



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ELÉCTRICO

Título del proyecto:

DISEÑO DEL BUSBAR DE UN CONVERTIDOR DE 5 NIVELES.

Alumno: Iñigo Pastor Matías

Tutores: Jesús López Taberna

Eduardo Burguete Archel

Pamplona, 31 de Mayo de 2013

Contenido

1. OBJETIVO	6
2. CONTEXTO	7
2.1 ¿Por qué calcular la inductancia?	7
2.1.1 Electromagnetismo	7
2.1.2 Inductancia	8
2.2 Multiniveles (3L-NPC y 5L-ANPC)	10
2.2.1 NPC Neutral Point Clamped Converter	10
2.2.2 Flying Capacitor (FC)	15
2.2.3 Five-Level Active Neutral Point Clamped (5L-ANPC)	21
2.2.4 Resumen y conclusiones	23
2.3 Cosas a tener en cuenta a la hora de diseñar un busbar	24
3. METODOLOGÍA EMPLEADA	31
3.1 Programas utilizados	31
3.2 Validación del programa	32
3.2.1 Dos conductores infinitos	33
3.2.2 Dos placas infinitas	33
3.2.3 Caso práctico: busbar real	34
4. INDUCTANCIAS EN CONVERTIDOR DE 3 NIVELES (NPC)	37
4.1 Lay-out	37
4.2 Diseño de placas	38
4.3 Camino de corriente y resultados	39
5. INDUCTANCIAS EN UN CONVERTIDOR DE 5 NIVELES (5L-ANPC)	40
5.1 Prototipo	46
5.1.1 Lay-out	46
5.1.2 Diseño de placas	52
5.1.3 Caminos de corriente y resultados	54
5.1.4 Influencia de IGBTs	55
5.1.5 Conexiones a las capacidades flotantes	56
5.1.6 Calculo experimental de la inductancia de las placas	60
5.2 Industrial	62
5.2.1 Lay-out	64

5.2.2	Diseño de placas.....	68
5.2.3	Caminos de corriente y resultados.....	71
5.2.4	Influencia de agujeros	72
5.2.5	Aumento de la distancia entre nivel superior e inferior de placas	73
5.2.6	Uso de otros materiales	74
5.2.7	Influencia de la frecuencia	74
6.	Conclusiones.....	75
7.	Bibliografía	76
8.	Anexo 1.....	77

Figuras

Fig. 1:	Esquema eléctrico de dos placas perfectamente superpuestas.	9
Fig. 2:	NPCs de 3 y 5 niveles de tensión.	11
Fig. 3:	Estados de conmutación de los niveles de tensión 2, 1 y 0 del 3L-NPC.	12
Fig. 4:	Estados de conmutación de los niveles 4, 3, 2, 1 y 0 del 5L-NPC.	15
Fig. 5:	Convertidor 5L-FC.	16
Fig. 6:	Estados de conmutación del 5L-FC.....	20
Fig. 7:	Convertidor 5L-ANPC de una capacidad flotante.	21
Fig. 8:	Convertidor 5L-ANPC de dos capacidades flotantes	22
Fig. 9:	Variación de inductancia en función del grosor (izquierda) y con ancho/grosor constante (derecha).	24
Fig. 10:	Busbar de convertidor de Airbus sin agujeros ni “aletas”	25
Fig. 11:	Busbar de convertidor de Airbus con agujeros y aletas.	26
Fig. 12:	Corriente circulando por la placa.	27
Fig. 13:	Placas por las que pasa la corriente.	29
Fig. 14:	Placas por las que no circula la corriente.	29
Fig. 15:	Montaje para el cálculo de inductancia del busbar de Airbus.	34
Fig. 16:	Montaje para el cálculo de la inductancia de los cables.	34
Fig. 17:	Ondas que se observan en el medidor de impedancias.....	35
Fig. 18:	Camino de corriente en el busbar de Airbus.....	35
Fig. 19:	Lay-out 1 NPC	37
Fig. 20:	Lay-out 2 NPC	37
Fig. 21:	Placas del lay-out 1 NPC.	38
Fig. 22:	Placas del lay-out 2 NPC.	38
Fig. 23:	Camino de corriente simulado en el NPC.....	39
Fig. 24:	Nivel 4 de tensión en el 5L-ANPC.	40
Fig. 25:	Nivel 3 de tensión en el 5L-ANPC.	41
Fig. 26:	Camino de corriente rojo 5L-ANPC (conmutación de nivel 4 a 3 de tensión).	41

Fig. 27: Nivel 0 de tensión del 5L-ANPC.	42
Fig. 28: Nivel 1 de tensión del 5L-ANPC.	42
Fig. 29: Camino de corriente verde del 5L-ANPC (conmutación 0-1).	43
Fig. 30: Nivel 2 de tensión del 5L-ANPC.	44
Fig. 31: Nivel 3 de tensión del 5L-ANPC.	44
Fig. 32: Camino de corriente azul del 5L-ANPC (conmutación 3-2).	45
Fig. 33: Convertidor 5L-ANPC de una capacidad flotante.	46
Fig. 34: Lay-out 1 del 5L-ANPC.	47
Fig. 35: Lay-out 2 del 5L-ANPC.	48
Fig. 36: Lay-out 3 del 5L-ANPC.	49
Fig. 37: Lay-out 4 del 5L-ANPC.	50
Fig. 38: Lay-out 5 del 5L-ANPC.	50
Fig. 39: Lay-out 6 del 5L-ANPC.	51
Fig. 40: Placas del lay-out 1 del 5L-ANPC.	52
Fig. 41: Placas del lay-out 2 del 5L-ANPC.	52
Fig. 42: Placas del lay-out 3 del 5L-ANPC.	53
Fig. 43: Caminos de corriente simulados en el 5L-ANPC.....	54
Fig. 44: Lay-out 2 con la conexión de los IGBTs.	55
Fig. 45: 5L-ANPC con conexión a una CF.	56
Fig. 46: 5L-ANPC con conexión a dos CF.	57
Fig. 47: Camino de corriente verde en el 5L-ANPC de una CF.	58
Fig. 48: Camino de corriente verde en el 5L-ANPC de dos CF.....	59
Fig. 49: Conexión del busbar de 1CF al medidor de impedancias.....	60
Fig. 50: Conexión del busbar de 2CF al medidor de impedancias.....	61
Fig. 51: IGBT (5SNA1200G450300) utilizado para el convertidor real.	62
Fig. 52: Circuito eléctrico del IGBT (5SNA1200G450300).....	63
Fig. 53: Lay-out 1 del 5L-ANPC industrial.	64
Fig. 54: Lay-out 2 del 5L-ANPC industrial.	65
Fig. 55: Lay-out 3 del 5L-ANPC industrial.	66
Fig. 56: Lay-out 4 del 5L-ANPC industrial.	67
Fig. 57: Diseño de placas del lay-out 1 del 5L-ANPC industrial.	68
Fig. 58: Diseño de placas del Lay-out 2 del 5L-ANPC industrial.	69
Fig. 59: Diseño de placas del Lay-out 3 del 5L-ANPC industrial.	69
Fig. 60: Diseño de placas del Lay-out 4 del 5L-ANPC industrial.	70
Fig. 61: Caminos de corriente simulados en el 5L-ANPC industrial.	71
Fig. 62: Placas del lay-out 1 del 5L-ANPC con agujeros.....	72
Fig. 63: Gráfica de variación de inductancia en función de la distancia entre nivel superior e inferior.	73
Fig. 64: Diseño del convertidor con dos capacidades flotantes.....	77
Fig. 65: Diseño del convertidor con una capacidad flotante.....	77

Tablas

Tabla 1: Estados de conmutación del 3L-NPC.....	12
Tabla 2: Estados de conmutación de un 5L-NPC.....	13
Tabla 3: Estados de conmutación del 5L-FC y efecto sobre las capacidades flotantes.	17
Tabla 4: Estados de conmutación del 5L-ANPC de 1 capacidad flotante.....	22
Tabla 5: Estados de conmutación del 5L-ANPC de 2 capacidades flotantes.....	23
Tabla 6: inductancia según el número y la colocación de agujeros.....	25
Tabla 7: comparación de inductancia de busbar de Airbus con y sin agujeros.	26
Tabla 8: Inductancia de una placa y dos placas superpuestas.....	27
Tabla 9: Influencia de la superposición de placas.....	28
Tabla 10: diferencia de inductancia entre busbar completo y solo con las placas que conducen.	30
Tabla 11: Comparativa entre inductancia simulada y teórica de dos conductores infinitos.....	33
Tabla 12: Comparativa entre inductancia simulada y teórica de dos placas infinitas.	33
Tabla 13: Comparativa de inductancia entre medición experimental y simulación del busbar de Airbus.	35
Tabla 14: Inductancias resultantes en el NPC.	39
Tabla 15: Comparativa de las inductancias de los distintos lay-out en el 5L-ANPC.....	54
Tabla 16: Inductancias resultantes en el lay-out 2 del 5L-ANPC con y sin IGBTs.....	55
Tabla 17: Inductancias resultantes en el 5L-ANPC con conexiones a una y dos CF y sin conexión a las mismas.	57
Tabla 18: Resultados experimentales del busbar de 1CF.....	61
Tabla 19: Resultados experimentales del busbar de 2CF.....	62
Tabla 20: Inductancias resultantes en el 5L-ANPC industrial para los dos caminos de corriente y para cada lay-out.....	71
Tabla 21: Inductancia resultantes en el 5L-ANPC industrial al añadirle los agujeros al lay-out1.	72
Tabla 22: Inductancia resultantes en el 5L-ANPC industrial lay-out 1 separando los niveles superior e inferior.....	73
Tabla 23: Inductancia resultantes en el 5L-ANPC industrial lay-out 1 cambiando el material de las placas.....	74
Tabla 24: Inductancia resultantes en el 5L-ANPC industrial lay-out 1variando la frecuencia de la corriente.....	74

1. OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es estudiar las inductancias parásitas de los busbar de distintas topologías de convertidores. En concreto, se quiere cuantificar la inductancia de los busbar de convertidores multinivel.

Un convertidor multinivel emplea más semiconductores que un convertidor binivel clásico o célula elemental de conmutación. Por ello, el busbar comprende más placas conductoras y el cambio de la corriente en las conmutaciones puede comprender un mayor número de semiconductores.

Debido a las razones anteriores, es de esperar que los convertidores multinivel puedan presentar una inductancia relativamente alta que pueda limitar su funcionamiento. Por lo tanto, es interesante calcular dichas inductancias parásitas.

Para el cálculo de estas inductancias parásitas se emplearán programas de elementos finitos.

Se prestará especial atención al convertidor de 5 niveles (5L-ANPC), que se presenta más adelante en este documento.

2. CONTEXTO

2.1 ¿Por qué calcular la inductancia?

2.1.1 Electromagnetismo

Para comprender bien la importancia que tiene minimizar la inductancia parásita, es necesario conocer alguna noción básica sobre electromagnetismo.

Cuando se estudian campos eléctricos de baja frecuencia o estáticos (a partir de 20-30kHz el campo eléctrico y magnético no se pueden separar y forman una única forma de onda electromagnética), los campos eléctrico y magnético están desacoplados de tal manera que uno no influye en el otro. En 1831, Faraday descubrió que un campo magnético puede producir una corriente en un circuito eléctrico cerrado cuando el flujo que atraviesa ese circuito varía en el tiempo.

La relación entre la diferencia de potencial, también llamada fuerza electromotriz, inducida en el circuito y el flujo de campo magnético es:

$$V_{emf} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

El signo de esta fuerza electromotriz viene dado por la **ley de Lenz**: el signo de la tensión inducida es tal que tiende a establecer una corriente que se oponga a la variación de flujo que la produce.

Por lo tanto, se demuestra que el campo eléctrico y el magnético están interrelacionados entre sí por la **Ley de Faraday**.

Al igual que Faraday, Maxwell recogió la **Ley de Amperè** y añadió las ecuaciones de Maxwell dando lugar a la ley de Amperè-Maxwell ($\oint H \cdot dl = i_{neta}$ siendo H la intensidad de campo magnética), que dice que un campo eléctrico variante con el tiempo produce un campo magnético también variante con el tiempo. Éste a su vez, por la Ley de Faraday, crea un campo magnético, que a su vez crea un campo eléctrico y así sucesivamente.

2.1.2 Inductancia

Es la propiedad de un circuito mediante el cual, un cambio en la corriente provoca un cambio en el voltaje del mismo circuito. Dicho desde un punto de vista más electromagnético, es la relación que existe entre el flujo magnético total y la corriente que lo genera.

$$L = \frac{\Psi}{i}$$

En una placa se producen dos inductancias, una es la inductancia provocada por el paso de corriente a través de la misma, y la otra es la inductancia que provocan las otras placas sobre ella. Estas inductancias son provocadas por el fenómeno llamado **acoplamiento magnético**.

Por lo tanto, la inductancia de cada una de las placas que componen el busbar será:

- Flujo debido a la corriente que circula por la propia placa (inductancia magnética).

$$L_{p1} = \frac{N_{p1}^2}{\mathfrak{R}_{p1}}$$

- Flujo debido a la corriente que circula por la propia placa y se cierra por el aire (inductancia de fugas).

