



Estudio y Desarrollo de un convertidor Push-Pull como elevador de tensión de baterías para Sistemas de Alimentación Ininterrumpida¹

Valenzuela, Simón María; Botterón, Fernando; Fernández, Guillermo Alfredo; Aguirre, Yonatan Gabriel

¹Trabajo de Investigación

Resumen

El objetivo general es el estudio, diseño, construcción y validación de un convertidor estático de baja potencia (CC-CC) del tipo push-pull, para elevar la tensión de salida de un conjunto de baterías estacionarias de gel, para luego convertir esta tensión CC a tensión alternada CA con un inversor monofásico para Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI). El control de la tensión de salida del convertidor CC-CC seleccionado, se realizará en base a una estrategia de control combinada con el estado de carga de las baterías y la demanda de energía del SAI; en el sentido de optimizar la energía almacenada.

Palabras Clave: *Push-Pull, Electrónica de potencia, Convertidor CC-CC, Sistemas de alimentación ininterrumpida*

Introducción

Un convertidor estático de potencia es un elemento que permite efectuar conversiones de energía eléctrica utilizando elementos de electrónica de potencia tales como semiconductores. Los tipos más habituales de conversión en electrónica son de continua a continua (CC-CC), de alterna a continua (AC-CC), de continua a alterna (CC-AC) y de alterna a alterna (AC-AC).

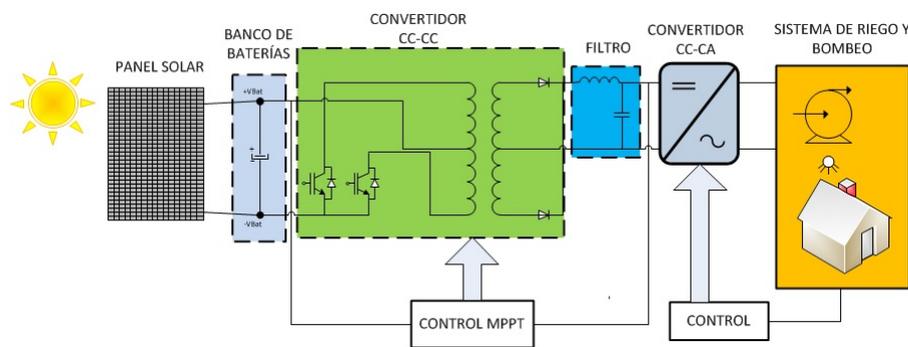
El convertidor conformará el circuito necesario para el acondicionamiento de la energía eléctrica que provee un banco de baterías cargadas con energía solar fotovoltaica, la cual será utilizada por un inversor que alimentará sistemas de iluminación a LED y algunos electrodomésticos de baja potencia. Dicho convertidor realizará una conversión CC-CC elevadora de tensión que se describirá más adelante.

De las etapas de conversión de energía eléctrica, una económicamente conveniente, simple de implementar y que cumple con las necesidades antes mencionadas, el convertidor *Push-Pull* es uno de los que mejor se adecúa a las necesidades establecidas en este proyecto de investigación.

El convertidor *Push-Pull* es un tipo de convertidor CC-CC que mediante un proceso de conmutación y un transformador puede cambiar la tensión de una fuente de continua, pudiendo actuar como reductor o elevador de la misma. Una característica de este convertidor es que el primario de este transformador es alimentado con una corriente de entrada que pasa por transistores ubicados simétricamente. Estos transistores conmutan alternativamente, invirtiendo

de manera periódica la corriente en el transformador.

Este tipo de convertidores presenta la ventaja de tener un costo generalmente menor a otros convertidores, es más sencillo y los circuitos que excitan los transistores presentan un punto de masa en común. Por otro lado, se debe tener en cuenta que es destinado a pequeñas potencias por no hacer un uso eficiente del transformador y dificultar el empleo de la técnica para evitar la saturación del núcleo debido a las desigualdades en los tiempos de conmutación de los transistores. Además, es recomendado para bajas tensiones por someter a los interruptores a tensiones muy elevadas.



Metodología

Uno de los pasos más importantes durante el diseño del convertidor *Push-Pull*, para estudiar y comprender todos los fenómenos asociados a la operación del mismo, es la realización de simulación con programas dedicados, la cual nos permitirá tener una idea previa acerca del funcionamiento del circuito. La topología simulada estará conformada por elementos básicos, los cuales tratan de representar los distintos efectos de los componentes del circuito, como ser resistencias, inductancias y capacitancias parásitas, además de los elementos activos.

Para poder contrastar los datos obtenidos mediante simulación, se procede en primer lugar a realizar los cálculos teóricos de corrientes y tensiones que aproximadamente se deberían observar en el funcionamiento del convertidor. Se parte de que se desea una potencia de salida a una tensión de salida. En la Tabla- 1 se muestran los parámetros que se desea que tenga el transformador. Entonces, se procede a hallar la corriente a la salida de la siguiente manera:

$$P_{out} = U I \dots \rightarrow \dots I = \frac{P_{out}}{U} \quad (1)$$



$$I = \frac{1000 \text{ W}}{390 \text{ V}} \rightarrow I = 2,564 \text{ A} \quad (2)$$

Con la corriente obtenida, se calcula el valor de la carga a la salida del convertidor:

$$U = IR \rightarrow R = \frac{U}{I} \quad (3)$$

$$R = \frac{390 \text{ V}}{2,564 \text{ A}} \rightarrow R = 152,106 \Omega \quad (4)$$

Se toma un valor de, con lo cual se vuelve a calcular el valor de la corriente y la potencia de salida.

