

# Acondicionador ferroresonante de voltaje

## *Ferroresonant voltage conditioner*

a. Luis David Pabón-Fernández, b. Oscar J. Suárez, c. Frayn Steevens Monsalve-Pabón, d. Edison Andrés Caicedo-Peñaranda

-  a. Magíster en Controles Industriales, davidpabon@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
-  b. Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, oscar.suarez@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
-  c. Ingeniero Eléctrico, frayn.monsalve@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.
-  d. Magíster en Controles Industriales, edison.caicedo@unipamplona.edu.co, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Recibido: Julio 1 de 2021 Aceptado: Noviembre 8 de 2021

**Forma de citar:** L.D Pabón-Fernández, O.J. Suárez, F.S Monsalve-Pabón, E.A Caicedo-Peñaranda, “Acondicionador ferroresonante de voltaje”, *Mundo Fesc*, vol. 12, no. s1, pp. 158-176, 2022

## Resumen

El suministro de la energía eléctrica es uno de los servicios más importantes que respaldan la vida cotidiana en la sociedad moderna, por lo que la importancia de la calidad de la energía es encontrar formas efectivas de prevenir perturbaciones y fluctuaciones de voltaje para el usuario y proponer soluciones para las fallas que se presentan del en sistema de la compañía operadora de la red eléctrica, logrando con ello un suministro de la energía eléctrica con calidad. Este artículo presenta el diseño e implementación de un acondicionador de calidad de la energía basado en ferroresonancia, se realiza el análisis de circuito eléctrico equivalente y de circuito magnético equivalente, obteniendo las ecuaciones necesarias para la implementación del mismo. En la última parte se valida el funcionamiento del transformador mediante pruebas de variación de voltaje de entrada en vacío y con carga, evidenciando el buen funcionamiento ante variaciones por encima del valor nominal.

**Palabras clave:** Ferro resonancia, calidad de la energía, acondicionador de potencia, implementación.

---

Autor para correspondencia:

\*Correo electrónico: oscar.suarez@unipamplona.edu.co



## Abstract

Electric power supply is one of the most important services supporting daily life in modern society, so the importance of power quality is to find effective ways to prevent disturbances and voltage fluctuations from the user side and propose solutions to correct the failures that occur on the side of the system of the electric power supply company, thereby achieving a quality electric power supply. This article presents the design and implementation of a power quality conditioner based on ferroresonance, the analysis of equivalent electrical circuit and equivalent magnetic circuit is carried out, obtaining the necessary equations for its implementation. In the last part, the operation of the transformer is validated by testing the input voltage variation with no load and with load, evidencing the proper functioning in case of variations above the nominal value.

**Keywords:** Ferroresonance, power quality, voltage conditioner, prototype.

## Introducción

La ferroresonancia es un fenómeno determinado por elevaciones de voltaje y distorsión de la forma de onda, generada por la energización de inductancias saturables en serie con un capacitor físico o parásito [1]. Es una clase de resonancia no regular intrínsecamente asociada a las características no lineales de inductancias con núcleo de material ferromagnético [2]. En la mayoría de los casos es un fenómeno indeseable para las redes eléctricas de energía, pero que puede ser usado para acondicionar potencia [3] como en el caso de los transformadores de voltaje constante (CVT), con el fin de mejorar la calidad del suministro [4].

En los últimos años las cargas no lineales, las conmutaciones y la operación de cambio de carga han aumentado el deterioro en el nivel de calidad de la energía eléctrica en los sistemas eléctricos, gran proporción de los equipos electrónicos son sensibles a pequeñas variaciones en las variables de operación. Por lo tanto, es necesario mantener la buena funcionalidad en estos equipos además de la confiabilidad en el sistema eléctrico de potencia aplicando técnicas de acondicionamiento de potencia y de voltaje [5]-[9].

El CVT es un dispositivo dentro de los acondicionadores de potencia y utiliza el fenómeno de ferroresonancia para mejorar la calidad de la potencia eléctrica [4],[10]. Un modelo de este dispositivo se observa en la figura 1. El principio de funcionamiento de este transformador aprovecha la saturación magnética como propiedad reguladora, manteniendo el voltaje del de salida estable gracias al flujo saturado

en este devanado. De este modo, la tensión de salida permanecerá invariante sin importar los cambios en el suministro de entrada. Para evitar que la corriente de entrada sea excesiva por la saturación, el devanado primario debe operar insaturado, esto se consigue implementando una derivación magnética junto con la integración de un condensador en el devanado secundario [12].

Las aplicaciones de estos dispositivos ferroresonantes se dan principalmente en donde la confiabilidad y la necesidad de regulación frente a las variaciones de tensión en la línea son fundamentales [12].

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un transformador ferroresonante como acondicionador de potencia, aplicando los principios y desarrollo precedentes [13] [14]; inicialmente, se analiza el circuito eléctrico equivalente y circuito magnético equivalente, derivando en ecuaciones de diseño para una posterior implementación y validación del prototipo por medio de pruebas ante variaciones de voltaje de entrada en vacío y con carga.

## *Transformador Ferroresonante*

Los transformadores de voltaje constante basados en ferroresonancia se aplican como reguladores en suministros eléctricos para regular la tensión en corriente alterna y limitar la corriente, evitando los problemas de calidad de la potencia debidos a la variación de la tensión del suministro. El esquema general del transformador ferroresonante se muestra en la figura 1.