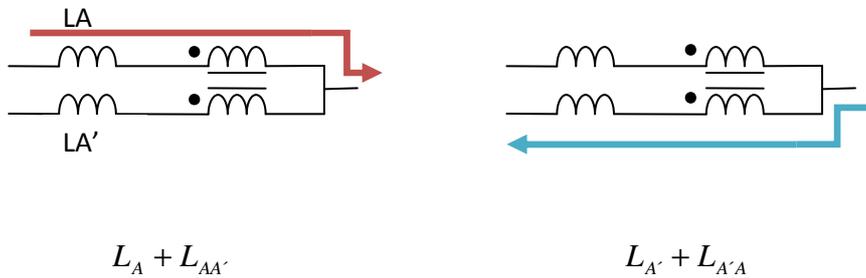
$$L_{f1} = \frac{N_{p1}^2}{\mathfrak{R}_{a1}}$$

- Flujo debido a la corriente que circula por el resto de placas (inductancias mutuas). De tal manera que cada placa tendrá tantas inductancias mutuas como placas compongan el busbar menos una.

$$L_{p1,p2\dots n-1} = \frac{N_1 \cdot N_{2\dots n-1}}{\mathfrak{R}_{p1}}$$

(Siendo “n” el número de placas que componen el busbar y N el número de espiras (en nuestro caso 1))

Otra de las cosas importantes a tener en cuenta es que cuando dos placas están perfectamente superpuestas, las inductancias mutuas se anulan:



Si sumamos ambos caminos de corriente:

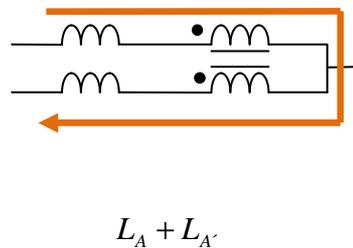


Fig. 1: Esquema eléctrico de dos placas perfectamente superpuestas.

2.2 Multiniveles (3L-NPC y 5L-ANPC)

En los últimos años, se ha logrado aumentar la capacidad de los semiconductores de potencia para conducir y conmutar elevados niveles de tensión y corriente. Este hecho permite trabajar a los convertidores de potencia en aplicaciones que antes eran inalcanzables. Sin embargo, para algunas aplicaciones sigue siendo insuficiente y se requiere trabajar a una tensión mayor de la que soportan los semiconductores. Una solución para alcanzar una mayor tensión con los mismos semiconductores es el empleo de convertidores multinivel, que permiten trabajar a una tensión mayor que la que soportan los semiconductores.

Los convertidores multinivel son dispositivos electrónicos, que hacen uso de varios niveles de tensión o corriente, capaces de transformar la energía eléctrica AC/AC, AC/DC, DC/AC o DC/DC.

En los últimos 20 años se han propuesto una gran cantidad de convertidores multinivel. Por ejemplo, unas topologías muy conocidas son el convertidor de tres niveles NPC (3L-NPC, Neutral Point Clamped) y el Flying Capacitor.

El 3L-NPC ha sido el convertidor que más aceptación ha tenido por parte de la industria. A pesar de mejorar las prestaciones de otros convertidores como el de dos niveles de tensión (una mejor onda de salida, menores requerimientos de filtros en la salida, mayor densidad de potencia etc.) su topología es bastante sencilla.

2.2.1 NPC Neutral Point Clamped Converter

El convertidor NPC de tres niveles es uno de los convertidores multinivel con mayor aceptación por parte de la industria por ser probablemente el convertidor multinivel más sencillo.

Este convertidor conecta mediante diodos, distintos puntos intermedios del bus a las ramas de semiconductores que van desde la salida AC a los terminales de mayor tensión y de menor tensión del bus. En la Fig. 2 se muestra el convertidor NPC para el caso de 3 y 5 niveles de tensión:

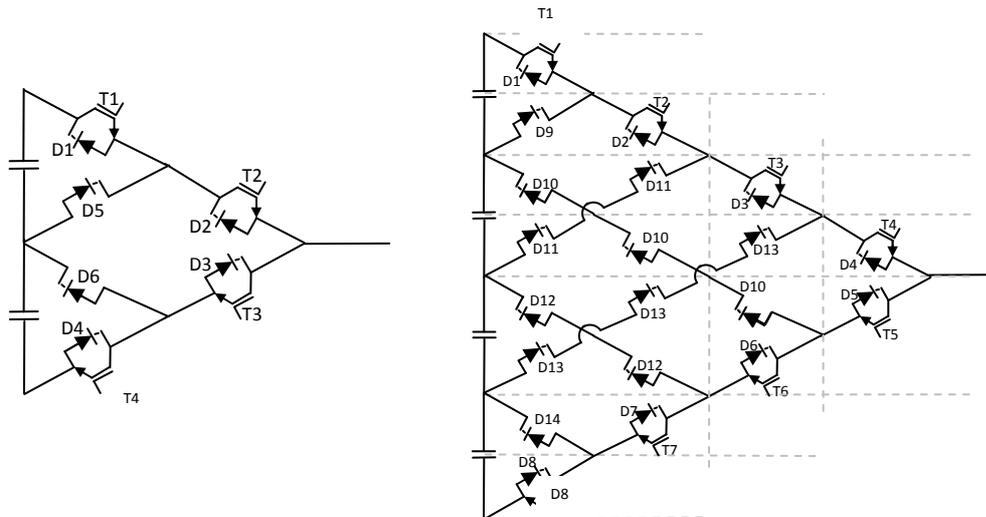


Fig. 2: NPCs de 3 y 5 niveles de tensión.

Gracias a la representación utilizada, queda claro que para el convertidor NPC de 5 niveles hace falta serializar dos pares (D11 y D12) y dos tríos (D10 y D13) de diodos por fase, o disponer de diodos de distinta tensión de bloqueo, de 1 nivel de tensión, de 2 niveles de tensión (D11 y D12) y de 3 niveles de tensión (D10 y D13) o que haya semiconductores sobredimensionados.

La filosofía de los convertidores NPC es proporcionar dos caminos alternativos, cada uno para un sentido de corriente, para cada nivel de tensión intermedio del bus mediante la conexión de diodos entre los puntos intermedios del bus y las ramas principales.

El funcionamiento de estos convertidores es tan simple como habilitar los dos caminos alternativos antes citados para el nivel de tensión que se quiera tener a la salida. Es decir, para un nivel de tensión, los interruptores que tienen que estar encendidos son los interruptores que quedan entre el terminal de tensión AC y los puntos de conexión entre las ramas de diodos para ese nivel y las ramas principales. Para los niveles de tensión máxima y mínima se encienden los interruptores la rama principal positiva o de la rama principal negativa respectivamente.

Uno de los principales problemas del NPC es que requiere controlar la tensión de las capacidades de bus. Esto se puede conseguir de dos maneras distintas: mediante modulación o con hardware adicional. Se suele tratar de evitar la opción del hardware adicional, ya que aumenta el número de componentes, el tamaño y coste del convertidor.

Los estados de conmutación del 3L-NPC se pueden ver en la Tabla 1. Los interruptores T1 y T3 son complementarios, como también lo son los interruptores T2 y T4, para evitar que algún interruptor soporte una tensión mayor que su nominal. Por la misma razón, los interruptores T1 y T4 no pueden estar encendidos a la vez.

3L-NPC	T1	T2	T3	T4
Nivel 2	1	1	0	0
Nivel 1	0	1	1	0
Nivel 0	0	0	1	1

Tabla 1: Estados de conmutación del 3L-NPC.

En la Fig. 3 se muestran los estados de conmutación del 3L-NPC:

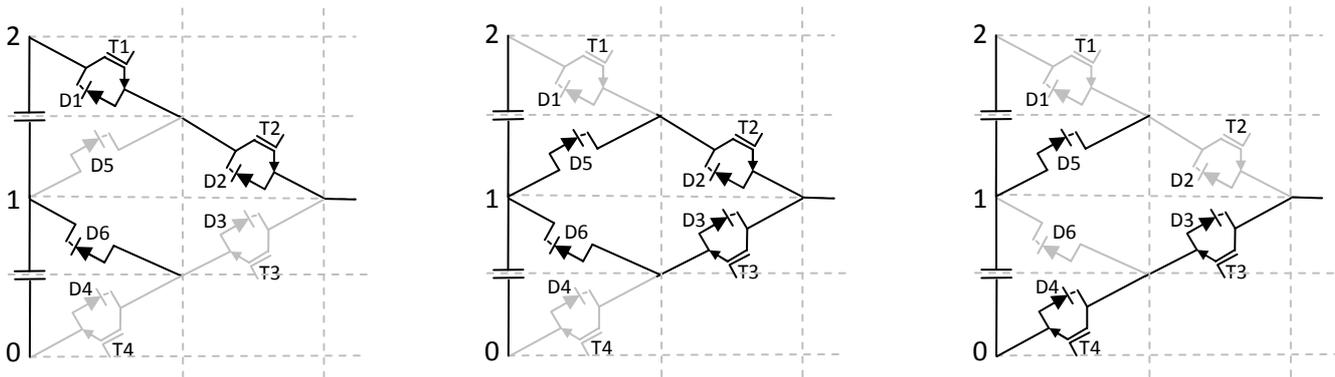


Fig. 3: Estados de conmutación de los niveles de tensión 2, 1 y 0 del 3L-NPC.

Para el nivel de tensión 2, se encienden los interruptores T1 y T2. En función de que la corriente sea positiva o negativa, conducirán los interruptores T1 y T2 o conducirán los diodos D1 y D2. El diodo D6 no soporta tensión.

Para el nivel de tensión 1, se encienden los interruptores T2 y T3. En función de que la corriente sea positiva o negativa, conducirán el interruptor T2 y el diodo D5 o conducirán el interruptor T3 y el diodo D6. Los diodos D5 y D6 no soportan tensión.

Par el nivel de tensión 0, se encienden los interruptores T3 y T4. En función de que la corriente sea positiva o negativa, conducirán los interruptores T3 y T4 o conducirán los diodos D3 y D4. El diodo D5 no soporta tensión.

Solo están permitidas las conmutaciones entre niveles de tensión adyacentes, entre los niveles de tensión 2 y 1, y entre los niveles de tensión 1 y 0. Las conmutaciones entre los niveles de tensión 2 y 0 no son realizables, ya que no se puede asegurar que los interruptores T3 y T4 vayan a soportar la misma tensión de bloqueo y el diodo D6 no vaya a soportar tensión o que los interruptores T1 y T2 vayan a soportar la misma tensión de bloqueo y el diodo D5 no vaya a soportar tensión, en función de si se ha conmutado del nivel de tensión 0 al 2 o se ha conmutado del nivel de tensión 2 al 0 respectivamente.

Los semiconductores del 3L-NPC no conmutan y conducen la corriente de la misma manera. Por ejemplo, para una corriente positiva, el interruptor T1 conduce solo para el nivel de tensión 2, mientras que el interruptor T2 conduce para los niveles de tensión 2 y 1. Las conmutaciones tampoco son iguales para todos los semiconductores.

Por tanto, las pérdidas en los semiconductores 3L-NPC no son uniformes y en consecuencia, habrá un (unos) semiconductores que alcance la temperatura máxima de unión antes que los demás semiconductores, limitando las condiciones de funcionamiento del convertidor.

El 3L-NPC requiere el control de un punto medio de bus. Este control, para un sistema trifásico senoidal es factible mediante modulación para todas las condiciones de operación, aunque para algunos casos aparecerá un rizado en la tensión del punto medio de bus con una frecuencia tres veces mayor que la frecuencia fundamental. Para realizar este control se hace uso de los vectores de tensión redundantes que permiten inyectar una corriente de signo contrario en el punto medio del bus. Es decir, se usa la tensión homopolar para lograr el equilibrado del punto medio del bus.

Los estados de conmutación de un NPC de 5 niveles se pueden ver en la Tabla 2.

5L-NPC	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Nivel 4	1	1	1	1	0	0	0	0
Nivel 3	0	1	1	1	1	0	0	0
Nivel 2	0	0	1	1	1	1	0	0
Nivel 1	0	0	0	1	1	1	1	0
Nivel 0	0	0	0	0	1	1	1	1

Tabla 2: Estados de conmutación de un 5L-NPC.

Para el nivel de tensión 4, se encienden los interruptores T1, T2, T3 y T4. En función de que la corriente sea positiva o negativa, conducirán los interruptores T1, T2, T3 y T4 o conducirán los diodos D1, D2, D3 y D4. Los diodos D10, D12 y D14 no soportan tensión.

Para el nivel de tensión 3, se encienden los interruptores T2, T3, T4 y T5. En función de que la corriente sea positiva o negativa, conducirán los interruptores T2, T3, T4 y T5 o conducirán los diodos D2, D3, D4 y D5. Los diodos D9, D10, D12 y D14 no soportan tensión.