$$I = \frac{390 \text{ V}}{150 \Omega} \rightarrow I = 2,6 \text{ A} \quad (5)$$

$$P_{out} = (390 \text{ V})(2,6 \text{ A}) = 1014 \text{ W}$$

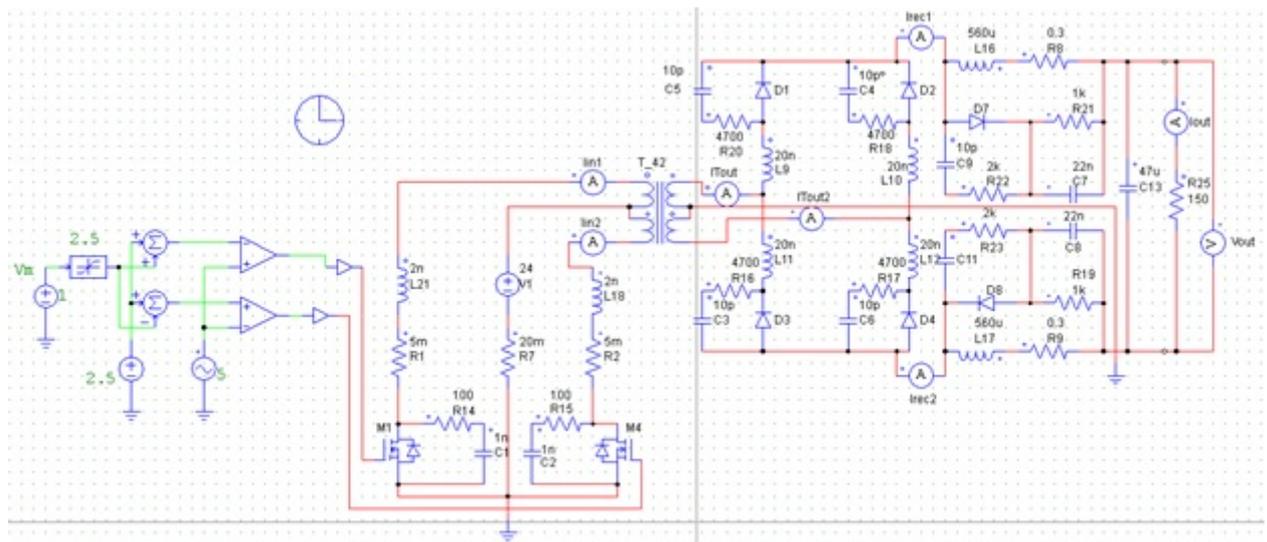
Como se puede apreciar en la ecuación(5), la potencia de salida es un poco mayor que la que se había planteado en un principio; lo cual es posible como se verá más adelante si es que las características del núcleo lo permiten.

Una vez que se obtienen algunos resultados teóricos, se procedió a simularlo. En laFigura 2 se muestra el esquema del circuito simulado en la herramienta de software PSIM.

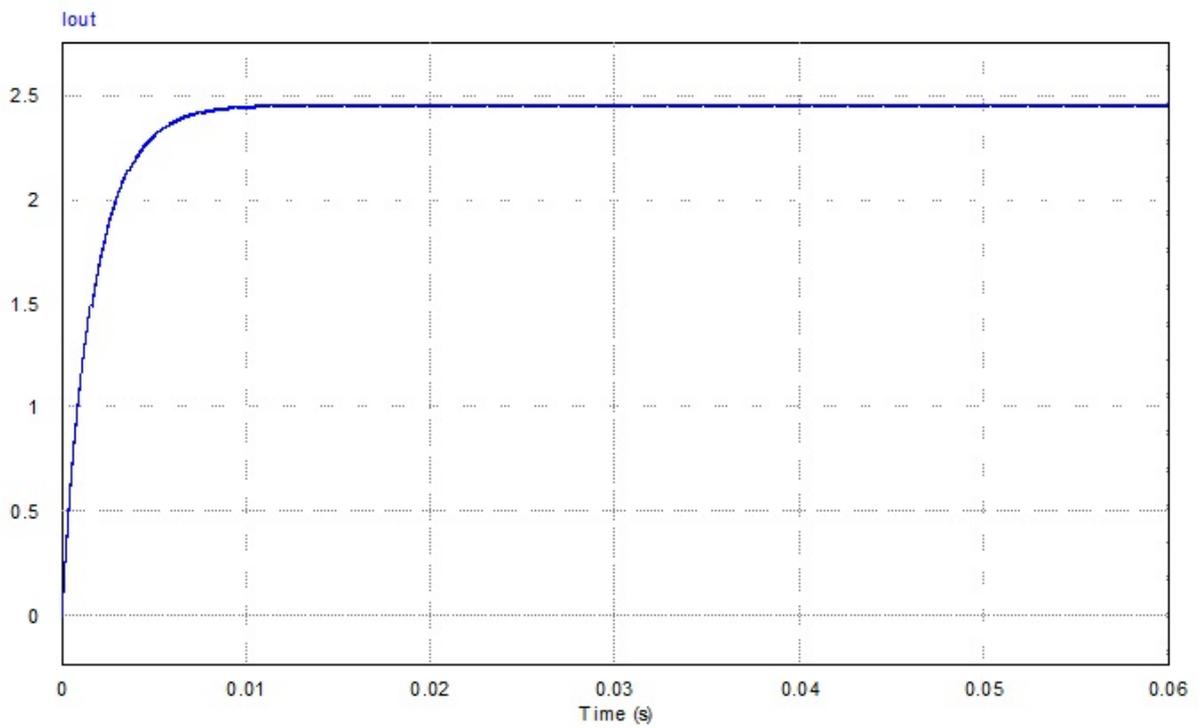
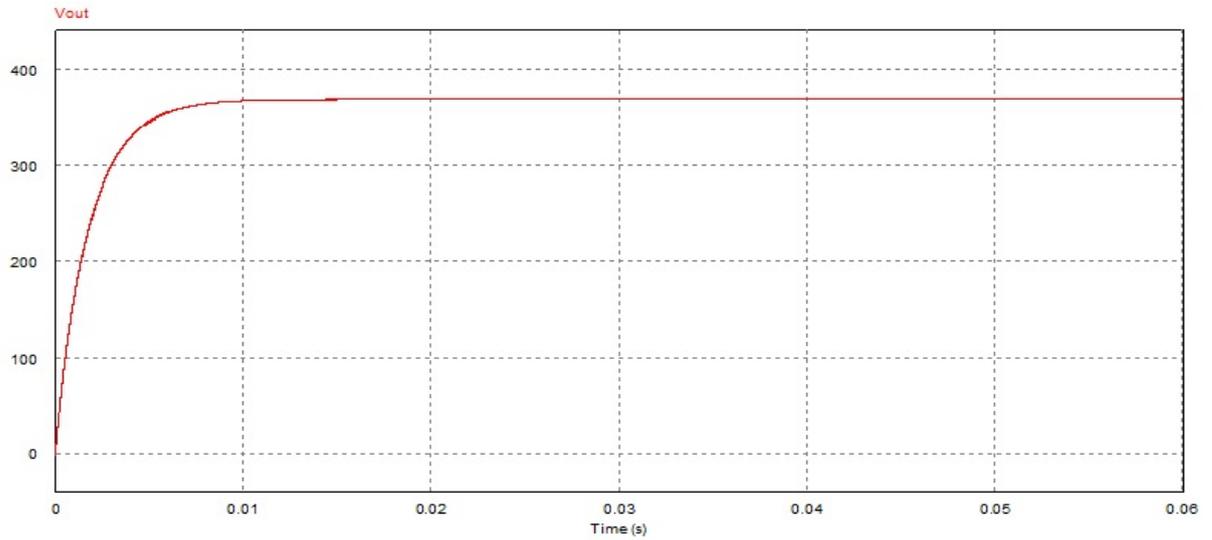
En laFigura 3 se muestra la tensión de salida del convertidor. Puede observarse que la salida no alcanza los 390 V, llegando a un valor de 369,12 V en un tiempo de 10,89 ms aproximadamente.