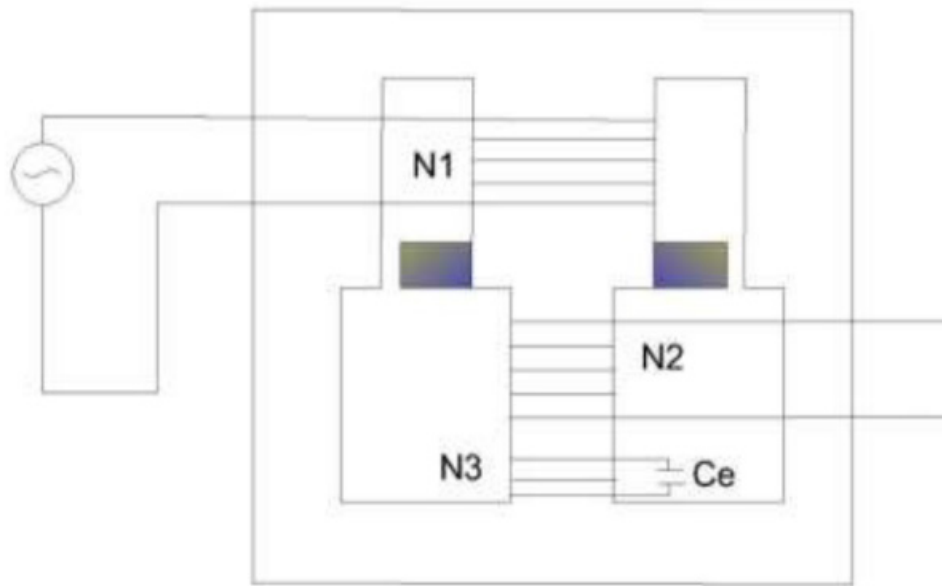


Figura 1. Modelo Transformador Ferroresonante.

En la figura 1 se observa la constitución física del transformador el cual cuenta con un devanado primario, un devanado secundario y un devanado terciario; el devanado secundario es el de salida y el devanado terciario alimenta el condensador que genera la ferroresonancia. De igual forma, en esta figura en color gris se resalta la derivación magnética la cual separa los devanados secundario y terciario del devanado primario[11]. El circuito eléctrico equivalente del dispositivo se presenta en la figura 2.

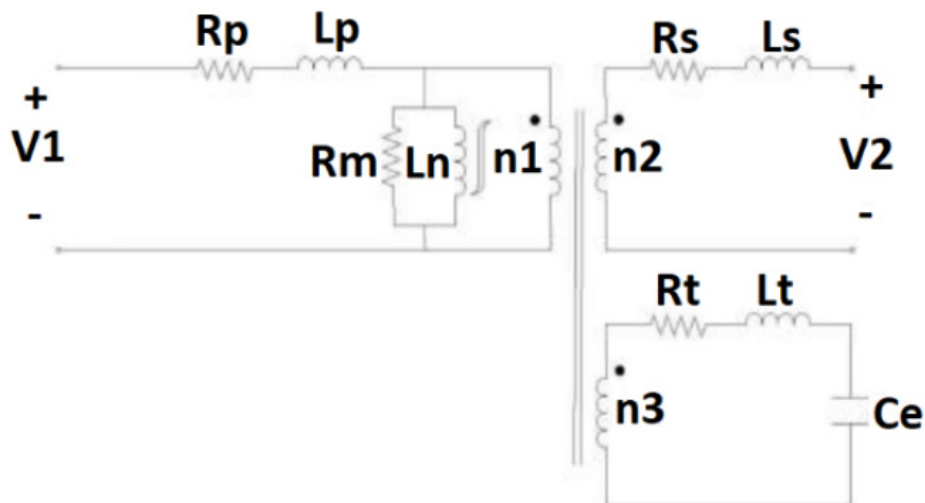


Figura 2. Circuito equivalente transformador ferroresonante.

## Modelado Matemático

### A. Análisis del circuito eléctrico equivalente

En la figura 2 se aprecia los elementos constitutivos del circuito eléctrico de estado estacionario, dentro de ellos se presentan las resistencias que modelan las pérdidas en el cobre de los diferentes devanados, de igual forma se muestran las inductancias que modelan los flujos dispersos y autoinductancias para cada una de las Bobinas. Además, se muestran la inductancia magnetizante ( $L_n$ ), la resistencia de pérdidas en el núcleo ( $R_m$ ), y el condensador de resonancia ( $C_o$ ). Si se simplifica el circuito equivalente realizando la referenciación del devanado terciario al primario se obtiene el circuito presentado en la figura 3. Partiendo del circuito mostrado en la figura 3 y teniendo en cuenta las impedancias equivalentes en la referenciación realizada se iguala el circuito terciario en serie a su equivalente en paralelo, como se presenta en la ecuación (1).

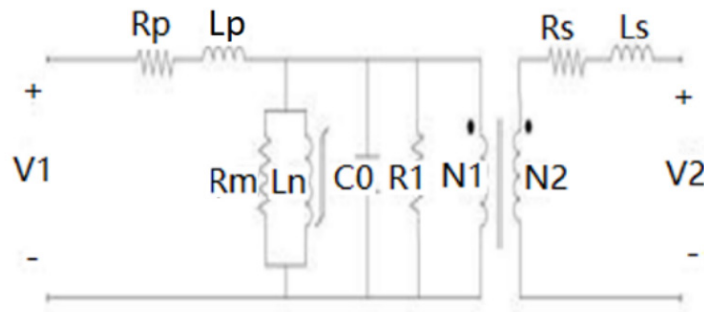


Figura 3. Circuito equivalente eléctrico referido al primario.

$$R_t + (X_{Lt} - X_{Ce}) * i = \frac{R_1 * X_{Co}^2}{R_1^2 + X_{Co}^2} + \frac{R_1^2 * X_{Co} * i}{R_1^2 + X_{Co}^2} \quad (1)$$

De acuerdo a esta igualación se establece que el condensador  $C_o$  y la resistencia  $R_1$  se calculan de acuerdo con las ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

$$C_o = \frac{(X_{Ce} - X_{Lt})}{2 * \pi * f_e * n_{13}^2 * [R_t^2 + (X_{Lt} - X_{Ce})^2]} \quad (2)$$

$$R_1' = \frac{n_{13}^2 * [R_t^2 + (X_{Lt} - X_{Ce})^2]}{R_t} \quad (3)$$

El condensador  $C_o$  y la resistencia  $R_1$  e determinan con base en la ecuación de resistencia en paralelo  $R_1$  separando la parte real de la ecuación (1). Se despeja  $R_1$  y se refiere del lado terciario al primario, de manera similar se realiza el cálculo para el condensador. Si se fija que la máxima ganancia de tensión se dé a la frecuencia de resonancia  $f_e$ , se establece la relación de la ecuación (4):

$$f_e = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_n * C_o}} \quad (4)$$