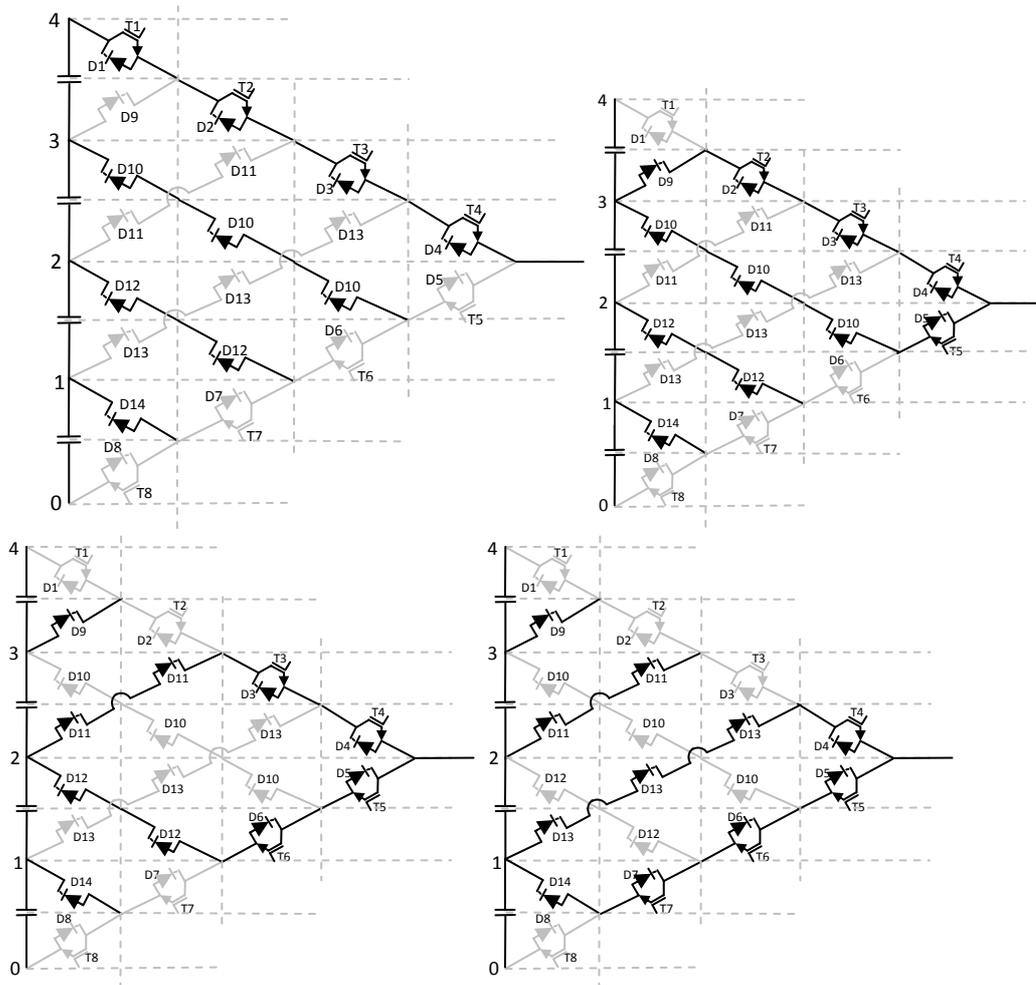
Para el nivel de tensión 2, se encienden los interruptores T3, T4, T5 y T6. En función de que la corriente sea positiva o negativa, conducirán los interruptores T3, T4, T5 y T6 o conducirán los diodos D3, D4, D5 y D6. Los diodos D9, D11, D12 y D14 no soportan tensión.

Para el nivel de tensión 1, se encienden los interruptores T4, T5, T6 y T7. En función de que la corriente sea positiva o negativa, conducirán los interruptores T4, T5, T6 y T7 o conducirán los diodos D4, D5, D6 y D7. Los diodos D9, D11, D13 y D14 no soportan tensión.

Para el nivel de tensión 0, se encienden los interruptores T5, T6, T7 y T8. En función de que la corriente sea positiva o negativa, conducirán los interruptores T5, T6, T7 y T8 o conducirán los diodos D5, D6, D7 y D8. Los diodos D9, D11 y D13 no soportan tensión.

Solo están permitidas las conmutaciones entre niveles de tensión adyacentes. Las conmutaciones entre niveles de tensión no adyacentes no son realizables, ya que no se puede asegurar que los interruptores vayan a soportar la misma tensión de bloqueo y que algún diodo de los que no soportaban tensión no vaya a hacerlo.

En la Fig. 4 de la siguiente página se muestran los estados de conmutación del 5L-NPC:



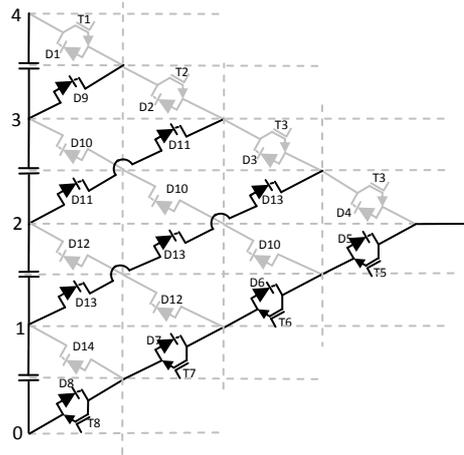


Fig. 4: Estados de conmutación de los niveles 4, 3, 2, 1 y 0 del 5L-NPC.

El 5L-NPC requiere el control de tres puntos medios de bus. Este control, ya no es tan sencillo como para el convertidor de 3 niveles. Para un sistema trifásico senoidal no es factible mediante modulación para todas las condiciones de operación. En caso de tener un sistema back to back trifásico con potencia activa entrante y saliente iguales, sí que es posible equilibrar las tensiones de los puntos medios del bus, pero para algunas condiciones de operación el equilibrado de las tensiones del bus se consigue a costa de empeorar el THD (el valor de los armónicos, contra más niveles tenga el convertidor menor es el número THD y por lo tanto más limpia es la onda), especialmente del lado con mayor índice de modulación.

2.2.2 Flying Capacitor (FC)

El convertidor FC (Flying Capacitor) de n niveles de tensión se compone de $n-1$ células conectadas en serie formadas por una capacidad a la que se conecta a cada semiconductor con diodo en anti paralelo.

Este convertidor se caracteriza por obtener los n niveles de tensión del convertidor sumando y restando la tensión de capacidades flotantes. En concreto, un FC de n niveles tiene $n-2$ capacidades flotantes y son de $n-2$, $n-1$, ... 1 niveles de tensión.

El FC de 5 niveles se puede ver en la Fig. 5:

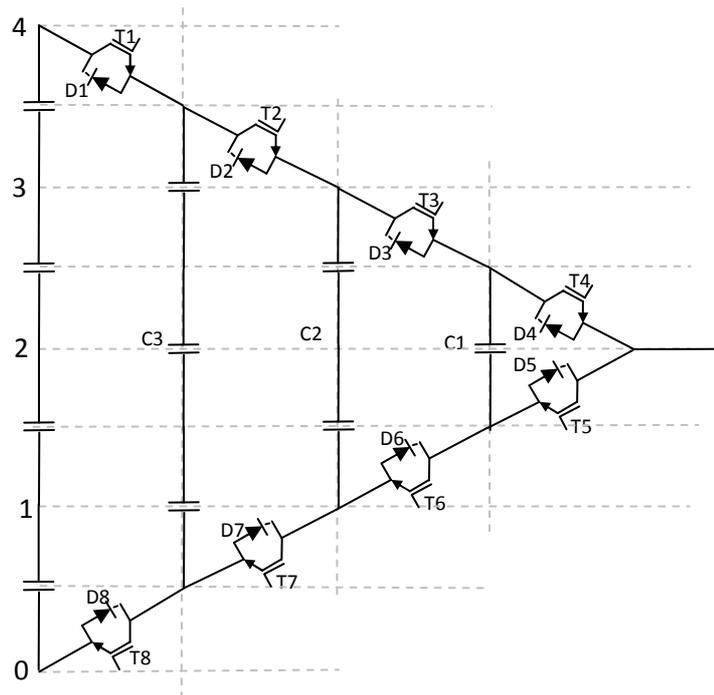


Fig. 5: Convertidor 5L-FC.

Los interruptores de cada célula del FC son complementarios (por ejemplo para el 5L-FC, T1 y T8, T2 y T7, T3 y T6, y T4 y T5). Para obtener un nivel de tensión j hay que encender j interruptores cualesquiera de la rama principal positiva. El número de estados redundantes para un nivel de tensión $j \in [0, n-1]$ de un convertidor de n niveles es $\binom{n-1}{j}$

$$v_0 = \frac{V_{BUS}}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} T_i$$

Para un mismo nivel de tensión, según los interruptores que se hayan encendido se tendrá un efecto en la carga y descarga de las capacidades distinto. Para cada nivel de tensión existen el mismo número de estados redundantes que afectan a cada capacidad. Además, la mitad de los estados redundantes de cada nivel que afectan a una capacidad tienden a cargar esa capacidad, mientras que la otra mitad tiende a descargarla. De esta manera, queda claro que existen estados redundantes para el control de las capacidades flotantes del convertidor.

En la Tabla 3 se pueden ver los estados de conmutación para el 5L-FC. Se ha añadido la suma de los interruptores de la rama principal positiva y el efecto de carga (+) o descarga (-) que tendría una corriente saliente sobre las capacidades flotantes.

5L-FC	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	$\sum[T1,T4]$	Efecto Capacidades
Nivel 4	1	1	1	1	0	0	0	0	4	-
Nivel 3	0	1	1	1	1	0	0	0	3	C1+
Nivel 3	1	0	1	1	0	1	0	0	3	C1-,C2+
Nivel 3	1	1	0	1	0	0	1	0	3	C2-,C3+
Nivel 3	1	1	1	0	0	0	0	1	3	C3-
Nivel 2	0	0	1	1	1	1	0	0	2	C2+
Nivel 2	0	1	0	1	1	0	1	0	2	C1+,C2-,C3+
Nivel 2	0	1	1	0	1	0	0	1	2	C1+,C3-
Nivel 2	1	0	0	1	0	1	1	0	2	C1-,C3+
Nivel 2	1	0	1	0	0	1	0	1	2	C1-,C2+,C3-
Nivel 2	1	1	0	0	0	0	1	1	2	C2-
Nivel 1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	C1-
Nivel 1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	C1+,C2-
Nivel 1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	C2+,C3-
Nivel 1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	C3+
Nivel 0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	-

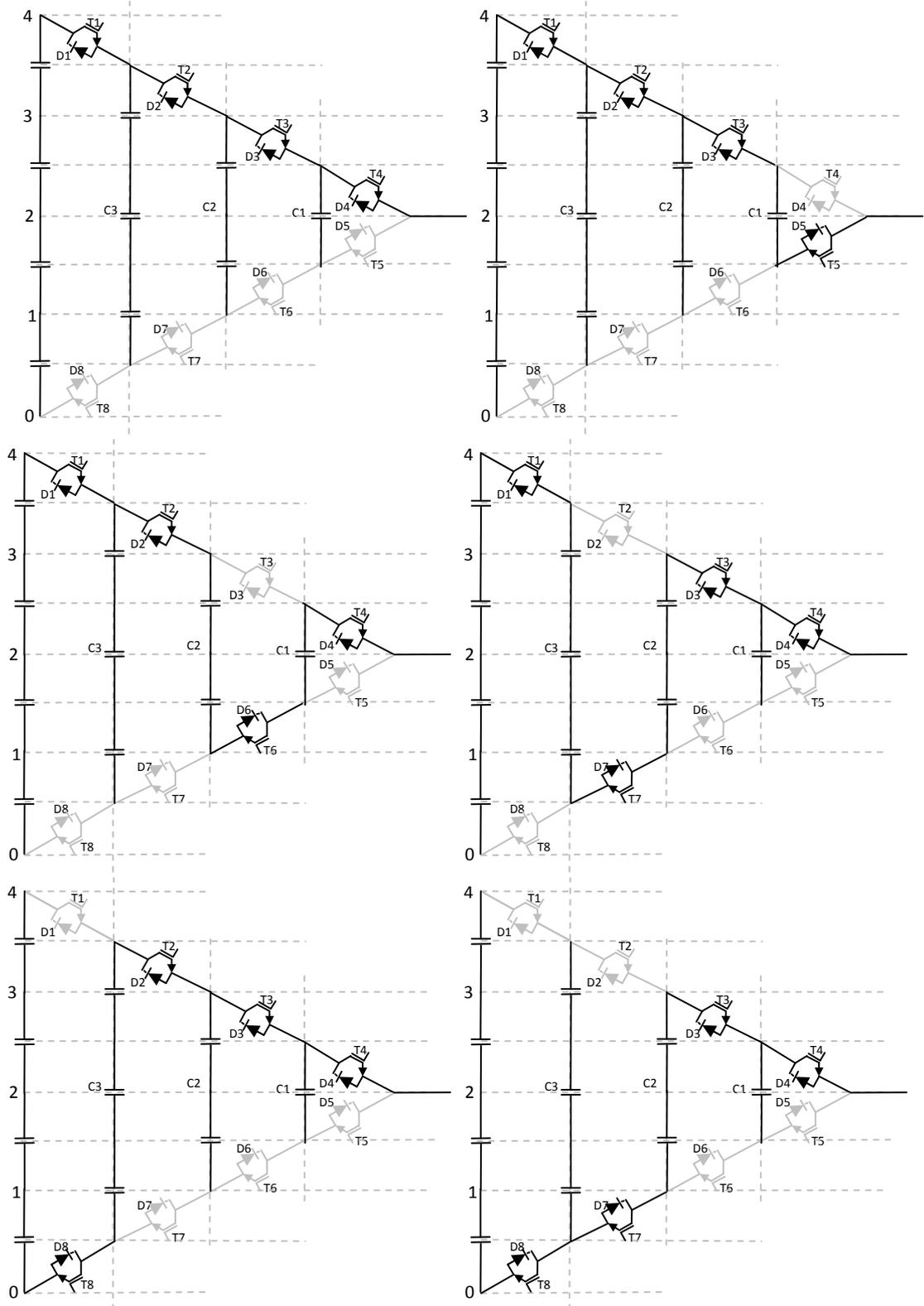
Tabla 3: Estados de conmutación del 5L-FC y efecto sobre las capacidades flotantes.