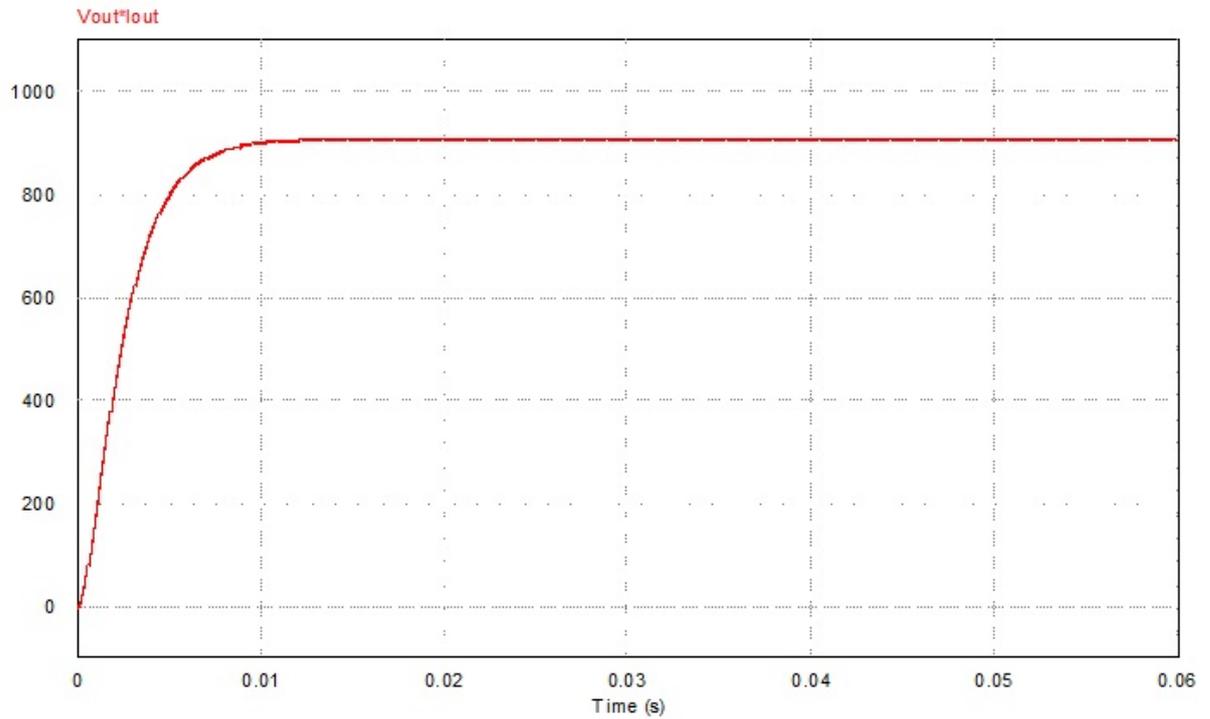


Potencia nominal de salida, P_{out}	1000 W
Tensión nominal de entrada, V_{in}	24 V
Tensión mínima de entrada, $V_{inMÍN}$	21 V
Tensión máxima de entrada, $V_{inMÁX}$	30 V
Tensión nominal de salida, V_o	390 V
Tensión mínima de salida, $V_{oMÍN}$	350 V
Corriente nominal de salida, I_{out}	2,564 A
Corriente nominal de entrada, I_{in}	50.952 A
Frecuencia de conmutación de interruptores, f_s	50 kHz