El condensador de resonancia  $C_e$  se puede calcular como se establece en la ecuación (5), esta relación se da debido a que si el paralelo entre la reactancia de  $C_o$  y la reactancia de  $X_{Ln}$  se anulan la impedancia tiende a infinito y se daría la condición de resonancia, resultando la siguiente ecuación.

$$C_e = \frac{n_{13}^2}{\pi * f_e * \left( X_{Ln} + 2 * n_{13}^2 * X_{Lt} + \sqrt{X_{Ln}^2 - 4 * n_{13}^4 * R_t^2} \right)} \quad (5)$$

Donde:

$$\begin{aligned} X_{Lt} &= 2 * \pi * f_e * L_t, \\ X_{Ln} &= 2 * \pi * f_e * L_n, \\ n_{13} &= n_1/n_3. \end{aligned}$$

### B. Análisis del circuito magnético

La estructura magnética del transformador se presenta en la figura 4, la letra A denota el ancho en las trayectorias del núcleo y Lg, la longitud media de cada segmento. En la figura 5 se muestra el circuito magnético equivalente de donde se desprende el circuito magnético equivalente de Thévenin que se muestra en la figura 6. El circuito magnético equivalente de Thévenin se obtiene más fácilmente si se analiza el circuito original como un circuito simétrico, tal como se presenta en la figura 7. En este circuito se emplean las leyes de Kirchoff a través de caídas de potencial magnético estableciendo las reluctancias del núcleo del equivalente Ecuación (6-9).

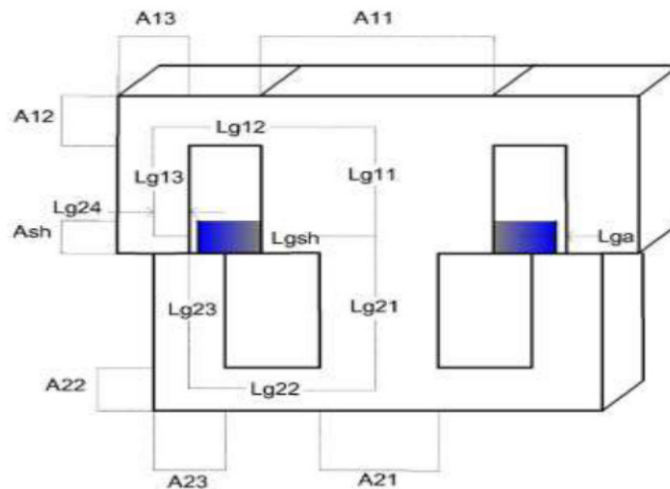


Figura. 4. Estructura de transformador ferroresonante

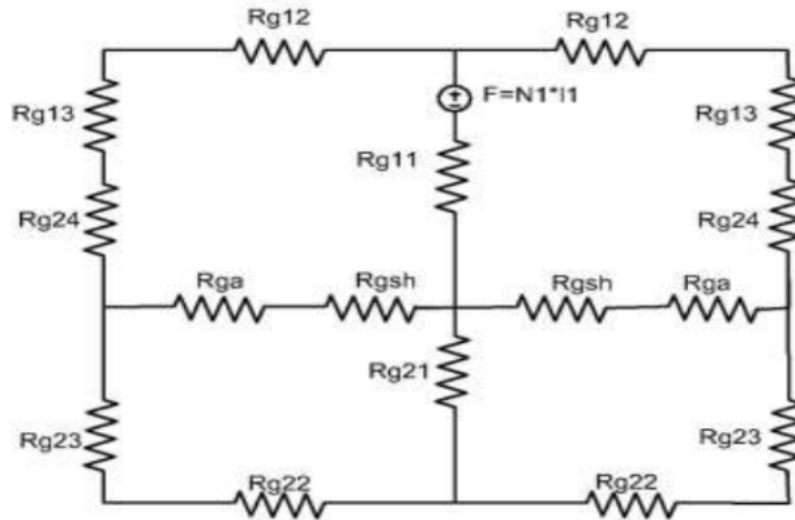


Figura 5. Circuito magnético equivalente transformador ferroresonante.

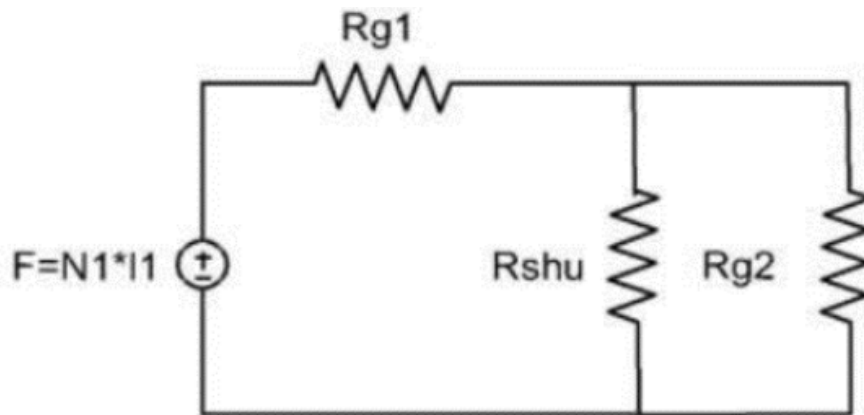


Figura 6. Circuito magnético equivalente de Thévenin transformador ferroresonante

