

CÁLCULO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR DE ALTO
VOLTAJE PARA APLICACIÓN EN DESCARGAS CON BARRERA DIELECTRICA
T.G. 1017

JUAN JOSÉ CORREA ACOSTA
ARNOLD FABIAN WIESNER HERNANDEZ

DIRIGIDO POR:
ING. RAFAEL FERNANDO DÍEZ M., PhD.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ D.C.
MAYO DE 2011

ARTÍCULO 23 DE LA RESOLUCIÓN NO 13 DE JUNIO DE 1946

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por los alumnos en sus trabajos de grado, solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católicos y porque el trabajo no contenga ataques y polémicas puramente personales, antes bien, se vean en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de Tesis, Rafael Fernando Diez PhD. por su continuo apoyo y su disposición permanente e incondicional ante nuestras dudas, infundiendo en nosotros un estímulo hacia un crecimiento intelectual continuo.

A David Magín Flórez estudiante de Doctorado de la pontificia Universidad Javeriana, por su colaboración y su apoyo durante todo el desarrollo del trabajo de grado caracterizado siempre por una actitud amable y con muy buen humor.

A Djibrillah Mahamat Abakar, quien con muy buena actitud y a pesar de las limitaciones de idioma, brindo sugerencias vitales y observaciones críticas para el desarrollo del trabajo de grado.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
2	El problema	2
2.1	Planteamiento del Problema.....	2
2.2	Objetivos de la Investigación	3
3	Marco teórico	3
3.1	Antecedentes:	3
3.1.1	Históricos.....	3
3.2	Base teórica	3
3.2.1	Finalidades del transformador	3
3.2.2	Transformador ideal.....	4
3.2.3	Transformador real	5
3.2.4	Circuito equivalente del transformador.....	5
4	Desarrollo.....	6
4.1	Especificaciones:	6
4.2	Desarrollo Teórico.....	7
4.2.1	Diseño transformador	7
4.3	Simulación del modelo del transformador	16
4.3.1	Elementos finitos.....	16
4.4	Desarrollo experimental	27
4.4.1	Método de medición	27
4.4.2	Respuesta del Transformador	31
5	Análisis de los resultados	34
5.1	Núcleo ETD59 Una Capa.....	34
5.2	Núcleo EC70 Una Capa	35
5.3	Núcleo EC70 Dos Capas	37
5.4	Núcleo E80 Bobinado Central.....	38
5.5	Núcleo E80 Bobinado con dos patas	40
5.6	Núcleo U93 Bobinado completo	41
5.7	Núcleo U93 Bobinado con una sola pata	43
5.8	Eficiencia de los transformadores	44
5.8.1	Eficiencia del transformador U93 de una sola pata	45
5.8.2	Eficiencia de núcleo E.....	48

5.9	Comparación de los transformadores con cálculos teóricos y simulaciones.....	51
6	Conclusiones y Recomendaciones	55
6.1	Conclusiones	55
6.2	Recomendaciones.....	56
7	Bibliografía	56
8	Anexos	58
	Tabla AWG.....	58

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1: Modelo del sistema.	1
Ilustración 2: Modelo del sistema con transformador.	2
Ilustración 3: Transformador ideal.	4
Ilustración 4: Esquemático Transformador real.	5
Ilustración 5: Modelo del transformador.	7
Ilustración 6: Cuadro comparativo de materiales de núcleos y sus usos.	8
Ilustración 7: Tabla de tipos de núcleos en función de su rango de potencia. Tomado de (Philips pág. 36).	9
Ilustración 8: Tipos de núcleos seleccionados.	9
Ilustración 9: Pérdidas en potencia como función de la densidad.	10
Ilustración 10: Efecto Skin.	12
Ilustración 11: Capacitancia entre cables circulares.	13
Ilustración 12: Diferencias de Superficie.	14
Ilustración 13: Líneas de campo eléctrico.	14
Ilustración 14: Asignar material a una geometría.	16
Ilustración 15: Como insertar la curva B-H para un núcleo.	17
Ilustración 16: Simulación del efecto skin sobre el cable.	18
Ilustración 17: Visualización del efecto skin sobre el cable escogido.	18
Ilustración 18: Efecto de proximidad.	19
Ilustración 19: Efecto de proximidad.	20
Ilustración 20: Efecto de proximidad entre primario y secundario.	20
Ilustración 21: Efecto de proximidad entre primario y secundario.	21
Ilustración 22: Modelo del núcleo U93.	22
Ilustración 23: excitación de corriente sobre el núcleo U93.	22
Ilustración 24: Simulación de la inductancia parásita del núcleo U93 por métodos finitos.	23
Ilustración 25: Resultado simulación para obtener la inductancia de magnetización en el núcleo U93	23
Ilustración 26: Modelo de núcleo E80.	24
Ilustración 27: Excitación de corriente sobre el núcleo E80.	24
Ilustración 28: Simulación de la inductancia parásita del núcleo E80 por métodos finitos.	25
Ilustración 29: Simulación para obtener la inductancia de magnetización en el núcleo E80.	25
Ilustración 30: Simulación Electroestática del núcleo U93.	26
Ilustración 31: Resultados simulación electrostática del núcleo U93.	26
Ilustración 32: Simulación Electroestática del núcleo E80.	27
Ilustración 33: Resultados simulación electrostática del núcleo E80.	27
Ilustración 34: Modelo del transformador real.	28
Ilustración 35: Primer modelo aproximado del transformador.	28
Ilustración 36: Modelo del transformador en circuito abierto.	29
Ilustración 37: Respuesta del transformador en frecuencia.	29
Ilustración 38: Modelo del transformador en corto circuito.	30
Ilustración 39: Modelo del transformador con las capacitancias reflejadas en primario.	30
Ilustración 40: Corriente de entrada experimental en OrCAD.	31
Ilustración 41: Simulación del modelo del transformador conectado al modelo de la lámpara.	31
Ilustración 42: Corriente de salida simulación orcad.	32
Ilustración 43: Corriente de salida osciloscopio.	32
Ilustración 44: Modelo Simplificado del transformador conectado al modelo de la lámpara de DBD (Reflejado en el primario).	33
Ilustración 45: Corriente de salida con modelo simplificado.	33

Ilustración 46: Ficha técnica transformador ETD59	34
Ilustración 47: Gráfica de corrientes en primario y secundario del transformador ETD59 conectado a la lámpara DBD.....	35
Ilustración 48: Ficha técnica núcleo EC70 con una capa.....	35
Ilustración 49: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador EC70 de una capa en secundario conectado a la lámpara DBD.....	36
Ilustración 50: Ficha técnica del transformador EC70 con dos capas en secundario.....	37
Ilustración 51: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador EC70 de dos capas en secundario conectado a la lámpara DBD.....	38
Ilustración 52: Ficha técnica núcleo E80 con Bobinado central.....	38
Ilustración 53: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador E80 con Bobinado central conectado a la lámpara DBD.....	39
Ilustración 54: Gráfica experimental del transformador E80 con Bobinado central conectado a la lámpara DBD.....	39
Ilustración 55: Ficha técnica núcleo E80 con patas externas bobinadas.....	40
Ilustración 56: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador núcleo E80 con patas externas bobinadas conectado a la lámpara DBD.....	41
Ilustración 57: Ficha técnica Transformador U93 con Bobinado completo.....	41
Ilustración 58: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador U93 conectado a la lámpara DBD.....	42
Ilustración 59: Ficha técnica Transformador U93 Bobinado con una sola pata.....	43
Ilustración 60: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador U93 Bobinado con una sola pata conectado a la lámpara DBD.....	44
Ilustración 61: Gráfica experimental del transformador U93 Bobinado con una sola pata conectado a la lámpara DBD.....	44
Ilustración 62: Gráficas para hallar la eficiencia en el transformador U93.....	45
Ilustración 63: Voltaje sobre el primario y secundario del transformador U93.....	46
Ilustración 64: Corriente sobre el primario y secundario del transformador U93.....	46
Ilustración 65: Potencia sobre el bobinado primario y secundario del transformador U93.....	47
Ilustración 66: Potencia promedio sobre el bobinado primario y secundario del transformador U93.....	48
Ilustración 67: Gráficas para hallar la eficiencia en el transformador E80.....	48
Ilustración 68: Voltaje sobre el primario y secundario del transformador E80.....	49
Ilustración 69: Corriente sobre el primario y secundario del transformador E80.....	49
Ilustración 70: Señales invertidas de potencia sobre el bobinado primario y secundario del transformador E80.....	50
Ilustración 71: Potencia promedio sobre el bobinado primario y secundario del transformador E80.....	51
Ilustración 72: Modelo de simulación del transformador y la lámpara de DBD.....	51
Ilustración 73: Corriente sobre el primario.....	52
Ilustración 74: Corriente de los cuatro modelos en el secundario del núcleo U93.....	52
Ilustración 75: Voltaje de los cuatro modelos en el secundario del núcleo U93.....	53
Ilustración 76: Comparación de las señales de voltaje de los modelos contra la señal obtenida en el laboratorio en el núcleo U93.....	53
Ilustración 77: Corriente de los cuatro modelos en el secundario del núcleo E80.....	54
Ilustración 78: Voltaje de los cuatro modelos en el secundario del núcleo U93.....	54
Ilustración 79: Comparación de las señales de voltaje de los modelos contra la señal obtenida en el laboratorio en el núcleo E80.....	54

1 Introducción

Cuando pensamos en la importancia del agua, la conclusión más obvia a la que llegamos, es que esta es sinónimo de vida, sin embargo es claro que el mal uso por parte del hombre, genera cada vez más escases de este importante recurso.

La ingeniería que está al servicio del hombre y de su entorno, siempre debe tener una mirada crítica e investigativa que nos lleve a un mejor aprovechamiento de los recursos y así utilizar esta como herramienta para la sostenibilidad del entorno del hombre, de ahí que el hombre desde hace muchos años, por medio de la ingeniería y otras áreas busca y genera nuevos métodos que le ayuden a sostener y reparar su entorno; en estos últimos tiempos donde la importancia y el cuidado del medio ambiente ha surgido como lema fundamental en todo el mundo, se han buscado diferentes métodos para la purificación de uno de los recursos naturales más importantes, como lo es el agua.

Existen muchos métodos de purificación del agua, como filtración, cloración, saturación con aire, entre otros, sin embargo, la desinfección de agua por radiación ultravioleta (U.V.) es un procedimiento físico, que no altera la composición química, el sabor, ni el olor del agua. La desinfección U.V. es una alternativa segura, eficaz, económica y ecológica frente a otros métodos de desinfección del agua.

La radiación U.V. ocupa una de las franjas del espectro electromagnético y posee mayor energía que la luz visible. La irradiación de los microorganismos presentes en el agua con rayos U.V. provoca una serie de daños en sus moléculas de ADN, que impiden la división celular y causan su muerte ("UV", 2011).

Una opción para generar U.V. es por medio de una lámpara excimer de descarga con barrera dieléctrica, que actualmente está siendo estudiada por el grupo CEPIT de la Pontificia Universidad Javeriana. Esta lámpara funciona con alto voltaje, lo que genera ciertos inconvenientes; cómo podemos ver en la Ilustración 1 modelamos nuestro problema con un esquema muy sencillo, una fuente de corriente que alimenta a una carga (lámpara de descarga de barrera dieléctrica) controlada por un puente en H. Teniendo en cuenta que la lámpara puede desarrollar voltaje de ± 5000 V, podemos observar que cuando S1 y S4 estén cerrados, habrá un voltaje de hasta ± 5000 V sobre los interruptores S2 y S3. De la misma manera existirá un voltaje muy alto sobre S1 y S4 cuando S2 y S3 estén cerrados.

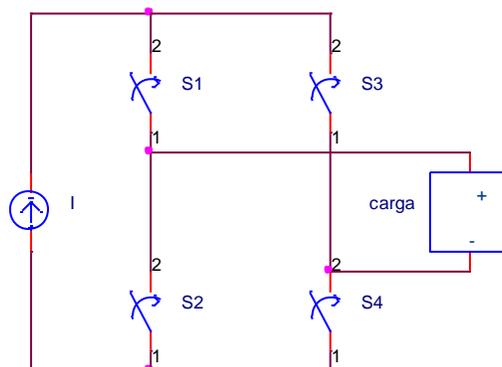


Ilustración 1: Modelo del sistema.

Debido a que no existe ningún interruptor comercial que soporte este nivel de tensión a la frecuencia de funcionamiento de la lámpara (50 kHz – 200 kHz), es necesario usar un

transformador que nos permita manejar niveles de tensión mucho más bajos en los interruptores y la misma potencia de salida, como se muestra en la ilustración 2.

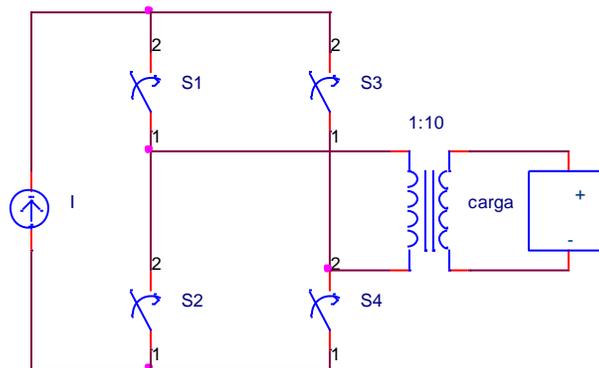


Ilustración 2: Modelo del sistema con transformador.

Aunque la teoría de transformadores es amplia, en la mayoría de casos se desprecian los componentes parásitos, pues son muy pequeños para las aplicaciones más comunes y no afectan el comportamiento de los sistemas. Sin embargo, para el caso de la lámpara de descarga con barrera dieléctrica, la carga es en su mayoría capacitiva y de muy bajo valor, lo cual genera limitaciones en el diseño, adicionalmente, la inductancia de magnetización debe ser elevada, debido a los voltajes altos que se manejan, con el fin de tener una corriente de magnetización (parásita) pequeña respecto a la corriente inyectada. Las inductancias de fugas deben ser minimizadas con el fin de evitar oscilaciones indeseables en la corriente entregada a la lámpara. Todo esto teniendo en cuenta que el rango de funcionamiento del sistema está en frecuencias relativamente altas (50 kHz-200 kHz), esto afecta el método y los materiales de construcción del transformador.

En este proyecto se estudiarán e implementarán varias configuraciones, comparando cálculos teóricos, simulación y resultados experimentales, para lograr así la mayor eficiencia posible del sistema y el equilibrio entre los componentes parásitos que den como resultado el correcto funcionamiento de la lámpara de descarga de barrera dieléctrica.

2 El problema

2.1 Planteamiento del Problema

En el proyecto se pretende elaborar un transformador de alto voltaje, para aplicación en descargas con barrera dieléctrica. Se desea elaborar un diseño que permita aumentar la eficiencia de un sistema de alto voltaje (~ 5 kV), con bajas corrientes (~ 100 mA), para lo cual necesitamos tener una alta inductancia de magnetización y pequeñas capacitancias parásitas, se tratará de encontrar el equilibrio adecuado entre los componentes parásitos del transformador para lograr mayor eficiencia, debido a que tradicionalmente la inductancia de magnetización está relacionada proporcionalmente a las capacitancias parásitas, para lo cual se tiene que un transformador de alta inductancia de magnetización tendrá altas capacitancias parásitas.

2.2 Objetivos de la Investigación

- Minimizar los componentes parásitos en el transformador, de forma que tengan un menor impacto en el principio de funcionamiento del convertidor estático que alimenta la DBD
- Realizar los cálculos de diversas configuraciones magnéticas utilizando modelos para encontrar una solución eficiente al problema de alimentación de la lámpara excimer.
- Realizar simulaciones de los transformadores elegidos, mediante la técnica de elementos finitos para verificar concordancia con la teoría.
- Implementar algunas de las configuraciones seleccionadas (las cuales durante el proceso teórico y de modelado se suponen tienen mayor eficiencia). El número de transformadores a probar no se especifica; sin embargo, será mínimo 3.
- Realizar pruebas de eficiencia de cada una de las configuraciones en un sistema real de conversión de energía.

3 Marco teórico

3.1 Antecedentes:

3.1.1 Históricos

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

3.2 Base teórica

3.2.1 Finalidades del transformador

Según (Ras, 1991), los transformadores se definen como maquinas estáticas que transmiten, mediante un campo electromagnético alterno, la energía eléctrica de un sistema, con una determinada tensión, a otro sistema con tensión deseada.

La función de esta máquina, consiste en transformar la energía, la transformación de la energía sigue la siguiente relación:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$$

Hay que agregar que esta función se realiza con simplicidad y económicamente (escaso mantenimiento, elevado rendimiento y coste bajo en comparación con máquinas rotatorias).

3.2.2 Transformador ideal

Según (Chapma, 1987), un transformador ideal es una máquina sin pérdidas, con una bobina de entrada y una bobina de salida. Las relaciones entre los voltajes de entrada y de salida, entre la corriente de entrada y de salida, se establece mediante dos ecuaciones sencillas.

El transformador tiene N_p espiras de alambre sobre su lado primario y N_s espiras de alambre en su lado secundario. La relación entre el voltaje $V_p(t)$ aplicado al lado primario del transformador y el voltaje $V_s(t)$ inducido sobre su lado secundario es:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a$$

En donde a se define como la relación de espiras del transformador.

La relación entre la corriente $i_p(t)$ que fluye en el lado primario del transformador y la corriente $i_s(t)$ que fluye hacia fuera del lado secundario del transformador es:

$$N_p * i_p(t) = N_s * i_s(t)$$

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{1}{a}$$

Los transformadores usan la convención de puntos. Los puntos que aparecen en un extremo de cada bobina muestran la polaridad del voltaje y la corriente sobre el lado secundario del transformador. La relación es como sigue:

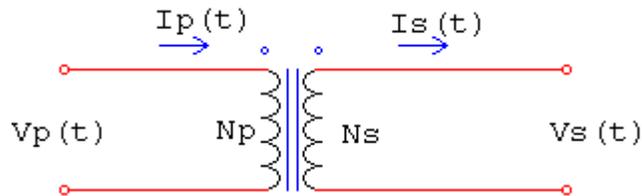


Ilustración 3: Transformador ideal.

Si el voltaje sobre la bobina del primario es positivo en el extremo punteado de la bobina con respecto al extremo no punteado, entonces el voltaje del secundario será también positivo en el extremo punteado. Si la corriente primaria del transformador fluye hacia dentro del extremo punteado de la bobina primaria, la corriente secundaria fluirá hacia fuera del extremo punteado de la bobina secundaria.

La potencia suministrada al transformador en la bobina del primario se expresa por medio de la ecuación:

$$P_{in}(t) = V_p(t) * i_p(t)$$

La potencia que el transformador suministra a sus cargas está dada por la ecuación:

$$P_{out}(t) = V_s(t) * i_s(t)$$

Puesto que los ángulos entre el voltaje y la corriente no se afectan en un transformador ideal, las bobinas primaria y secundaria de un transformador ideal tienen el mismo factor de potencia. Por lo tanto la potencia de salida de un transformador ideal es igual a su potencia de entrada.

$$P_{in}(t) = P_{out}(t)$$

3.2.3 Transformador real

Según (Ras, 1991), un transformador real es una máquina con pérdidas, con una bobina de entrada y una bobina de salida, en este modelo se tendrá en cuenta la carga, que es capacitiva de bajo valor para nuestro caso, las pérdidas en los bobinados, las pérdidas en el núcleo y se analizarán mediante un circuito equivalente que parte desde el modelo de un transformador ideal.

3.2.4 Circuito equivalente del transformador

Según (Flanagan, 1992), el análisis de un transformador real, parte desde el modelo más simple como lo es el del transformador ideal, usualmente este análisis comienza por la elaboración de los circuitos equivalentes; los circuitos equivalentes no son réplicas exactas del transformador real, ellos sólo son aproximaciones que permiten simplificar el análisis.

Empezamos con un modelo que incluye la mayor cantidad de pérdidas en el transformador.

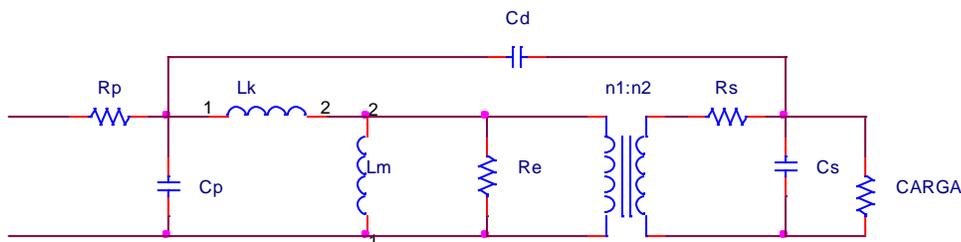


Ilustración 4: Esquemático Transformador real.

A continuación daremos una breve explicación de cada uno de los componentes del circuito.

La transformación ideal de corriente no tiene en cuenta la corriente que fluye en el primario independiente del secundario, la cual llamamos corriente de magnetización, esa corriente se suma a la corriente de la carga, es por eso que se tiene en cuenta como una inductancia en paralelo al transformador ideal, está la denotamos como L_m la cual llamaremos inductancia de magnetización.

Debido a que los materiales ferro magnéticos son conductores, el cambio del flujo magnético en el núcleo crea pequeños lazos de corriente llamado corriente de fugas, esta corriente representa pérdidas de potencia que no tienen que ver con la carga. El continuo alineamiento de las partículas en el núcleo descrito por sus propiedades magnéticas representa otra fuente de pérdida de potencia, la cual se le llama pérdida por histéresis; la combinación de estos dos efectos se representa con una resistencia en paralelo al transformador ideal, que se denota como R_e y es variable dependiendo las condiciones de trabajo del transformador.

Como el bobinado primario y secundario están hechos de conductores no ideales cada vuelta tendrá una resistencia asociada, la corriente en el secundario fluye por la resistencia de este mismo sólo en

respuesta a una carga aplicada, es por esto que la resistencia en secundario se puede representar como una resistencia en serie a la carga, de hecho visto desde primario esta resistencia no se puede diferenciar de la carga y se puede transformar al primario por el cuadrado del número de vueltas igual que la carga, esta se denota como R_s .

La resistencia en primario no solo lleva la corriente de la carga sino que también la que no es de la carga, que es la suma de la corriente de magnetización y de la corriente de pérdidas, por eso que la resistencia en primario es colocada antes de los elementos que llevan la corriente que no pertenece a la carga y a esta se le llama R_p .

Como los transformadores se componen de vueltas de material conductor cercanas entre si y a la vez cercanas al núcleo, existe una capacitancia parásita apreciable. Las vueltas cambian su potencial una a la otra y a su vez con el núcleo y la geometría para cada vuelta varía, haciendo que la capacitancia sea un parámetro muy difícil de caracterizar, esta situación se puede manejar representando estas capacitancias en tres capacitores equivalentes, C_p que representa las capacitancias entre las vueltas del primario, C_s que representas las capacitancias entre las vueltas de secundario y C_d que representa las capacitancias entre primario y secundario, primario y el núcleo y secundario y el núcleo.

La transformación ideal de voltaje y la expresión para la fuerza magnética asume que todo el flujo magnético está asociado a todas las vueltas de los bobinados, cuando de hecho una pequeña parte del flujo se pierde, la presencia de esta pequeña fuga en el flujo se evidencia con un cambio en el valor de la inductancia de magnetización, la cual debería ser exactamente proporcional al cuadrado del número de vueltas, además de esto también es evidente la presencia de esta fuga por la aparición de una pequeña inductancia cuando el bobinado secundario se encuentra en corto circuito, a esta inductancia la llamaremos inductancia de fugas y está presente en cada uno de los bobinados, igual que la capacitancia parásita, este valor es sólo una aproximación de un efecto mucho más complejo; la inductancia la denotaremos como L_k y esta incluye el efecto sobre los dos bobinados..

A pesar de todas las aproximaciones ya hechas para elaborar el circuito equivalente de un transformador real, este resulta muy complejo para la mayoría de los análisis, por lo cual es necesario realizar más aproximaciones dependiendo de la aplicación.