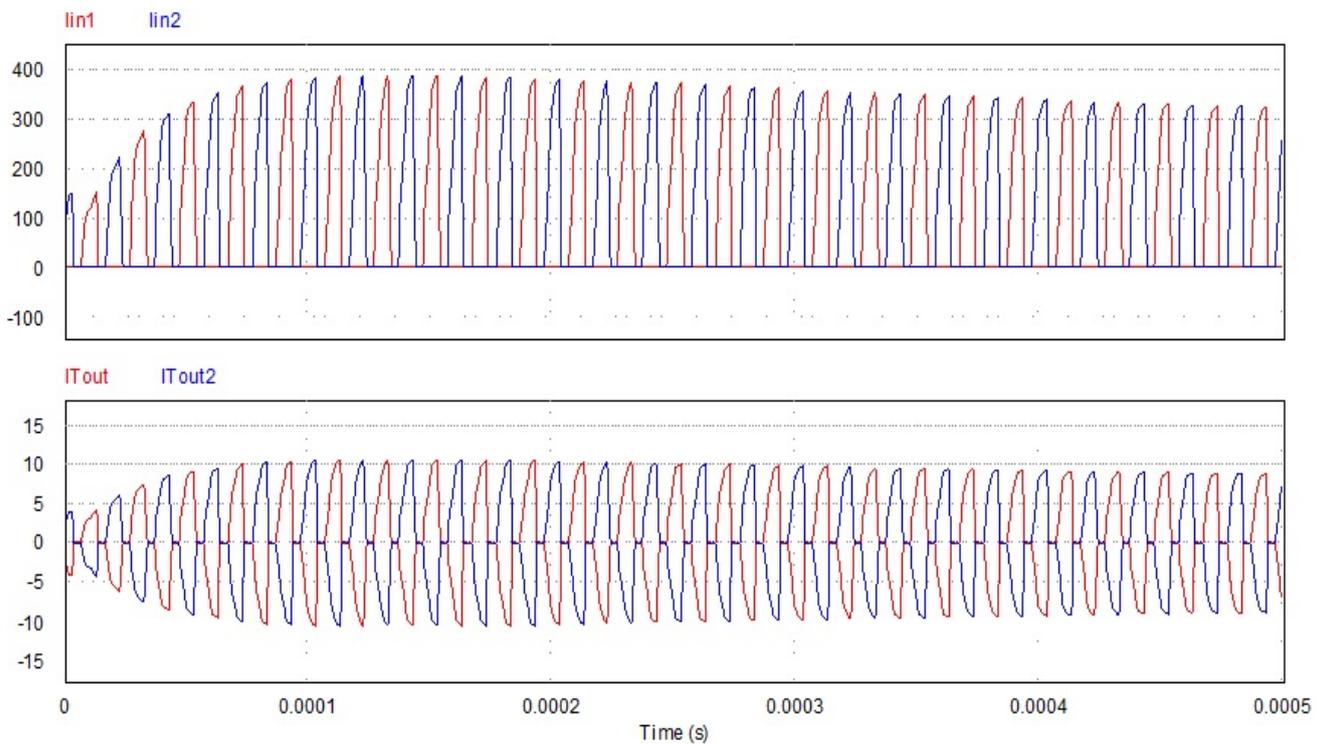
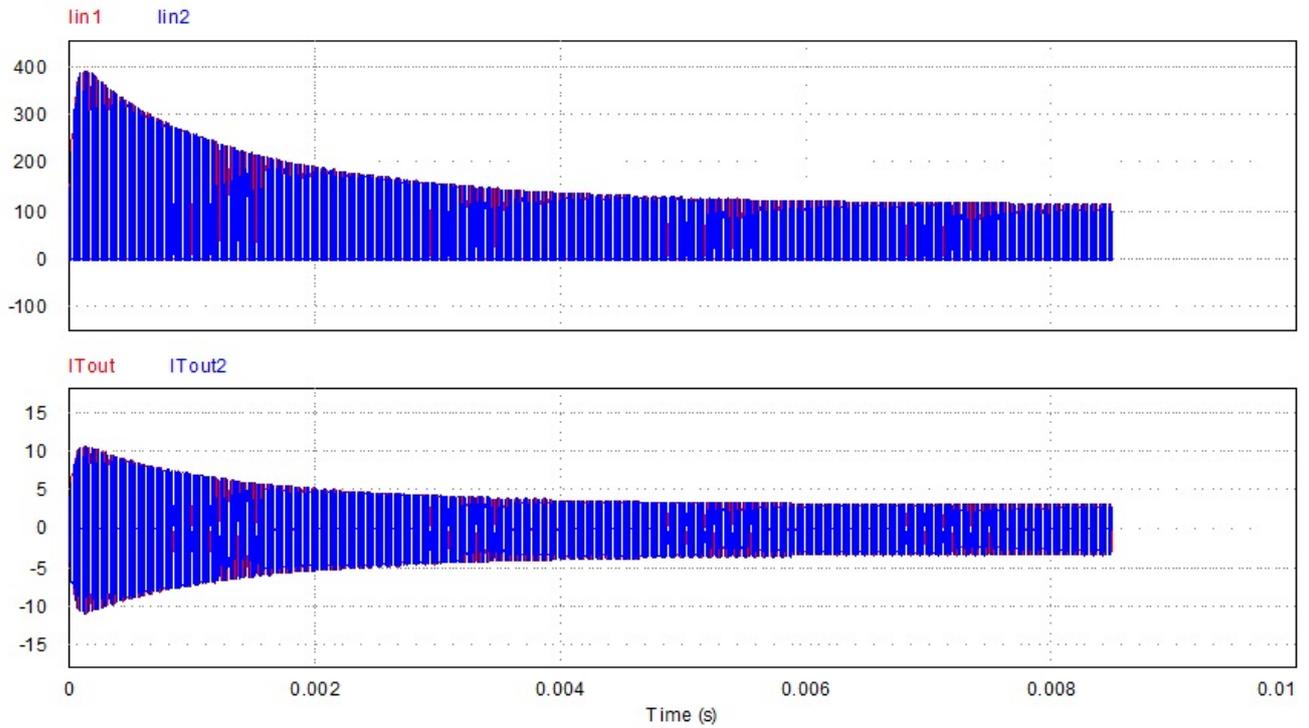


La corriente se muestra en la Figura 4. Se puede apreciar que la misma llega a un valor de aproximadamente en régimen estable, el cual es un poco menor al calculado en la ecuación (5). La potencia de salida, que se muestra en la Figura 5, llega a un valor aproximado de . Esto se debe a que tanto la corriente como la tensión son menores a los valores que se habían calculado. Para mejorar estos valores es necesario aplicar un lazo de control, logrando así que la potencia de salida se mantenga constante en un valor deseado aún ante variaciones de carga o tensión. Como se podrá apreciar sin embargo, los valores obtenidos mediante simulación están próximos a los valores obtenidos mediante cálculos.