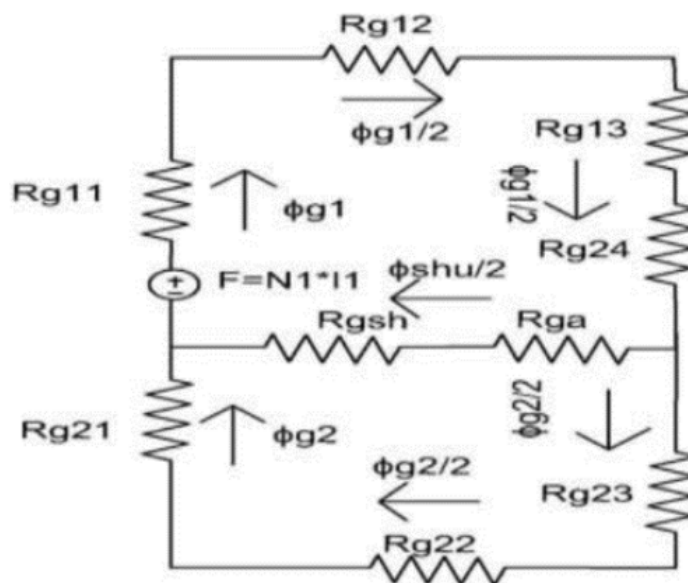


Figura 7. Circuito magnético equivalente simétrico del transformador ferroresonante

$$\mathbb{F} = \Phi_{g1} \left( R_{g11} + \frac{R_{g12} + R_{g13} + R_{g24}}{2} \right) + \Phi_{shu} \left( \frac{R_{gsh} + R_{ga}}{2} \right) \quad (6)$$

$$\mathbb{F} = \Phi_{g1} \left( R_{g11} + \frac{R_{g12} + R_{g13} + R_{g24}}{2} \right) + \Phi_{g2} \left( \frac{R_{g23} + R_{g22}}{2} + R_{g21} \right) \quad (7)$$

$$\Phi_{shu} \left( \frac{R_{gsh} + R_{ga}}{2} \right) = \Phi_{g2} \left( \frac{R_{g23} + R_{g22}}{2} + R_{g21} \right) \quad (8)$$

$$\Phi_{g1} = \Phi_{shu} + \Phi_{g2} \quad (9)$$

De acuerdo al planteamiento presentado de Thevenin, se pueden establecer las reluctancias magnéticas  $R_{g1}$ ,  $R_{shu}$  y  $R_{g2}$ , del circuito magnético equivalente como se muestra en la ecuación (10-12) [15].

$$R_{g1} = \frac{L_{g11}}{\mu^*(A_{11}^*t)} + \left[ \sum_{i=2}^3 \frac{L_{g1i}}{\mu^*(2^*A_{1i}^*t)} \right] + \frac{L_{g24}}{\mu^*(2^*A_{sh}^*t)} \quad (10)$$

$$R_{shu} = \frac{L_{gsh} - L_{ga}}{\mu^*(2^*A_{sh}^*t)} + \frac{L_{ga}}{\mu_o^*(2^*A_{sh}^*t)} \quad (11)$$

$$R_{g2} = \frac{L_{g21}}{\mu^*(A_{21}^*t)} + \left[ \sum_{i=2}^3 \frac{L_{g2i}}{\mu^*(2^*A_{2i}^*t)} \right] \quad (12)$$

Donde:

$i$  es el índice de la trayectoria magnética,

$L_{gx}$  es la longitud media de la trayectoria magnética  $x$ ,

$A_x$  es el ancho de la trayectoria magnética  $x$ ,

$A_{sh}$  es el ancho de la trayectoria shunt magnético,

$t$  es el grosor del núcleo,

$\mu$  es la permeabilidad del núcleo, y

$\mu_o$  es la permeabilidad del vacío.

Se fija la tensión nominal secundaria  $V_{2rod}$  (De acuerdo a la ley de Faraday [6]) y mediante relación de transformación  $V_{1rod}$ , se logra establece el punto “codo” ( $V_{1rod}$ ,  $V_{2rod}$ ) en donde se separa la región lineal de la región no lineal de la curva de magnetización, este punto se establece en la ecuación (13):

$$V_{2rod} = \frac{N_2 * 4.44 * B_{m\acute{a}x} * f * A_2}{10^4} \quad (13)$$

$$V_{1rod} = \frac{N_1}{N_2} * V_{2rod} \quad (14)$$

La figura 8 presenta las trayectorias del flujo dentro del núcleo cuando opera en la zona lineal, es decir cuando la tensión del suministro es menor al voltaje nominal primario definido como “codo”. En la figura 9 se presentan las trayectorias de los flujos cuando el acondicionador opera en la región de saturación de la curva de magnetización debido a que V\_1 es superior al voltaje nominal primario V\_1rod.

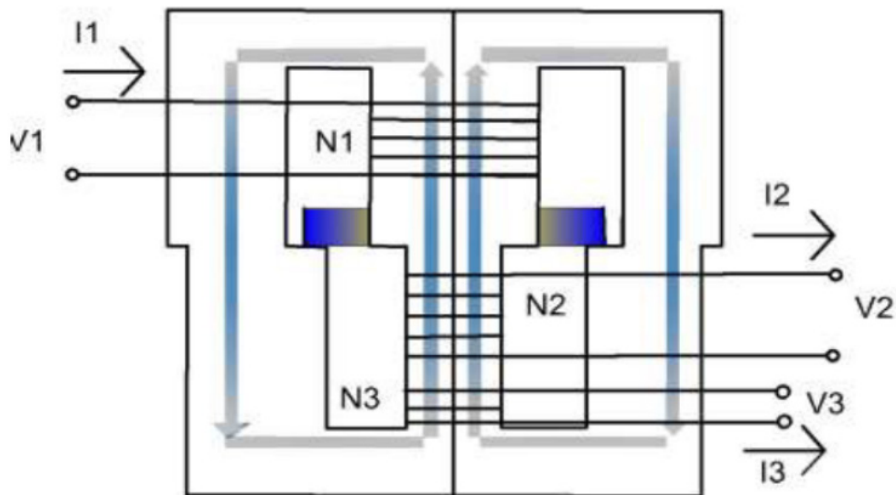


Figura 8. Trayectorias de flujo del transformador operando en la zona lineal.