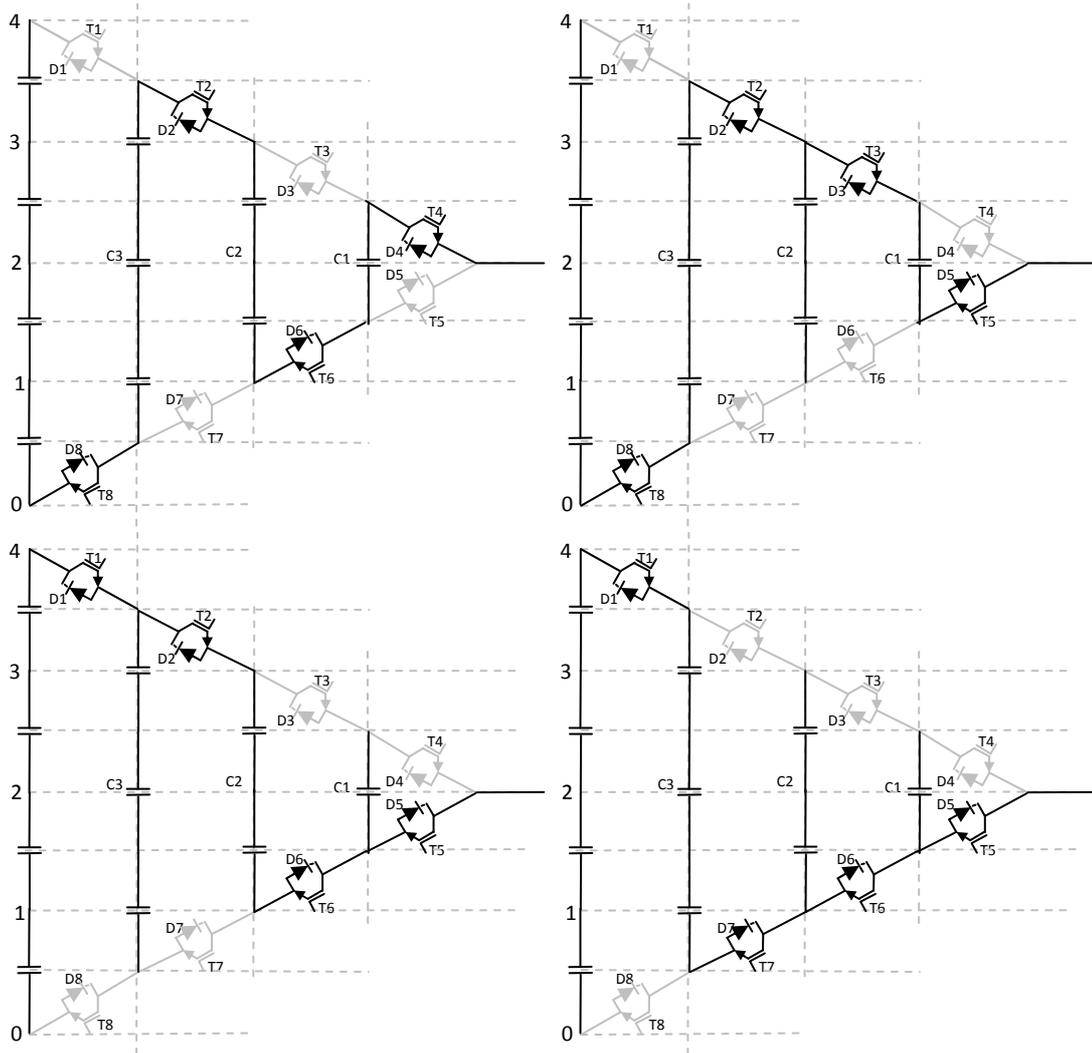
Una ventaja del FC es que no requiere controlar ningún punto medio de bus, pero a cambio necesita controlar la tensión de n-2 capacidades flotantes para un convertidor de n niveles.

Con una modulación adecuada se puede controlar la tensión de las capacidades flotantes. Lo ideal es conmutar en una misma secuencia las células de las que se compone el FC.

Así, se puede llegar a obtener una frecuencia aparente a la salida n-1 veces mayor que la frecuencia de conmutación. Comparando el 5L-FC con el 5L-NPC, para una misma frecuencia de salida, los interruptores del flying capacitor conmutarían a una frecuencia n-1 veces menor.

El mayor problema de este convertidor es que al aumentar de niveles el tamaño de las capacidades aumenta, haciendo el convertidor más voluminoso y encareciéndolo. Por ello, el FC suele ser inviable a partir de 4 o 5 niveles de tensión.





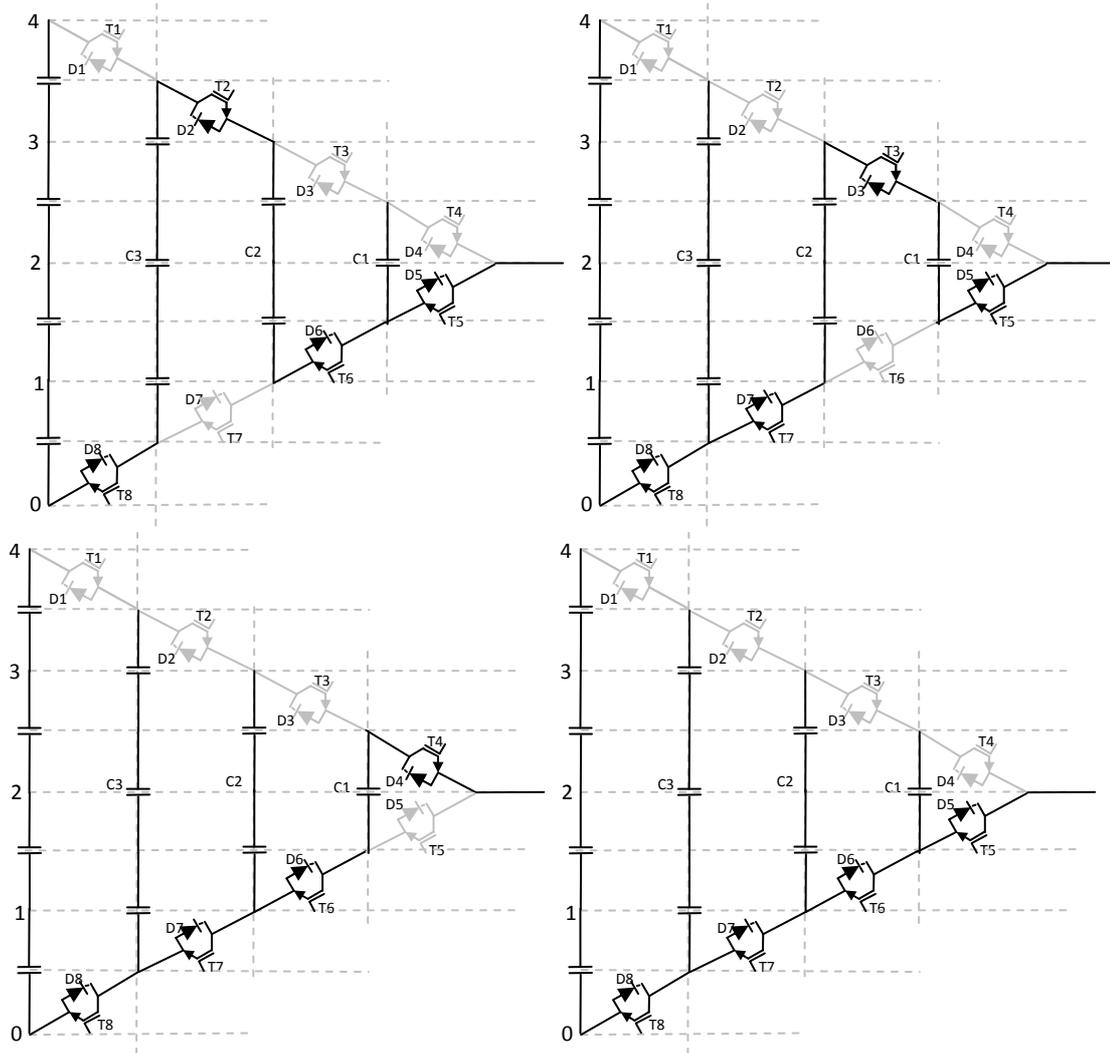


Fig. 6: Estados de conmutación del 5L-FC

2.2.3 Five-Level Active Neutral Point Clamped (5L-ANPC)

El convertidor 5L-ANPC es un convertidor que trata de aprovechar las ventajas del NPC como del FC. Por una parte, hace uso de un punto medio de bus, que posibilita la obtención de nuevos niveles de tensión pudiéndose controlar la tensión del mismo mediante la modulación. Por otra parte, utiliza alguna capacidad flotante para la obtención de más niveles de tensión. Además, si se compara el volumen requerido por las capacidades flotantes del 5L-ANPC con el volumen de las capacidades flotantes del 5L-FC, se observa que es mucho menor.

Existen diferentes estructuras que pueden englobarse dentro del convertidor 5L-ANPC. En la Fig. 7 y en la Fig. 8 se muestran dos estructuras de 5L-ANPC, que denominaremos 5L-ANPC de una capacidad flotante y 5L-ANPC de dos capacidades flotantes respectivamente, debido al número de capacidades flotantes que usa cada estructura:

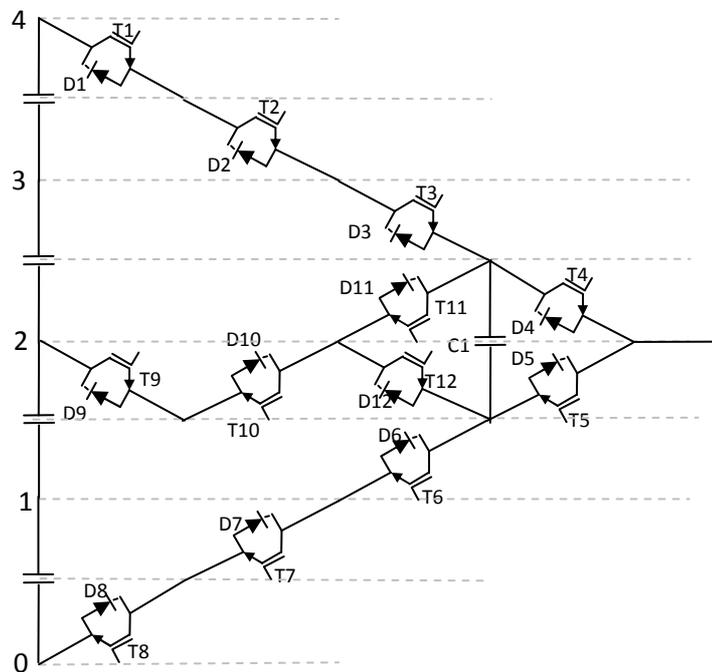


Fig. 7: Convertidor 5L-ANPC de una capacidad flotante.

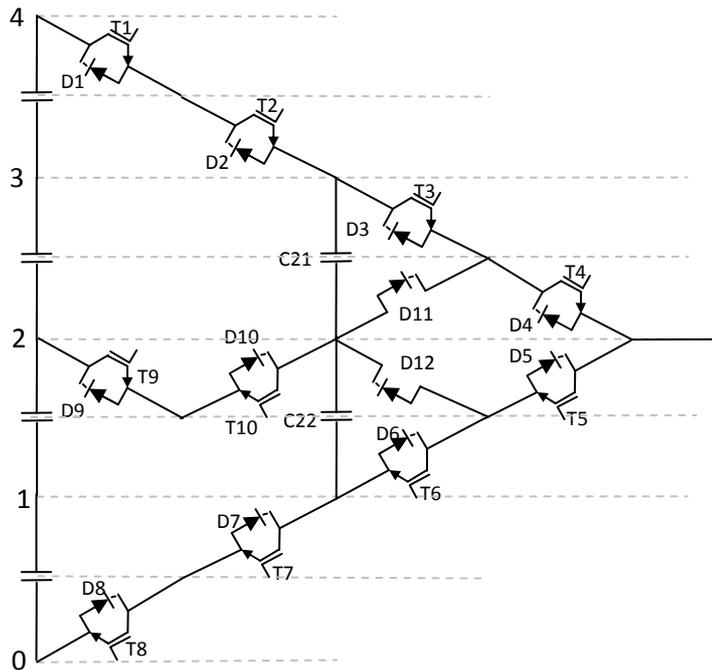


Fig. 8: Convertidor 5L-ANPC de dos capacidades flotantes

El convertidor dispone de redundancias internas, es decir, que se puede obtener un mismo nivel de tensión con distintos estados de conmutación de los IGBTs. Los niveles de tensión 1 y 3 se pueden obtener de dos maneras distintas y cada una de ellas tiene un efecto contrario en la carga y descarga de la/s capacidades flotantes, lo que permite el control de la tensión de las mismas.