4 Desarrollo

En este capítulo podremos observar inicialmente las especificaciones requeridas para nuestro diseño, después se mostrará un proceso paso a paso de los cálculos requeridos para el diseño óptimo de nuestro transformador. También apreciaremos los métodos y pruebas necesarias en laboratorio para medir los componentes parásitos del transformador, además de las simulaciones por métodos finitos de los componentes parásitos del transformador, que nos ayudarán a validar nuestro modelo obtenido experimentalmente y comparar con nuestros resultados teóricos.

4.1 Especificaciones:

Sabemos que, el cambio de corriente sobre una inductancia es inversamente proporcional al valor de la inductancia $i_l = \frac{1}{L} \int v_l dt$, por lo tanto entre más grande sea el valor de nuestra inductancia de magnetización en el primario menos corriente va a pasar sobre ella y por lo tanto habrán menos pérdidas en el sistema.

Por otra parte conocemos que nuestra carga es de mayor parte capacitiva y no lineal. (Flòrez, y otros, 2010) Para facilidad en el modelo la tomaremos como si esta fuera netamente capacitiva, con

un valor de 14 pF cuando la lámpara esté encendida y 55 pF cuando la lámpara esté apagada. Como podemos apreciar en la Ilustración 5 esta capacitancia queda en paralelo a la capacitancia parásita del transformador vista desde secundario, por esta razón si la capacitancia parásita tiene un valor muy alto, una parte de la corriente de salida del transformador se iría por dicha capacitancia, lo que provocaría una pérdida en la eficiencia del sistema.

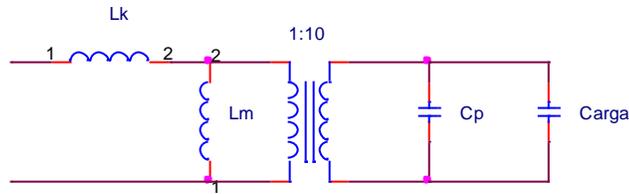


Ilustración 5: Modelo del transformador.

Por lo tanto, los requerimientos del transformador para el circuito de la lámpara de descarga de barrera dieléctrica deberían ser:

Relación de vueltas del primario al secundario: Transformador elevador de 1:10, con el fin de bajar el voltaje de los semiconductores del convertidor.

Capacitancia parásita del transformador: Tan baja como se pueda, con el fin de aumentar la corriente de salida del transformador.

Inductancia de Magnetización (primario): Tan alta como se pueda, con el fin de minimizar la corriente de magnetización y mantener la forma de onda de corriente.

Frecuencia de funcionamiento: 50 kHz – 200 kHz

Voltaje de entrada: Señal triangular de 500 V máximo (pico).

Corriente de entrada: Señal cuadrada con descanso en cero de 1 A máximo (pico).

Aislamiento: Debe existir un aislamiento capaz de resistir los voltajes de trabajo del núcleo, este debe existir en: Núcleo a vueltas, capa a capa, vuelta a vuelta.

4.2 Desarrollo Teórico

Para iniciar el desarrollo del trabajo de grado utilizamos bibliografía sobre transformadores en potencia, y buscamos configuraciones de baja capacitancia para tener así varios tipos de construcción.

Los primeros cálculos son el diseño de un transformador normal sin tener en cuenta sus componentes parásitos.

4.2.1 Diseño transformador

A continuación haremos una descripción de cada uno de los pasos para un diseño óptimo de un transformador.

4.2.1.1 Núcleo.

Según (Van den Bossche, y otros, 2005), el desarrollo de materiales magnéticos suaves para propósitos industriales empezó con laminados de hierro y continúa con hierro en polvo y carbonilo, ferritas, materiales amorfos y materiales nano cristalinos. En electrónica de potencia hay dos clases básicas de materiales usados en núcleos magnéticos para transformadores e inductores.

Según (Flanagan, 1992) , los materiales ferromagnéticos, su valor de saturación de inducción empiezan en 1,4 T y para algunos materiales puede estar cerca de 1,9 T. La resistividad eléctrica de estas aleaciones es sólo ligeramente superior a buenos conductores como el cobre o el aluminio

Los materiales ferrimagnéticos o ferritas son cerámicos y su magnetización es significativa, pero menor que en los ferromagnéticos, sus conductividades son bajas, además de que su resistividad es alta, es incluso un millón de veces más alta que los materiales ferromagnéticos.

Según (Van den Bossche, y otros, 2005), la más importante característica que hace que las ferritas sean el material magnético suave más utilizado en la electrónica de potencia, es su alta resistividad comparado con los otros materiales. En aplicaciones de alta frecuencia las pérdidas por corrientes de fugas son usualmente importantes y se incrementan aproximadamente con el cuadrado de la frecuencia, sin embargo estas pérdidas son inversamente proporcionales a la resistividad, lo que hace que las ferritas sean la mejor opción en aplicaciones de alta frecuencia.

Para ilustrar mejor lo anteriormente nombrado, mostraremos una gráfica de materiales contra sus aplicaciones.

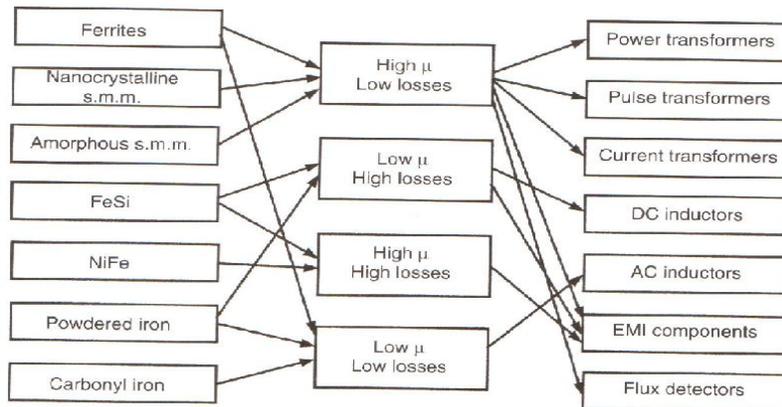


Ilustración 6: Cuadro comparativo de materiales de núcleos y sus usos.

Tomado de (Van den Bossche, y otros, 2005 pág. 111)

En esta gráfica podemos confirmar que una buena elección para nuestra aplicación sería un núcleo de ferrita.

Según (Philips), el rango de operación de nuestra aplicación en frecuencia, además de la potencia disipada en el transformador serán los parámetros que nos permitan seleccionar los tipos de núcleos a utilizar.

Table 3 Power throughput for different core types at 100 kHz switching frequency

POWER RANGE (W)	CORE TYPE
<5	RM4; P11/7; T14; EF13; U10
5 to 10	RM5; P14/8
10 to 20	RM6; E20; P18/11; T23; U15; EFD15
20 to 50	RM8; P22/13; U20; RM10; ETD29; E25; T26/10; EFD20
50 to 100	ETD29; ETD34; EC35; EC41; RM12; P30/19; T26/20; EFD25
100 to 200	ETD34; ETD39; ETD44; EC41; EC52; RM14; P36/22; E30; T56; U25; U30; E42; EFD30
200 to 500	ETD44; ETD49; E55; EC52; E42; P42/29; U37
<500	E65; EC70; U93; U100

Ilustración 7: Tabla de tipos de núcleos en función de su rango de potencia. Tomado de (Philips pág. 36)

Esta tabla proporcionada por el fabricante nos permite tener una primera selección de topologías. Ahora podemos verificar que los materiales de dichas topologías estén en el rango de frecuencia de nuestro trabajo.

Después de verificar los materiales de las distintas topologías y la disponibilidad del núcleo escogemos.

Topología	Material
U93/76/30	3C90
E80/38/20	3F3
EC70	3C90
ETD59	3F3

Ilustración 8: Tipos de núcleos seleccionados.

3C90: Material para uso industrial de media frecuencia (< 200 kHz).

3F3: Material de alta frecuencia (hasta 700 kHz).

Nota: este procedimiento se realizó con base en el manual de “Philips-Ferroxcube”. Para utilizar otros fabricantes es necesario consultar los manuales respectivos.

Teniendo en cuenta que el transformador es para un prototipo funcional de laboratorio y que no se desea optimizar tamaño, peso, ni dinero, se eligen los núcleos más grandes de diferentes formas geométricas y materiales para así superar los límites de potencia, tener más espacio para realizar el transformador y estos sean más versátiles ya que nos permitirán realizar muchas configuraciones en un solo núcleo.

Con estos núcleos procedemos a realizar los cálculos de construcción:

4.2.1.2 Densidad de flujo magnético

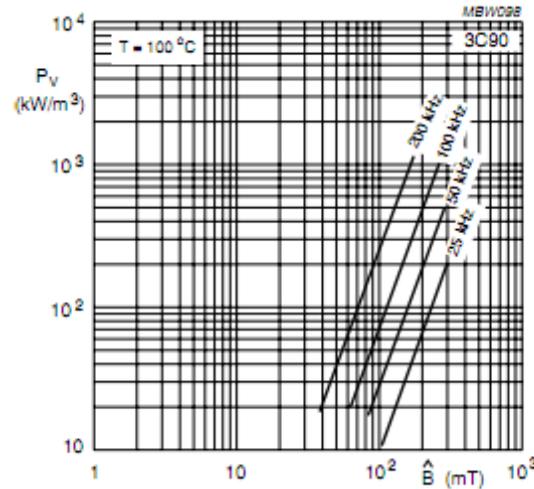


Ilustración 9: Pérdidas en potencia como función de la densidad de flujo magnético, con la frecuencia como parámetro.

Tomado de (Philips pág. 68)

Según (Philips), a partir de las gráficas del fabricante (ferroxcube) obtenemos los valores de trabajo del núcleo y lo comparamos con la densidad de saturación del flujo magnético para verificar que esté dentro de los límites y no se sature.

4.2.1.3 Número mínimo de vueltas.

Según (Van den Bossche, y otros, 2005), con el fin de conocer el número de vueltas mínimo que debe tener el transformador se calcula el flujo φ así:

$$\varphi = \int_t^{t+T} v(t) dt$$

Sabemos que la onda de voltaje de entrada $v(t)$ se aproxima a una onda triangular que va de -500V a 500V con periodo T de $10\mu\text{s}$ por esta razón podemos aproximar la integral a:

$$\hat{\varphi} = \frac{500(5\mu\text{s})}{2} \approx 1,25 \text{ mWb}$$

Pero también sabemos que:

$$\hat{\varphi} = n1 * \phi_{pp}$$

Y a su vez que:

$$\phi_{pp} = Ae * 2 * B_{material}$$

Si despejamos el número de vueltas de estas dos ecuaciones y además conocemos la relación de vueltas entre primario y secundario previamente, podemos hallar las ecuaciones del número de vueltas de primario y secundario:

$$n_1 = \frac{\varphi}{2} \cdot \frac{1}{Ae(B_{material})}$$

$$n_2 = 10 \cdot n_1$$

Dónde:

Φ_{pp} es el flujo magnético pico a pico.

$\hat{\varphi}$ es el flujo magnético pico a pico total

n_1 es el número de vueltas en el primario.

n_2 es el número de vueltas en el secundario.

Ae es el número el Área efectiva del núcleo donde se van a hacer las vueltas.

$B_{material}$ es la densidad de flujo magnético de trabajo del material del núcleo.

4.2.1.4 Diámetro del cable

Según (Van den Bossche, y otros, 2005)

$$d = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot I \cdot \sqrt{\frac{\rho_{cobre} \cdot L_{vuelta} Ni}{\rho_{perdidas}}}$$

Donde

d es el diámetro del cable en mm.

I es la corriente.

ρ_{cobre} es la resistividad eléctrica del cobre.

Ni es el número de vueltas.

L_{vuelta} longitud de la vuelta.

$\rho_{perdidas}$ es la constante de pérdidas, se calcula a continuación

$$\rho_{perdidas} = \rho_{nc} \cdot \alpha$$

$$\rho_{nc} = \frac{1}{2}$$

Donde

ρ_{nc} es la constante de pérdidas en el cobre.

$$\alpha = \frac{n_1}{n_1 + n_2 \left(\frac{1}{10}\right)}; n_1 = \frac{n_2}{10}$$

Donde α representa las pérdidas permitidas en el bobinado

$$\alpha = \frac{\frac{n_2}{10}}{\frac{n_2}{10} + n_2 \left(\frac{1}{10}\right)} = \frac{1}{2}$$

$$\rho_{perdidas} = 0.25$$

Después de calcular el diámetro del cobre, es necesario tener en cuenta la profundidad de penetración de los electrones pues la frecuencia de trabajo es alta, así:

$$Penetracion = \sqrt{2\rho_{cobre}/(\omega\mu)}$$

A esta profundidad de penetración se relaciona el llamado efecto skin y consiste en la distribución del flujo de electrones en el exterior del material conductor reduciendo así su área efectiva, ver ilustración 10.

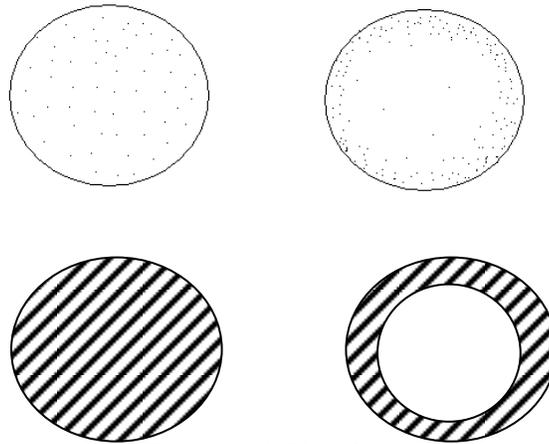


Ilustración 10: Efecto Skin

Después se compara el diámetro elegido con la penetración, si la penetración es menor al diámetro es necesario aumentar el diámetro para tener una nueva proporción que mantenga la misma área diagonal así:

Si

$$Penetracion < d$$

Entonces

$$\frac{d}{2} = \pi(r_{nuevo})^2 - \pi(r_{nuevo} - Penetracion)^2$$

Donde r_{nuevo} sera el nuevo radio del cable, después de calcular la penetración para que el área efectiva sea igual a la necesaria.

De esta ecuación podemos despejar el nuevo radio del cable.

Al finalizar estas cuentas se selecciona el calibre (AWG) que esté inmediatamente por encima del valor obtenido. Podemos observar la tabla de conversiones AWG en los anexos.

4.2.1.5 Inductancia de Fuga

Según (Scoggins, 2007), para encontrar la inductancia de fuga se utiliza la siguiente ecuación.

$$L_l = \frac{0,269 * N^2 * MT * (2nc + a)}{10^9 * n^2 * b}$$

Dónde:

L_l es la inductancia de fuga de los dos bobinados.

N es el número de vueltas en el bobinado.

MT es el largo efectivo de vuelta alrededor del núcleo.

n es el número de dieléctricos entre bobinados.

c es el grosor del dieléctrico.

a altura de bobinado.

b longitud de vuelta.

4.2.1.6 Inductancia de magnetización

Según (Van den Bossche, y otros, 2005), para encontrar la inductancia de magnetización utilizamos la siguiente fórmula.

$$L_m = N^2 \mu \frac{A_e}{L_e}$$

Dónde:

N^2 es la relación de vueltas al cuadrado.

A_e es el área efectiva.

L_e es la longitud efectiva.

4.2.1.7 Capacitancia parásita.

Según (Massarini, y otros, 1997), para encontrar el valor de la capacitancia parásita entre cables, lo calculamos así.

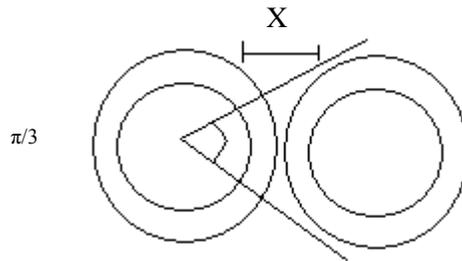


Ilustración 11: Capacitancia entre cables circulares.

Al calcular la capacitancia entre dos superficies circulares, encontramos una distancia X de conductor a conductor la cual no es constante, esta depende del ángulo que llamaremos θ , el ángulo efectivo de esta capacitancia es aproximadamente $\pi/3$, y existe una superficie S de material aislante por la naturaleza de la construcción.

$$dC = \frac{\epsilon dS}{X}$$

Si analizamos la superficie de aislamiento por separado obtenemos;

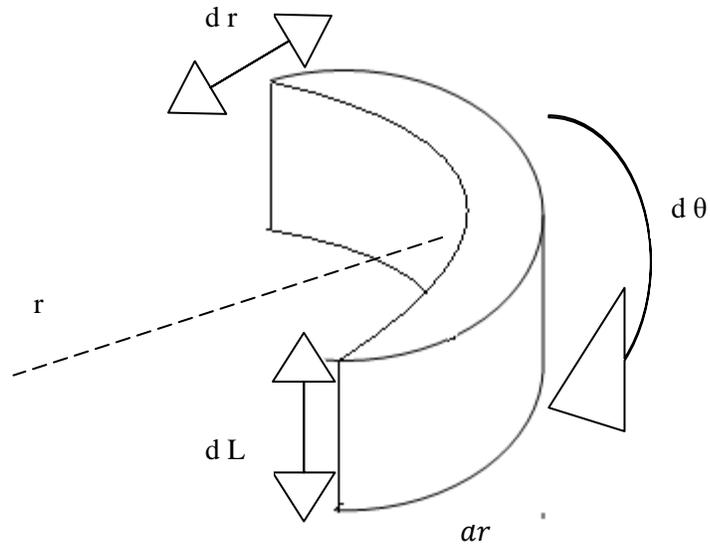


Ilustración 12: Diferencias de Superficie

Para las vueltas intermedias hay dos aislantes, más el gap entre las vueltas, lo cual genera tres capacitancias en serie.

El camino que toma el campo eléctrico en el aislante es igual al grosor de este, así:

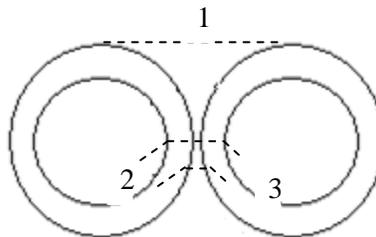


Ilustración 13: Líneas de campo eléctrico

$$dC_c = \epsilon d\theta \int_0^{Lx} dL \int_{rc}^{r0} \frac{r}{dr} = \frac{\epsilon Lx}{\ln(r0/rc)} d\theta$$

$$dC/d\theta = \frac{\epsilon(Lr)}{2\ln(r0/rc)}$$

Donde r0 es el radio externo y rc es el radio del conductor.

De esta forma obtenemos la capacitancia por unidad de ángulo, en 2 y 3, es decir la capacitancia sobre el aislamiento.

Para encontrar la capacitancia 1 tenemos:

La distancia X entre cable y cable es

$$X(\theta) = D_o(1 - \cos(\theta))$$

Donde D_o es el diámetro total del cable

$$dS = \frac{l(D_o)}{2} d\theta$$

Donde l =largo de la vuelta.

$$dC_g/d\theta = \varepsilon_0 \frac{L_t}{2(1 - \cos(\theta))}$$

El resultado de los 3 condensadores es:

$$C_{tt} = \varepsilon_0 \int_0^{\pi/6} \frac{L_t}{1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \ln \frac{D_o}{D_c} - \cos(\theta)} d\theta$$

Donde D_o es el diámetro total del cable

Donde C_{tt} es la capacitancia de vuelta a vuelta.

La capacitancia de vuelta al núcleo es

$$C_{tc} = 2C_{tt}$$

Según (Massarini, y otros, 1997)

$$C_{tt} = \varepsilon_0 L_t \left\{ \frac{\varepsilon_r \theta''}{\ln \left(\frac{D_o}{D_c} \right)} + \cot \left(\frac{\theta''}{2} \right) - \cot \left(\frac{\pi}{12} \right) \right\}$$

Donde

$$\theta'' = \arccos \left(1 - \frac{\ln \frac{D_o}{D_c}}{\varepsilon_r} \right)$$

Para bobinados de más de 10 vueltas se aproxima la capacitancia total del bobinado a:

$$C = 1.366(C_{tt})$$

4.3 Simulación del modelo del transformador

Debido a la complejidad de algunos elementos parásitos se realizó una simulación de método de elementos finitos, se simularon los dos componente más críticos, la inductancia de magnetización y la capacitancia parásita, además se simuló la densidad de corriente en los cables a alta frecuencia para verificar los efectos de distribución irregular conocidos como efecto skin y efecto de proximidad, esto con el fin de comprobar la necesidad de utilizar cable de litz.

4.3.1 Elementos finitos

El simulador de elementos finitos es muy útil cuando se necesitan realizar operaciones complicadas, para nuestro caso simulamos, capacitancia, inductancia y efecto skin (Ansoft).

Este simulador nos permite hacer un modelo de nuestro transformador, al cual le podemos asignar una geometría, fronteras, excitaciones, materiales, así como las propiedades físicas de los materiales como: permitividad, permeabilidad, conductividad, etc.

Después de dibujar nuestro transformador, su bobinado primario y secundario debemos asignarle el material al núcleo y a los bobinados respectivamente.

Asignamos el material a la geometría previamente dibujada:

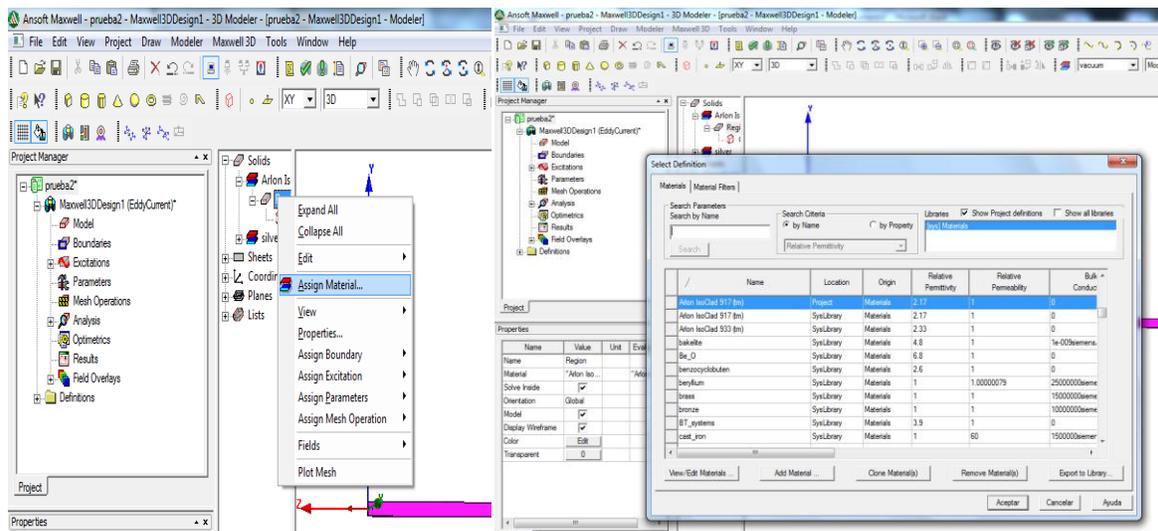


Ilustración 14: Asignar material a una geometría.

En la ilustración 14 podemos ver los materiales que tiene el simulador y los valores de sus propiedades físicas, para los núcleos los cuales están hechos de materiales que no posee el simulador (3C90, 3F3), podemos crear estos materiales y asignar valores a sus propiedades físicas.

En la ilustración 15, podremos observar todas las propiedades físicas que puede tener el material, todos estos valores no son necesarios para la simulación, entonces asignamos los valores que nos interesan y son críticos para nuestra simulación. Para asignar la permeabilidad del material del núcleo, no dejamos un valor constante, si no que cambiamos el tipo del valor a no lineal, después de esto nos aparecerá la opción de describir la curva B-H, ingresamos los valores de esta curva que nos proporciona el fabricante y damos aceptar.