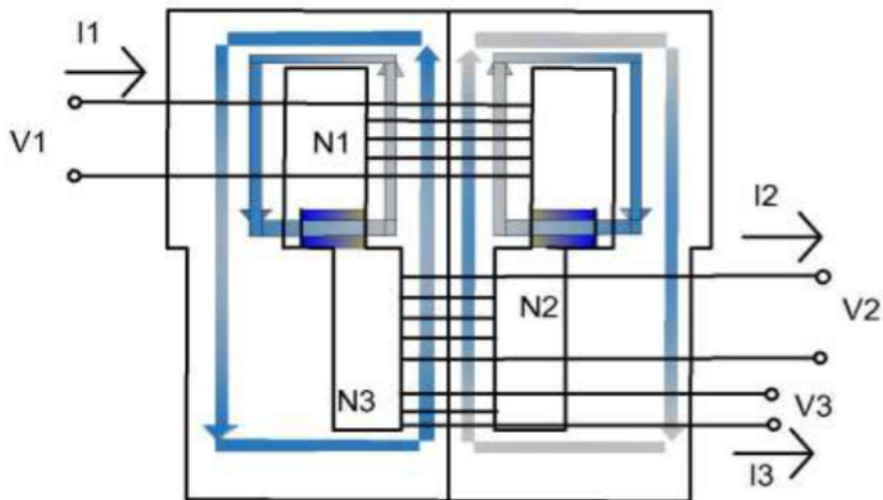


Figura 9. Trayectorias del flujo del transformador operando en la zona de saturación.



Si se definen las relaciones  $K_{ns}$  como el cociente del flujo magnético  $\phi_{g1}$  y  $\phi_{g2}$  para el caso en el que el transformador no trabaja en saturación y  $K_{ss}$  el cociente para el núcleo secundario trabajando en saturación, estas relaciones se pueden determinar mediante las leyes de Kirchhoff aplicadas en la figura 7 de acuerdo a las ecuaciones (15) y (16)

$$K_{ns} = \frac{\phi_{g2}}{\phi_{g1}} = \frac{R_{shu}}{R_{shu} + R_{g2nosat}} \quad (15)$$

$$K_{ss} = \frac{\phi_{g2}}{\phi_{g1}} = \frac{R_{shu}}{R_{shu} + R_{g2sat}} \quad (16)$$

$R_{g2nosat}$  es la reluctancia no saturada  $R_{g2}$  con la permeabilidad  $\mu$  y  $\mu_o$  en la región lineal, y  $R_{g2sat}$  en la región saturada.

La relación de transformación en la zona de operación lineal a la zona de saturación se puede determinar dividiendo  $V_2$  entre  $V_1$  acorde con la ley de Faraday en la ecuación (17).

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} * K_{ns} * V_1 = S_{ns} * V_1 \quad (17)$$

Se calcula la pendiente  $S_{ns}$  en la región lineal de la curva de magnetización por medio de las reluctancias magnéticas. Ecuación (18).

$$K_{ns} = \frac{L_{gsh} * \mu_o + L_{ga} (\mu - \mu_o)}{L_{gsh} * \mu_o + L_{ga} (\mu - \mu_o) + L_{g21} * \mu_o * 2 * m + L_{g22} * \mu_o * m + L_{g23} * \mu_o * m} \quad (18)$$

Donde:

$$m = \frac{A_{sh} * t}{A_{21} * t} = \frac{A_{shu}}{A_2}$$

$$A_{21} * t = A_{22} * t = A_{23} * t$$

Conforme la ecuación (18) se despeja  $L_{ga}$  y se obtiene la longitud del entrehierro magnético. Ecuación (19)

$$L_{ga} = \frac{L_{gsh} * \mu_o - K_{ns} (L_{gsh} * \mu_o + L_{g21} * \mu_o * 2 * m + L_{g22} * \mu_o * m + L_{g23} * \mu_o * m)}{K_{ns} * (\mu - \mu_o) - (\mu - \mu_o)} \quad (19)$$

De igual forma, se calcula la inductancia de magnetización según la ecuación (20).

$$L_n = \frac{N_1^2}{R_{g1} + R_{shu} || R_{g2nosat}} \quad (20)$$

De igual forma, se calcula la inductancia de magnetización según la ecuación 20.

### ***Diseño e implementación del acondicionador ferro resonante***

Teniendo en cuenta las expresiones deducidas en apartes anteriores se pueden calcular el número de vueltas para los tres devanados, mediante el establecimiento del área del núcleo del transformador y los voltajes  $V_{1rod}$ ,  $V_{2rod}$ , y  $V_{3}$ , el número de vueltas del devanado primario, para este caso en particular, se muestran en la ecuación (21).

$$N_1 \approx 282 \text{ vueltas} \quad (21)$$

Donde:

$$B_{m\acute{a}x} = 0.8 \text{ Tesla}$$

$$V_{1rod} = 120 \text{ V.}$$

La corriente del devanado primario será como lo denota la ecuación (22)

$$I_p = \frac{S}{V_{1rod}} = 1.04 \text{ A} \quad (22)$$

Donde:

$$S = (2 \text{ cm} * 5 \text{ cm})^2 = 100 \text{ VA}$$

Se calcula en la ecuación (23) la sección transversal de los conductores utilizando la densidad máxima de corriente permisible sin exceder una elevación térmica de 60°C. Para el caso de transformadores a  $3.5\left(\frac{A}{mm^2}\right)$ . 100 VA, es igual

$$A(mm^2) = \frac{1.04 A}{3.5\left(\frac{A}{mm^2}\right)} = 0.29 mm^2 \quad (23)$$

Esta sección transversal corresponde a un calibre 22 A.W.G.[16].

La longitud para el conductor determinado se puede estimar mediante ecuación (24).

$$l_p = N_1(2a + 2p) * 1.4 \approx 95 m \quad (24)$$

Donde, a es el ancho del núcleo y p la profundidad del mismo.