Estados de conmutación de 1 CF (Tabla 4) y 2 CF (Tabla 5).

5L-ANPC (1CF)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Nivel 4	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1
Nivel 3	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1
Nivel 3	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1
Nivel 2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1
Nivel 2	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0
Nivel 1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
Nivel 1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0
Nivel 0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0

Tabla 4: Estados de conmutación del 5L-ANPC de 1 capacidad flotante.

5L-ANPC (2CF)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Nivel 4	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
Nivel 3	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0
Nivel 3	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
Nivel 2	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1
Nivel 1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
Nivel 1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1
Nivel 0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1

Tabla 5: Estados de conmutación del 5L-ANPC de 2 capacidades flotantes.

2.2.4 Resumen y conclusiones

NPC

- Ventajas:
 - No requiere capacidades flotantes, por lo tanto ocupa menos espacio, es más fácil de construir y de controlar, ya que no hay que controlar capacidades flotantes.
 - Solo utiliza 2 diodos más para 3 niveles.
- Desventajas:
 - Hay que controlar un punto medio (aunque se puede controlar con la modulación).
 - Es difícil subir niveles ya que necesita control de dos puntos más el punto medio, para ello, es necesario un hardware (IGBTs) adicional.

FC

- Ventajas:
 - Fácil aumentar niveles.
 - No tiene que controlar punto medio.
 - Multiplica la frecuencia de salida x0.
- Desventajas:
 - Requiere capacidades flotantes, por lo tanto aumenta el volumen del convertidor, de hecho, no es recomendable realizar convertidores de más de 5 niveles ya que su tamaño sería desproporcionado.
 - Es necesario controlar la tensión de las capacidades flotantes.

5L-ANPC:

- **Ventajas:**
 - Tiene un punto medio controlable y solo una capacidad flotante (ventajas respecto al 5L-NPC y 5L-FC).
 - Multiplica la frecuencia x2.
- **Desventajas:**
 - La capacidad flotante hace que aumente el tamaño y aunque sea sencillo, es necesario controlar un punto medio.

2.3 Cosas a tener en cuenta a la hora de diseñar un busbar

Como ya he comentado al inicio de este documento, una de las formas más comunes de evitar las inductancias parásitas es mediante la estructura del busbar. Para ello realizaré una serie de simulaciones con un busbar muy sencillo.

En un principio, sin necesidad de realizar ninguna simulación, se sabe que cuanto más finas sean las placas y menos cobre tengan, menor será la inductancia. Pero las placas no pueden ser todo lo finas que queramos ya que limitaría mucho la corriente que puede circular por ellas y empeoraría su comportamiento térmico y mecánico.

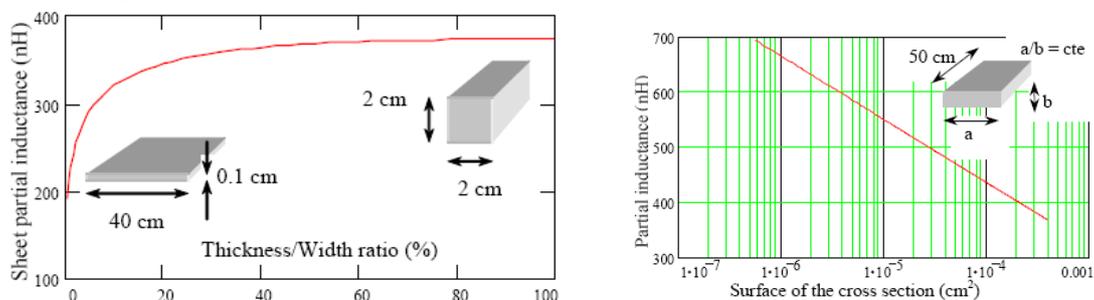


Fig. 9: Variación de inductancia en función del grosor (izquierda) y con ancho/grosor constante (derecha).

1. La primera simulación que se realiza es el cálculo de la inductancia de dos placas cortocircuitadas por uno de sus lados (formando una U) y se hacen distintas situaciones con y sin agujeros.

Para ello se dibujan dos placas de 40x40 cm, con un grosor de 1mm cada una, separadas entre sí 1mm y cortocircuitadas por un lado. Se hace circular por ambas placas una corriente senoidal de

10A de amplitud y una frecuencia de 1MHz y se realizan distintos ensayos con la finalidad de comparar las distintas inductancias:

Ambas placas sin agujeros	1,9789 nH
Placa superior con agujeros en el centro	1,9891 nH
Placa inferior con agujeros en el centro	1,9897 nH
Placa inferior con agujeros en los bordes	1,9905 nH
Ambas placas con agujeros en el centro	1,9911 nH
Ambas placas con agujeros en las esquinas	1,9922 nH

Tabla 6: inductancia según el número y la colocación de agujeros.

A parte de estas simulaciones con placas sencillas, también se realiza la comparativa (sin agujeros y con agujeros) mediante el busbar de Airbus utilizado en el apartado de validación del programa.

Se hace una primera simulación con el busbar sin agujeros. Se le introduce una corriente senoidal de 10A de amplitud y una frecuencia de 1MHz. El camino de corriente es el mismo que en el apartado de validación del programa:

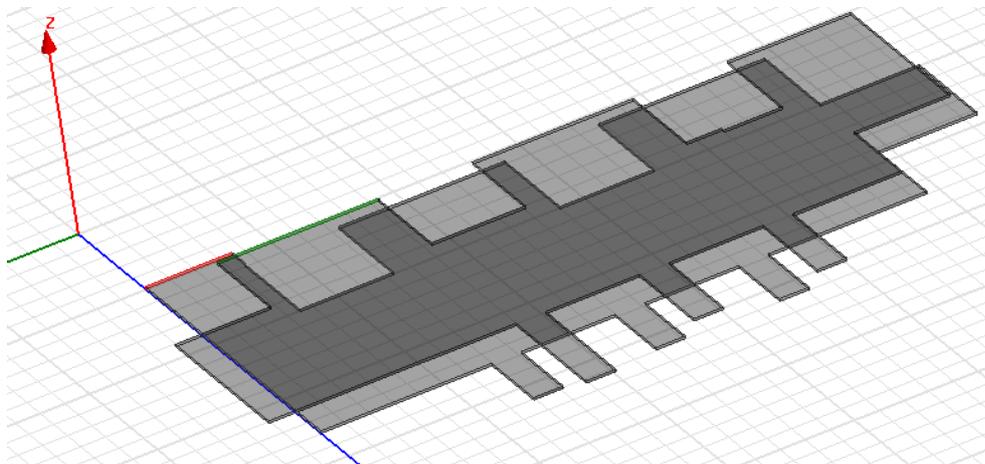


Fig. 10: Busbar de convertidor de Airbus sin agujeros ni "aletas".

A continuación se simula con las mismas condiciones que la anterior pero esta vez con el busbar completo:

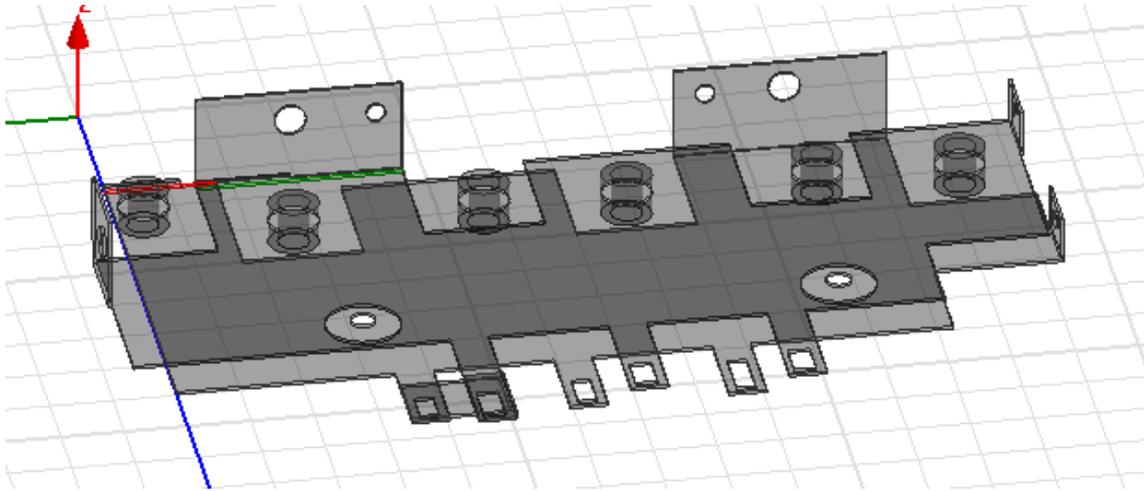


Fig. 11: Busbar de convertidor de Airbus con agujeros y aletas.

Los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 7.

Inductancia sin agujeros	Inductancia busbar completo
27,326 nH	33,043 nH

Tabla 7: comparación de inductancia de busbar de Airbus con y sin agujeros.

En este ejemplo se ve de manera más clara la influencia de los agujeros ya que hacen que la inductancia parásita aumente un 17%.

Como resumen, en los resultados de las simulaciones se puede observar cómo la inductancia aumenta al introducirle agujeros a las placas. También se observa que no es lo mismo colocar los agujeros en los bordes de las placas que en el centro, siendo más conveniente colocarlos lo más en el centro posible ya que la inductancia es menor. Esto se debe a que al realizar agujeros en los bordes el campo magnético externo se modifica mucho, lo que provoca el aumento de la inductancia. Este efecto se ve de manera clara al dibujar las corrientes:

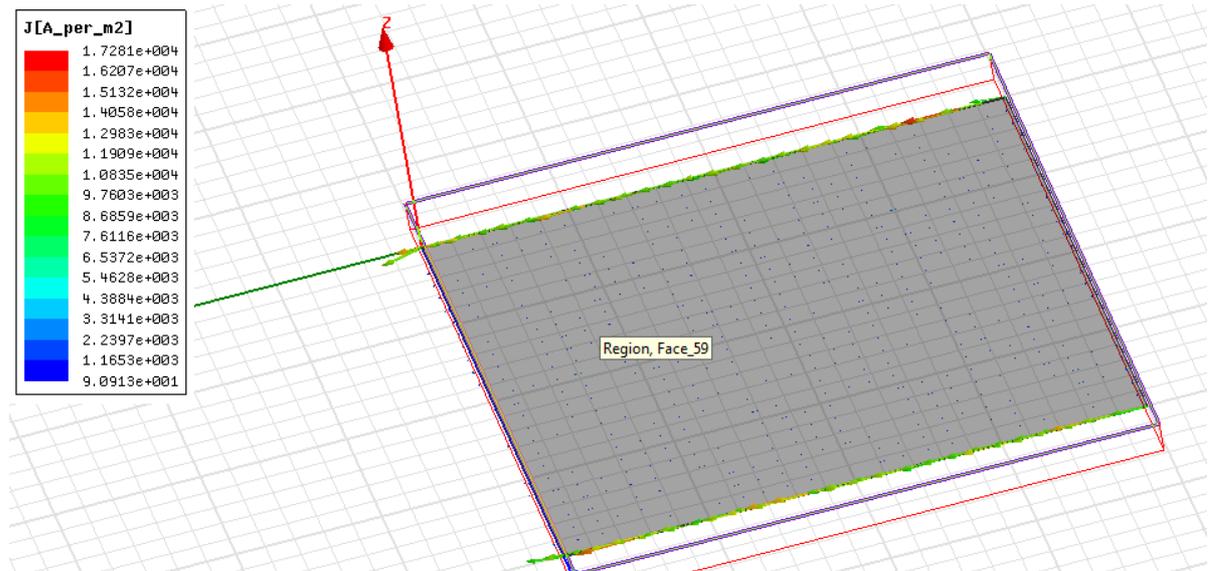


Fig. 12: Corriente circulando por la placa.

En la Fig. 12 se observa como la mayoría de la corriente tiende a ir por el borde de la placa, por lo tanto, al introducirle agujeros o rendijas en el borde de la misma dificultará el paso de corriente y hará aumentar la inductancia.

Aunque no existe mucha diferencia (del orden de 0.01nH), esta diferencia será mayor cuantos más agujeros se realicen y contra mayor sea su tamaño, por lo tanto es algo importante a la hora de diseñar el busbar.