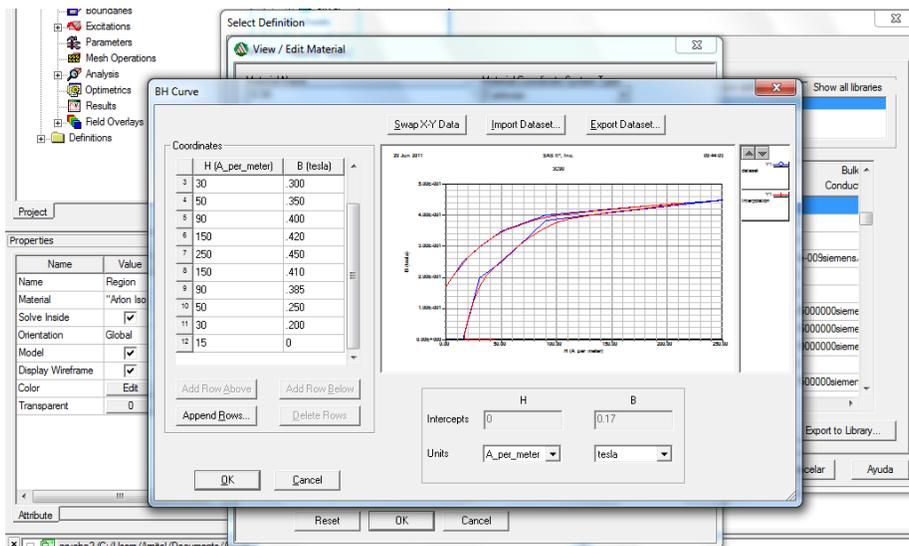
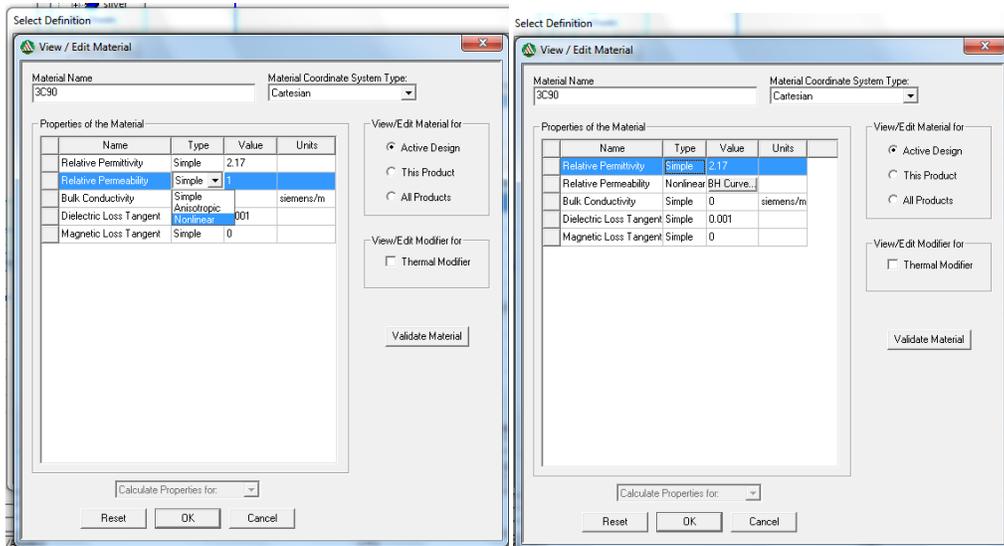


Ilustración 15: Como insertar la curva B-H para un núcleo.

Para una mayor claridad en el proceso de elaboración de la simulación por métodos finitos, en los anexos se podrán encontrar varios videos, donde se describen algunos procesos importantes de la simulación como: el método para dibujar el transformador, la asignación de materiales, la asignación de excitación, etc. También se encontrará un manual del usuario donde se están algunos ejemplos elaborados paso a paso.

4.3.1.1 Efecto skin

Según (Meeker), debido a la complejidad del efecto skin en combinación con el efecto de proximidad se decidió utilizar un simulador de elementos finitos. Para esto usamos Maxwell de Ansoft con una licencia de dos meses entregada de forma gratuita por parte del fabricante, exclusivamente para el trabajo de grado.

El efecto skin consiste en la distribución no uniforme de densidad de corriente en un conductor, donde a mayor frecuencia el flujo de corriente aumenta en la superficie y disminuye en el interior del conductor.

Debido a la disminución en el área de circulación de la corriente, la resistencia eléctrica se aumenta, aumentando así las pérdidas y calentando los conductores.

Los resultados son los siguientes:

Para el cable de secundario se decidió utilizar calibre 33(AWG) tomando como entrada una corriente de 100mA a 100kHz. Los resultados son:

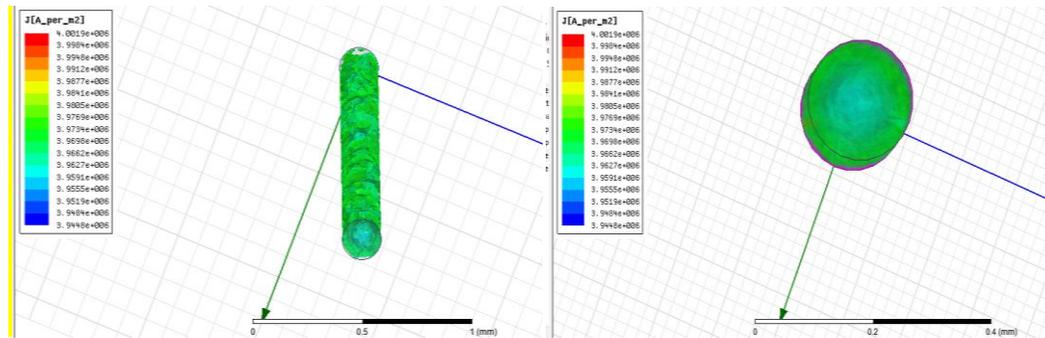


Ilustración 16: Simulación del efecto skin sobre el cable.

Como se puede observar, debido a la baja corriente el efecto skin no es apreciable, la distribución de corriente en el conductor es casi simétrica y no es necesario tomar ninguna medida para reducir este efecto.

Para el cable de primario se simuló en calibre 24, a 100kHz con 1A de corriente.

Los resultados son:

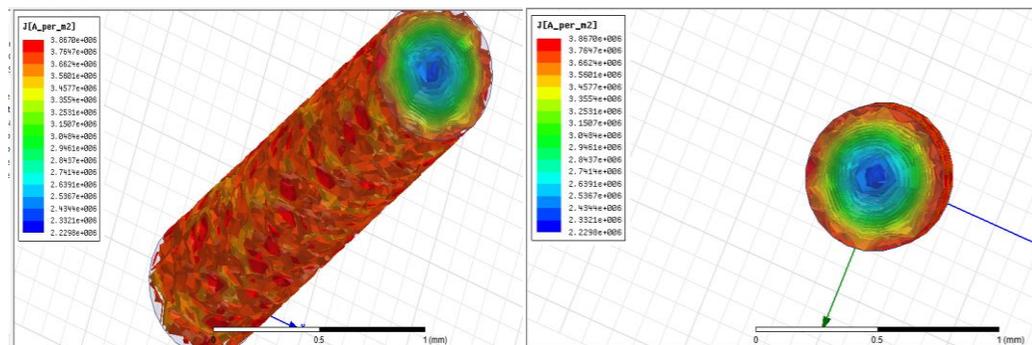


Ilustración 17: Visualización del efecto skin sobre el cable escogido.

Como se puede observar el efecto skin es considerable en esta configuración, la densidad de corriente es mayor en los bordes del cable mientras en el centro de este es muy baja, por lo cual se utilizó cable de Litz (El cable utilizado fue uno con 100 cables cada uno con diámetro de 0,071 mm.), para disminuir este efecto.

De acuerdo a esto se corroboró la decisión acertada de usar cable de Litz en el transformador real.

4.3.1.2 Efecto de proximidad

Sumado a este efecto, el efecto de proximidad, causado por el efecto del campo magnético de los conductores cercanos aumenta este problema, la distribución ya no es uniforme similar a una corona sino que depende completamente de la distribución de conductores alrededor

Para la simulación se utilizaron diez conductores cercanos unos de otros con calibre 24 a 100 kHz y a 1 A.

Los resultados fueron:

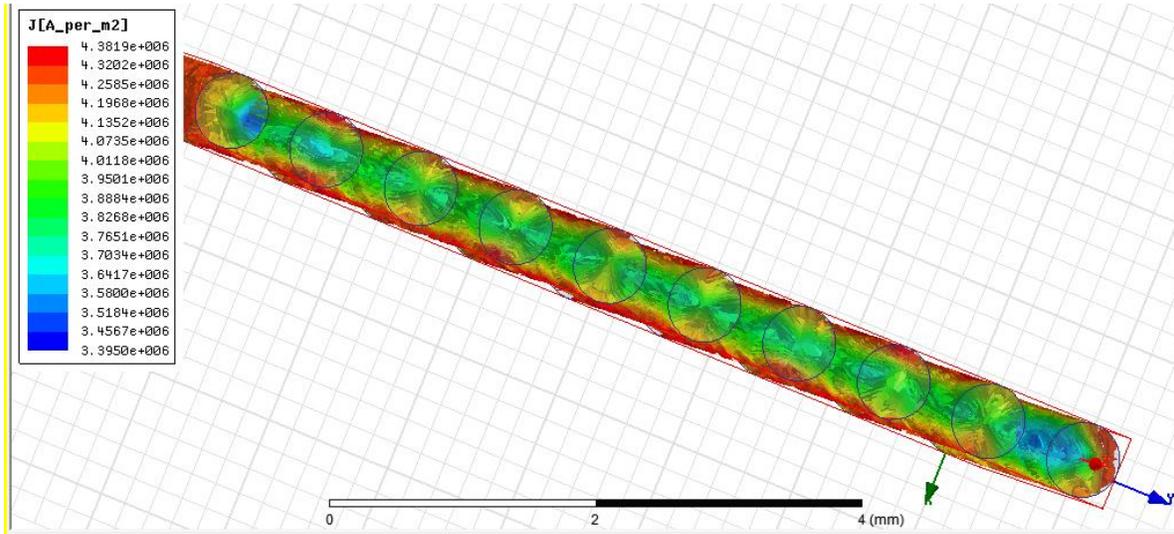
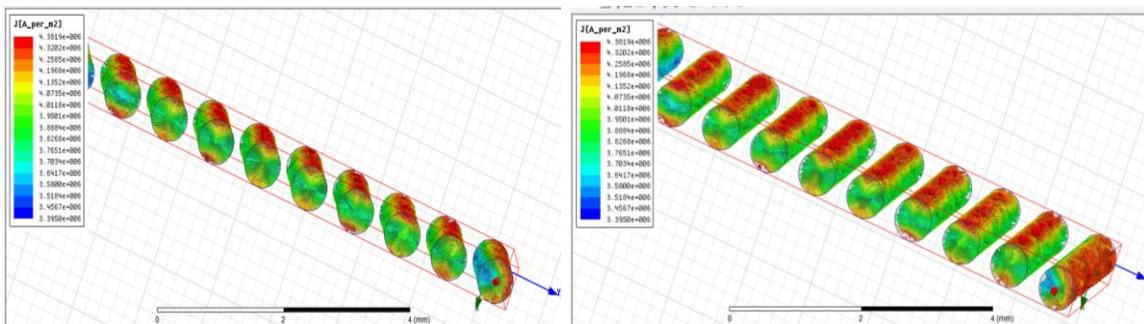


Ilustración 18: Efecto de proximidad.

Como se puede observar en la ilustración, además del efecto skin, los conductores cercanos crean otro efecto denominado efecto de proximidad este hace que además de que la densidad de corriente se distribuya lejos del centro, también se aleje de los cables vecinos, por tal razón el resultado es mayor densidad solo en los bordes externos.



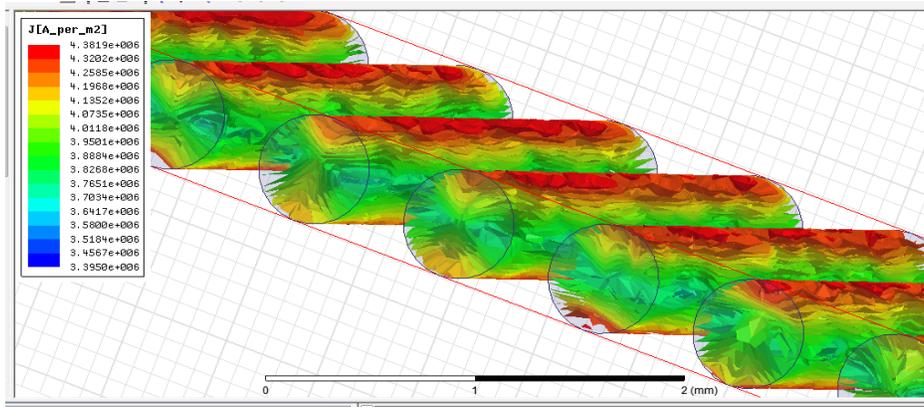


Ilustración 19: Efecto de proximidad.

El cambio es significativo, el campo de los conductores cercanos cambia la distribución de corriente de manera compleja.

Cuando al efecto de proximidad le añadimos el efecto causado de secundario sobre primario el resultado es un área efectiva aún menor.

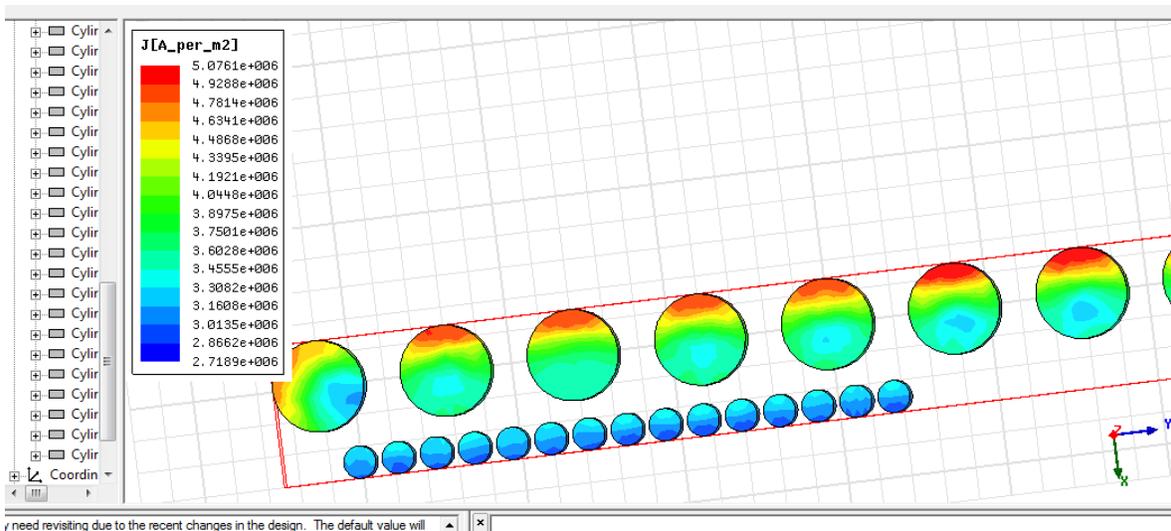


Ilustración 20: Efecto de proximidad entre primario y secundario.

Aunque en secundario el efecto no es significativo, en primario el área cercana a secundario presenta menor concentración de corriente, lo cual significa que la corriente se encuentra toda concentrada en los extremos lejanos al secundario y lejanos entre vueltas de primario, por lo cual el volumen que tiene corriente es muy reducido, la consecuencia final de esto es un calentamiento muy alto del barniz que acabaría haciendo un corto en el transformador.

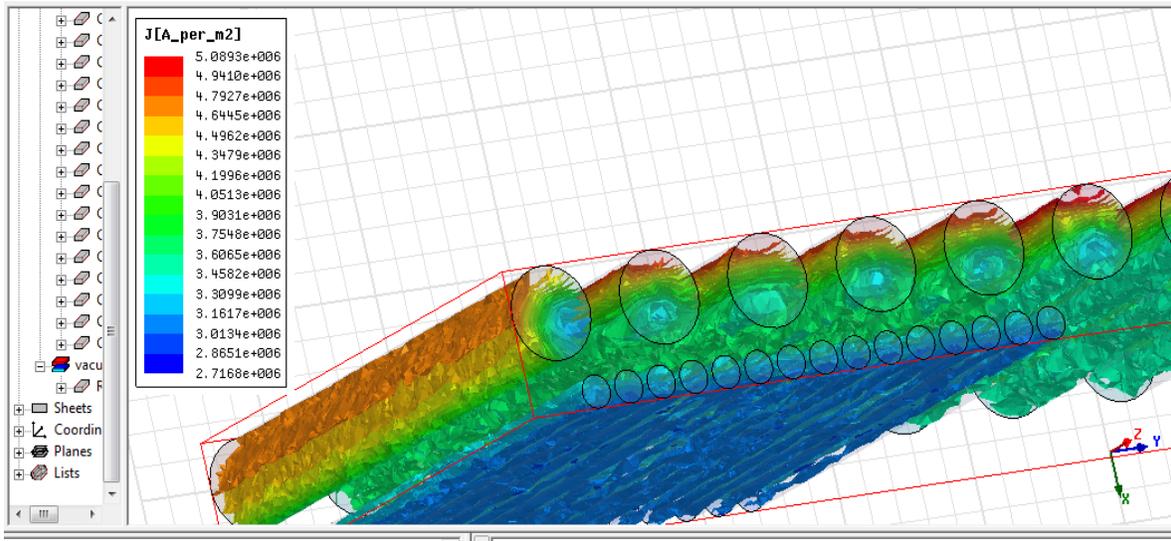


Ilustración 21: Efecto de proximidad entre primario y secundario.

Por lo cual la decisión definitiva es utilizar cable de Litz el cual reduce significativamente estos dos efectos.

4.3.1.3 Inductancia de magnetización

La simulación de elementos finitos también permite encontrar valores parásitos como la inductancia de magnetización, para esto se tomaron los dos núcleos principales (Con los cuales se espera mejores resultados según los cálculos teóricos) el E80 y el U93.

U93

Para esta simulación se creó un material con valor de permeabilidad relativa de 2200 similar al 3C90 y con conductividad 0 pues así simulamos el aislamiento realizado en la configuración, las vueltas son simuladas con otra figura cuyo ancho es el diámetro del cable y como material se seleccionó el cobre, las simulación se realizó utilizando las medidas reales, tanto del núcleo como del cable así:

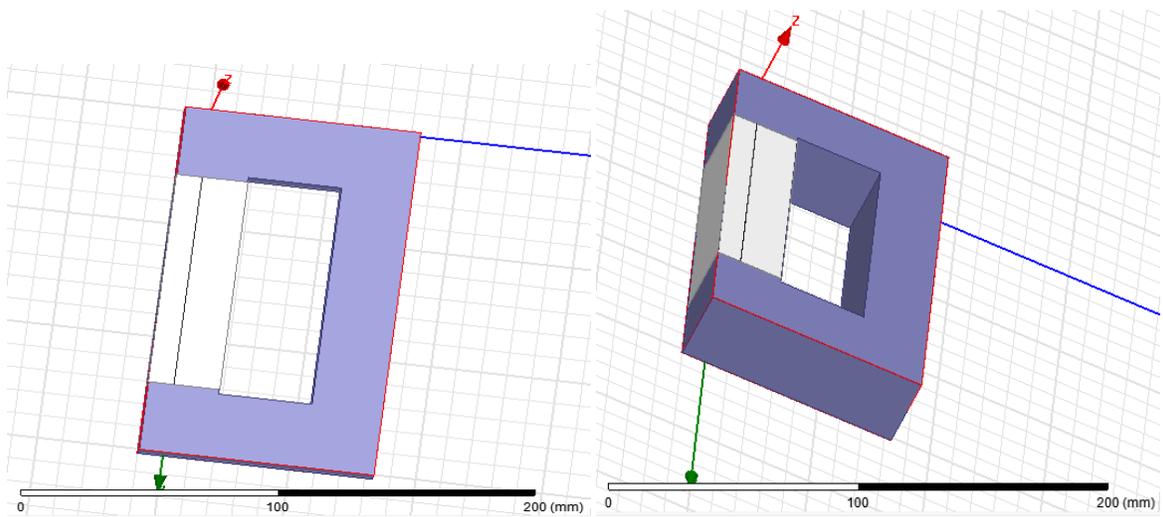


Ilustración 22: Modelo del núcleo U93

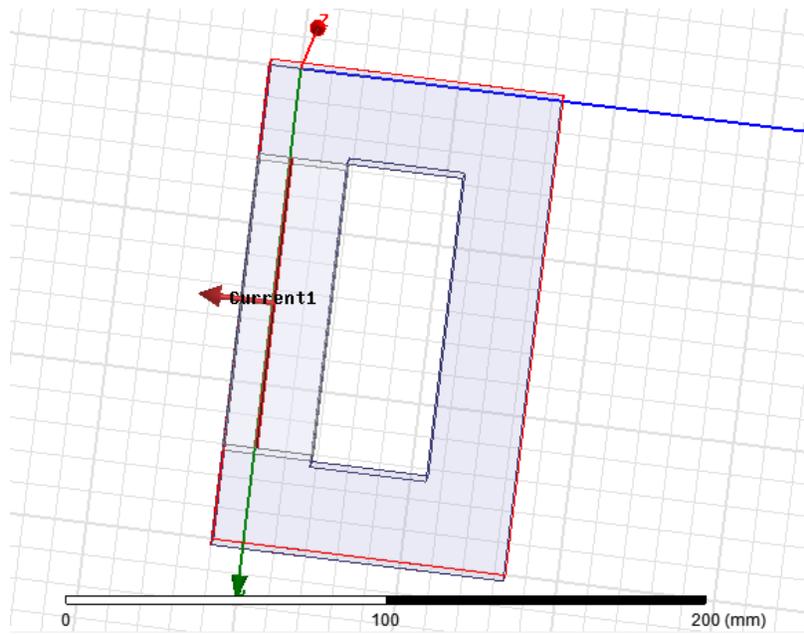


Ilustración 23: excitación de corriente sobre el núcleo U93.

Los resultados son:

La inductancia de una vuelta es: 7,12uH

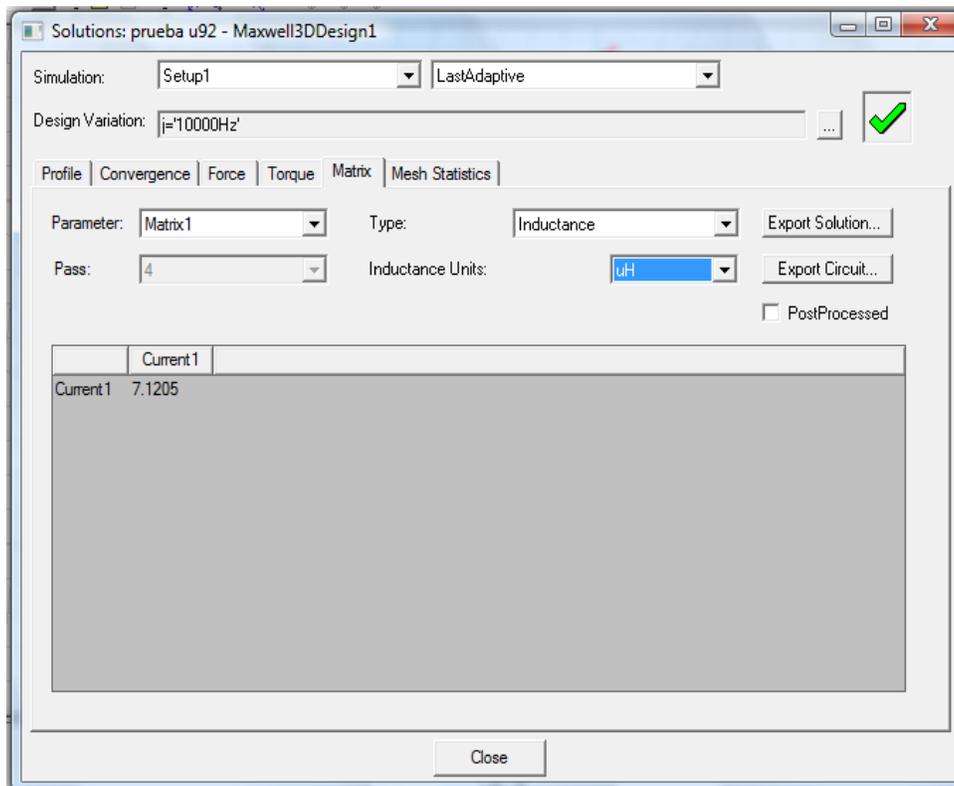


Ilustración 24: Simulación de la inductancia parásita del núcleo U93 por métodos finitos.