Se aplica el procedimiento anterior para obtener las dimensiones del devanado secundario y terciario, ecuación (25).

$$N_2 \approx 326 \text{ vueltas} \quad (25)$$

$$l_s \approx 78 m \quad (26)$$

$$N_3 \approx 126 \text{ vueltas} \quad (27)$$

$$l_t \approx 30 m \quad (28)$$

Donde:

$$B_{m\acute{a}x} = 1.5 \text{ Tesla}$$

$$A_2 = (2 cm * 5 cm) = 10 cm^2$$

$$V_{2rod} = 130 V$$

$$B_{m\acute{a}x} = 1.5 \text{ Tesla}$$

$$A_3 = (2 cm * 5 cm) = 10 cm^2$$

$$V_3 = 50 V.$$

Como siguiente cálculo se establece la longitud del espacio de aire magnético  $l_{ga}$  por medio de la ecuación (29)

$$L_{ga} = 1.13 \text{ cm} \quad (29)$$

Respecto al núcleo del transformador se establece:

$$\begin{aligned} L_{gsh} &= 12,5 \text{ cm} \\ L_{g21} &= 20 \text{ cm} \\ L_{g22} &= 10 \text{ cm} \\ L_{g23} &= 20 \text{ cm} \\ \mu_o &= 4 * \pi * 10^{-7} \frac{H}{m} . \end{aligned}$$

Las láminas ferromagnéticas utilizadas son de acero al silicio de grano no orientado, cuya permeabilidad magnética del núcleo se determina a través de la ecuación (30) [17]:

$$\mu = \frac{B}{H} = 1.15 \times 10^{-3} \frac{H}{m} \quad (30)$$

Se halla la relación  $K_{ns}$  del flujo magnético y se calcula  $m$  en la ecuación (31)

$$K_{ns} = \frac{\Phi_{g2}}{\Phi_{g1}} = \frac{B_{m\acute{a}x} * A_2}{B_{m\acute{a}x} * A_1} = 0,93 \quad (31)$$

$$m = \frac{A_{sh}}{A_{21}} = 1 \quad (32)$$

Donde:

$$A_{sh} = 5 \text{ cm}$$

$$A_{21} = 5 \text{ cm}$$

A continuación, se realizan los ensayos de vacío y de cortocircuito del transformador ferro resonante con el fin de obtener los datos requeridos para el dimensionamiento del condensador  $C_e$ .

### A. Ensayo sin carga

Se alimenta el transformador por el lado de bajo voltaje, de tal manera que la tensión sea la nominal y asegurando que los devanados secundario y terciario estén sin carga. Se mide el voltaje de alimentación  $V_o$ , la potencia activa  $P_o$  y la corriente de vacío  $I_o$ . Se calcula la resistencia de pérdidas en el núcleo  $R_m$  y reactancia de magnetización  $X_{ln}$  [18]

A continuación en la ecuación (33-37), se realiza los ensayos de vacío y de cortocircuito del transformador ferro resonante con el fin de obtener los datos requeridos para el dimensionamiento del condensador  $C_e$ .

$$V_o = 120.4 V \quad (33)$$

$$P_o = 20 W \quad (34)$$

$$I_o = 1.65 A \quad (35)$$

$$R_m = 725.3 \Omega \quad (36)$$

$$X_{ln} = j 73.3 \Omega \quad (37)$$

### B. Ensayo de cortocircuito primario-secundario

Se alimenta el primario y se cortocircuita el devanado secundario manteniendo el devanado terciario en circuito abierto, se incrementa la tensión de alimentación desde cero hasta que circule la corriente nominal secundaria  $I_{ns}$  referida al primario y se mide voltaje, corriente, y potencia activa [18]. Ecuación (38-42).

$$I'_{ns} = 0.88 A \quad (38)$$

$$P_{ccps} = 5 W \quad (39)$$

$$V_{ccps} = 33.3 V \quad (40)$$

$$I_{ccps} = 0.87 A \quad (41)$$

$$Z_{ccps}^p = 6.51 \Omega + j 37.4 \Omega \quad (42)$$

Se energiza el devanado primario y se cortocircuita el devanado terciario manteniendo el devanado secundario en circuito abierto, se incrementa la tensión de alimentación desde cero hasta que circule la corriente nominal terciaria  $I_{nt}$  referida al primario y se mide corriente, potencia activa y voltaje [18]. Ecuación (43-46).

$$P_{ccpt} = 6 W \quad (43)$$

$$V_{ccpt} = 34.2 V \quad (44)$$

$$I_{ccpt} = 0.87 A \quad (45)$$

$$Z_{ccpt}^p = 7.92 \Omega + j 38.5 \Omega \quad (46)$$

### C.Ensayo de cortocircuito secundario-terciario

Se energiza el bobinado secundario y el terciario se cortocircuita manteniendo el devanado primario en circuito abierto, se incrementa la tensión de alimentación desde cero hasta que circule la corriente nominal terciaria  $I_{nt}$  referida al secundario y se mide voltaje, corriente, y potencia activa [18]. Ecuación (47-49)

$$P_{ccSt} = 4.9 W \quad (47)$$

$$V_{ccst} = 5.98 V \quad (48)$$

$$I_{ccst} = 0.82 A \quad (49)$$

Se refiere la impedancia de la prueba secundaria terciaria al devanado primario. Ecuación (50)

$$Z_{ccst}^p = 5.37 \Omega + j 0.68 \Omega \quad (50)$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones (42), (46) y (50) se obtienen las impedancias propias de los devanados [19]. Ecuación (50)

$$Z_p^p = 4.53 \Omega + j 37.63 \Omega \quad (51)$$

Se refieren los valores a calores reales en sus respectivos lados en las ecuaciones (52) y (53).

$$Z_s = 2.64 \Omega - j 0.24 \Omega \quad (52)$$

$$Z_t = 0.67 \Omega + j 0.17 \Omega \quad (53)$$

Y se calcula con la ecuación (54). el condensador resonante  $C_e$ .

$$C_e = 179.52 \mu F \quad (54)$$

### ***Implementación y validación***

El prototipo implementado se presenta en la figura 10



Figura 10. a) y b) Transformador de voltaje constante basado en ferro resonancia implementado.

A continuación en la Tabla I, se pueden observar los resultados obtenidos ante variaciones de voltaje de entrada en el transformador.

Tabla I: Resultados con capacitor electrolítico de 177 uF a 160 v.