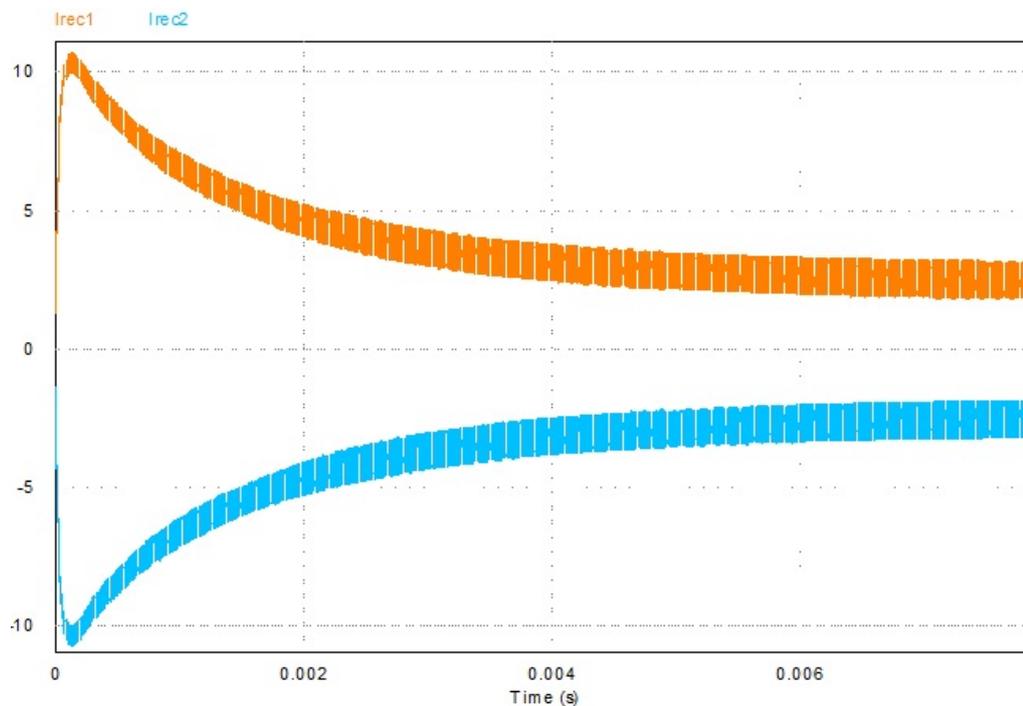
Una vez analizados los parámetros de la salida del convertidor, procedemos a ver las corrientes tanto en la entrada como en la salida del transformador.





En la Figura 6 se muestran tanto la corriente de entrada como de salida del transformador correspondiente a los dos periodos de conmutación de los transistores. La corriente a la entrada del transformador tiene un valor medio aproximado de 43.2 A, mientras que a la salida tiene un valor medio de 2.35 A aproximadamente. En la Figura 7 se muestran las mismas ondas con un mayor acercamiento.

En la Figura 8 se puede ver la corriente a la salida del puente rectificador.



DISEÑO DE TRANSFORMADOR

La primera tarea en el diseño de un transformador es elegir un material adecuado para el núcleo del mismo. Al momento de elegir el material correspondiente para el núcleo, deben tenerse en cuenta los siguientes factores:



Ø Aplicación del circuito.

Ø Frecuencia de operación.

Ø Rango de tensiones de operación.

Ø Potencia requerida.

Ø Eficiencia.

Ø Costos.

El transformador debe diseñarse para que trabaje con una excursión simétrica máxima lo más grande posible, debido a que ello resultará en menos vueltas de bobina, mayor capacidad de potencia y menor inductancia de dispersión.

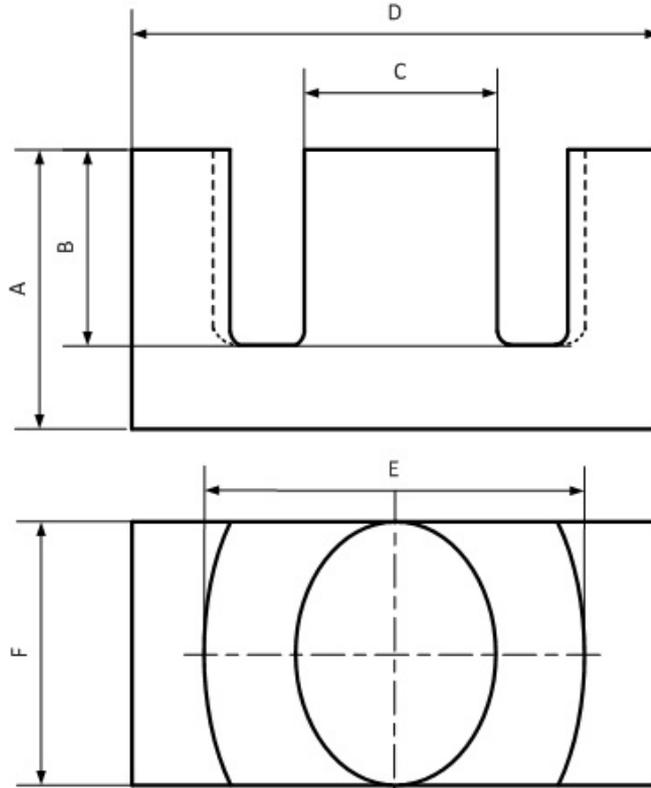
Generalmente, una vez que se determina la máxima excursión, la frecuencia de operación del transformador y la corriente que circulará por el devanado, se calcula el producto de áreas necesario para la aplicación y, en base a eso, se opta por núcleos disponibles en el mercado. En este caso, se tiene el núcleo **ETD 59/31/22**, el cual se puede ver en la Figura 9 con sus respectivas dimensiones en la Tabla- 2.

Dimensión	Valor (cm)
A	3,12
B	2,2
C	2,21
D	5,98
E	4,36
F	2,21

En primera instancia se obtiene el **área de ventana** A_w y luego el **producto de áreas AP** de este núcleo:



$$A_w = \frac{(E - C) \cdot 2B}{2} = 4,73 \text{ cm}^2 \quad (6)$$



Ahora se define el valor del **área efectiva** A_e :

$$A_e = 3,68 \text{ cm}^2 \quad (7)$$

Teniendo ambos valores (y), se puede calcular el producto de áreas AP como sigue:

$$AP = A_w A_e = 17,406 \text{ cm}^4 \quad (8)$$

Seguidamente, se calcula la potencia límite que es posible disipar en el núcleo del transformador. Para esto, primero se necesita conocer la **Resistencia térmica** mediante la siguiente aproximación:



$$R_{\theta T} = 23 (AP)^{-0,37} = 7,992 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \quad (9)$$

Tomando una sobre elevación de temperatura de 50° C en el transformador, es posible obtener la potencia de pérdida en el mismo mediante la siguiente expresión:

$$P_{\text{trafo}} = \frac{\Delta T_{\text{trafo}}}{R_{\theta T}} = 6,256 \text{ W} \quad (10)$$

Si se supone que la sobreelevación de temperatura aportada por el núcleo es de 25 °C, se tendrá:

$$P_{\text{núcleo}} = \frac{P_{\text{trafo}}}{2} = 3,128 \text{ W} \quad (11)$$

De la hoja de datos del transformador ETD 59/31/22 se tiene que la **longitud media magnética** vale:

$$L_e = 13,9 \text{ cm} \quad (12)$$

Usando el valor de, obtenemos el **volumen efectivo del núcleo**:

$$V_e = A_e L_e = 51,152 \text{ cm}^3 \quad (12)$$

Ahora bien, es posible obtener la **pérdida de potencia por unidad de volumen** P_v en el núcleo.

$$P_v = \frac{P_{\text{núcleo}}}{V_e} = 0,061 \frac{\text{W}}{\text{cm}^3} \quad (13)$$

Este es el máximo valor de potencia por unidad de volumen que puede disiparse en el núcleo para que el incremento de temperatura no supere los 25 °C. Para no superar este valor, también es necesario limitar el valor de densidad máxima B_{max} ($?B/2$).

