f_{uo} * Dens = 13543,348 [Kg] \quad (3.39)$$

C.6 Cálculo de las pérdidas en el núcleo

Las pérdidas en un transformador comprenden un pequeño porcentaje de la potencia total que transmite ($\leq 0,5\%$ de pérdidas para transformadores de potencia) [6]. Sin embargo estas pérdidas pueden provocar calentamientos localizados en zonas donde pueden comprometer el buen funcionamiento de la unidad transformadora. Existen dos tipos de pérdidas en un transformador teniendo en cuenta donde se producen:

- Pérdidas en el Hierro (Fe) o pérdidas en vacío.
 - Pérdidas por histéresis del material.
 - Pérdidas por corrientes parasitas o corrientes de Foucault.
- Pérdidas en el Cobre (Cu) o pérdidas en carga.

La Figura C3 brinda la relación entre la inducción magnética o densidad de flujo y las pérdidas presentes en el material, para una inducción magnética de ($B = 1,5238$ T), resulta $0,95$ W/Kg de pérdidas ($Perd_{Nuc} = 0,95$ [W/Kg]).

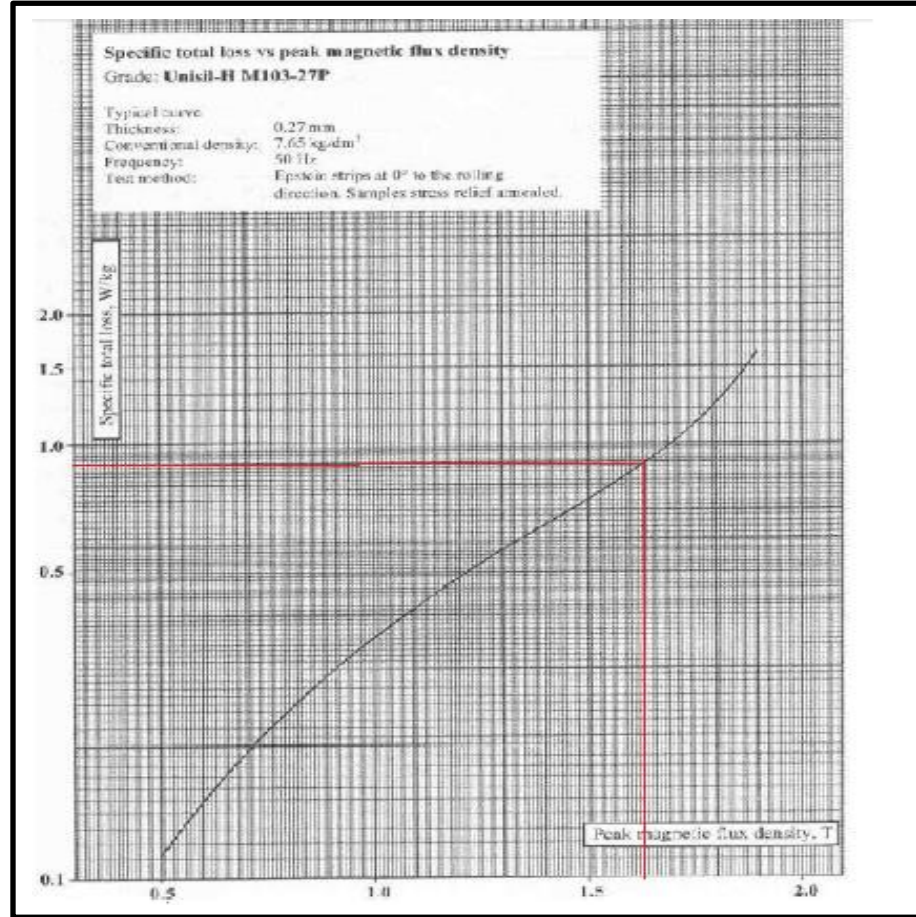


Figura C3. Curva de relación entre pérdidas y la inducción magnética (B).
Fuente: Dasgupta Indranjit, “Power Transformer Quality Assurance”.