La inductancia de 35 vueltas es de 0,92281 H

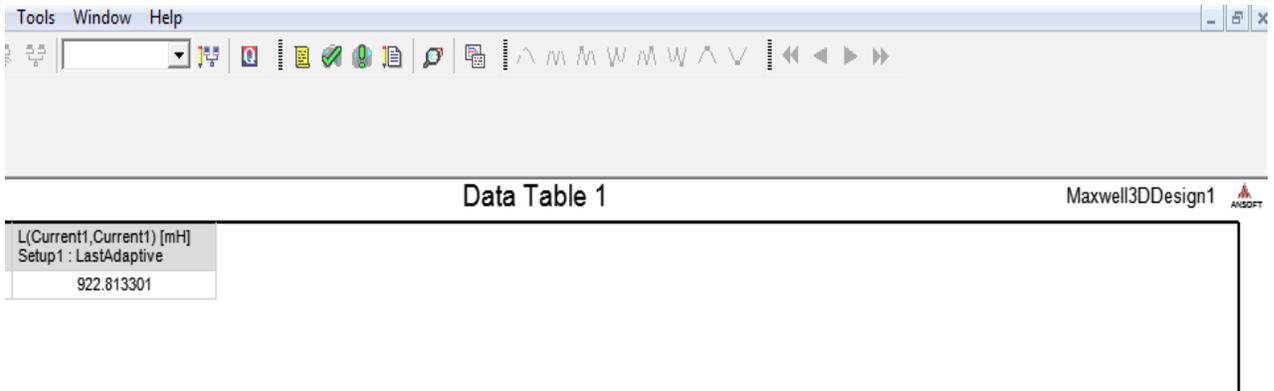


Ilustración 25: Resultado simulación para obtener la inductancia de magnetización en el núcleo U93

E80

El mismo principio que usamos para el U93 se utilizó en el E80, el material se creó simulando el 3F3, el cual tiene mejor respuesta en frecuencia, como permeabilidad se utilizó 1710.

Las vueltas se simulan utilizando como material cobre y la misma distancia de estas.

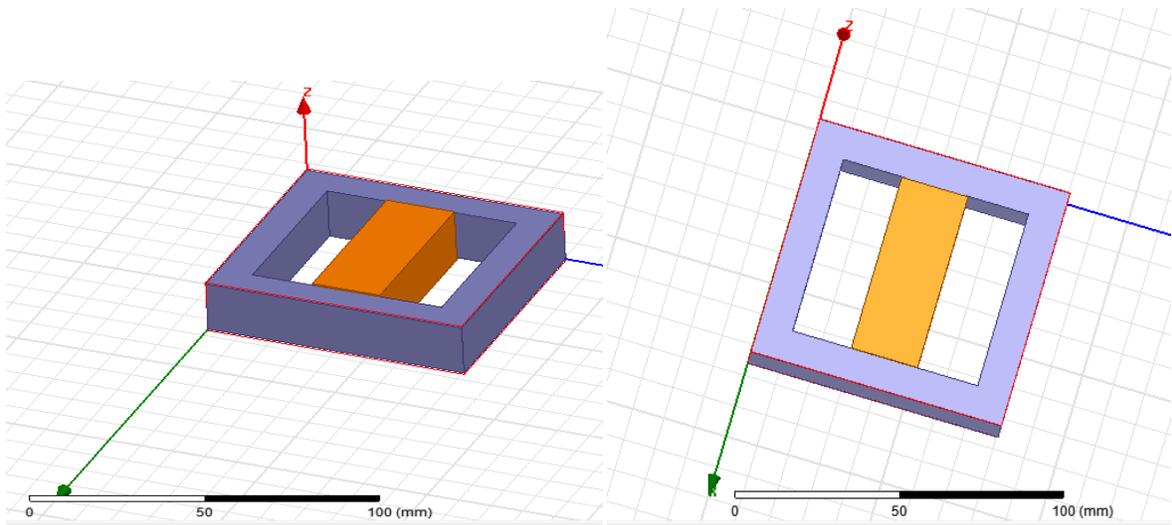


Ilustración 26: Modelo de núcleo E80

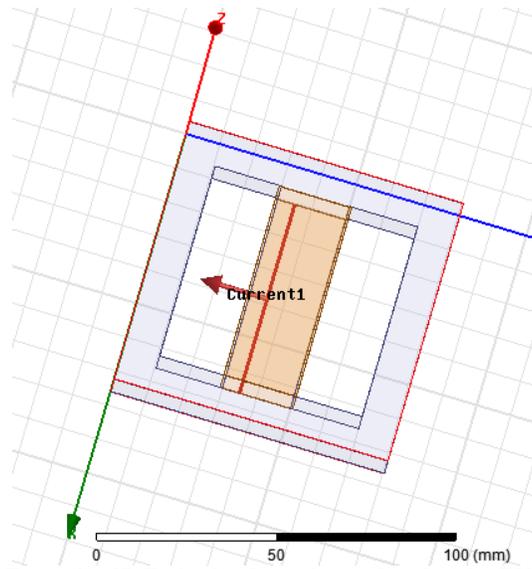


Ilustración 27: Excitación de corriente sobre el núcleo E80.

Los resultados de inductancia de magnetización son:

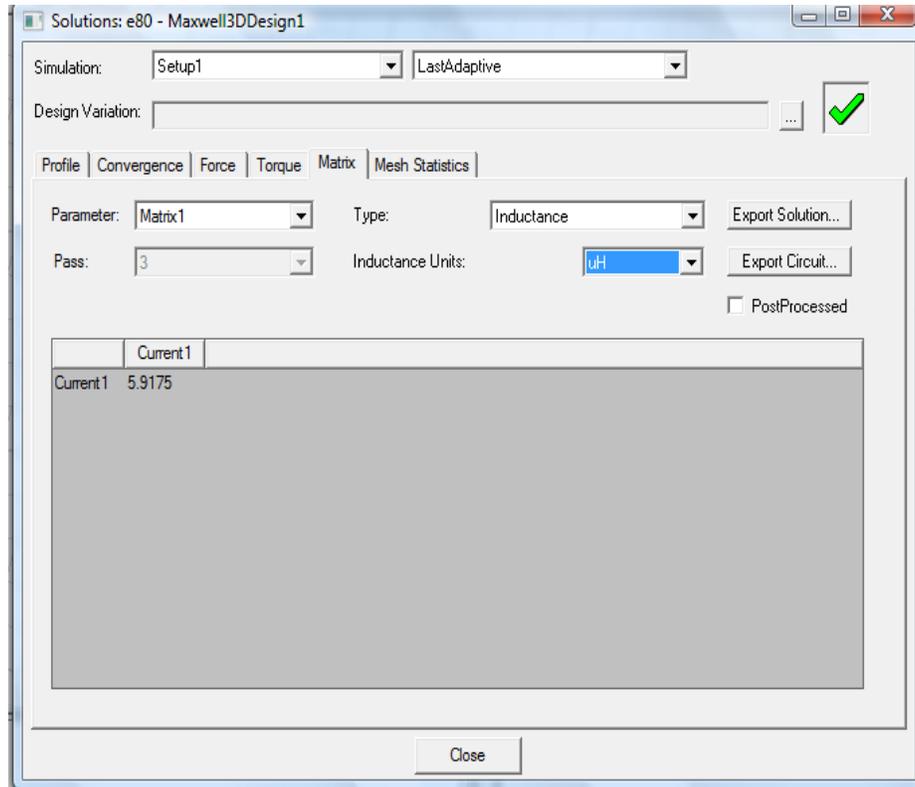


Ilustración 28: Simulación de la inductancia parásita del núcleo E80 por métodos finitos.

La inductancia de 10 vueltas es de 0,92281 H

Data Table 2		Maxwell3DDesign1
L(Current1,Current1) [mH]		
Setup1 : LastAdaptive		
	605.948416	

Ilustración 29: Simulación para obtener la inductancia de magnetización en el núcleo E80.

4.3.1.4 Capacitancia parásita

Aunque el módulo Electrostático Maxwell cuenta con un simulador para encontrar la capacitancia, para problemas complejos como las vueltas del cable sobre el núcleo del transformador el análisis toma demasiado tiempo, por tal razón se decidió no utilizar este módulo y hacerlo por energía, se disminuyó al máximo el mesh posible y se disminuyeron los pasos a solo 4, realizando estas aproximaciones la simulación duro aproximadamente 1 día.

Para el núcleo en U93 utilizamos el siguiente modelo:

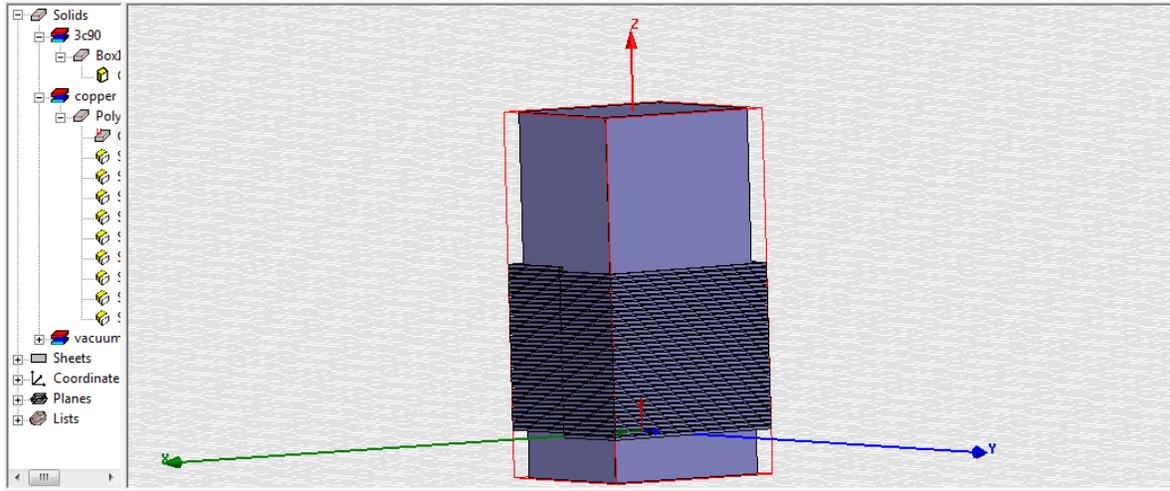


Ilustración 30: Simulación Electrostática del núcleo U93.

Los resultados de la simulación son los siguientes:

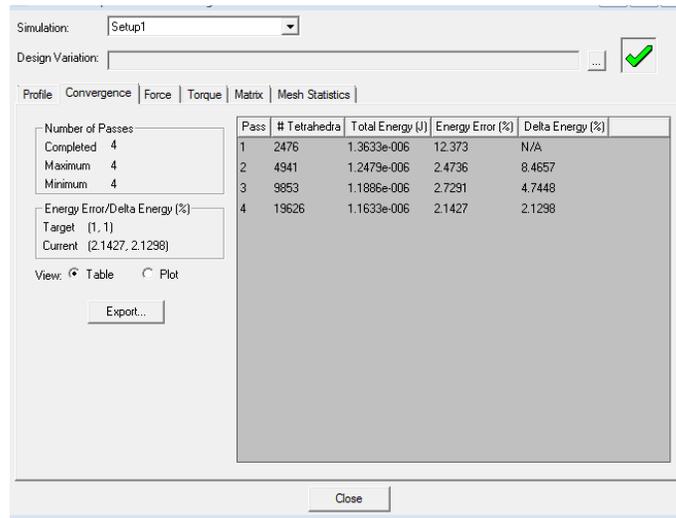


Ilustración 31: Resultados simulación electrostática del núcleo U93.

Ahora que tenemos la energía y el voltaje podemos encontrar la capacitancia.

Para el caso del transformador U93, la capacitancia es de 1,09nF en primario, es decir 10,9pF en secundario.

Para el transformador E80 el modelo es:

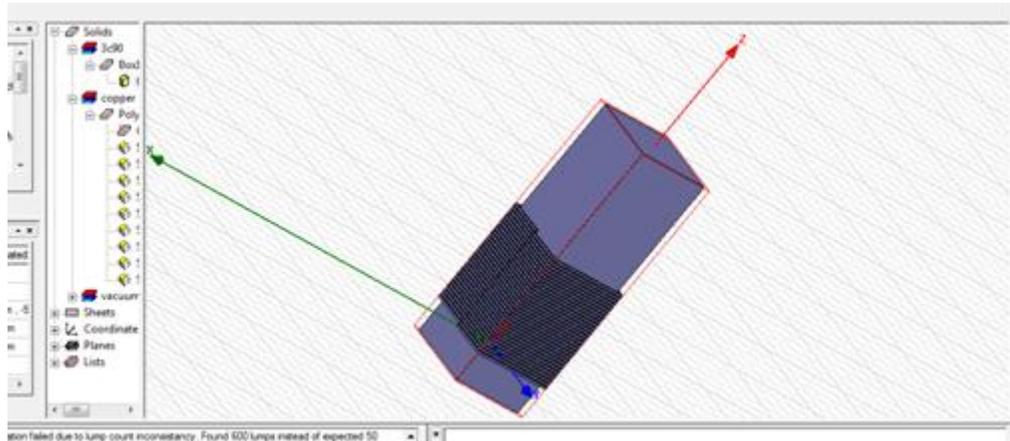


Ilustración 32: Simulación Electroestática del núcleo E80.

Los resultados son:

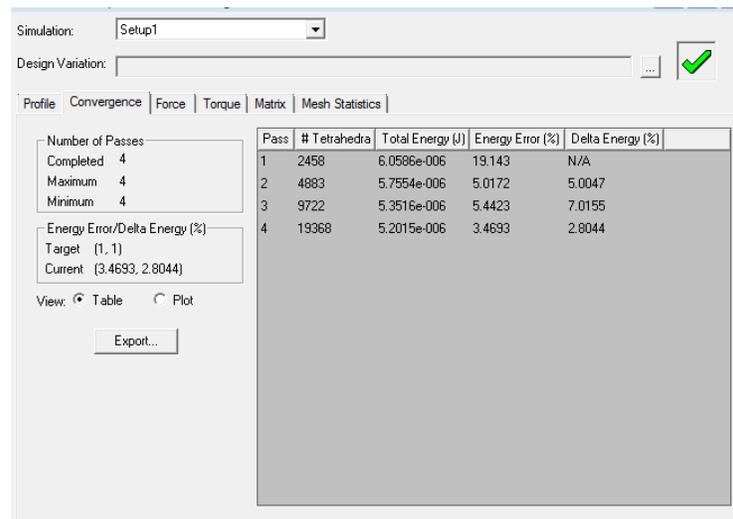


Ilustración 33: Resultados simulación electroestática del núcleo E80.

El valor de la capacitancia es:
232,66pF en primario, es decir, 2,32pF en secundario.

4.4 Desarrollo experimental

Se realizaron varias construcciones sobre los núcleos seleccionados y se elaboraron las mediciones en el laboratorio, para compararlas con el desarrollo teórico.

4.4.1 Método de medición

Según (Flanagan, 1992), la determinación de los componentes parásitos del transformador, se hace por medio de un barrido en frecuencia y la verificación de la impedancia de entrada en circuito abierto y corto circuito.

Tomamos como modelo del transformador el siguiente circuito:

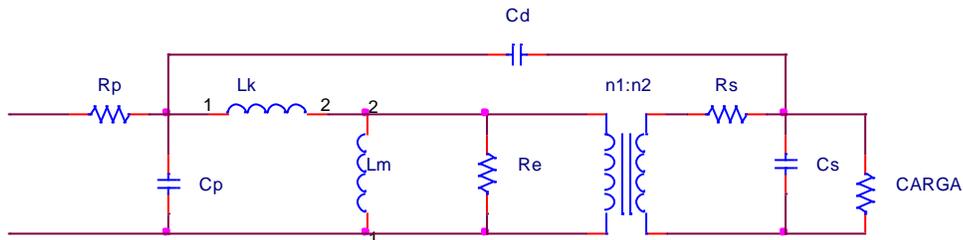


Ilustración 34: Modelo del transformador real.

Para facilidad en estas mediciones, se decidió despreciar los componentes parásitos disipativos del transformador, debido a su bajo impacto en el funcionamiento del convertidor, sin embargo a continuación mencionaremos las razones para despreciar algunos componentes parásitos.

Aunque el transformador funciona con alto voltaje, la corriente es relativamente baja, lo cual implica una alta resistividad en la carga la cual se encuentra en serie con la resistencias R_s y R_p , por lo tanto para la simplificación del modelo podemos despreciarlas, como las pérdidas en el núcleo no son apreciables podemos despreciar R_e .

Debido a que la impedancia de la carga posee mayor parte capacitiva y de muy bajo valor, los primeros componentes relevantes para nuestro modelo serán las capacitancias parásitas, además necesitaremos un valor de inductancia de magnetización alta, para evitar el efecto de la corriente de magnetización y por lo tanto altas pérdidas en el sistema, la fuente de alimentación de nuestro transformador tiene una inductancia de salida alta por lo tanto la inductancia de fugas debe tener un valor bajo.

Debido a las últimas aproximaciones propuestas para el modelo del transformador en esta aplicación específica, utilizaremos un modelo de transformador mostrado en la siguiente Ilustración.

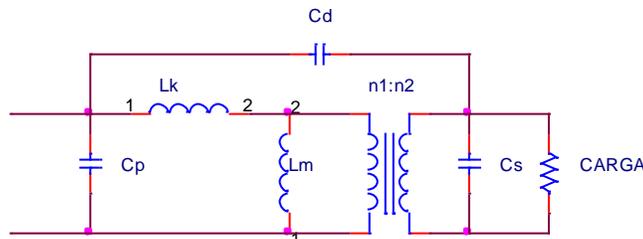


Ilustración 35: Primer modelo aproximado del transformador.

4.4.1.1 Medición en circuito abierto

Según (Djibrillah, 2011), para la medición en circuito abierto tenemos el siguiente circuito del transformador:

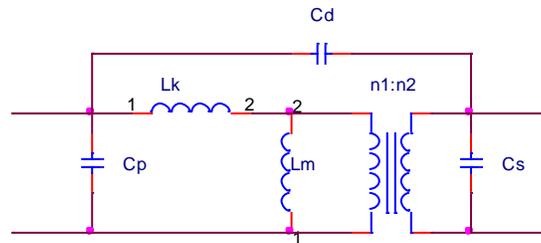


Ilustración 36: Modelo del transformador en circuito abierto.

Para la medición se tendrán en cuenta los siguientes parámetros, voltaje RMS en el primario, corriente RMS en el primario, desfase entre el voltaje y la corriente del primario y frecuencia. Estas medidas son realizadas con señal de entrada sinusoidal.

Se realizarán varias mediciones a distintas frecuencias para obtener el comportamiento en frecuencia de los componentes del transformador, con el voltaje y la corriente sobre el primario se halla la impedancia para cada frecuencia y se anota el desfase a esa frecuencia.

Dando como resultado una gráfica así:

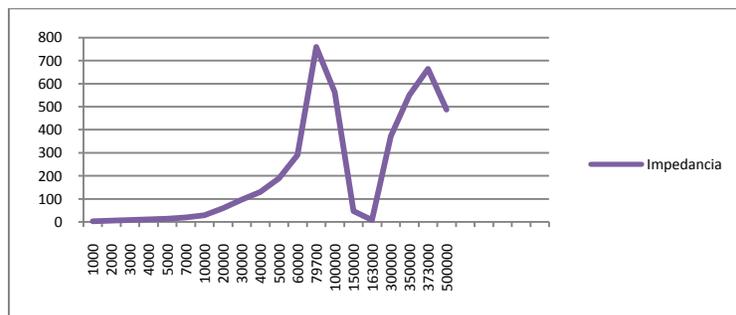


Ilustración 37: Respuesta del transformador en frecuencia.

Durante el intervalo en el cual el desfase del voltaje y la corriente son 90° sabemos que la impedancia es netamente inductiva y encontrando la pendiente en este intervalo obtenemos el valor de las inductancias de magnetización en serie con la inductancia de fuga, además se tendrán en cuenta las tres primeras frecuencias de resonancia, que suceden cuando el desfase entre voltaje y corriente es cero, de acuerdo a lo anterior podemos hallar la inductancia de magnetización con:

$$L_m + L_k = \frac{Z_2 - Z_1}{2\pi * (f_2 - f_1)^2}$$

4.4.1.2 Medición en corto circuito

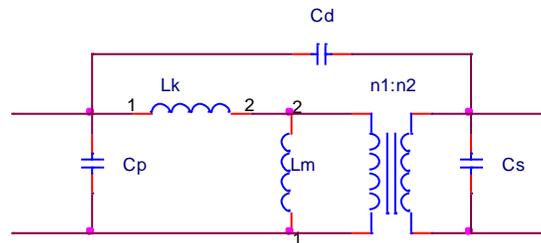


Ilustración 38: Modelo del transformador en corto circuito.

Según (Djibrillah, 2011), con los terminales de bobinado secundario en corto circuito la inductancia de magnetización queda en paralelo con el corto, por esta razón se elimina, por lo tanto queda un modelo del transformador como aparece en la Ilustración de arriba; ya que la inductancia de fuga se ve en frecuencias altas, y esta es la única inductancia presente en esta prueba se inicia la medición en 50kHz, el procedimiento es similar que en circuito abierto, pero en este se tendrá en cuenta la primera frecuencia de resonancia, que sucede cuando el desfase entre voltaje y corriente es cero, por lo cual la fórmula para hallar la inductancia de fuga es:

$$L_k = \frac{Z_2 - Z_1}{2\pi * (f_2 - f_1)^2}$$

Capacitancias Parásitas

Según (Djibrillah, 2011), al reflejar las capacitancias parásitas al primario tenemos:

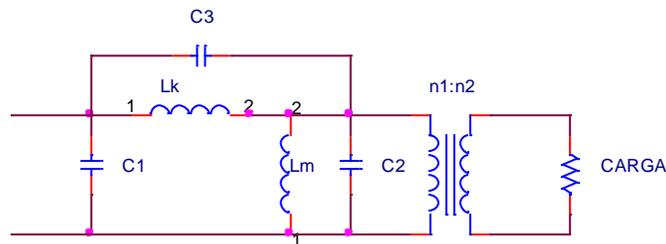


Ilustración 39: Modelo del transformador con las capacitancias reflejadas en primario.

Como tenemos las frecuencias de resonancia, y los valores de la inductancia, se pueden despejar los valores de las capacitancias así:

$$C_1 + C_2 = \frac{1}{(2\pi f_{01})^2 L_m}$$

$$C_2 + C_3 = \frac{1}{(2\pi f_{02})^2 L_f}$$

$$C_1 + C_3 = \frac{1}{(2\pi f_{03})^2 L_f}$$

4.4.2 Respuesta del Transformador

Para verificar que el modelo sea correcto se realiza una simulación de la respuesta ante una entrada paso con los componentes previamente obtenidos y esta se compara a la respuesta del transformador ante una entrada paso real.

El método de barrido en frecuencia y pruebas de cortocircuito y circuito abierto tiene un problema que es el voltaje utilizado, pues para realizar el barrido en frecuencia se utiliza un generador de funciones el cual no tiene un valor constante de voltaje al variar la frecuencia y la carga, y además es de muy bajo valor (muy lejano comparado con los valores de voltaje de trabajo en la lámpara), por lo que se trabaja en un punto diferente de la curva B-H al punto normal de trabajo de la lámpara.