V PRIMARIO (V)	V SECUNDARIO (V)
20.7	24.5
40.2	46.9
60.6	69.4
80.6	92.5
100.8	115
120.5	130.1
140.3	134.8
160.6	139.4
PRUEBA CONDENSADOR ELECTROLÍTICO 160 V 177 uF	

La figura 11 muestra la relación medida

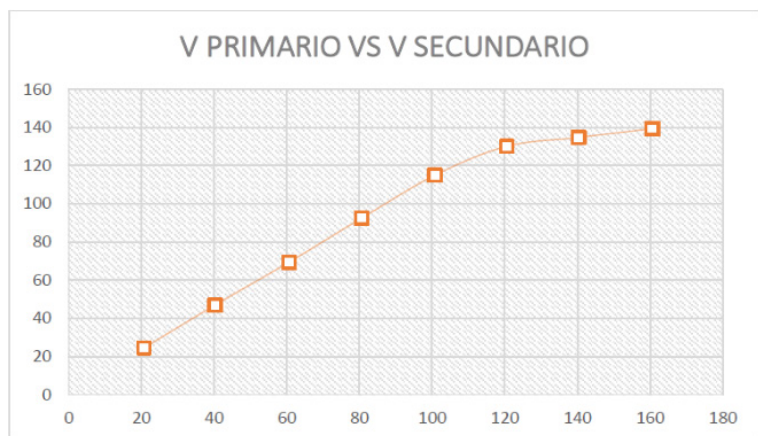


Figura 11. Tensión primaria vs tensión secundaria en vacío.

Las figuras 12 y 13 muestran los oscilogramas de las tensiones asociadas a la tabla I.

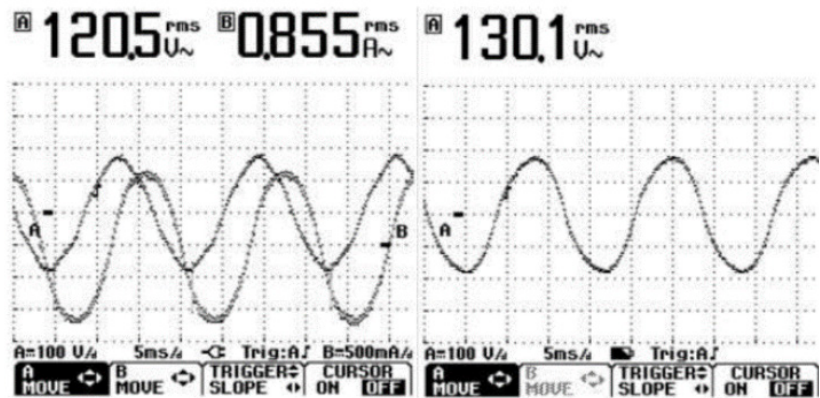


Figura 12. a) Devanado primario y b) Devanado secundario. Valores medidos corriente, voltaje devanado primario y secundario en vacío.

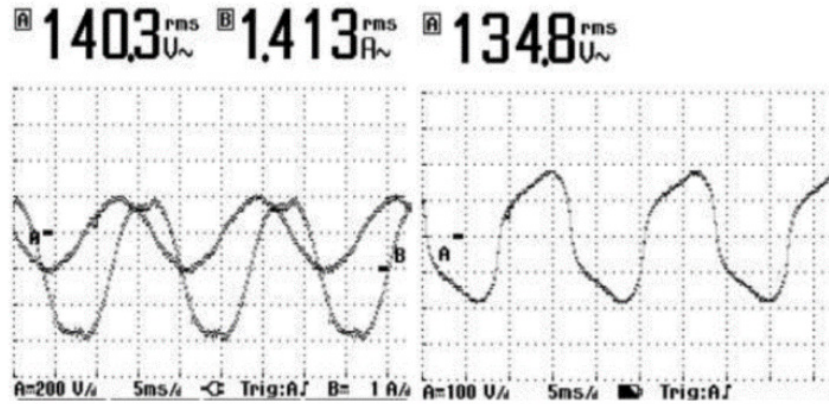


Figura 13. a) Devanado primario y b) Devanado secundario. Valores medidos corriente, voltaje devanado primario

En cuanto a las pruebas en carga se muestran los resultados obtenidos del transformador alimentando una carga de luminaria incandescente de 70 W. Tabla II.

Tabla II: prueba carga luminaria incandescente de 70 w.

V PRIMARIO (V)	V SECUNDARIO (V)
20.4	15
40	34.1
60.2	54
80.6	74
100.7	93.3
120.5	110.8
139.9	124.6
160.5	130.3
<b>PRUEBA CON CARGA LUMINARIA INCANDESCENTE 70 W</b>	

La figura 14 muestra la relación medida

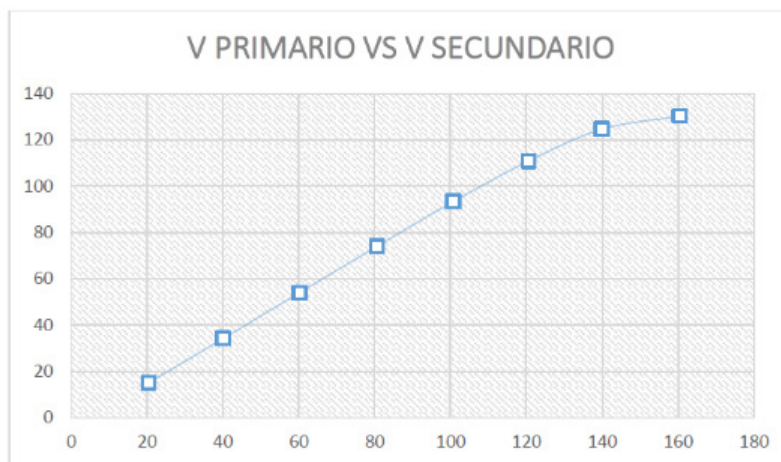


Figura 14. Tensión primaria vs tensión secundaria del transformador basado en ferro resonancia con carga.



En la figura 11 y 14 se percibe la separación entre la región lineal y la región no lineal del transformador. Estas figuras también indican que, ante variaciones de voltaje de entrada mayor al nominal, el voltaje secundario permanecerá casi constante, ya que su núcleo secundario se encuentra saturado.