2. A continuación, en lugar de dos placas de 40x40 cm en forma de U, se simula con solamente una placa de 40x40 cm introduciéndole la misma corriente senoidal que en las simulaciones anteriores.

En principio tendemos a pensar que al haber una sola placa y la cantidad de cobre es menor, la inductancia también será menor, pero no es así:

Placas en forma de U	Una placa
1,9789 nH	6,3169 nH

Tabla 8: Inductancia de una placa y dos placas superpuestas.

Los resultados muestran que la inductancia de la placa sola es un 31% mayor, lo cual es una diferencia bastante considerable.

El motivo de estos resultados es que al superponer dos placas éstas se acoplan, es decir, como la dirección de la corriente en la placa de arriba es la opuesta a la dirección en la placa de abajo, los

campos magnéticos que crean las corrientes también son opuestos y el uno debilita al otro reduciendo la inductancia total del conjunto de forma considerable.

3. El tercer punto importante a la hora de reducir la inductancia parásita es la superposición de las placas. Existe dos casos posibles:
 - Si la placa de arriba y la de abajo (positiva y negativa) están perfectamente superpuestas, el bucle de inductancia es pequeño y la inductancia mutua es grande. Por lo tanto la inductancia resultante es pequeña ya que se calcula de la siguiente manera:

$$L = L_1 + L_2 - 2M_{12}$$

- Si la placa de arriba y la de abajo (positiva y negativa) no están perfectamente superpuestas, el bucle de inductancia es grande y la inductancia mutua es pequeña. Por tanto, la inductancia resultante es grande.

A continuación se realizan las dos simulaciones necesarias para demostrar lo dicho anteriormente.

- La primera simulación consiste en hacer pasar una corriente senoidal (la misma que en las simulaciones anteriores) a través de dos placas perfectamente superpuestas de 50x40 cm, 7mm de espesor y separadas 10mm entre sí.
- La segunda simulación es igual que la primera, solo que se irá desplazando la placa superior de tal manera que cada vez estarán menos superpuestas.

En la Tabla 9 se ve cómo va aumentando la inductancia a medida que voy desolapando las placas.

Placas superpuestas	Placas no superpuestas (10mm)	Placas no superpuestas (50mm)
18,96 nH	18,99 nH	21,22 nH

Tabla 9: Influencia de la superposición de placas.

Se observa como al desolaparlas únicamente 1cm, la inductancia apenas varía, pero al desolaparlas 5cm la inductancia aumenta notablemente y contra más se separen las placas, mayor será el aumento de la inductancia.

4. Si analizamos un busbar completo en lugar de uno sencillo, observamos que no todas las placas conductoras participan en la conmutación de las células.

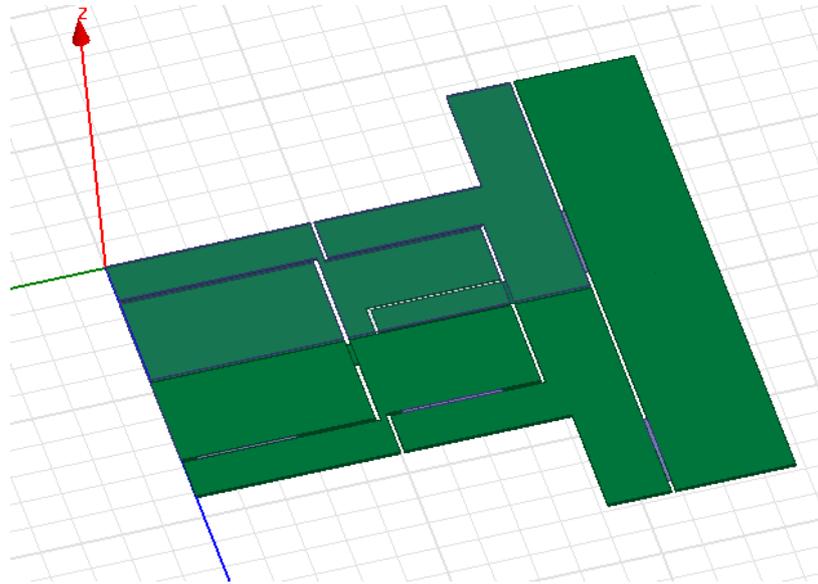


Fig. 13: Placas por las que pasa la corriente.

En la Fig. 13 se observan las placas que conducen en una conmutación en concreto (camino verde).

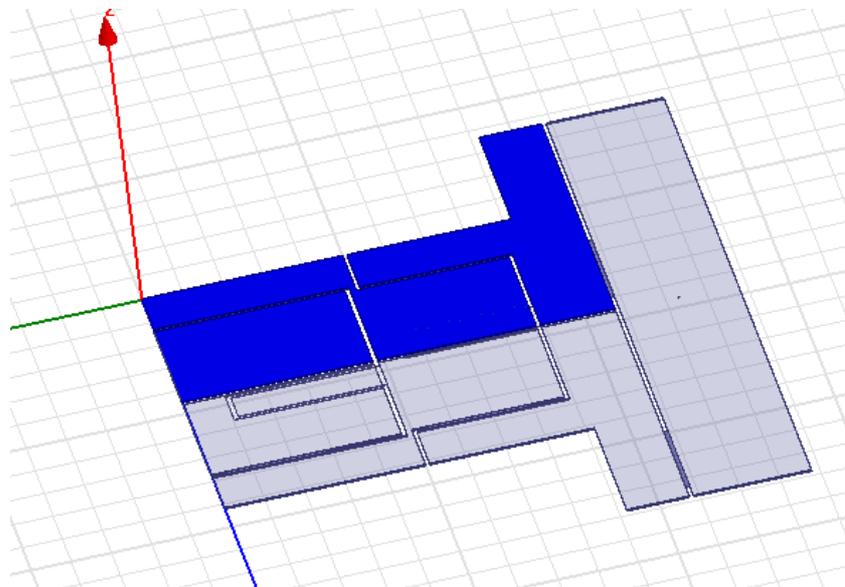


Fig. 14: Placas por las que no circula la corriente.

En la Fig. 14 se ven, en azul, las placas que no conducen en esa misma conmutación.

Pero aunque estas últimas placas no participen en la célula de conmutación, pueden modificar un poco el campo magnético, y por lo tanto, la inductancia parásita.

Con la finalidad de comprobar la influencia de las placas que no participan en la célula de conmutación, se hacen dos simulaciones.

- La primera con la geometría completa.
- Y la segunda manteniendo, únicamente, las placas activas.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Geometría completa	Sólo placas activas
206 nH	210 nH

Tabla 10: diferencia de inductancia entre busbar completo y solo con las placas que conducen.

En este caso, el efecto que producen las placas no activas en la inductancia parásita es positiva, ya que hace que ésta se reduzca unos 4nH.

Datos a tener en cuenta a la hora de diseñar un busbar:

1. Realizar el menor número de agujeros posibles y evitar hacerlos en los bordes de las placas.
2. Es muy importante intentar superponer placas por las cuales circulen corrientes opuestas.
3. Intentar superponer al máximo las placas.
4. Conseguir un buen equilibrio entre el grosor de las placas y la corriente que va a circular a través de las mismas.
5. Conseguir que la distancia entre placas, tanto entre niveles superior e inferior como entre placas del mismo nivel, sea la mínima, teniendo en cuenta el nivel de tensión de cada placa y respetando las distancias mínimas para dichos niveles de tensión.

3. METODOLOGÍA EMPLEADA

3.1 Programas utilizados

Para este proyecto era necesario utilizar un programa de elementos finitos especializado en electricidad y magnetismo. En un principio se utilizó Flux, pero cuando se estaba realizando su validación mediante el busbar real de Airbus, empezó a dar muchos problemas de mallado. Tras varios intentos y leer varios tutoriales, se decidió cambiar de programa y se comenzó a utilizar Maxwell. Éste no ha dado ningún tipo de problemas y, además, realizaba las simulaciones en menos tiempo. Otro de los programas muy utilizado, a la hora del diseño del busbar ha sido AutoCAD.

La metodología a utilizada es la siguiente:

- Primero: se eligen los distintos lay-out sobre papel.
- Segundo: se diseñan las placas para cada lay-out en AutoCAD.

Una vez realizados estos pasos, se pasa a utilizar el programa de elementos finitos Maxwell:

- Se le dice al programa que se va a realizar una simulación en 3D.
- Se elige el tipo de solución, en este caso **Transient magnético**.
- Se coge el material cobre de la librería de materiales de Maxwell
- Se dibuja la geometría (las placas), y se realizan las uniones necesarias, dependiendo del camino de corriente y las conmutaciones que se quieran estudiar.
- Se crea un **winding** y los terminales por donde entra y sale la corriente. Antes de crear los terminales hay que crear las caras que se van a usar como terminales (selecciona la cara, boolean, surface, create object from face), en definitiva, se crea el camino de corriente (**es muy importante que las caras que se designan como terminales estén en el límite de la región del ambiente o vacío, si no el programa dará error y no simulará**).
- Se crea la región de vacío. (**los terminales del winding creado tendrán que estar obligatoriamente en el mismo plano de la frontera de esta región**).
- Se designa el tamaño de los elementos de malla, tanto los de las placas como los de la región de vacío.
- Se crea un análisis set up y se le da al botón de simular.

Tras acabar la simulación, se quieren ver los resultados, en este caso la inductancia parásita que se ha producido. Para ello se le da a results y se crea una gráfica en 2D en la cual se dibuja:

$$\frac{\frac{voltage_inducido}{\partial corriente}}{\partial t}$$

Lo cual nos da la inductancia parásita a lo largo del tiempo.

También existe otra forma más directa de calcular la inductancia parásita. Para ello hay que realizar algunos cambios:

- Ahora el tipo de solución no es transient si no que es **Magnetoestatic**.
- Se dibuja la geometría igual.
- En este caso no se crea un winding, si no que se crean directamente los dos terminales a los cuales se les tiene que indicar la amplitud de la corriente que se les introduce.
- En parameters, se le dice que cree una matriz con el camino de corriente creado anteriormente. De tal manera que creará una matriz por cada camino de corriente creado. Por ejemplo, si se ponen un terminal de salida y uno de entrada, sólo se crea 1 matriz de un único valor de inductancia. Sin embargo si se crean dos terminales de salida y dos de entrada, se crean 2 matrices en el cual nos da 4 valores de inductancia, dos valores son la inductancia de cada una de las placas y los otros dos son las inductancias mutuas.
- Se realiza la malla y el análisis set up igual y se le da a simular.
- Una vez terminada la simulación se le da a Maxwell 3D, results y solution data en donde aparece el valor/es de la inductancia/s parásita.

3.2 Validación del programa

Antes de indicar las cuestiones más importantes a tener en cuenta para conseguir reducir la inductancia parásita es necesario realizar una validación del programa a utilizar (MAXWELL). Para ello se realizan varias simulaciones:

- Dos conductores infinitos y compararlo con los resultados teóricos.
- Dos placas infinitas y compararlo con los resultados teóricos.
- Busbar real del laboratorio.

3.2.1 Dos conductores infinitos

Se utilizan unos conductores de 1 mm de radio, 100 mm de longitud y a una distancia de 20 mm entre ellos.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\pi} \cdot \cos^{-1} \frac{d}{2a}$$

Siendo “d” la distancia entre los cables y “a” el radio de los cables.

Cálculo teórico	Simulación Maxwell
120 nH	122 nH

Tabla 11: Comparativa entre inductancia simulada y teórica de dos conductores infinitos.

3.2.2 Dos placas infinitas

Se utilizan unas placas de 1x1m con un grosor de 0,5mm y una distancia entre ellas de 10,5mm.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot h}{W}$$

Siendo “h” la distancia entre placas y “W” la anchura de las placas.

Cálculo teórico	Simulación Maxwell
13,194 nH	12,8530 nH

Tabla 12: Comparativa entre inductancia simulada y teórica de dos placas infinitas.

3.2.3 Caso práctico: busbar real

Para el caso práctico se coge un busbar real de un convertidor de Airbus que se encuentra en el laboratorio y se mide su inductancia mediante un medidor de impedancias. Para ello se realiza el montaje que se muestra en la Fig. 15:



Fig. 15: Montaje para el cálculo de inductancia del busbar de Airbus.

La inductancia que se quiere medir tiene un valor muy pequeño en comparación con la inductancia de los cables, por tanto no se puede despreciar. De tal manera que es necesario restarle la inductancia de los cables para lo cual se realiza el montaje de la Fig. 16:



Fig. 16: Montaje para el cálculo de la inductancia de los cables.

De esta manera el medidor de impedancia nos dirá, solamente, la inductancia de los cables que habrá que restar a la medida obtenida en el montaje anterior.

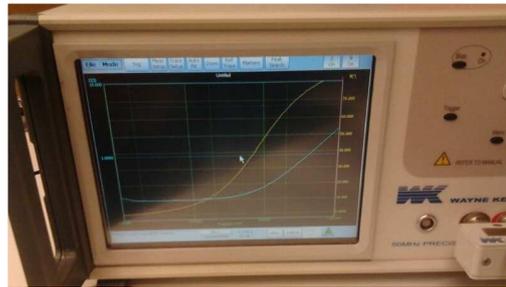


Fig. 17: Ondas que se observan en el medidor de impedancias.