Para verificar este modelo se midió la onda de corriente de entrada al transformador y se guardaron los datos para simularlos en pSpice (Anexo 2). Los resultados en OrCAD son:

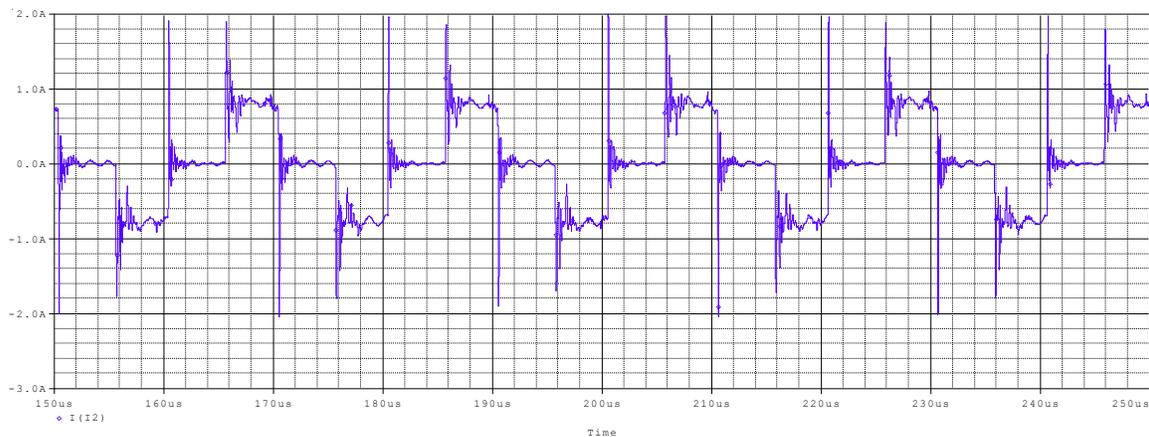


Ilustración 40: Corriente de entrada experimental en OrCAD

El modelo del transformador conectado a la lámpara simulada en OrCAD es:

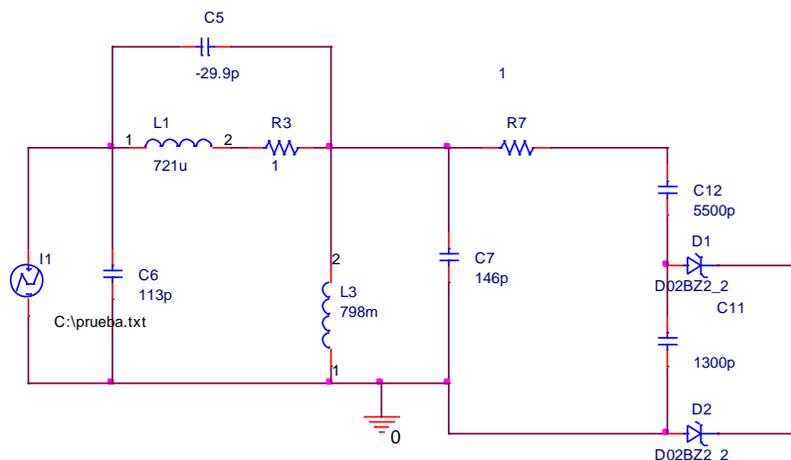


Ilustración 41: Simulación del modelo del transformador conectado al modelo de la lámpara.

La corriente de salida para el núcleo U93 es:

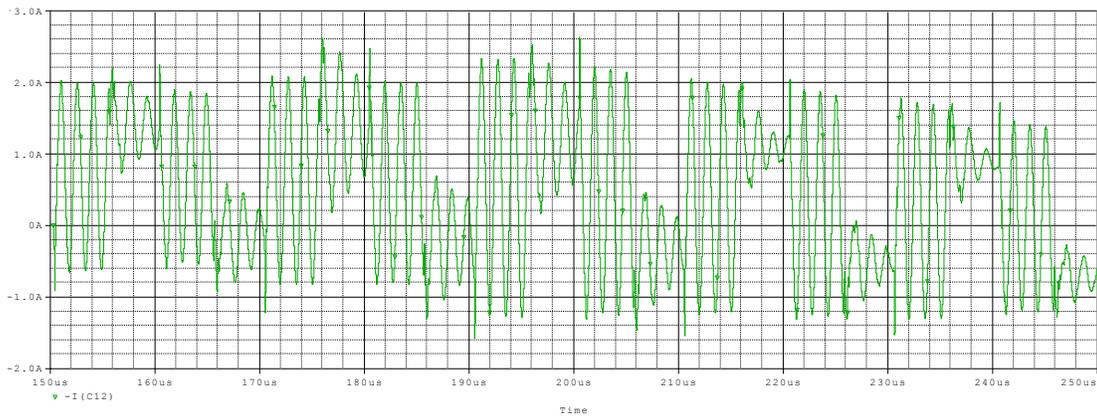


Ilustración 42: Corriente de salida simulación orcad.

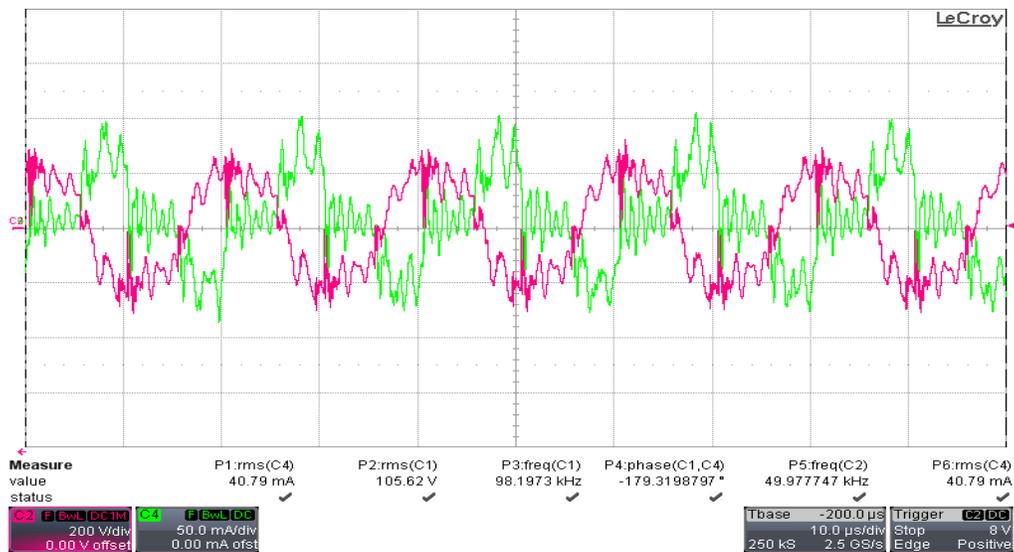


Ilustración 43: Corriente de salida osciloscopio.

Como podemos observar en las gráficas, el modelo presenta problemas pues donde la corriente no tiene los mismos ciclos, es decir aunque en la gráfica del osciloscopio existe una oscilación en el periodo de la señal, se puede visualizar que es una señal con un parte del período con promedio positivo, en otra parte del periodo, su promedio es cercano a cero, y por último en otra parte de su periodo tiene un promedio negativo y esto se asemeja a una señal cuadrada con un descanso en cero, lo cual no sucede en la simulación.

Observando estos resultados se decidió simplificar el modelo, realizando las mediciones de los componentes parásitos del transformador en un puente de impedancias, es decir se decidió no hacer más el barrido en frecuencia con la señal de entrada sinusoidal, pero aun así realizamos las mediciones con la prueba de circuito abierto y corto circuito; reduciendo el modelo al siguiente:

Convertidor y Transformador

Modelo de la lámpara (Reflejada en el primario)

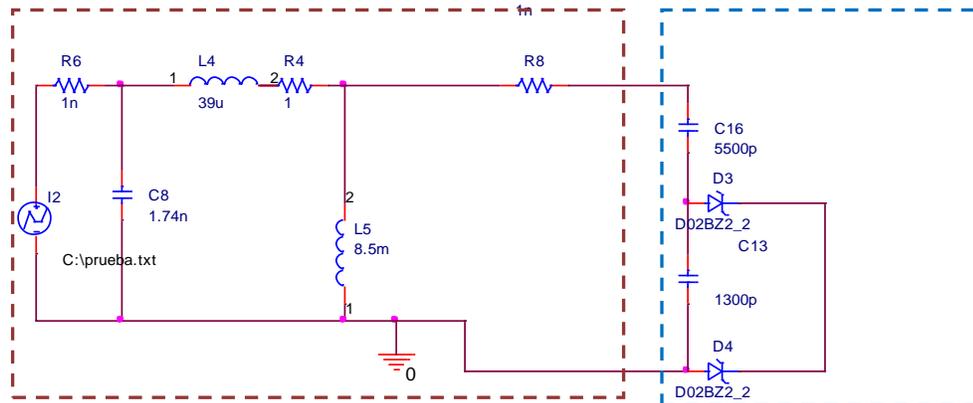


Ilustración 44: Modelo Simplificado del transformador conectado al modelo de la lámpara de DBD (Reflejado en el primario).

Utilizando el modelo simplificado los resultados fueron:

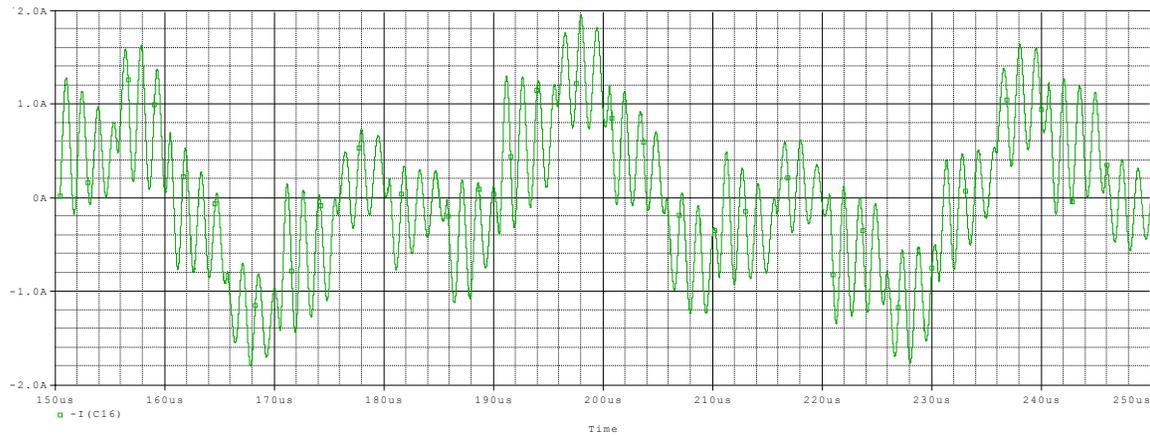


Ilustración 45: Corriente de salida con modelo simplificado.

Este modelo se acerca más a los resultados obtenidos en laboratorio, por lo cual decidimos cambiar el modelo al segundo utilizado, ya que además de ser más sencillo, su comportamiento es más cercano al del transformador conectado a la lámpara.

5 Análisis de los resultados

5.1 Núcleo ETD59 Una Capa

<i>Ficha técnica del transformador</i>	
Fabricante:	Ferroxcube
Tipo de núcleo:	Tipo ETD
Componentes del Transformador:	2 núcleos tipo ETD
Numero de parte:	ETD59
Material del núcleo:	3C90
<i>Geometría del transformador</i>	
Largo interno:	4,5 cm
Largo externo:	6,2 cm
Ancho interno:	4,47 cm
Ancho externo:	6 cm
Alto:	2,16 cm
Diámetro del brazo central:	2,16 cm
<i>Construcción y caracterización del núcleo</i>	
Número de capas del primario:	1
Número de capas del secundario:	1
Calibre del cable del primario:	32 AWG
Calibre del cable del secundario:	Cable de Litz (100 hilos cada uno de diámetro 0,071 mm)
Número de vueltas del primario:	17
Número de vueltas del secundario:	170
Inductancia de magnetización en primario:	1,33 mH
Inductancia de fugas en primario:	4,1 uH
Capacitancia parásita en secundario:	4,2 pF

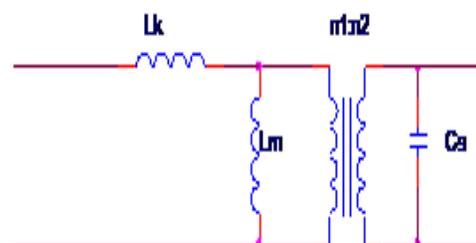
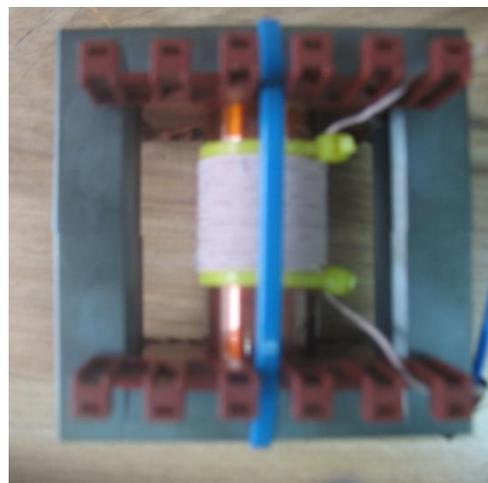


Ilustración 46: Ficha técnica transformador ETD59

Al realizar las pruebas de laboratorio con este transformador y conectar este a la lámpara, la lámpara de DBD no encendió; cómo podemos ver en la ilustración 45 la corriente a la salida del transformador es casi cero, esto puede ser causa del bajo valor en la inductancia de magnetización (ver ficha técnica del transformador, Ilustración 44), lo que provoca que una gran parte de la corriente fluya en este elemento parásito y en consecuencia exista una muy baja eficiencia en el transformador, como resultado de esto no genere la corriente suficiente para prender la lámpara.

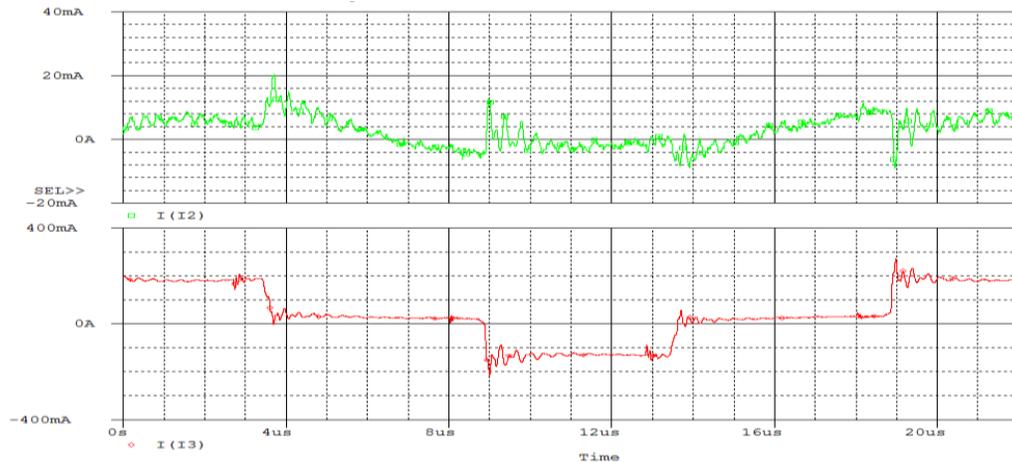


Ilustración 47: Gráfica de corrientes en primario y secundario del transformador ETD59 conectado a la lámpara DBD.

5.2 Núcleo EC70 Una Capa

<i>Ficha técnica del transformador</i>	
Fabricante:	Ferroxcube
Tipo de núcleo:	Tipo EC
Componentes del Transformador:	2 núcleos tipo EC
Numero de parte:	EC70
Material del núcleo:	3C90
<i>Geometría del transformador</i>	
Largo interno:	4,54 cm
Largo externo:	6,9 cm
Ancho interno:	4,45 cm
Ancho externo:	7,17 cm
Alto:	1,64 cm
Diámetro del brazo central:	1,64 cm
<i>Construcción y caracterización del núcleo</i>	
Número de capas del primario:	1
Número de capas del secundario:	1
Calibre del cable del primario:	33 AWG
Calibre del cable del secundario:	Cable de Litz (100 hilos cada uno de diámetro 0,071 mm)
Número de vueltas del primario:	22
Número de vueltas del secundario:	220
Inductancia de magnetización en primario:	3,31 mH
Inductancia de fugas en primario:	2,23 uH
Capacitancia parásita en secundario:	5,6 pF

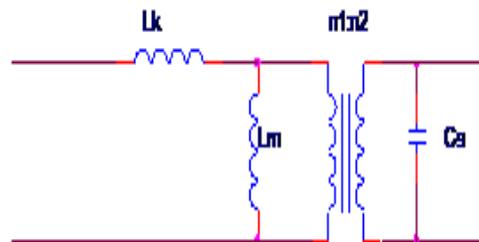
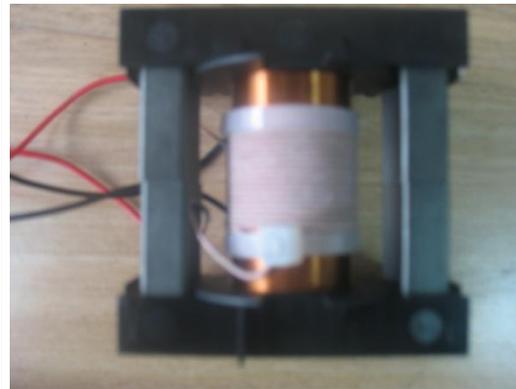


Ilustración 48: Ficha técnica núcleo EC70 con una capa.

Se intentó realizar una configuración parecida al núcleo anterior, pero con un calibre de cable más pequeño, que también resiste la corriente que pasa sobre él; esto con el fin de aumentar la inductancia de magnetización en una sola capa. Al realizar las pruebas de laboratorio con este transformador y conectar éste a la lámpara, la lámpara de DBD no encendió; cómo podemos ver en la ilustración 47, la corriente a la salida del transformador es casi cero, esto puede ser causa del bajo valor en la inductancia de magnetización(ver ficha técnica del transformador, Ilustración 46) lo que provoca que una gran parte de la corriente fluya en este elemento parásito y en consecuencia exista una muy baja eficiencia en el transformador, como resultado de esto no se genera la corriente suficiente para prender la lámpara.

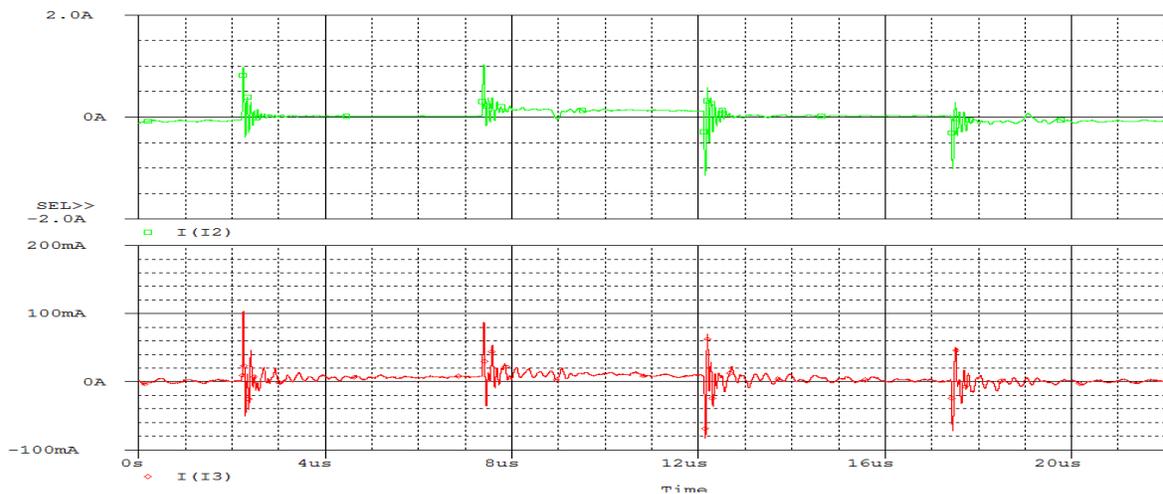


Ilustración 49: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador EC70 de una capa en secundario conectado a la lámpara DBD.

5.3 Núcleo EC70 Dos Capas

<i>Ficha técnica del transformador</i>	
Fabricante:	Ferroxcube
Tipo de núcleo:	Tipo EC
Componentes del Transformador:	2 núcleos tipo EC
Numero de parte:	EC70
Material del núcleo:	3C90
<i>Geometría del transformador</i>	
Largo interno:	4,54 cm
Largo externo:	6,9 cm
Ancho interno:	4,45 cm
Ancho externo:	7,17 cm
Alto:	1,64 cm
Diámetro del brazo central:	1,64 cm
<i>Construcción y caracterización del núcleo</i>	
Número de capas del primario:	1
Número de capas del secundario:	2
Calibre del cable del primario:	33 AWG
Calibre del cable del secundario:	Cable de Litz (100 hilos cada uno de diámetro 0,071 mm)
Número de vueltas del primario:	34
Número de vueltas del secundario:	340
Inductancia de magnetización en primario:	340 mH
Inductancia de fugas en primario:	2,82 uH
Capacitancia parásita en secundario:	332 pF

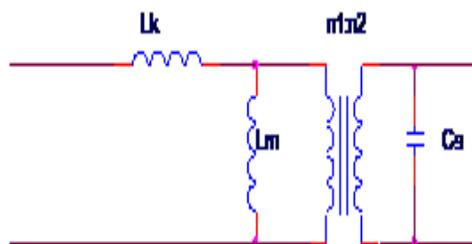


Ilustración 50: Ficha técnica del transformador EC70 con dos capas en secundario.

Este modelo de transformador con dos capas en el bobinado secundario, se diseñó con el fin de poder subir la inductancia de magnetización, para evitar las pérdidas sobre este componente parásito, lograr que la lámpara de DBD se encienda y poder observar el efecto de dos capas en un bobinado sobre la capacitancia parásita. Al realizar las pruebas de laboratorio con este transformador y conectar éste a la lámpara, la lámpara de DBD no encendió; cómo podemos ver en la ilustración 49 la corriente a la salida del transformador es casi cero, se atribuye este resultado al alto valor en la capacitancia parásita (ver ficha técnica del transformador, Ilustración 48), lo que provoca que una gran parte de la corriente fluya en este elemento parásito y en consecuencia exista una muy baja eficiencia en el transformador, como resultado de esto no genere la corriente suficiente para prender la lámpara. Con este modelo se puede observar que al introducir dos capas sobre un bobinado, la capacitancia parásita en el bobinado sube considerablemente, ocasionando grandes pérdidas en el transformador; de esto se concluye que debemos tener un diseño que tenga un equilibrio entre la inductancia de magnetización y la capacitancia parásita y por tanto los modelos que tengan más de una capa en uno de sus bobinados no serán eficientes para esta aplicación.

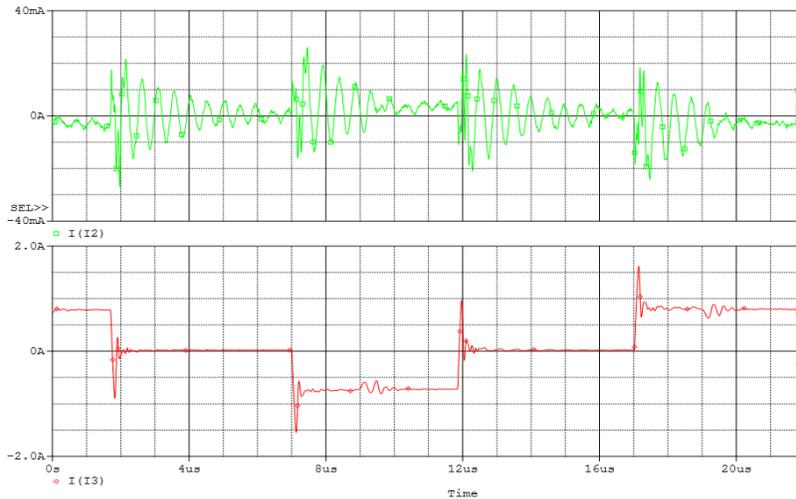


Ilustración 51: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador EC70 de dos capas en secundario conectado a la lámpara DBD.