De igual forma, se presentan los valores medidos del factor de cresta y THD (Total Harmonic Distortion) de la tensión en la tabla II.

En la tabla III se tiene un factor de cresta acorde para una senoide ideal [2]. En referencia al total de distorsión armónica las formas de onda de las variables de salida cumplen con la norma vigente para sistemas de baja tensión [20]-[21].

Tabla III: Medición factor de cresta y THD de voltaje con carga

<b>F.C ENTRADA</b>	<b>F.C SALIDA</b>
1.4 CF	1.4 CF
<b>ARMÓNICOS V ENTRADA</b>	<b>ARMÓNICOS V SALIDA</b>
4 THD	2.7 THD

## Conclusiones

La metodología de diseño del transformador ferroresonante en una primera etapa lleva a cabo el análisis de circuito eléctrico equivalente, obteniendo el dimensionamiento del condensador resonante, posteriormente del análisis del circuito magnético equivalente necesario para fijar la fórmula de longitud del entrehierro.

En la prueba de vacío del prototipo planteado se logra establecer el buen comportamiento de la regulación de tensión ante elevaciones de voltaje por encima del valor nominal, de igual forma en la prueba con carga se obtiene una regulación de tensión adecuada.

Las medidas realizadas con el osciloscopio industrial Fluke 125 del total de distorsión armónica y factor de cresta de voltaje, permite establecer que las variables se encuentran dentro de los límites establecidos por la normatividad vigente.

La estructura del transformador ferro resonante cuenta con un núcleo compacto y con una derivación magnética, para este trabajo particularmente se utilizó la unión de varios núcleos para constituir su estructura, lo que ocasionó la existencia de espacios de aires indeseados en el diseño. Se recomienda el uso de chapas o flejes magnéticos troqueladas con las medidas específicas con el fin de evitar estos espacios de aire.

Se obtuvo una regulación de voltaje ante variaciones de tensiones del suministro eléctrico este comportamiento permitió validar las fórmulas establecidas para el diseño y permitir que la tensión de salida este libre de fenómenos electromagnéticos de larga y corta duración al igual que de detorsión armónica.

## Referencias

- [1] S. McKee and R. Simpson, "Ferroresonance and preisach theory," in *IEE Colloquium on Warning! Ferroresonance Can Damage Your Plant (DigestNo: 1997/349)*, pp. 3/1–314, 1997
- [2] I. Hernanda, I. Negara, D. Asfani, D. Fahmi, N. Anggito, and C. Bahy, "Experimental setup for ferroresonance initiation on 3-phase low voltage transformer", in *2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, pp. 552–557, 2021
- [3] A. Heidary, K. Rouzbehi, H. Radmanesh, and J. Pou, "Voltage transformer ferroresonance: An inhibitor device", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 6, pp. 2731–2733, 2020
- [4] M. Sanchez, "Calidad de la energia el ectrica", Instituto Tecnologico de Puebla, Mexico, pp. 696–703, 2009
- [5] V. Polo, J. Pena, and L. Pacheco, "Calidad de la energia electrica bajo la perspectiva de los sistemas de puesta a tierra", *Ciencia e Ingenieria*, vol. 38, no. 2, pp. 167–176, 2017
- [6] J. Wang, H. Wu, K. Sun, and L. Zhang, "A high efficiency quasi-single-stage unified power quality conditioner integrating distributed generation" in *2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 1099–1104, 2019
- [7] D. Kumar and C. Kumar, "Dynamic voltage control using unified powerquality conditioner with storage", in *2021 IEEE 15th International Con-ference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, pp. 1–6, 2021
- [8] H. Hafezi, R. Faranda, and M. Falvo, "Single-phase dynamic voltage conditioner control under load variation", in *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pp. 563–568, 2016
- [9] Y. Liu, F. Ma, X. Wang, and Z. Zhu, "Voltage fluctuation and comprehen-sive control of multilevel power conditioner for railway traction system" in *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conferenceand Exposition (PEAC)*, pp. 1–6, 2018
- [10] A. Djebli, A. Khelafi, O. Touhami, and R. Ibtouen, "Modelling of constantvoltage transformer for transient and paramtric analysis", in *2022 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*, pp. 1–6, 2022
- [11] R.-L. Lin, C.-H. Tsai, and N.-C. Chen, "Design and implementation offerroresonant transformer for led driver systems", in *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1–9, 2016.2
- [12] R. Basu, "A new approach in the analysis and design of a ferroresonant transformer", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 3, no. 1, pp. 43–49, 1967
- [13] C. McLyman, *Transformer and inductor design handbook*. CRC press, 2004
- [14] Y. Zhilichev, "Models of ferroresonant transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 6, pp. 2631–2639, 2014
- [15] C. Restrepo, "Alternativas de solucion de circuitos magneticos excitados con corriente directa", *Scientia et technica*, vol. 2, no. 22, 2003
- [16] "Hilos de Cobre y Aluminio Esmaltados: Características Físicas y Eléctricas". *Elementos Magnéticos Navarra S.L.* <https://irp-cdn.multiscreensite.com/43609dd1/files/uploaded/TABLA%20DE%20CARACTERISTICAS%20FISICAS%20Y%20ELECTRICAS%20DE%20HILOS%20DE%20COBRE%20Y%20ALUMINIO%20ESMALTADOS.pdf>
- [17] "MagWeb - Your Source of Information on Magnetic Materials". *MagWeb - Your Source of Information on Magnetic Materials.*
- [18] M. Pozueta, "*M aquinas electricas i-g862*",

*Departamento de ingeniería eléctrica y energética, Universidad de Cantabria (España), 2015*

- [19] D. Barrera and O. Beltrán, “*Procedimientos de prueba para el laboratorio de máquinas eléctricas*”, 2009
- [20] “IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems”, IEEE Std 519-2014 (*Revision of IEEE Std 519-1992*), pp. 1–29, 2014
- [21] “IEEE recommended practice for monitoring electric power quality”, IEEE Std 1159-2019 (*Revision of IEEE Std 1159-2009*), pp. 1–98, 2019