A continuación, para poder calcular la excursión de la densidad de campo, definimos los valores de K_h que es el **Coefficiente de pérdidas por histéresis** y K_e que es el **coeficiente de pérdidas por corrientes de Eddy**:

$$K_h = 4 \times 10^{-5} \quad (14)$$

$$K_e = 4 \times 10^{-10} \quad (15)$$



$$\Delta B = \sqrt[2.4]{\frac{P_v}{K_h f_t + K_e f_t^2}} \quad (16)$$

Donde ΔB es el la **excursión de la densidad de campo magnético (T)**.

A modo de comprobación, se calcula la pérdida de potencia por unidad de volumen en el núcleo de ferrita a la respectiva frecuencia de trabajo:

$$PN_v = \Delta B^{2.4} \cdot (K_h f_t + K_e f_t^2) = 0,061 \frac{W}{cm^3} \quad (17)$$

A continuación, se define el valor del **ciclo útil** δ , con el cual se calcula el **Factor de forma de onda** K_f .

$$\delta = 0,45 \quad (18)$$

$$T = \frac{1}{f_s} = 2 \times 10^{-5} \text{ s} \quad (19)$$

$$K_f = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\delta}} = 4,216 \quad (20)$$

Ahora bien, necesitamos conocer la densidad de corriente que circula por los bobinados primario y secundario, para lo cual debemos saber la cantidad de vueltas de dichos bobinados.

$$N_1 = \frac{V_{inMIN} \cdot \delta \cdot T}{3,68 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta B} = 2,601 \text{ vueltas} \quad (21)$$

Redondeando queda $N_1 = 3$ vueltas.

$$\Delta B = 216 \frac{10^{-6}}{3 \cdot 3,68 \cdot 10^{-4}} = 0,196 \text{ T} \quad (22)$$

Seguidamente se procede a obtener el producto de áreas mínimo AP_{min} requerido por el convertidor, para lo cual primero se definen las siguientes constantes:

$$K_w = 0,4 \quad (23)$$



$$J = 800 \text{ A/cm}^2 \quad (24)$$

$$K_p = 0,41 \quad (25)$$

$$\delta_s = \frac{0.066 \text{ A}}{\sqrt{f_s}} = 2,952 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (26)$$

Donde es el factor de arrollamiento y es el factor de utilización del área del devanado primario con respecto a. Seguidamente, se calcula el valor de:

$$AP_{\text{mín2}} = 1.5 \frac{P_{\text{out}}}{K_w K_p J f_s \Delta B \eta} 10^4 = 12,567 \text{ cm}^4 \quad (27)$$

Recordando que el valor del producto de ventana es $AP = 17.406 \text{ cm}^4$, puede verse que es mayor al valor de producto de áreas mínimo obtenido mediante la expresión(27), con lo cual se concluye que el núcleo que se seleccionó cumple con el valor de AP necesario.

DISEÑO DE LOS BOBINADOS DEL TRANSFORMADOR

La **relación de vueltas p** entre los bobinados primario y secundario puede ser obtenida mediante la siguiente ecuación, donde η es la **eficiencia** y $\delta_{\text{máx}}$ es el **ciclo útil máximo**:

$$\eta = 0,93 \quad (28)$$

$$\delta_{\text{máx}} = 0,45 / 0,5 = 0.9 \quad (29)$$

$$p = \frac{V_{o\text{MIN}}}{V_{in\text{MIN}} \cdot \eta \delta_{\text{máx}}} = 19,912 \quad (30)$$

Una vez obtenida la relación de vueltas p podemos conocer la cantidad de vueltas del bobinado secundario:

$$N_2 = p \cdot N_1 = 57 \quad (31)$$

Ahora que ya se conoce la cantidad de vueltas de los bobinados, se procede a obtener el área de las secciones de los mismos. Se considera un factor de uso de los bobinados de 1.41. Tomamos una densidad de corriente en el devanado de



A continuación, obtenemos la corriente que se tendría en el primario cuando la tensión de entrada es mínima.

$$I_1 = \frac{1070 \text{ W}}{21 \text{ V}} = 50,952 \text{ A} \quad (32)$$

$$S_1 = \frac{36.136 \text{ A}}{8 \text{ A/mm}^2} = 4,517 \text{ mm}^2 \quad (33)$$

$$S_2 = \frac{1.282 \text{ A}}{8 \text{ A/mm}^2} = 0,16 \text{ mm}^2 \quad (34)$$

Ahora que conocemos las secciones de los devanados del primario y del secundario, procedemos a obtener la profundidad del **efecto skin** δ_s para el valor de frecuencia de conmutación de 50 kHz.

$$\delta_s = \frac{0.066 \text{ A}}{\sqrt{f_s}} = 2,952 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (35)$$

Con el valor obtenido de la profundidad del efecto skin se puede obtener el valor máximo de diámetro que deberán tener los conductores para reducir de una manera eficiente dicho efecto.

$$d_{max} = 2 \delta_s = 5,903 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (36)$$

$$S_{max} = \pi \delta_s^2 = 2,737 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \quad (37)$$

Para que los conductores cumplan con ese requisito de diámetro se recurre al uso de conductores **Litz**, los cuales consisten de varios conductores finos puestos en paralelo y trenzados. Con el valor de se calcula el valor máximo de sección que deberán tener los conductores utilizados en el Litz. Con el valor calculado en la ecuación(37), se procede a buscar el valor menor más próximo a en la Tabla- 3, el cual corresponde al alambre AWG23 0.002582 cm².