5.4 Núcleo E80 Bobinado Central

<i>Ficha técnica del transformador</i>	
Fabricante:	Ferroxcube
Tipo de núcleo:	Tipo E
Componentes del Transformador:	2 núcleos tipo E
Numero de parte:	E80/38/20
Material del núcleo:	3F3
<i>Geometría del transformador</i>	
Largo interno:	5,6 cm
Largo externo:	7,6 cm
Ancho interno:	5,9 cm
Ancho externo:	8 cm
Alto:	2 cm
Ancho pata central:	2 cm
<i>Construcción y caracterización del núcleo</i>	
Número de capas del primario:	1
Número de capas del secundario:	1
Calibre del cable del primario:	33 AWG
Calibre del cable del secundario:	Cable de Litz (100 hilos cada uno de diámetro 0,071 mm)
Número de vueltas del primario:	31
Número de vueltas del secundario:	310
Inductancia de magnetización en primario:	4,47 mH
Inductancia de fugas en primario:	8,2 uH
Capacitancia parásita en secundario:	5,2 pF

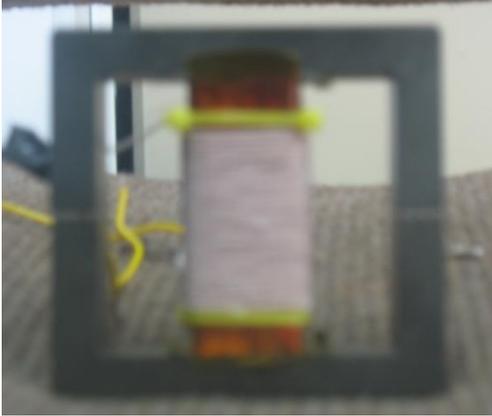
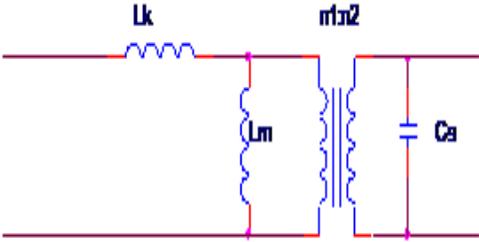



Ilustración 52: Ficha técnica núcleo E80 con Bobinado central.

En este modelo se incrementaron las dimensiones del núcleo con el fin de lograr una inductancia de magnetización más alta en una sola capa (ver ficha técnica del transformador, Ilustración 50). Al realizar las pruebas de laboratorio con este transformador y conectar este a la lámpara, la lámpara de DBD encendió; cómo podemos ver en la ilustración 51 la corriente a la salida del transformador trata de seguir la corriente de entrada; es evidente que su forma de onda no es igual, esto puede ser a causa de que el valor de inductancia no es lo suficientemente alto, lo cual genera una distorsión en la señal de corriente a la salida; la oscilación sobre la señal de corriente es el efecto que ocasiona la capacitancia parasita del primario sobre la señal de salida . La señal obtenida sobre este transformador sigue el mismo patrón y en promedio tendrían un valor semejante teniendo en cuenta la relación de transformación, también podemos observar que la relación de transformación es de 10 en las gráficas de voltaje (Ilustración 52).

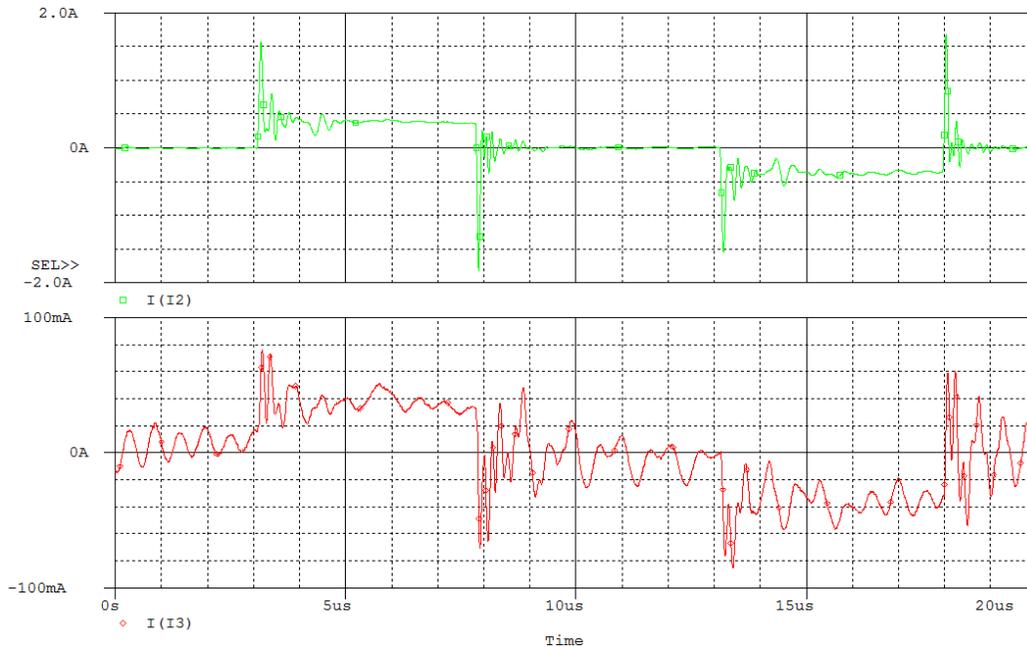


Ilustración 53: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador E80 con Bobinado central conectado a la lámpara DBD.

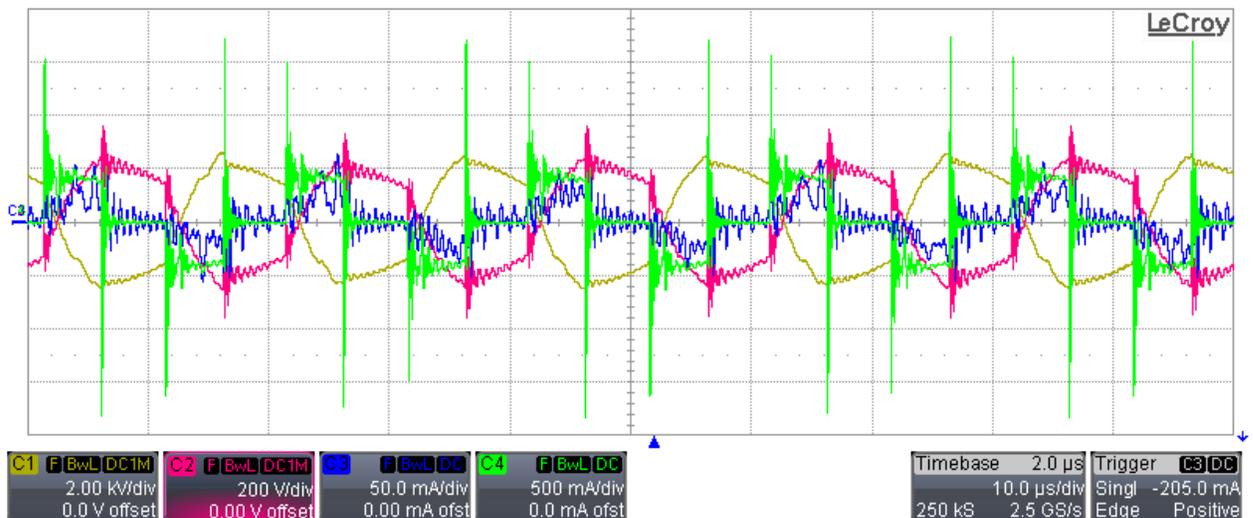


Ilustración 54: Gráfica experimental del transformador E80 con Bobinado central conectado a la lámpara DBD.

5.5 Núcleo E80 Bobinado con dos patas

<i>Ficha técnica del transformador</i>	
Fabricante:	Ferroxcube
Tipo de núcleo:	Tipo E
Componentes del Transformador:	2 núcleos tipo E
Numero de parte:	E80/38/20
Material del núcleo:	3F3
<i>Geometría del transformador</i>	
Largo interno:	5,6 cm
Largo externo:	7,6 cm
Ancho interno:	5,9 cm
Ancho externo:	8 cm
Alto:	2 cm
Ancho pata central:	2 cm
<i>Construcción y caracterización del núcleo</i>	
Número de capas del primario:	1
Número de capas del secundario:	1
Calibre del cable del primario:	33 AWG
Calibre del cable del secundario:	Cable de Litz (100 hilos cada uno de diámetro 0,071 mm)
Número de vueltas del primario:	62
Número de vueltas del secundario:	620
Inductancia de magnetización en primario:	15,2 mH
Inductancia de fugas en primario:	29,3 uH
Capacitancia parásita en secundario:	49,3 pF

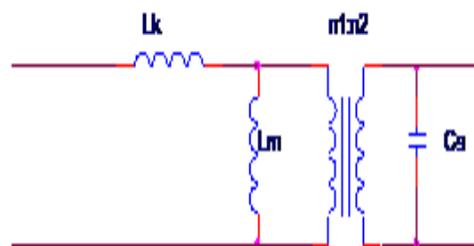


Ilustración 55: Ficha técnica núcleo E80 con patas externas bobinadas

En este modelo se intentó incrementar la inductancia de magnetización, para obtener una señal de corriente con menos distorsión. Al realizar las pruebas de laboratorio con este transformador y conectar este a la lámpara, la lámpara de DBD no encendió; cómo podemos ver en la ilustración 54 la corriente a la salida del transformador trata de seguir la corriente de entrada, pero a diferencia del caso anterior esta presenta oscilaciones mucho más grandes lo que provoca que la señal promedio de esta no se de la misma forma que la señal de corriente a la entrada, esto a causa de que al incrementar su bobinado para subir su inductancia de magnetización, también subió su capacitancia parásita (ver ficha técnica del transformador, Ilustración 53), con lo cual se genera pérdidas más grandes en este elemento parásito y esto genera que la lámpara no se alimenta con una forma de onda de corriente semejante a una señal cuadrada y por tal razón no enciende.

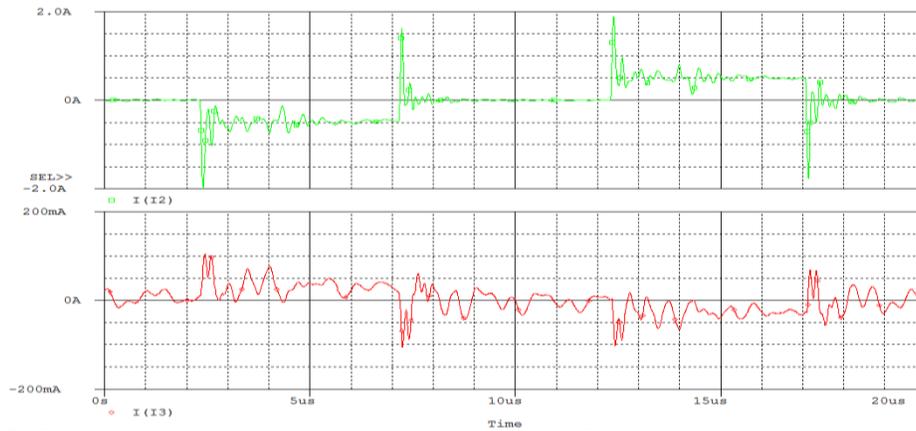


Ilustración 56: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador núcleo E80 con patas externas bobinadas conectado a la lámpara DBD.

5.6 Núcleo U93 Bobinado completo

<i>Ficha técnica del transformador</i>	
Fabricante:	Ferroxcube
Tipo de núcleo:	Tipo U
Componentes del Transformador:	2 núcleos tipo U
Numero de parte:	U93/76/30
Material del núcleo:	3C90
<i>Geometría del transformador</i>	
Largo interno:	9,3 cm
Largo externo:	15,2 cm
Ancho interno:	3,6 cm
Ancho externo:	9,3 cm
Alto:	3 cm
<i>Construcción y caracterización del núcleo</i>	
Número de capas del primario:	1
Número de capas del secundario:	1
Calibre del cable del primario:	32 AWG
Calibre del cable del secundario:	Cable de Litz (100 hilos cada uno de diámetro 0,071 mm)
Número de vueltas del primario:	35
Número de vueltas del secundario:	350
Inductancia de magnetización en primario:	34 mH
Inductancia de fugas en primario:	213 uH
Capacitancia parásita en secundario:	56,8 pF

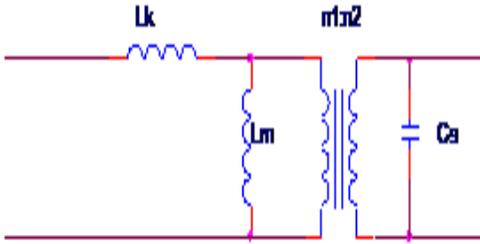



Ilustración 57: Ficha técnica Transformador U93 con Bobinado completo

En este modelo se intentó incrementar aún más las dimensiones, para obtener una inductancia de magnetización más alta. Al realizar las pruebas de laboratorio con este transformador y conectar este a la lámpara, la lámpara de DBD no encendió; cómo podemos ver en la ilustración 56 la corriente a la salida del transformador presenta oscilaciones muy grandes lo que provoca que la señal promedio de esta no sea de la misma forma que la señal de corriente a la entrada, esto genera que la lámpara no se alimenta con una forma de onda de corriente semejante a una señal cuadrada y por tal razón no enciende. Esto se debe al alto valor de la capacitancia parásita (ver ficha técnica del transformador, Ilustración 55), lo que genera que una gran parte de la corriente fluya por este elemento parásito y la forma final de corriente no sea la deseada.

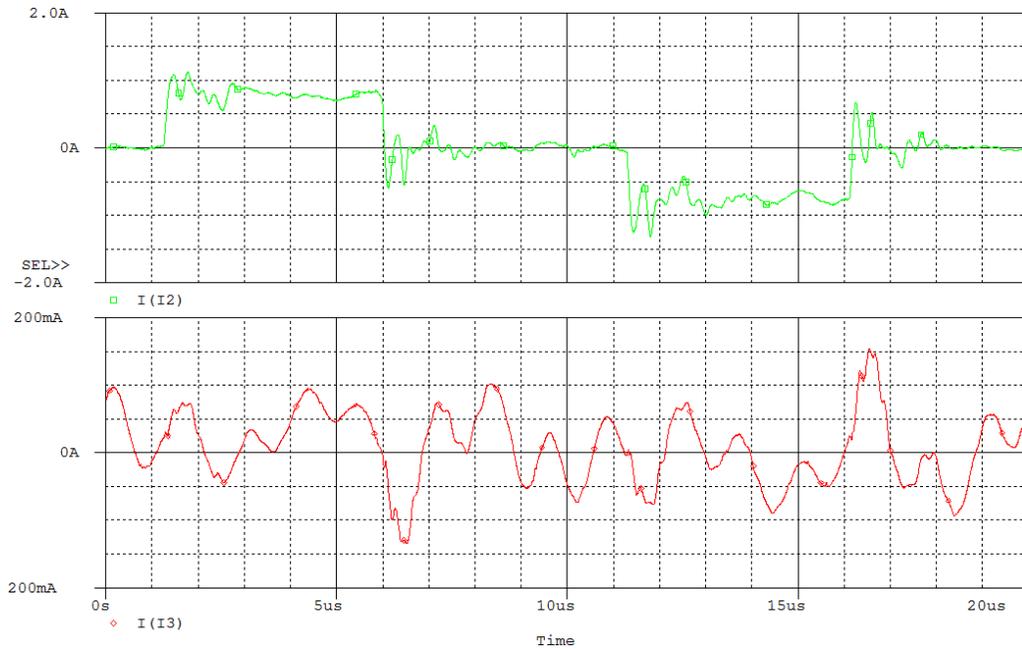


Ilustración 58: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador U93 conectado a la lámpara DBD.

5.7 Núcleo U93 Bobinado con una sola pata

<i>Ficha técnica del transformador</i>	
Fabricante:	Ferroxcube
Tipo de núcleo:	Tipo U
Componentes del Transformador:	2 núcleos tipo U
Numero de parte:	U93/76/30
Material del núcleo:	3C90
<i>Geometría del transformador</i>	
Largo interno:	9,3 cm
Largo externo:	15,2 cm
Ancho interno:	3,6 cm
Ancho externo:	9,3 cm
Alto:	3 cm
<i>Construcción y caracterización del núcleo</i>	
Número de capas del primario:	1
Número de capas del secundario:	1
Calibre del cable del primario:	32 AWG
Calibre del cable del secundario:	Cable de Litz (100 hilos cada uno de diámetro 0,071 mm)
Número de vueltas del primario:	35
Número de vueltas del secundario:	350
Inductancia de magnetización en primario:	8,41 mH
Inductancia de fugas en primario:	40,1 uH
Capacitancia parásita en secundario:	8,34 pF

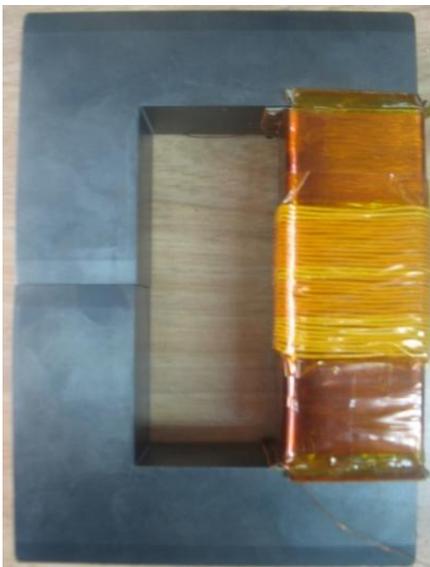
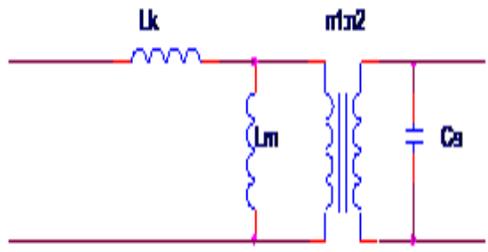



Ilustración 59: Ficha técnica Transformador U93 Bobinado con una sola pata

En este modelo se intentó optimizar los dos componentes parásitos críticos para que la lámpara de DBD encienda, como lo es obtener una inductancia de magnetización alta, pero con un valor de capacitancia parásita bajo. Al realizar las pruebas de laboratorio con este transformador y conectar este a la lámpara, la lámpara de DBD encendió; cómo podemos ver en la ilustración 58 la corriente a la salida del transformador trata de seguir la corriente de entrada y aunque su forma de onda no es igual sigue el mismo patrón, éste se comporta un poco mejor que con el transformador de núcleo E80 con bobinado central, ya que tiene una inductancia de magnetización más alta (ver ficha técnica del transformador, Ilustración 58); en promedio la señal de corriente tendrían un valor semejante, también podemos observar que la relación de transformación no es tan buena como en el caso del transformador de núcleo E80 con bobinado central y además este presenta un poco más de oscilaciones en su señales, esto a causa de que su capacitancia parásita también se incrementó (ver ficha técnica del transformador, Ilustración 58).



Ilustración 60: Gráfica de corriente en primario y secundario del transformador U93 Bobinado con una sola pata conectado a la lámpara DBD.

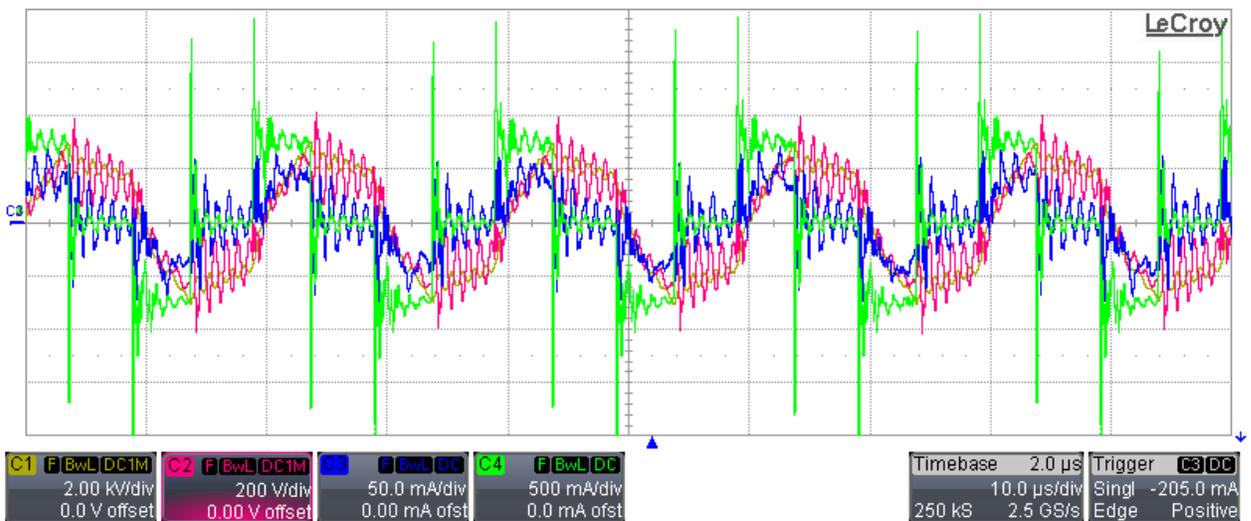


Ilustración 61: Gráfica experimental del transformador U93 Bobinado con una sola pata conectado a la lámpara DBD.

5.8 Eficiencia de los transformadores

En este capítulo analizaremos la eficiencia de los transformadores que nos permitieron encender la lámpara de DBD, puesto que los otros transformadores además de que tendrán una eficiencia muy baja, porque sus corrientes en secundario son muy pequeñas, tampoco lograron el objetivo principal de prender la lámpara de DBD.

Para hallar la eficiencia en el transformador hallaremos la potencia instantánea de las señales de voltaje y corriente en el primario y la potencia instantánea de las señales de voltaje y corriente en el secundario, después hallaremos el promedio de la potencia instantánea en primario y el promedio de la potencia instantánea en secundario; por último hallaremos la relación del promedio de la potencia en secundario con la potencia en primario y esto nos dará la eficiencia del transformador.

5.8.1 Eficiencia del transformador U93 de una sola pata

Para hallar la eficiencia en el transformador, hallaremos la potencia promedio en bobinado primario y en bobinado secundario y a continuación hallaremos la eficiencia.

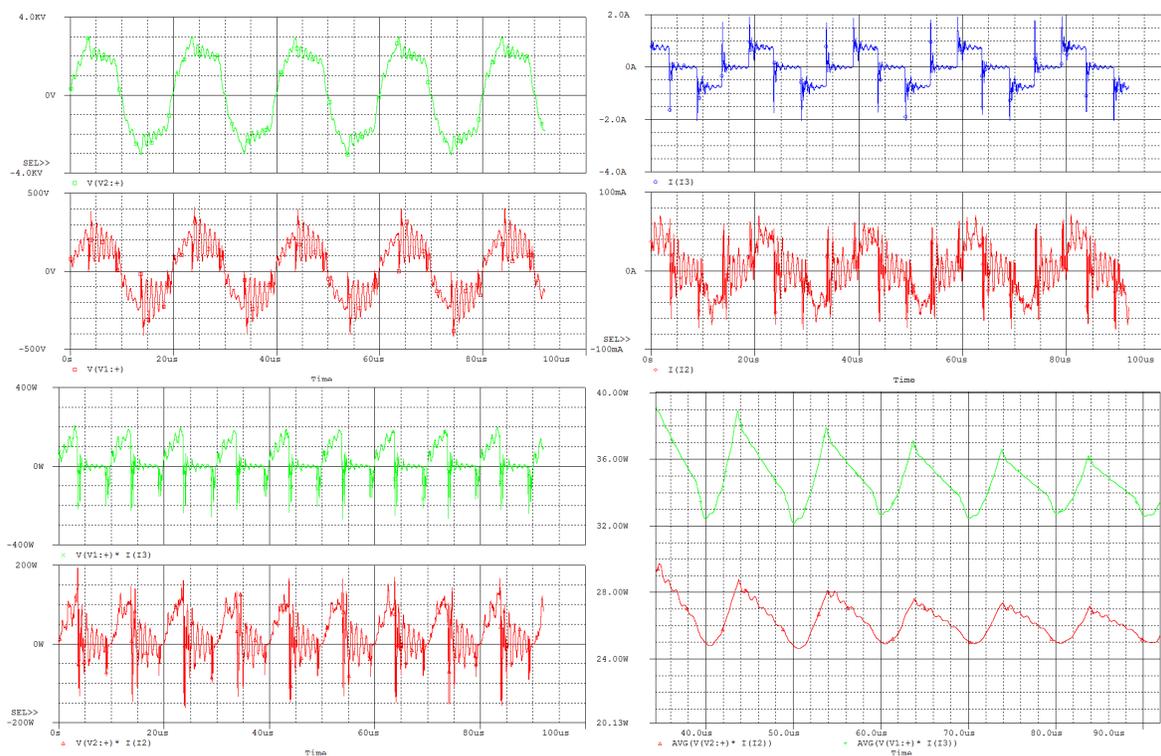


Ilustración 62: Gráficas para hallar la eficiencia en el transformador U93

Para hallar la potencia en el bobinado primario del transformador y la potencia en el bobinado secundario del transformador, tomamos los datos de las señales de voltaje y corriente sobre el bobinado primario y voltaje y corriente sobre el bobinado secundario, como lo mostramos en las siguientes ilustraciones.