Con las pérdidas presentes en el material, se puede calcular las pérdidas adicionales ($Perd_{Adic}$) en el material del núcleo (Acero - Silicio3%), para luego con este dato obtener las pérdidas totales ($Perd_{Tot}$) en el núcleo, usando las siguientes expresiones:

$$Perd_{Adic} = \frac{f^2 * B_{max}^2 * Esp_{Lam}^2 * \pi^2}{6 * \rho_{Effect}} = 0,12015 [W/m^2] \quad (3.40)$$

$$Perd_{TotFe} = \left(\frac{Perd_{Adic} * M_N}{Dens} \right) + 2 * Perd_{Nuc} * M_N = 22285,092 [W] \quad (3.41)$$

Para el cálculo de la corriente de vacío de la Figura C4., se obtienen los VA/kg frente a la inducción, para una inducción magnética ($B = 1.6 \text{ T}$), la potencia aparente por kilogramo es de 1,4 [VA/Kg] ($S_0 = 1,4 \text{ [VA/Kg]}$). En este valor obtenido de las curvas de la gráfica ya están incluidas las pérdidas en las juntas entre yugo y columnas, por lo tanto podemos obtener la corriente de vacío en la siguiente ecuación:

$$I_0 = \left(\frac{S_0 * M_N}{\sqrt{3} * V_{FaseB}} \right) = 1,08108 \text{ [A]} \quad (3.42)$$

Esta corriente se ve incrementada debido que se necesita magnetizar el entrehierro y por lo tanto la corriente de vacío, adquiere además un incremento del 150%, sobre el valor ya obtenido, por lo cual la corriente de vacío magnetizante será:

$$I_{0Magn} = I_0 * (1 + 1,5) = 1,62162 \text{ [A]} \quad (3.43)$$

Por otro lado la corriente de vacío también se ve influenciada por los fenómenos de histéresis y las corrientes parásitas:

$$I_{Hist} = \frac{Perd_{TotFe}}{\sqrt{3} * V_{FaseB}} = 1,61717 \text{ [A]} \quad (3.44)$$

Por lo tanto la corriente de vacío total será:

$$I_{0Tot} = \sqrt{I_{0Magn}^2 + I_{Hist}^2} = 2,28691 \text{ [A]} \quad (3.45)$$