En la Fig. 17 se ven las formas de onda que da el medidor de impedancias, siendo la amarilla el ángulo en grados y la azul la impedancia en Ω .

Tras realizar los ensayos, se dibuja la geometría en el programa de elementos finitos Maxwell y se simula para calcular la inductancia y compararla con la obtenida en la práctica.

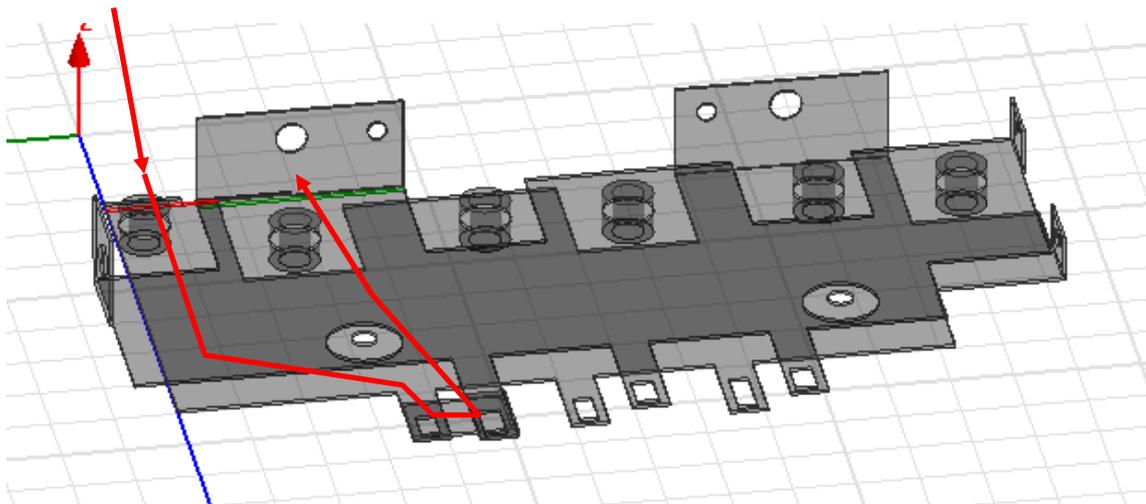


Fig. 18: Camino de corriente en el busbar de Airbus.

La Fig. 18 muestra tanto la geometría como el camino de corriente de la simulación.

Los resultados son los siguientes:

	Ensayo real	Simulaciones en Maxwell
Inductancia total	372,15 nH	
Inductancia cables	350,06 nH	
Inductancia placas	22,09 nH	33,04 nH

Tabla 13: Comparativa de inductancia entre medición experimental y simulación del busbar de Airbus.

Los resultados de la Tabla 13 muestran que el valor de inductancia simulado y medido son del mismo orden de magnitud. Como el valor medido se ha obtenido de la resta de dos mediciones de magnitud mucho mayores, el resultado se considera satisfactorio. La diferencia entre el valor medido y el simulado puede atribuirse a la imprecisión de la medida.

En definitiva, observando los resultados en las Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13 se puede asumir que el programa es válido y da resultados bastante reales y similares a la realidad.

4. INDUCTANCIAS EN CONVERTIDOR DE 3 NIVELES (NPC)

4.1 Lay-out

En principio, planteamos dos distribuciones o lay-out distintas:

Lay-Out 1

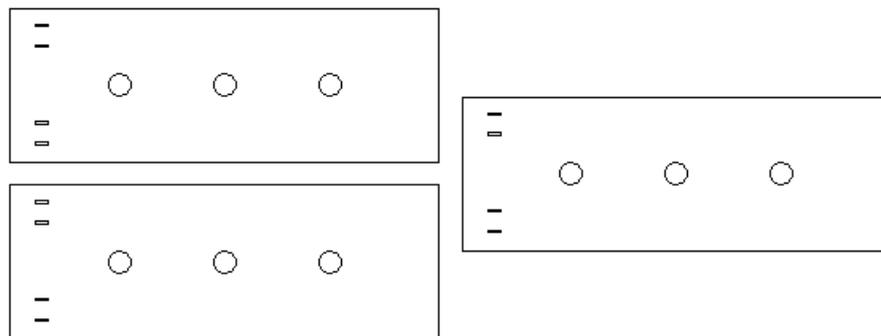


Fig. 19: Lay-out 1 NPC

Lay-out 2

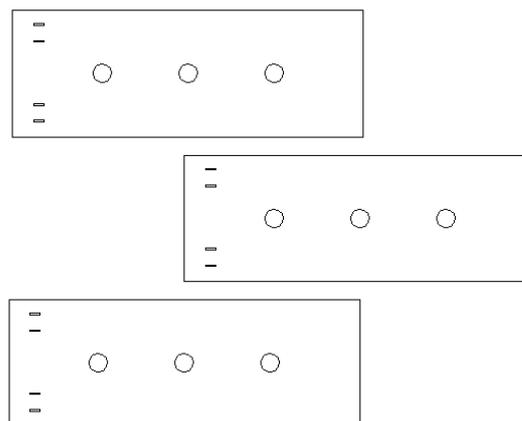


Fig. 20: Lay-out 2 NPC

Para comprobar qué lay-out es el mejor en cuanto a inductancia se realizan los siguientes pasos:

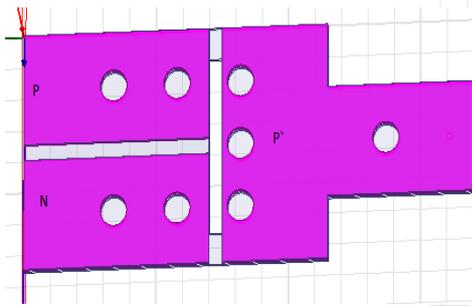
- Se dibujan los dos lay-out en AutoCAD (sólo los IGBTs).
- Se diseñan las placas encima de los IGBTs, utilizando dos niveles de placas y realizando los agujeros necesarios.
- Se dibujan las placas en Maxwell y se realizan las simulaciones pertinentes.

Estos pasos se seguirán también para el convertidor de 5 niveles.

4.2 Diseño de placas

Lay-out 1:

Nivel superior de placas



Nivel inferior de placas

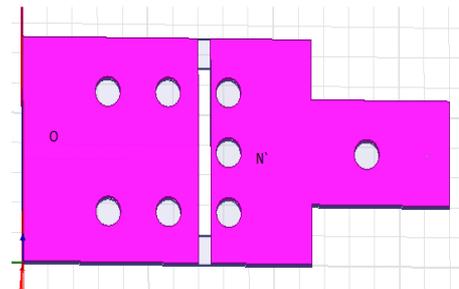
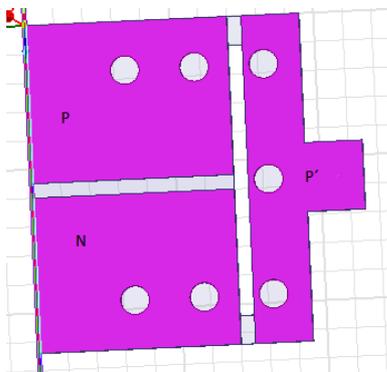


Fig. 21: Placas del lay-out 1 NPC.

Lay-out 2:

Nivel superior de placas



Nivel inferior de placas

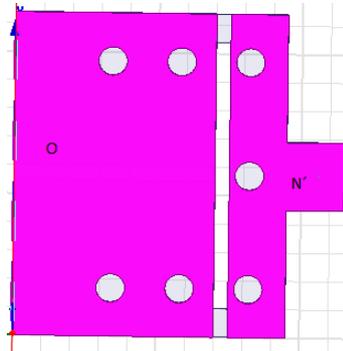


Fig. 22: Placas del lay-out 2 NPC.

4.3 Camino de corriente y resultados

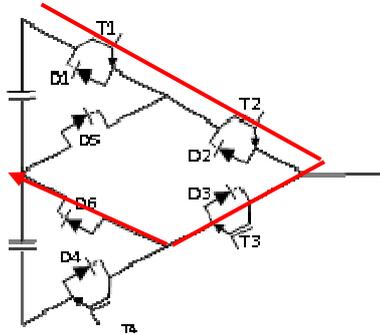


Fig. 23: Camino de corriente simulado en el NPC.

Se simulan los dos lay-out ambos con el mismo camino y la misma magnitud de corriente, una senoidal de 10A de amplitud y una frecuencia de 1MHz. El camino de corriente es el que se produce al pasar de un nivel de tensión 2 a un nivel de tensión 1. Conmutarían el T1 y el T3 y el convertidor estaría trabajando como tectificador.

Lay-out 1	Lay-out 2	Diferencia
21.55 nH	27.33 nH	21 %

Tabla 14: Inductancias resultantes en el NPC.

Las simulaciones nos indican que el mejor lay-out es el 1 (Fig. 19), ya que es el que menor inductancia parásita provoca y, por tanto, el que menor sobretensión provocará.

La razón es que el camino de ida de corriente (T1; T2) y el de vuelta (T3; D6) están más juntos en el lay-out 1 que en el lay-out 2 y, por lo tanto, la espira de corriente es menor.

5. INDUCTANCIAS EN UN CONVERTIDOR DE 5 NIVELES (5L-ANPC)

En todos los casos estudiados a lo largo del proyecto se han simulado dos caminos de corriente. Se decidió simular estos caminos de corriente porque son los que mayor inductancia parásita provocan. Las conmutaciones que producen dichos caminos de corriente se explican a continuación.

Conmutación superior

En la Fig. 24 se muestra la estructura del convertidor 5L-ANPC de una capacidad flotante. Esta imagen nos indica en color negro los módulos que están activos y en color grisáceo los módulos inactivos. Siguiendo el camino que muestran los módulos activos, el camino rojo, se ve que el convertidor nos estaría dando a la salida un nivel 4 de tensión. Los módulos T9-D9 y T12-D12 están encendidos para fijar la tensión y no estar encendiéndolos y apagándolos.

Redondeado de verde se indican los módulos que conmutan para pasar de un nivel 4 a un nivel 3.

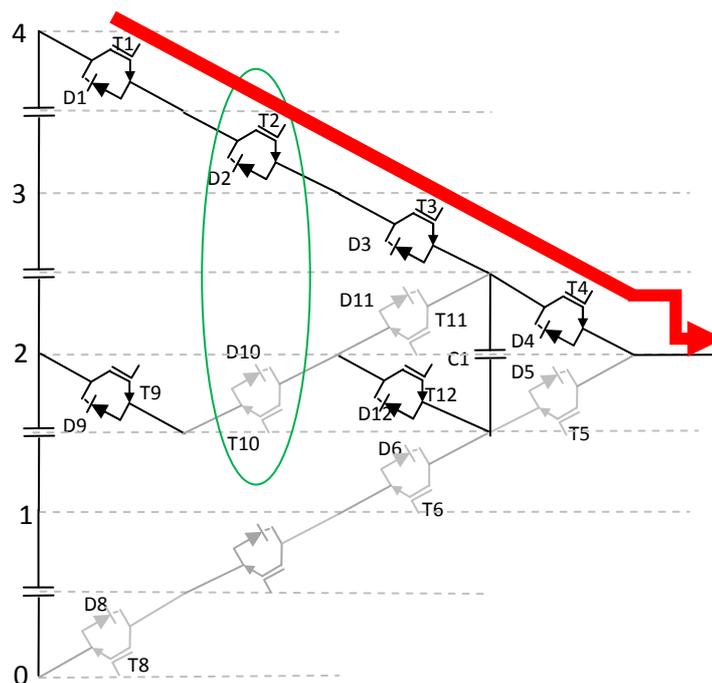


Fig. 24: Nivel 4 de tensión en el 5L-ANPC.

En la Fig. 25 el convertidor nos estaría dando a la salida un nivel 3 de tensión de una de las dos maneras posibles. Se puede ver que la única variación con respecto a la Fig. 24 es que ahora el módulo T2-D2 está apagado y el T10-D10 está encendido. Por lo tanto esa es la conmutación que se ha producido.

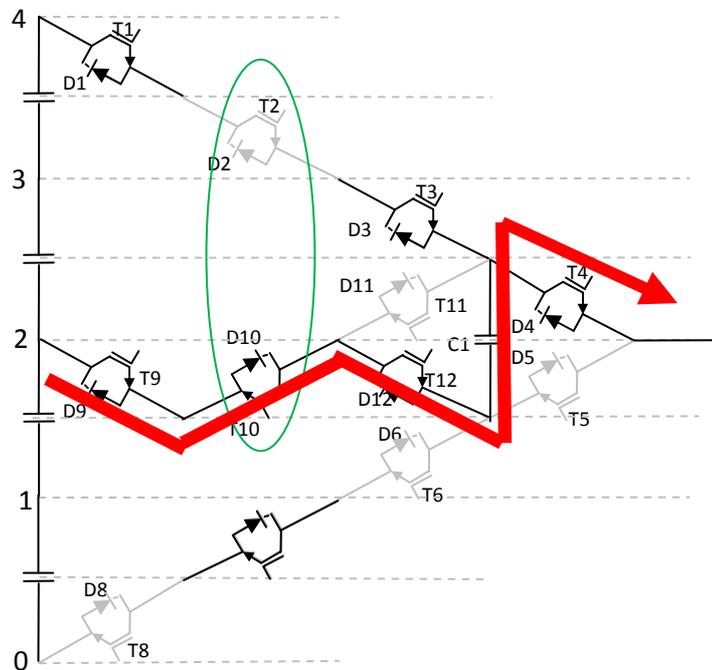


Fig. 25: Nivel 3 de tensión en el 5L-ANPC.