El alambre conductor con el que se cuenta es un Litz de 200 conductores, conformados por alambres de 0.1 mm de diámetro (que vendría a ser el AWG38). Con esta información, calculamos el número de conductores que deben asociarse en paralelo al bobinado primario, el cual es la razón entre la sección del devanado primario y la sección seleccionada.



AWG	Diámetro del Cobre (cm)	Área del Cobre (cm ²)	Diámetro del Aislamiento (cm)	Área del Aislamiento (cm ²)	Ω/cm (20°C)	Ω/cm (100°C)	Corriente para J=450A/cm ² (A)
10	0,259	0,052620	0,273	0,058572	0,000033	0,000044	23,679
11	0,231	0,041729	0,244	0,046738	0,000041	0,000055	18,778
12	0,205	0,033092	0,218	0,037309	0,000052	0,000070	14,892
13	0,183	0,026243	0,195	0,029793	0,000066	0,000080	11,809
14	0,163	0,020811	0,174	0,023800	0,000083	0,000111	9,365
15	0,145	0,016504	0,156	0,019021	0,000104	0,000140	7,427
16	0,129	0,013088	0,139	0,015207	0,000132	0,000176	5,890
17	0,115	0,010379	0,124	0,012164	0,000166	0,000222	4,671
18	0,102	0,008231	0,111	0,009735	0,000209	0,000280	3,704
19	0,091	0,006527	0,100	0,007794	0,000264	0,000353	2,937
20	0,081	0,005176	0,089	0,006244	0,000333	0,000445	2,329
21	0,072	0,004105	0,080	0,005004	0,000420	0,000561	1,847
22	0,064	0,003255	0,071	0,004013	0,000530	0,000708	1,465
23	0,057	0,002582	0,064	0,003221	0,000668	0,000892	1,162
24	0,051	0,002047	0,057	0,002586	0,000842	0,001125	0,921
25	0,045	0,001624	0,051	0,002078	0,001062	0,001419	0,731
26	0,040	0,001287	0,046	0,001671	0,001339	0,001789	0,579
27	0,036	0,001021	0,041	0,001344	0,001689	0,002256	0,459
28	0,032	0,000810	0,037	0,001083	0,002129	0,002845	0,364
29	0,029	0,000642	0,033	0,000872	0,002685	0,003587	0,289
30	0,025	0,000509	0,030	0,000704	0,003386	0,004523	0,229
31	0,023	0,000404	0,027	0,000568	0,004269	0,005704	0,182
32	0,020	0,000320	0,024	0,000459	0,005384	0,007192	0,144
33	0,018	0,000254	0,022	0,000371	0,006789	0,009070	0,114
34	0,016	0,000201	0,020	0,000300	0,008560	0,011437	0,091
35	0,014	0,000160	0,018	0,000243	0,010795	0,014422	0,072
36	0,013	0,000127	0,016	0,000197	0,013612	0,018186	0,057
37	0,011	0,000100	0,014	0,000160	0,017165	0,022932	0,045
38	0,010	0,000080	0,013	0,000130	0,021644	0,028917	0,036
39	0,009	0,000063	0,012	0,000106	0,027293	0,036464	0,028
40	0,008	0,000050	0,010	0,000086	0,034417	0,045981	0,023
41	0,007	0,000040	0,009	0,000070	0,043399	0,057982	0,018

Calibre de Alambre Americano (en inglés AWG - American Wire Gauge).

A su vez, necesitamos conocer la sección del Litz que se va a utilizar, que se calcula seguidamente. Primero, tenemos en cuenta que la sección unitaria de cada uno de los conductores que conforman el Litz es. La sección equivalente de los 200 conductores sería:

$$S_{eq} = 200 S_{un} = 0,026 \text{ cm}^2 \quad (38)$$

Con el valor de la sección equivalente se puede calcular el valor del diámetro equivalente aproximado del Litz con el cual se está trabajando.



$$S_{eq} = \frac{\pi d_{eq}^2}{4} \quad (39)$$

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4 S_{eq}}{\pi}} = \mathbf{0,182 \text{ cm}} \quad (40)$$

Tanto con el valor de sección equivalente como con el valor de diámetro equivalente se puede obtener la cantidad de conductores en paralelo que se necesitarán en el Litz del primario y secundario utilizando los valores de sección dimensionados en las ecuaciones(33)y(34) , como se verá a continuación.

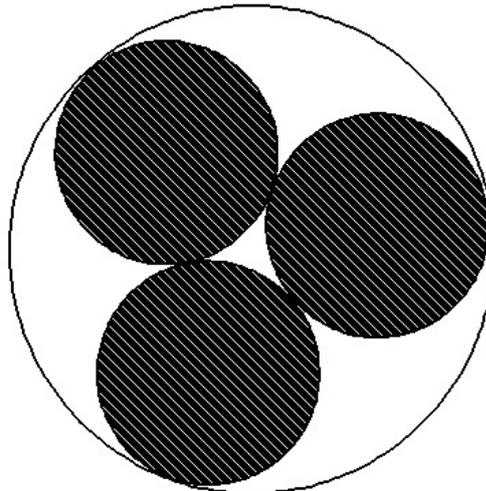
$$Z_p = \frac{0,04517}{0,026} = \mathbf{1,737 \text{ vueltas}} \quad (41)$$

Tomamos, redondeando y agregando un conductor más como margen de seguridad. Entonces se llega a que el bobinado primario se constituye de tres vueltas, que a su vez tienen tres conductores en paralelo.

Ahora bien, se procede de igual manera con el bobinado secundario.

$$Z_s = \frac{0,016}{0,026} = \mathbf{0.062 \text{ vueltas}} \quad (42)$$

Se toma. Entonces, se llega a que el secundario está constituido de 57 vueltas de un conductor.





Una vez conocidas las vueltas de los bobinados, se procede a calcular la longitud necesaria de conductor Litz para conformar ambos bobinados.

El perímetro de la parte central del núcleo está dado por la siguiente expresión:

$$\text{perim} = 2 \pi (C1 + 0,9) = \mathbf{19,541 \text{ cm}} \quad (43)$$

Teniendo en cuenta que el conductor del primario se conforma de 3 conductores LITZ, se multiplica por 3 la longitud obtenida. Otro agente que se debe tener presente es que los conductores van trenzados, por lo cual agregamos a la longitud calculada un factor del 15 % de la longitud total obtenida.

$$L1 = 3 [3 \text{ perim} + (0,15 \cdot 3 \cdot \text{perim})] = \mathbf{202,246 \text{ cm}} \quad (44)$$

De la misma manera procedemos con el bobinado secundario. En este caso debemos considerar que además de ser muchas más vueltas que el bobinado secundario, estas se conforman en varias capas; sin embargo, no se deben poner conductores paralelos en este caso, por lo cual no habrá un trenzado que considerar.