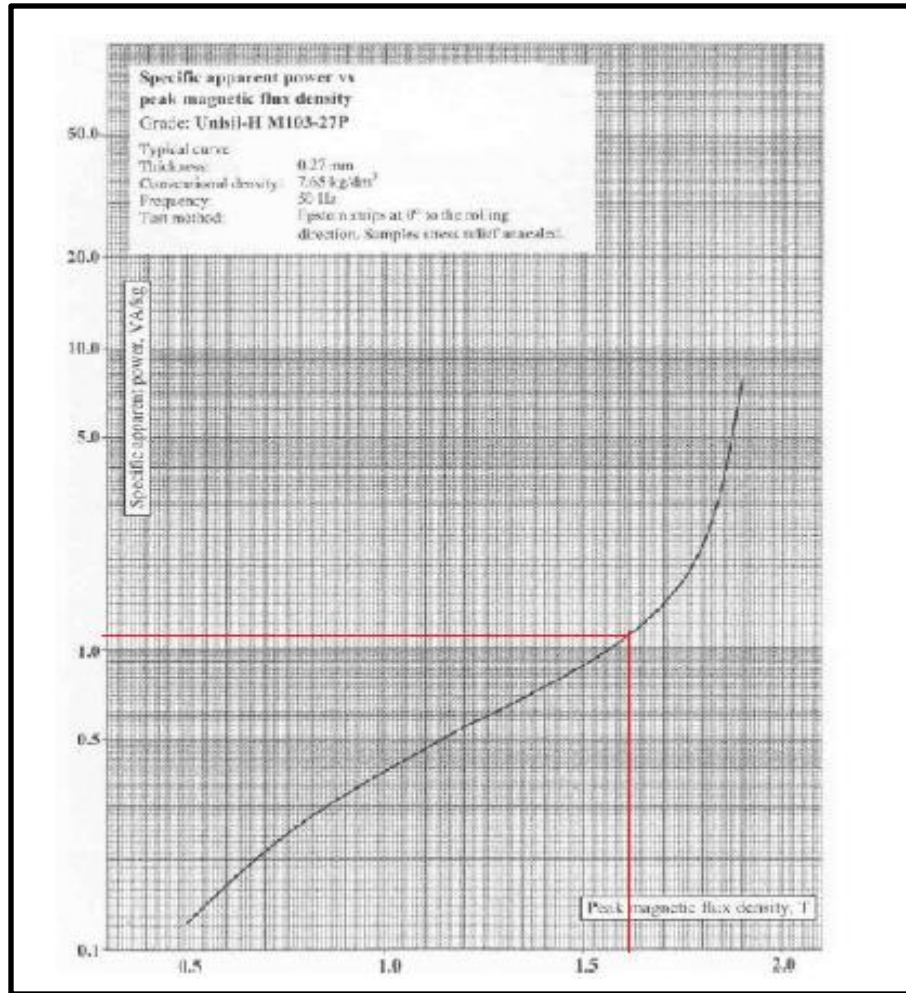


Figura C4. Curva de relación entre la potencia de excitación necesaria y la inducción magnética (B).

Fuente: Dasgupta Indranjit, "Power Transformer Quality Assurance".

C.7 Masa de los devanados

C.7.1 Masa de los arrollados en baja tensión

Primeramente procedemos a calcular el diámetro medio del devanado de baja tensión mediante la siguiente formula:

$$D_{BMed} = \left(\frac{D_{IntB} + D_{ExtB}}{2} \right) = 0,660 [m] = 660 [mm] \quad (3.46)$$

Para el cálculo de la masa del devanado de baja tensión, se necesita como dato la densidad del cobre, siendo esta 8900 Kg/m^3 ($Dens_{Cu} = 8900$), usando la ecuación que se expone a continuación podemos obtener el valor de la masa aproximada del arrollado de baja tensión:

$$Masa_{DevB} = (N_{Baja} * D_{BMed} * Dens_{Cu} * A_{CondB} * \pi * 10^{-6}) = 402,945 [Kg] \quad (3.47)$$

Debido a los conductores utilizados en las uniones entre fases la masa de cobre total será un poco mayor que la calculada anteriormente, en este caso se considerará un aumento del 10%, por lo que la masa aproximada total del cobre para el arrollamiento en baja tensión es:

$$Masa_{DevBTot} = 1,10 * Masa_{DevB} = 443,239 [Kg] \quad (3.48)$$

C.7.2 Masa de los arrollados en alta tensión

Primeramente procedemos a calcular el diámetro medio del devanado de alta tensión mediante la siguiente formula:

$$D_{AMed} = \left(\frac{D_{IntA} + D_{ExtA}}{2} \right) = 0,810 [m] = 810 [mm] \quad (3.49)$$

Para el cálculo de la masa del devanado de baja tensión, se necesita como dato la densidad del cobre, siendo esta 8900 Kg/m^3 ($Dens_{Cu} = 8900$), usando la ecuación que se expone a continuación podemos obtener el valor de la masa aproximada del arrollado de baja tensión:

$$Masa_{DevA} = (N_{Alta} * D_{AMed} * Dens_{Cu} * A_{Conda} * \pi * 10^{-6}) = 540,296 \text{ [Kg]} \quad (3.50)$$

Debido a los conductores utilizados en las uniones entre fases la masa de cobre total será un poco mayor que la calculada anteriormente, en este caso se considerará un aumento del 5%, por lo que la masa aproximada total del cobre para el arrollamiento en baja tensión es:

$$Masa_{DevATot} = 1,05 * Masa_{DevA} = 567,312 \text{ [Kg]} \quad (3.51)$$

Por lo tanto, la masa total que comprenden los arrollados y los conductores asociados a estos será:

$$Masa_{Tot} = Masa_{DevATot} + Masa_{DevBTot} = 1010,550 \text{ [Kg]} \quad (3.52)$$