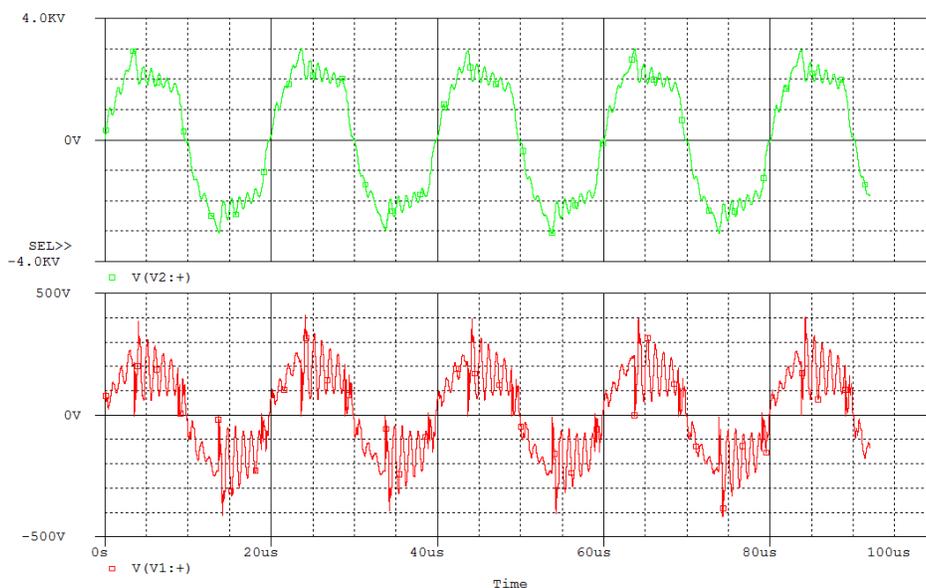


Ilustración 63: Voltaje sobre el primario y secundario del transformador U93

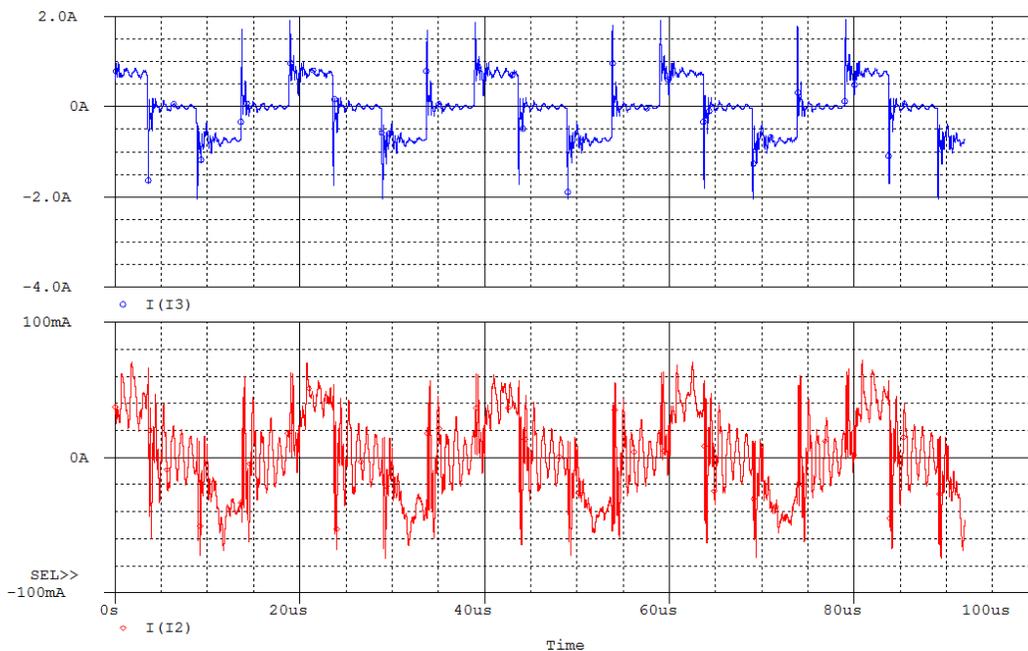


Ilustración 64: Corriente sobre el primario y secundario del transformador U93

Después de obtener los datos de las señales de voltaje y corriente sobre el bobinado primario y secundario, podemos hallar la potencia instantánea en cada punto del intervalo, para mayor facilidad de visualización para el usuario, podemos graficar las señales de potencia sobre el bobinado primario y secundario.

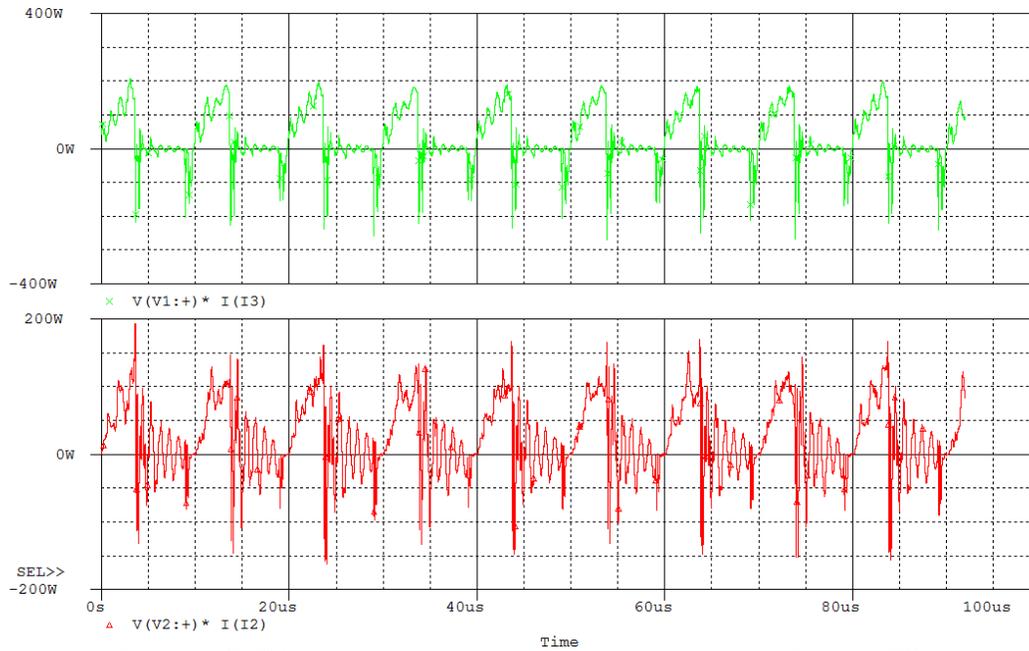


Ilustración 65: Potencia sobre el bobinado primario y secundario del transformador U93.

Posteriormente a que obtengamos nuestros datos de potencia instantánea, podemos hallar el promedio de dicha señal, obteniendo así la potencia real sobre el bobinado primario y secundario, si hacemos la relación de potencia real del bobinado secundario sobre potencia real sobre el bobinado del primario obtendremos la eficiencia del transformador; además de esto podemos graficar la señal de potencia sobre el bobinado primario y secundario.

$$P_{out} = 25,03 \text{ W}$$

$$P_{in} = 32,76 \text{ W}$$

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{25,03 \text{ W}}{32,76 \text{ W}} = 76,39\%$$

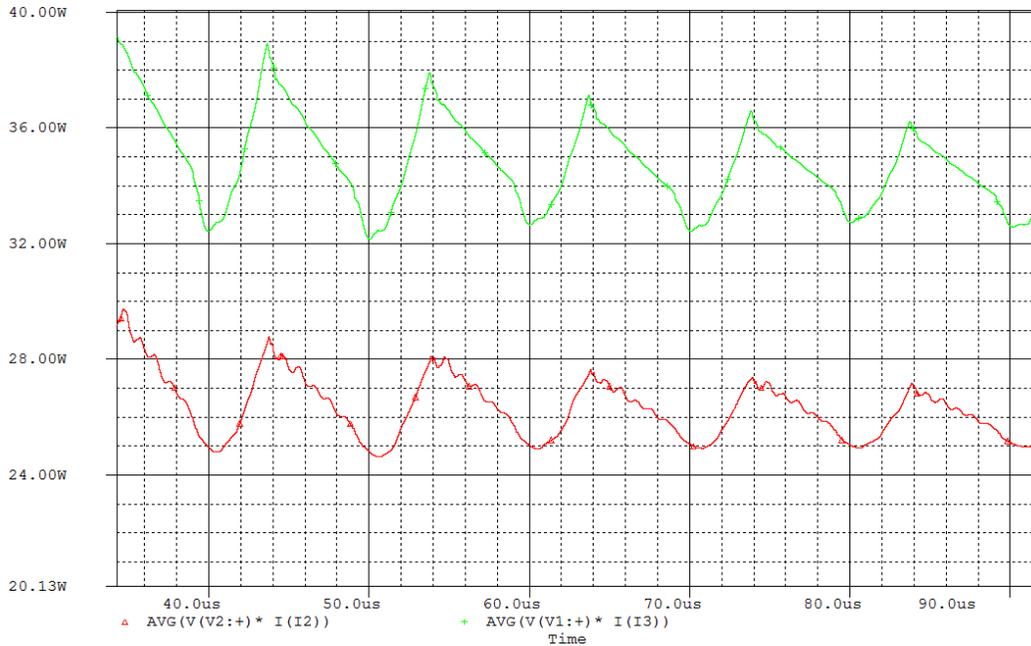


Ilustración 66: Potencia promedio sobre el bobinado primario y secundario del transformador U93.

La eficiencia del transformador U93 fue de un 76%.

5.8.2 Eficiencia de núcleo E

Para hallar la eficiencia en el transformador, hallaremos la potencia promedio en bobinado primario y en bobinado secundario y a continuación hallaremos la eficiencia.

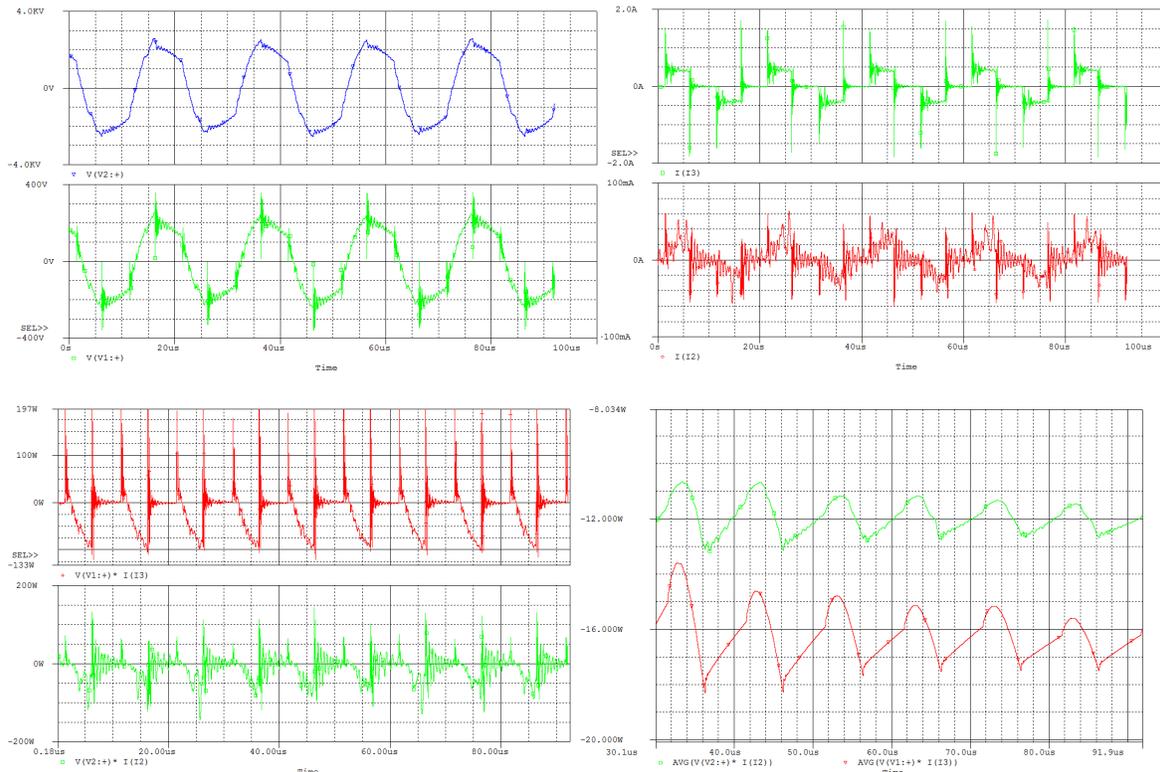


Ilustración 67: Gráficas para hallar la eficiencia en el transformador E80

Para hallar la potencia en el bobinado primario del transformador y la potencia en el bobinado secundario del transformador, tomamos los datos obtenidos en el laboratorio, de las señales de voltaje y corriente sobre el bobinado primario y de las señales de voltaje y corriente sobre el bobinado secundario, como lo mostramos en las siguientes ilustraciones.

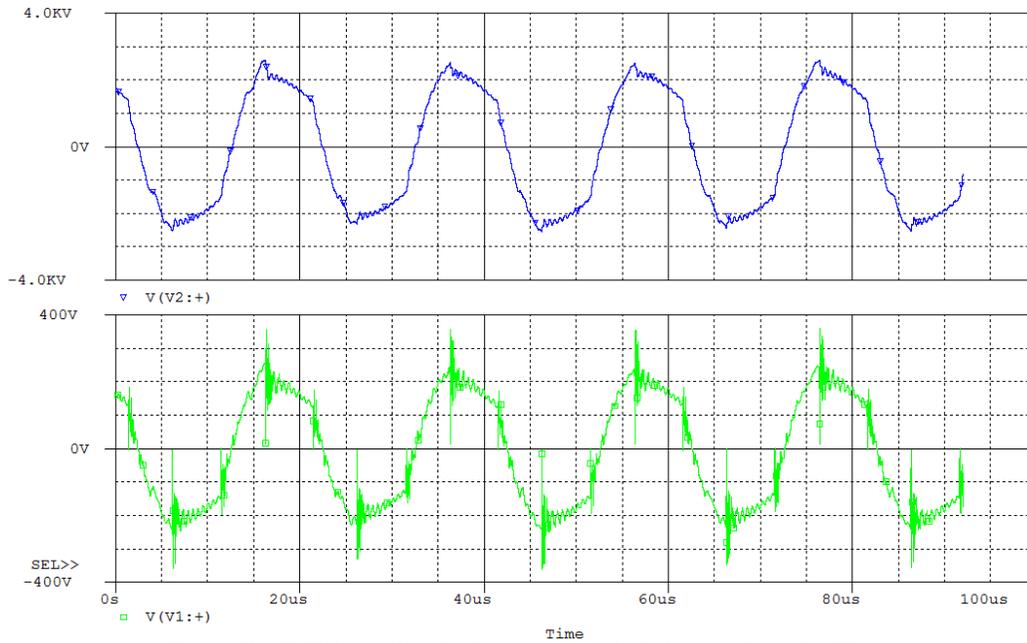


Ilustración 68: Voltaje sobre el primario y secundario del transformador E80



Ilustración 69: Corriente sobre el primario y secundario del transformador E80

Después de obtener los datos de las señales de voltaje y corriente sobre el bobinado primario y secundario, podemos hallar la potencia instantánea en cada punto del intervalo, para mayor

facilidad de visualización para el usuario, podemos graficar las señales de potencia sobre el bobinado primario y secundario.

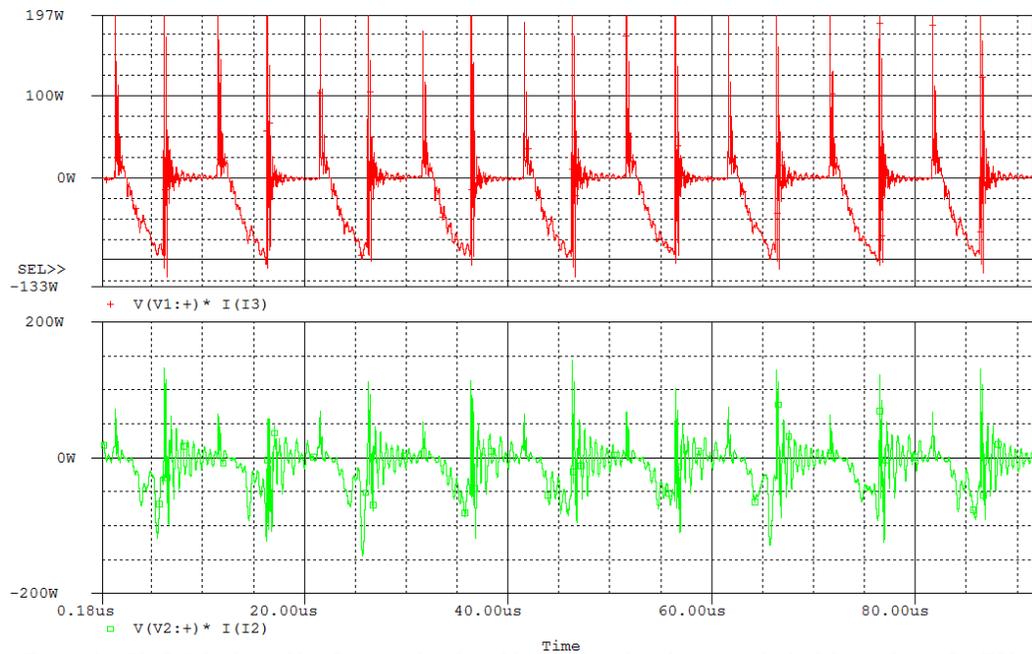


Ilustración 70: Señales invertidas de potencia sobre el bobinado primario y secundario del transformador E80.

Posteriormente a que obtengamos nuestros datos de potencia instantánea, podemos hallar el promedio de dicha señal, obteniendo así la potencia real sobre el bobinado primario y secundario, si hacemos la relación de potencia real del bobinado secundario sobre potencia real sobre el bobinado del primario obtendremos la eficiencia del transformador; además de esto podemos graficar la señal de potencia promedio sobre el bobinado primario y secundario.

$$P_{in} = 16,55 W$$

$$P_{out} = 12,12 W$$

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{12,12 W}{16,55 W} = 73,25\%$$

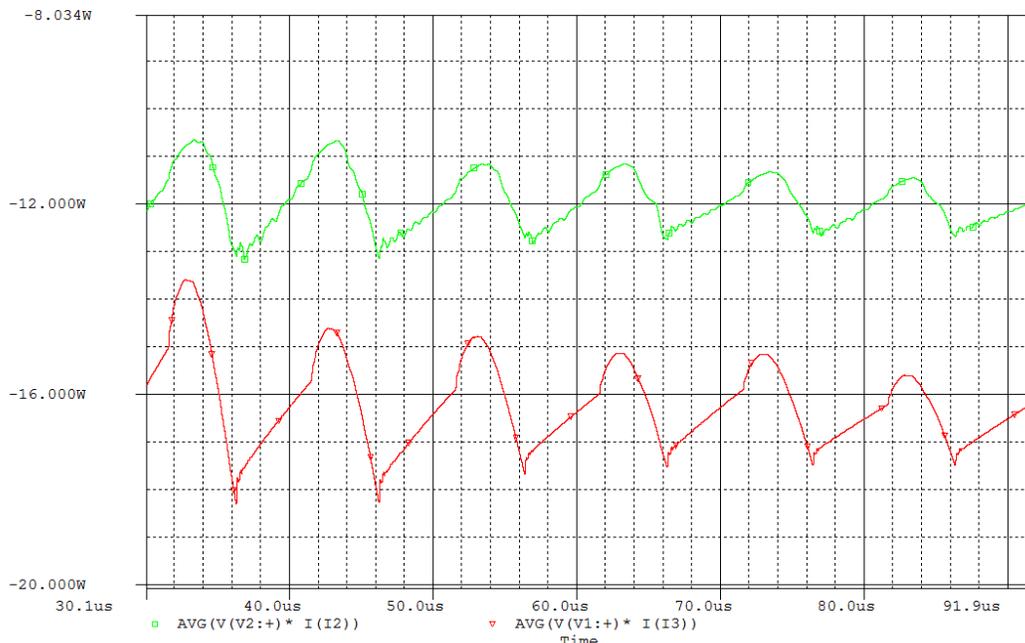


Ilustración 71: Potencia promedio sobre el bobinado primario y secundario del transformador E80.

La eficiencia del transformador E80 fue de un 73%.

5.9 Comparación de los transformadores con cálculos teóricos y simulaciones

Para realizar una comparación de los diferentes resultados de los elementos parásitos del transformador, vamos a utilizar el modelo del transformador; en este vamos a colocar los resultados de nuestros elementos parásitos obtenidos mediante, cálculos teóricos, simulación por métodos finitos y finalmente medición en el laboratorio (mediante un puente de impedancias a una frecuencia de 100 kHz). A continuación simularemos utilizando como corriente en el primario, la señal experimental obtenida en el laboratorio y con nuestro modelo del transformador observaremos el voltaje sobre el bobinado secundario y la corriente sobre el bobinado secundario; observaremos las diferencias entre las gráficas.

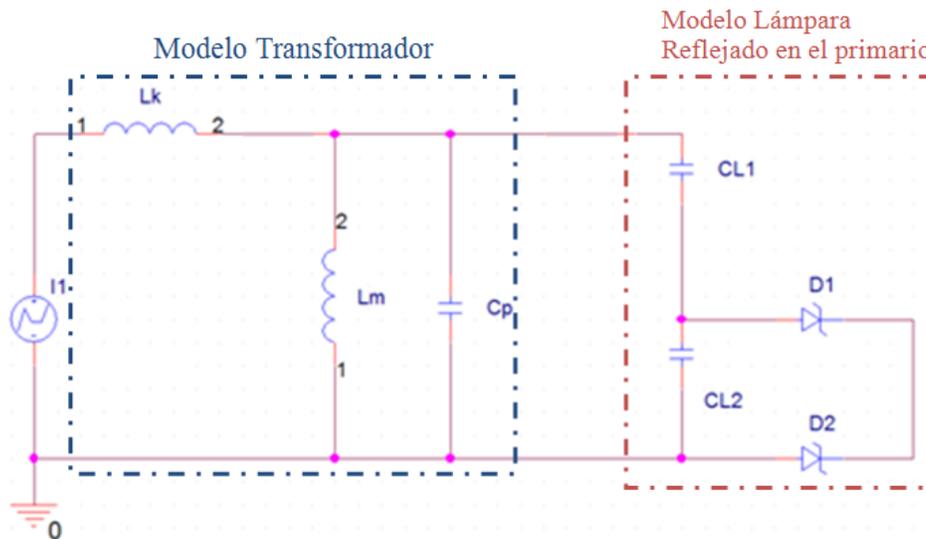


Ilustración 72: Modelo de simulación del transformador y la lámpara de DBD.