Capa 1:

$$L21 = 19 \cdot \text{perim} = \mathbf{371,273 \text{ cm}} \quad (45)$$

Capa 2:

$$L22 = 19 \cdot (\text{perim} + d_{eq}) \text{perim} = \mathbf{374,73 \text{ cm}} \quad (46)$$

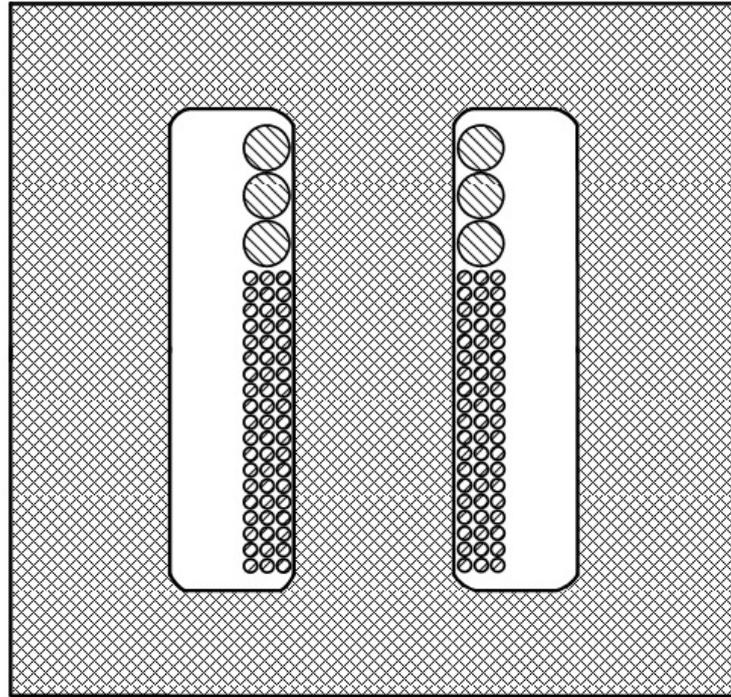
Capa 3:

$$L23 = 19 \cdot (\text{perim} + 2d_{eq}) \text{perim} = \mathbf{378,187 \text{ cm}} \quad (47)$$

Sumando cada una de las longitudes obtenidas en las respectivas capas y considerando un factor de 10% más, queda finalmente:



$$L2 = L21 + L22 + L23 + 0.1(L21 + L22 + L23) = 1,237 \cdot 10^3 \text{ cm} \quad (48)$$



Un factor que también hay que tener en cuenta es la longitud vertical total que van a ocupar los devanados para ver si es posible utilizar el bobinado en el núcleo con el que se pretende trabajar.

El diámetro equivalente del Litz del primario se calcula a continuación.

$$S_{eq1} = 3 S_{eq} = 0,078 \text{ cm}^2 \quad (49)$$

$$d_{eq1} = \sqrt{\frac{4 S_{eq1}}{\pi}} = 0,315 \text{ cm} \quad (50)$$

Entonces la longitud vertical aproximada que ocuparían los 3 conductores de primario sería:



$$3 d_{eq1} = 0,945 \text{ cm} \quad (51)$$

La longitud vertical aproximada que ocuparía el bobinado secundario se muestra a continuación.

$$19 d_{eq} = 3,457 \text{ cm} \quad (52)$$

PÉRDIDAS DE POTENCIA EN EL NÚCLEO

Ahora que se conoce la longitud de los bobinados, es posible calcular las pérdidas de potencia. En primera instancia obtenemos la resistencia del bobinado primario, para lo cual primero necesitamos conocer el valor de resistencia del conductor utilizado (AWG38) y la longitud media de conductor por vuelta.

$$L_{mp} = 2 \pi \left(\frac{C1 + 0.09}{2} + \frac{d_{eq1}}{2} \right) = 8,216 \frac{\text{cm}}{\text{vuelta}} \quad (53)$$

La resistividad por unidad de medida (cm) del conductor AWG38 es de. Se debe tener en cuenta que el conductor utilizado está conformado por 200 conductores AWG38 en PARALELO. Se utiliza la siguiente expresión.

$$R_p = \frac{N1 \cdot L_{mp} \cdot R_{AWG38}}{3 \cdot Z_{cond}} \quad (54)$$

En la expresión(54), el 3 corresponde a la cantidad de conductores colocados en paralelo y es la cantidad de hilos AWG38 que conforman el conductor utilizado.

$$R_p = \frac{N1 \cdot L_{mp} \cdot 0,028917}{3 \cdot 200} \quad (55)$$

Se procede de igual manera para el bobinado secundario. La longitud media de conductor por vuelta será:

$$L_{ms} = 2 \pi \left(\frac{C1 + 0.09}{2} + \frac{d_{eq}}{2} + d_{eq} \right) = 8,94 \frac{\text{cm}}{\text{vuelta}} \quad (56)$$



$$R_s = \frac{N2 \cdot L_{ms} \cdot 0,028917}{200} = 0,074 \frac{cm}{vuelta} \quad (57)$$

Resultados y Discusión

Conclusiones

Como puede verse en el trabajo, el convertidor CC-CC constituye una etapa fundamental en la conversión de la energía solar adquirida por el panel fotovoltaico para su posterior aprovechamiento en el bombeo de agua para todo el sistema de riego. Por esta razón, es necesario diseñar cada una de las etapas del mismo para posteriormente diseñar el filtro, inversor y la parte de control necesaria para la implementación eficiente de todo el sistema. También es importante resaltar que todo el sistema se planea hacer con tecnología de la región.

Referencias

1. NUÑEZ, R. O. y LIMA, C. A. (2011). *Proyecto de un convertidor CC-CC aislado elevador de tensión en configuración puente completo*. Proyecto final de carrera. Oberá: Facultad de ingeniería U.Na.M.
2. BARBI, IVO (2007)- *Proyecto de fontes chaveadas*. Florianópolis: Edición del autor.