C.8 Cálculo de la resistencia óhmica de los devanados

C.8.1 Cálculo de la resistencia óhmica del devanado de baja tensión

Para poder calcular la resistencia óhmica del devanado de baja tensión se tiene que tomar en cuenta el siguiente factor, resistividad del cobre ($\rho_{Cu} = 0,0216 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$). Primeramente obtenemos la longitud media de una espira del arrollado de baja tensión, haciendo uso de la siguiente expresión:

$$Long_{DevB} = \pi * D_{BMed} = 2,07345 [m] \approx 2073,45[mm] \quad (3.53)$$

Con este resultado obtenido, procedemos a calcular la longitud total del devanado de baja tensión:

$$Long_{TotB} = Long_{DevB} * N_{Baja} = 248,814 [m] \approx 2488,14 [mm] \quad (3.54)$$

La resistencia del arrollamiento de baja tensión para cada una de las 3 fases es:

$$A_{CondBaja} = 55,14 [mm^2]$$

$$Resit_{DevB} = \left(\frac{\rho_{Cu} * Long_{TotB}}{3 * A_{CondBaja} * \sqrt{2}} \right) = 0,022973 [\Omega] \approx 22,973 [m\Omega] \quad (3.55)$$

C.8.2 Cálculo de la resistencia óhmica del devanado de alta tensión

Para poder calcular la resistencia óhmica del devanado de alta tensión se tiene que tomar en cuenta el siguiente factor de resistividad del cobre, como en el caso del devanado de baja tensión:

$$Long_{DevA} = \pi * D_{AMed} = 2,54469 [m] \approx 2544,69 [mm] \quad (3.56)$$

Con este resultado obtenido, procedemos a calcular la longitud total del devanado de alta tensión:

$$Long_{TotA} = Long_{DevA} * N_{Alta} = 2,54469 * 1050 = 2671,925[m] \quad (3.57)$$

La resistencia del arrollamiento de baja tensión para cada una de las 3 fases es:

$$A_{CondAlta} = 7,785 [mm^2]$$

$$Resit_{DevA} = \left(\frac{\rho_{Cu} * Long_{TotA}}{3 * A_{CondAlta} * \sqrt{2}} \right) = 1,93443 [\Omega] \quad (3.58)$$

C.9 Reactancia, resistencia e impedancia porcentual

Para el cálculo de la reactancia, resistencia e impedancia porcentual se necesitan conocer una serie de parámetros o factores que se obtienen a continuación:

Espesor radial de los devanados de baja y alta tensión, así como el radio medio entre ambos devanados:

$$Esp_{RadB} = \left(\frac{D_{ExtB} - D_{IntB}}{2} \right) = 0,0400[m] \approx 40,00 [mm] \quad (3.59)$$

$$Esp_{RadA} = \left(\frac{D_{ExtA} - D_{IntA}}{2} \right) = 0,0400 [m] = 40,00 [mm] \quad (3.60)$$

$$D_{MedA-B} = \left(\frac{D_{AMed} + D_{BMed}}{2} \right) = 0,735 [m] \approx 735 [mm] \quad (3.61)$$

El factor de Rogowski, toma en cuenta el efecto de borde (Dispersión de las líneas de flujo) en los extremos del arrollamiento, siendo este:

$$fact_{Row} = \left[1 - \left(\frac{1 - e^{-\left(\frac{\pi * H_{CondA}}{Esp_{RadA} + Esp_{RadB} + Dist_{EntreDev}} \right)}}{\frac{\pi * H_{CondA}}{Esp_{RadA} + Esp_{RadB} + Dist_{EntreDev}}} \right) \right] = 0,96475 [Adim] \quad (3.62)$$

La longitud del canal de fuga, se calcula mediante la siguiente formula:

$$Long_{Fuga} = \frac{H_{Conda}}{fact_{Row}} = 1,4350 [m] \approx 1435,00 [mm] \quad (3.63)$$