La señal de corriente mostrada en la ilustración 71 será introducida en el modelo del transformador, para obtener los resultados de los diferentes modelos.

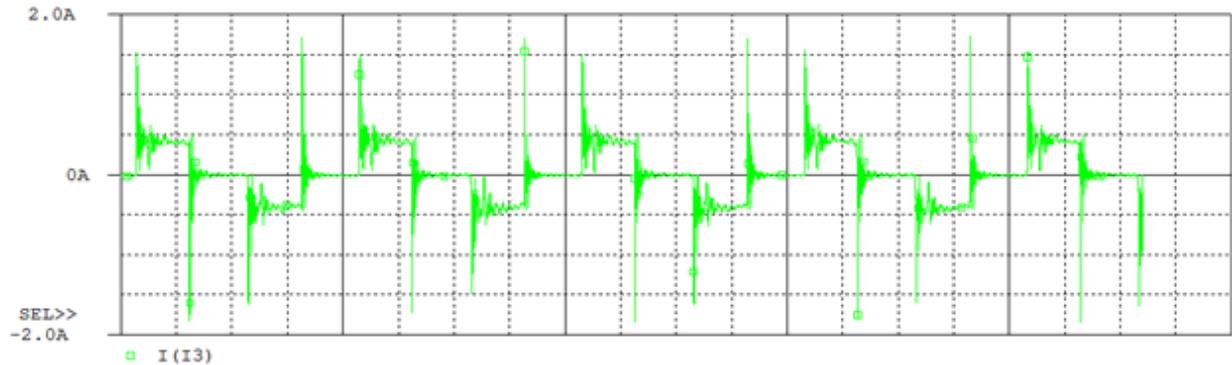


Ilustración 73: Corriente sobre el primario.

Las señales verdes son las obtenidas en el laboratorio, las señales rojas son obtenidas mediante las mediciones con el puente de impedancias, las señales moradas son las obtenidas mediante cálculos teóricos y finalmente las señales azules son las obtenidas por métodos finitos.

Señales de corriente en el secundario del U93:

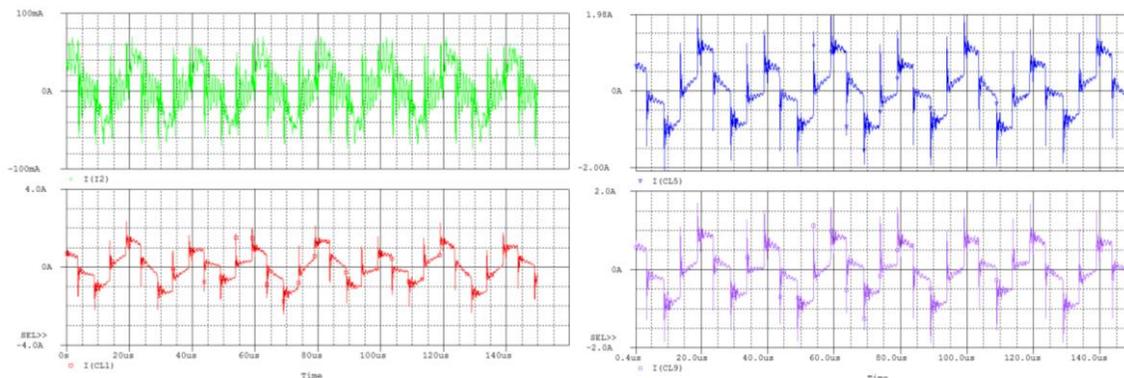


Ilustración 74: Corriente de los cuatro modelos en el secundario del núcleo U93.

En estas graficas de corriente donde la verde es la señal de corriente en el secundario obtenida en el laboratorio y las otras tres son las señales de corriente utilizando nuestro modelo y hallando sus parámetros, mediante la medición en un puente de impedancias (100 kHz), teóricamente y finalmente por métodos finitos. De estas gráficas podemos ver, que nuestro modelo se asemeja al comportamiento de nuestro transformador y nos permite ver la influencia que tiene el valor de la inductancia de magnetización y la capacitancia parásita en el transformador; ya que las pendientes que se observan en las señales es debido a un bajo valor de la inductancia de magnetización, y si aumentáramos nuestra capacitancia parásita, el valor de nuestra corriente empezaría a bajar y por tanto no encendería la lámpara de DBD.

Señales de voltaje en el secundario del U93:

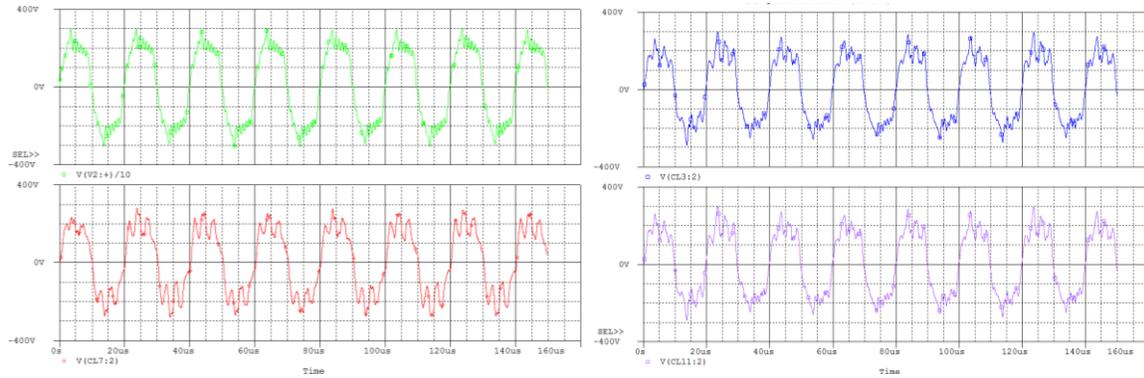


Ilustración 75: Voltaje de los cuatro modelos en el secundario del núcleo U93.

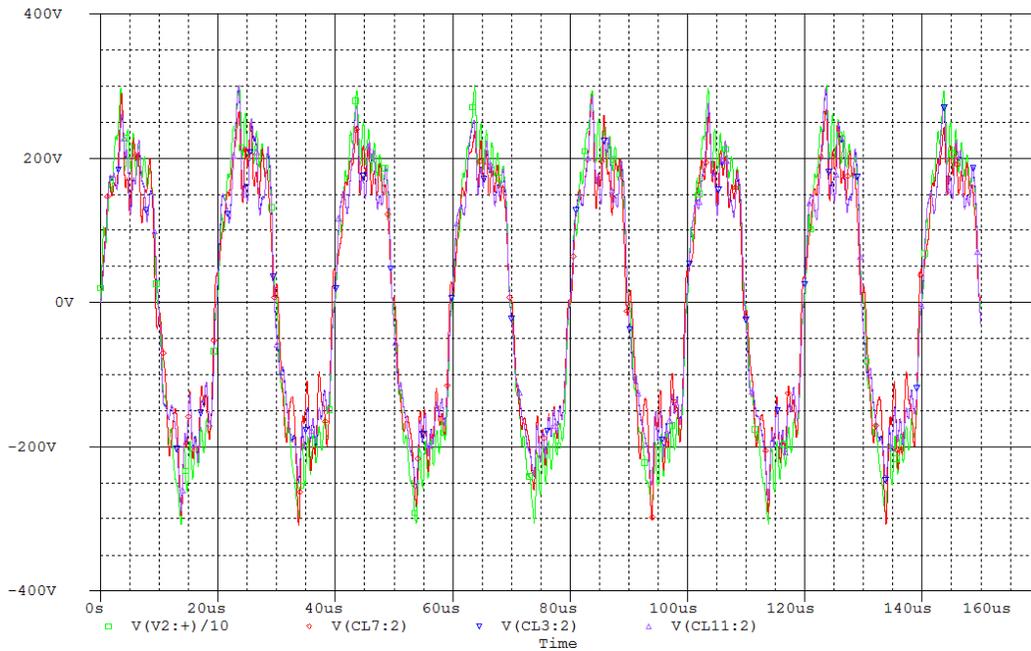


Ilustración 76: Comparación de las señales de voltaje de los modelos contra la señal obtenida en el laboratorio en el núcleo U93.

Nuestro modelo y los valores hallados por los diferentes métodos antes mencionados, tiene un buen comportamiento en voltaje ya que se puede observar que el comportamiento de nuestras señales es muy parecido a la señal obtenida en el laboratorio; con las simulaciones en voltaje podemos ver la influencia que tiene la inductancia de fuga en nuestro modelo, ya que si el valor de esta aumenta, las oscilaciones en nuestras señales de voltaje aumentan.

Señales de corriente en el secundario del E80:

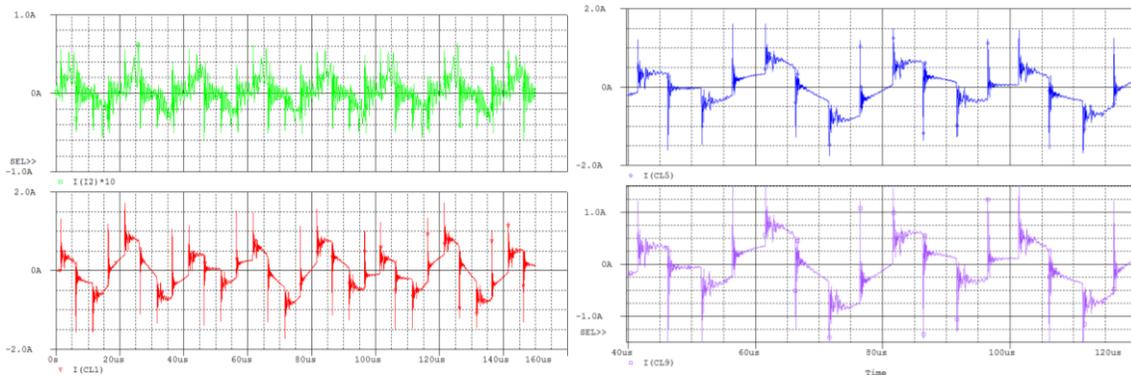


Ilustración 77: Corriente de los cuatro modelos en el secundario del núcleo E80.

En la ilustración 75 se puede ver mejor el efecto antes mencionado, debido a que el transformador con el núcleo E80 posee una inductancia de magnetización menor al transformador con el núcleo U93, por lo tanto en la ilustración 75 se ve que las señales de corriente tienen mayor pendiente que las señales de corriente de la ilustración 72. De esto se puede ver que el transformador con el núcleo U93 tiene una mayor eficiencia que el transformador con el núcleo E80, debido a que este presenta una menor distorsión en la señal de corriente como se ve en las ilustraciones 75 y 72.

Señales de voltaje en el secundario del E80:

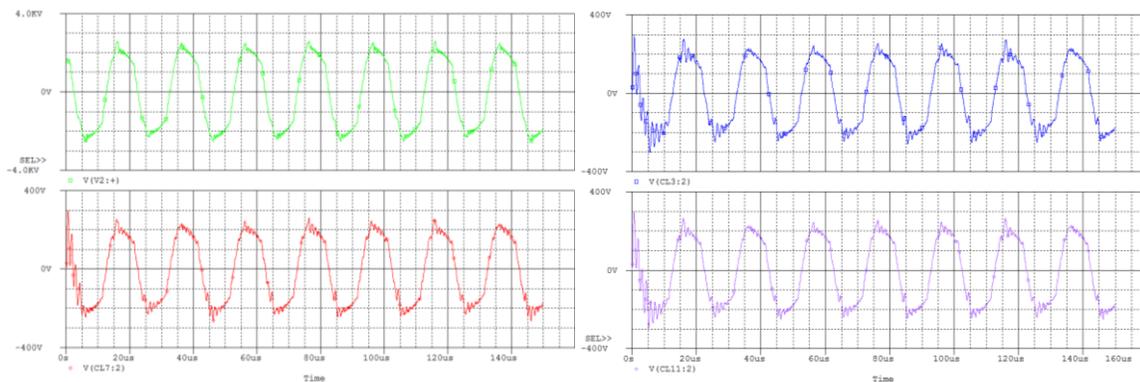


Ilustración 78: Voltaje de los cuatro modelos en el secundario del núcleo U93.

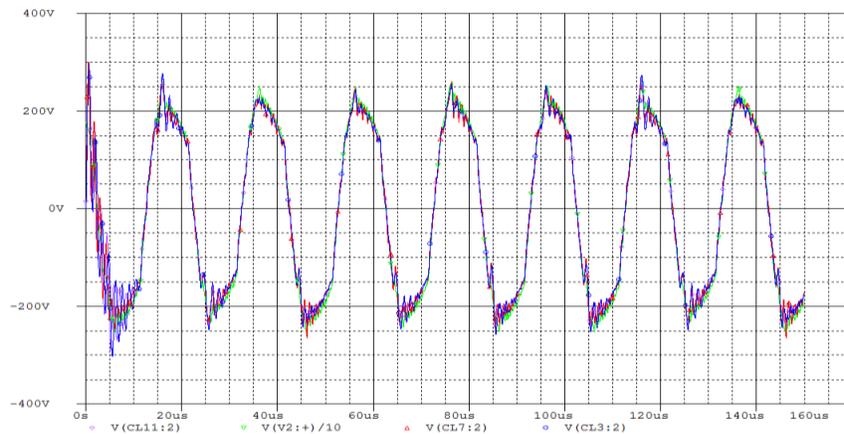


Ilustración 79: Comparación de las señales de voltaje de los modelos contra la señal obtenida en el laboratorio en el núcleo E80.

Acá podemos confirmar que nuestro modelo en voltaje funciona bien para ambos transformadores, ya que nuestras señales obtenidas son muy parecidas a las reales.

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Algunos componentes parásitos presentes en un transformador pueden ser muy difíciles de hallar, además no hay una base teórica lo suficientemente robusta para garantizar un valor exacto de estos, por lo cual se necesita recurrir a otros métodos, como simplificaciones del modelo según las aplicaciones o simulación por métodos finitos.

Se implementó un primer modelo para la simulación del transformador en el sistema de alimentación de la lámpara de DBD; este modelo tuvo que simplificarse aún más, debido a los resultados obtenidos, ya que estos distan mucho del comportamiento real del transformador, estas diferencias en los resultados de nuestro primer modelo, se pueden atribuir a que no se contaba con la herramienta suficiente para hacer las pruebas del transformador en un ambiente parecido a su ambiente de funcionamiento, se deja propuesto para un trabajo futuro, en el que se disponga de las herramientas necesarias, la validación de este modelo ya que es más completo que el modelo utilizado y nos permitirá ver efectos de otros componentes parásitos importantes, no tenidos en cuenta en este estudio.

Los componentes parásitos más importantes en esta aplicación de la lámpara de descarga de DBD, son la capacitancia parásita y la inductancia de magnetización, se pudo ver que estos componentes están directamente relacionados; por lo cual si incrementábamos la inductancia de magnetización aumentaba la capacitancia parásita, fue necesario encontrar un equilibrio entre estos, en uno de los diferentes modelos que permitiera tener una inductancia de magnetización alta y una capacitancia parásita baja.

A pesar de que algunos componentes parásitos son difíciles de hallar, como la capacitancia parásita y la inductancia de fuga, se pudo calcular dichos parámetros para nuestro modelo adoptado y los resultados de estos fueron buenos ya que el comportamiento de dicho modelo se acercó al comportamiento del transformador.

Los fenómenos electromagnéticos presentes en el transformador, pueden estudiarse de forma precisa mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell, que hoy día continúan siendo una poderosa herramienta de análisis y estudio. El Método de Elementos Finitos representa un Método Numérico de versátil aplicación en la resolución de las mencionadas ecuaciones en estructuras complejas tales como el transformador.

Actualmente, se conocen de exitosas aplicaciones del Método de Elementos Finitos al estudio de motores de inducción y maquinas eléctricas en general, realizadas desde hace 15 años aproximadamente. Estas aplicaciones van desde el diseño, diagnóstico de parámetros y evaluación del comportamiento de la maquina, apoyados en otras herramientas y áreas del conocimiento. En Colombia las aplicaciones son mucho más recientes y limitadas, sin embargo en muchas industrias se realizan diseños electromagnéticos, por lo cual es posible que su uso se expanda en un futuro no muy lejano.

La Simulación del Modelo Electromagnético del transformador debe fingir y presentar el transformador como si fuese absolutamente real. La simulación implica la resolución mediante el método de elementos finitos, de las ecuaciones que expresan el comportamiento del sistema en un

cierto dominio, lo cual representa un problema de dificultad en estructuras complejas. Por esta razón se acude a la versatilidad y relativa facilidad que ofrecen las herramientas computacionales de simulación electromagnética, con la cual se pueden resolver estructuras como la del transformador llegando a necesitar una malla de análisis de 64 000 elementos y demorándose 23 horas. Este tipo de herramienta nos permitió en el proceso darle validez a datos teóricos hallados previamente.

La estrategia de la utilización de software de método de elementos finitos permitirá a la universidad abordar otros temas con esta poderosa base lo cual servirá para el futuro análisis de problemas complejos no solo electromagnéticos sino eléctricos en general, de temperatura, y muchas otras aplicaciones.

Se implementaron durante el proceso más de seis diferentes configuraciones de transformadores, con diferentes topologías, dimensiones, materiales, cada una de estas nos permitió avanzar en la búsqueda de la configuración con mayor eficiencia y a su vez nos permitió darnos cuenta del efecto y la importancia de los componentes parásitos del transformador en el sistema, analizando los resultados de las problemáticas envueltas en cada configuración.

Se realizaron pruebas de eficiencias de las dos configuraciones, que permitieron encender la lámpara de DBD, lo que brinda otra herramienta más de decisión en el momento de escoger el transformador más indicado para el sistema, teniendo en cuenta, otros parámetros como tamaño, peso, precio, etc.

6.2 Recomendaciones

Si se quisiera mejorar aún más la inductancia de magnetización sin empeorar la capacitancia parásita, habría que pensar en una topología del núcleo que permita enrollar más vueltas en una sola capa sin cambiar el calibre del cable, o un área efectiva más grande, esta puede ser un núcleo en U más largo que el utilizado, también es importante tener en cuenta que al escoger un núcleo más grande, se emporaran parámetros del sistema tales como espacio, peso, precio, tamaño.

Enseñar el uso de esta herramienta de análisis en los estudiantes para promover el uso de esta en los profesionales del futuro, pues permiten estudiar y comprender las maquinas eléctricas con un enfoque detallado.

7 Bibliografía

"UV". 2011. Esterilizador de agua por rayos UV. [En línea] 2011. [Citado el: 15 de Febrero de 2011.] <http://www.ciberteca.net/equipos-para-purificadoras-y-embotelladoras-de-agua-purificada-y-mineral/lampara-de-Luz-Ultravioleta/lampara-de-Luz-Ultravioleta.htm>.

Ansoft. *Maxwell 3D v11 Userguide*.

Chapma, Stephen J. 1987. *Maquinas Electricas*. s.l. : McGraw-Hill, 1987.

Djibrillah, Mahamat. 2011. *Éléments de conception d'un générateur électrique pour l'alimentation d'un dispositif à décharge à barrière diélectrique*. Institut national polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse : 2011.

Flanagan, William M. 1992. *Handbook of Transformer Desing & Applications*. s.l. : McGraw-Hill, 1992.

Flòrez, David, y otros. 2010. Programmable Current Converter Synthesis for the Evaluation of UV Radiation of Excimer Lamps. 2010.

Massarini, Antonio y Kazimierczuk, Marian K. 1997. Self-Capacitance of Inductors. s.l. : IEEE, 1997.

Meeker, David. Continuum Representation of Wound Coils via an Equivalent Foil Approach.

Philips. Soft Ferrites and Accessories.

Ras, Enrique. 1991. *Transfomadores de potencia, de mediad y de proteccion.* Barcelona : Alfaomega, 1991. 968-6223-45-2.

Scoggins, Patrick. 2007. A Guide to Designing Gate-Drive Transformers. 2007.

Van den Bossche, Alex y Cekov Valchev, Vencislav. 2005. Inductors and Transformers for power electronics. New York : Taylor & Francis, 2005.

8 Anexos

Tabla AWG

A.W.G.	DIAMETER	AREA	WEIGHT		LENGTH		RESISTANCE	
	B. & S. Mm.		Sq. Mm.	Kg. per M.	Kg. per Ohm	M. per Kg.	M. per Ohm	Ohms per Kg.
0000	11.7	107.2	.953	5940	1.05	6,230	.000168	.000161
000	10.4	85.0	.756	3730	1.32	4,940	.000268	.000202
00	9.27	67.4	.599	2350	1.67	3,920	.000426	.000255
0	8.25	53.5	.475	1480	2.10	3,110	.000677	.000322
1	7.35	42.4	.377	929	2.65	2,460	.00108	.000406
2	6.54	33.6	.299	584	3.35	1,950	.00171	.000512
3	5.83	26.7	.237	367	4.22	1,550	.00272	.000645
4	5.19	21.2	.188	231	5.32	1,230	.00433	.000814
5	4.62	16.8	.149	145	6.71	975	.00688	.00103
6	4.11	13.3	.118	91.4	8.46	773	.0109	.00129
7	3.67	10.6	.0938	57.5	10.7	613	.0174	.00163
8	3.26	8.37	.0744	36.2	13.5	486	.0277	.00206
9	2.91	6.63	.0590	22.7	17.0	386	.0440	.00259
10	2.59	5.26	.0468	14.3	21.4	306	.0699	.00327
11	2.31	4.17	.0371	8.99	27.0	242	.111	.00413
12	2.05	3.31	.0294	5.66	34.0	192	.177	.00520
13	1.83	2.62	.0234	3.56	42.9	153	.281	.00656
14	1.63	2.08	.0185	2.24	54.1	121	.447	.00827
15	1.45	1.65	.0147	1.41	68.2	95.9	.711	.0104
16	1.29	1.31	.0116	.885	86.0	76.0	1.13	.0132
17	1.15	1.04	.00922	.556	108	60.3	1.80	.0166
18	1.02	.823	.00732	.350	136	47.8	2.86	.0209
19	.912	.653	.00580	.220	172	37.9	4.54	.0264
20	.812	.518	.00460	.138	217	30.1	7.23	.0333
21	.723	.410	.00365	.0871	274	23.9	11.5	.0419
22	.644	.326	.00289	.0548	346	18.9	18.3	.0529
23	.573	.258	.00229	.0344	436	15.0	29.1	.0667
24	.511	.205	.00182	.0217	550	11.9	46.2	.0841
25	.455	.162	.00144	.0136	693	9.43	73.4	.106
26	.405	.129	.00114	.00856	874	7.48	117	.134
27	.361	.102	.000908	.00538	1,100	5.93	186	.169
28	.321	.081	.000720	.00339	1,390	4.70	295	.213
29	.286	.0642	.000571	.00213	1,750	3.73	470	.268
30	.255	.0510	.000453	.00134	2,210	2.96	747	.338
31	.227	.0404	.000359	.000842	2,790	2.35	1,190	.426
32	.202	.0320	.000285	.000530	3,510	1.86	1,890	.537
33	.180	.0254	.000226	.000333	4,430	1.48	3,000	.678
34	.160	.0201	.000179	.000210	5,590	1.17	4,770	.855
35	.143	.0160	.000142	.000132	7,040	.928	7,590	1.08
36	.127	.0127	.000113	.0000829	8,880	.736	12,100	1.36
37	.113	.0101	.0000893	.0000521	11,200	.584	19,200	1.71
38	.101	.00797	.0000708	.0000327	14,100	.463	30,600	2.16
39	.0897	.00632	.0000562	.0000206	17,800	.367	48,500	2.73
40	.0799	.00501	.0000445	.0000130	22,500	.291	77,100	3.44

Anexos:

- Archivos y videos sobre la simulación por métodos finitos.
- Fotos de los transformadores implementados.
- Archivos de todos los transformadores de los datos obtenidos en las pruebas de la laboratorio y con los cuales se realizaron procesos en el trabajo.
- Archivos de las simulaciones en OrCAD.