C.9.1 Reactancia porcentual

Con los datos obtenidos anteriormente y con la permeabilidad el vacío ($\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$ [H/m]), se puede obtener el valor de la reactancia porcentual, aplicando la siguiente ecuación:

$$Q\% = \left\{ 2 * \pi * f * \mu_0 * \left(\frac{N_{Alta}}{V_{FaseA}} \right)^2 * \left(\frac{S_{Nom}}{Long_{Fuga}} \right) * [Dist_{EntreDev} * 2 * \pi * D_{MedA-B} * (Long_{DevA} * Esp_{RadA} + Long_{DevB} * Esp_{RadB}) * 100] \right\} \quad (3.64)$$

$$Q\% = = 11,09349 [\%]$$

C.9.2 Resistencia porcentual

Para el cálculo de la resistencia porcentual, primero debemos conocer las pérdidas de potencia activa a través de los conductores, las cuales se evaluarán a una temperatura de 75° C., como se expresa a continuación:

$$Perd_{PotCondB} = \rho_{Cu} * J_o^2 * Masa_{Tot} = 22073,153 [W] \quad (3.65)$$

Las pérdidas totales de potencia activa en los conductores de baja tensión, se considera un 10% de las pérdidas calculadas anteriormente, siendo estas:

$$Perd_{TotCondB} = 1,1 * Perd_{PotCondB} = 24280,468 [W] \quad (3.66)$$

Para el caso de los conductores de alta tensión se realiza el mismo procedimiento:

$$Perd_{PotConda} = \rho_{Cu} * J_o^2 * Masa_{Tot} = 22073,153 [W] \quad (3.67)$$

Las pérdidas totales de potencia activa en los conductores de alta tensión, se considera un 10% de las pérdidas calculadas anteriormente, siendo estas:

$$Perd_{TotConda} = 1,1 * Perd_{PotConda} = 24280,468 [W] \quad (3.68)$$

Las pérdidas de potencia activa en carga total para el transformador de potencia de la S/E móvil es la que se expone a continuación:

$$Perd_{TotCu} = Perd_{TotConda} + Perd_{TotCondB} = 48560,936 [W] \quad (3.69)$$

Con el valor de las pérdidas totales en los conductores, se puede calcular la resistencia porcentual del transformador de potencia de la S/E móvil IEM 26-1737, con un factor de potencia de 0,9 en atraso ($fp = 0,9$), siendo esta:

$$R\% = \frac{Perd_{TotCu}}{S_{Nom}} * 100 = 0,16187 [\%] \quad (3.70)$$

C.9.3 Impedancia porcentual

La impedancia porcentual del sistema se calcula mediante la siguiente formula:

$$Z\% = \sqrt{R\%^2 + Q\%^2} = 11,09467 [\%] \quad (3.71)$$

C.10 Rendimiento del transformador

Se calculara el rendimiento del transformador para el caso donde el mismo encuentra operando en plena carga y tomando en cuenta el factor de potencia antes utilizado ($fp = 0,9$), se procede a calcular el rendimiento mediante la siguiente ecuación:

$$\eta\% = \left(\frac{S_N * fp}{S_N * fp + Perd_{TotFe} + Perd_{TotCu}} \right) * 100 = 99,73818 [\%] \quad (3.72)$$

C.11 Regulación del transformador

Para obtener el valor de la regulación del transformador, se debe transformar el valor del ángulo del factor de potencia ($fp = 0,9$) y llevarlo de radianes a grados, luego se implementa en la siguiente ecuación para obtener la regulación de la unidad transformadora:

$$\theta = \cos^{-1}(fp) = 0,451 \text{ rad} = -17,63^\circ \quad (3.73)$$

$$Reg\% = \frac{I_{Alta}}{V_{FaseA}} * [R\% * \cos(\theta) + Q\% * \sin(\theta)] = 2,36267 [\%] \quad (3.74)$$