El resultado de esta conmutación es el siguiente camino de corriente:

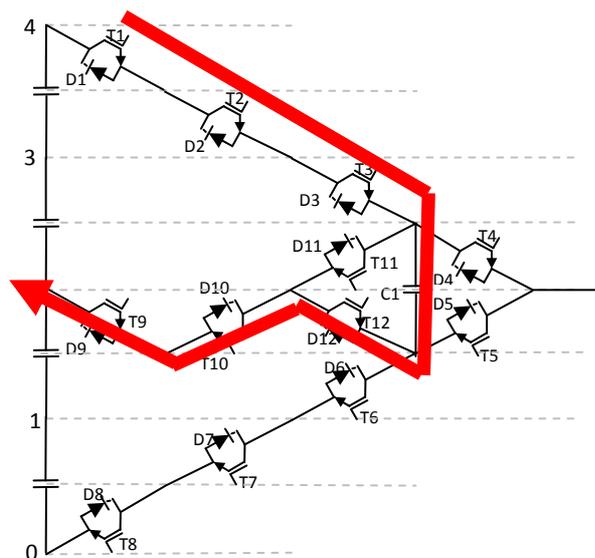


Fig. 26: Camino de corriente rojo 5L-ANPC (conmutación de nivel 4 a 3 de tensión).

Comutación inferior:

En la Fig. 27 se muestra la estructura del 5L-ANPC de una capacidad flotante, pero en este caso si observamos el camino verde, podemos apreciar como el convertidor nos estaría dando un nivel 0 de tensión.

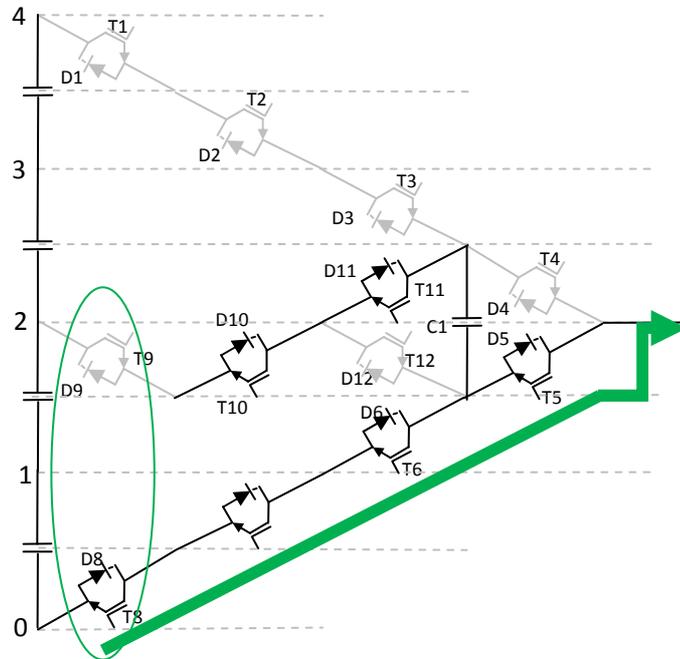


Fig. 27: Nivel 0 de tensión del 5L-ANPC.

En la Fig. 28, se aprecia sólo un único cambio, y es que el módulo T9-D9 está encendido y el T8-D8 está apagado (se observan dichos módulos redondeados en verde). Por tanto, el convertidor ha pasado a darnos un nivel 1 de tensión.

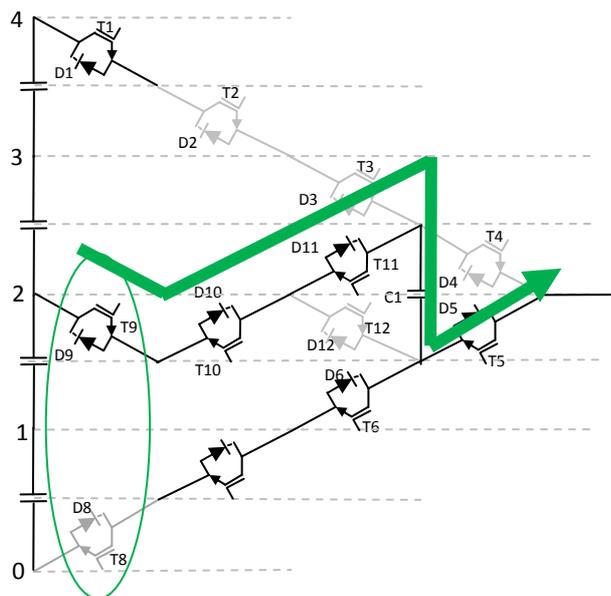


Fig. 28: Nivel 1 de tensión del 5L-ANPC.

El resultado de esta conmutación es el siguiente camino de corriente.

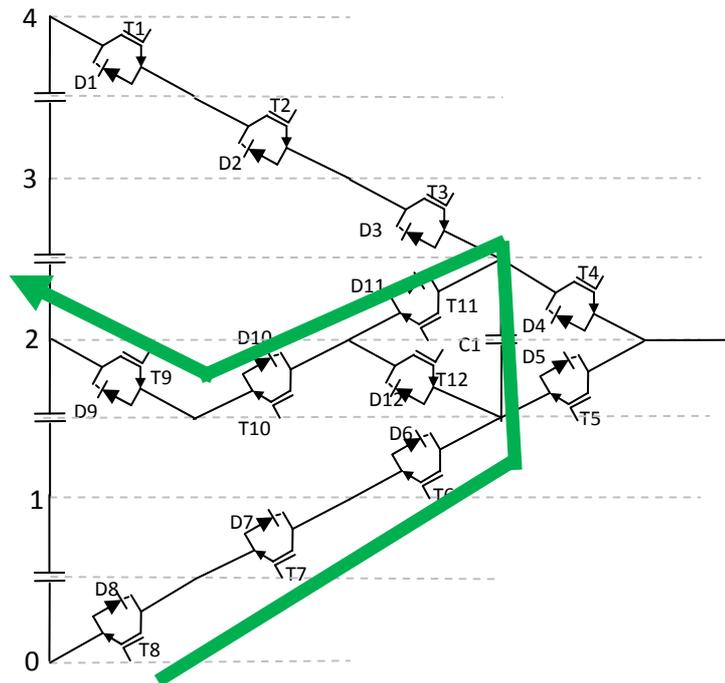


Fig. 29: Camino de corriente verde del 5L-ANPC (conmutación 0-1).

Comutación semiconductores de salida

En la Fig. 30 el convertidor nos estaría dando un nivel 2 de tensión de una de las dos maneras posibles.

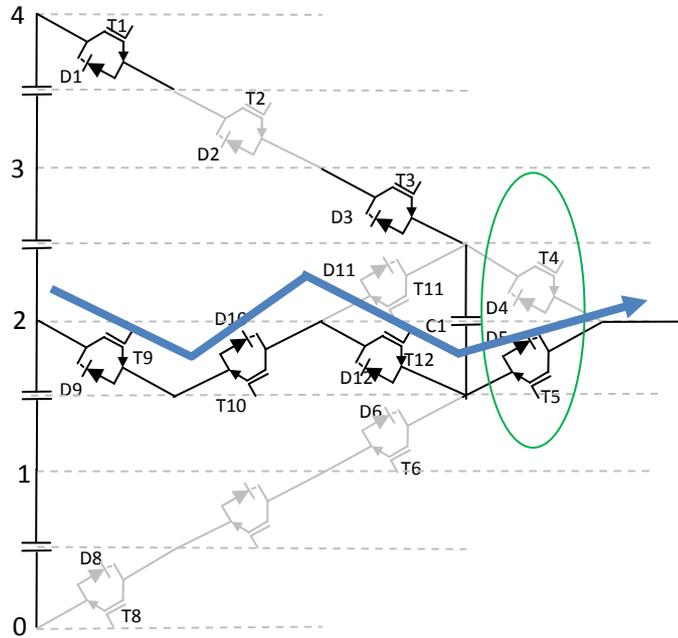


Fig. 30: Nivel 2 de tensión del 5L-ANPC.

En la Fig. 31 se muestra la estructura del convertidor dando como salida un nivel 3 de tensión de una de las maneras posibles.

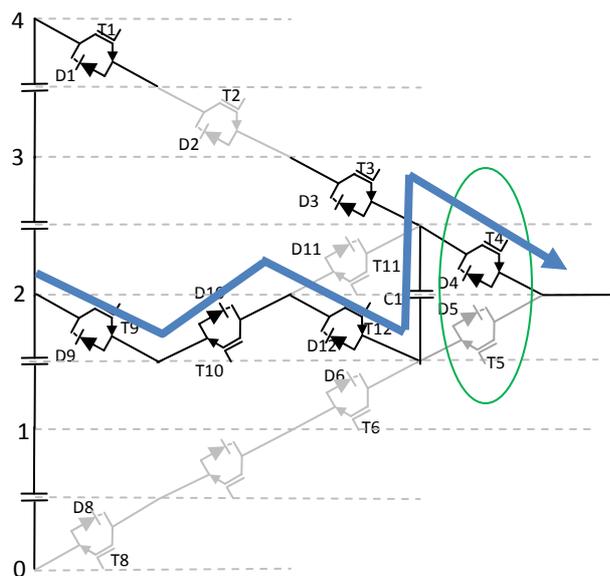


Fig. 31: Nivel 3 de tensión del 5L-ANPC.

5.1 Prototipo

5.1.1 Lay-out

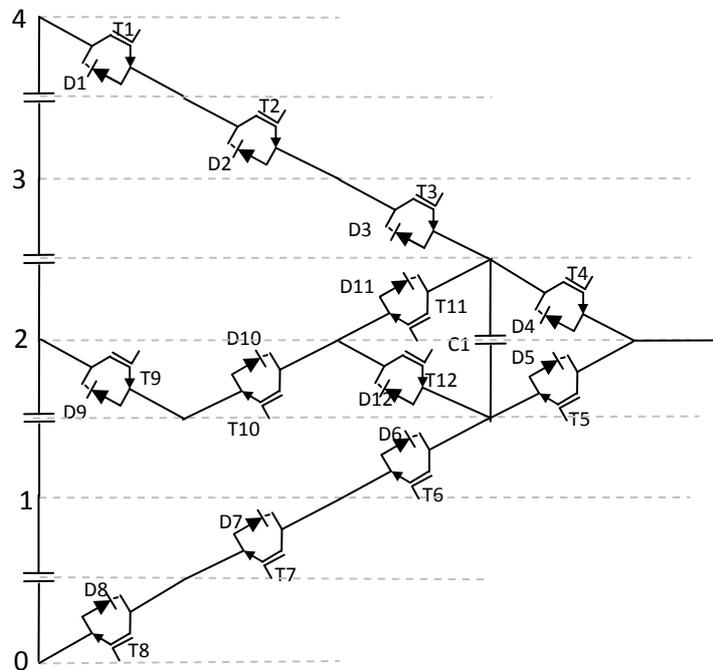


Fig. 33: Convertidor 5L-ANPC de una capacidad flotante.

En el caso del convertidor de 5 niveles, las posibles combinaciones de colocación de los módulos y, por tanto, los distintos lay-out son muy amplias. De tal manera que realizar todas las posibles combinaciones sería muy laborioso. Por este motivo, se escogen únicamente 6 lay-outs de los cuales se descartarán los que se consideren peores.

Lay-out 1:

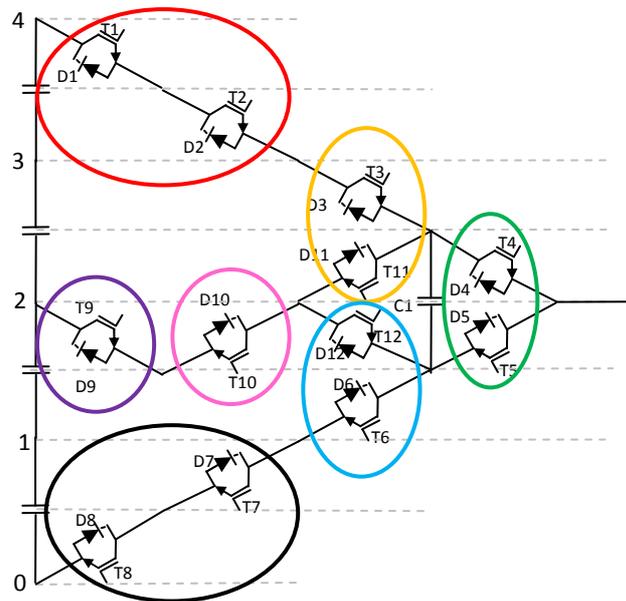
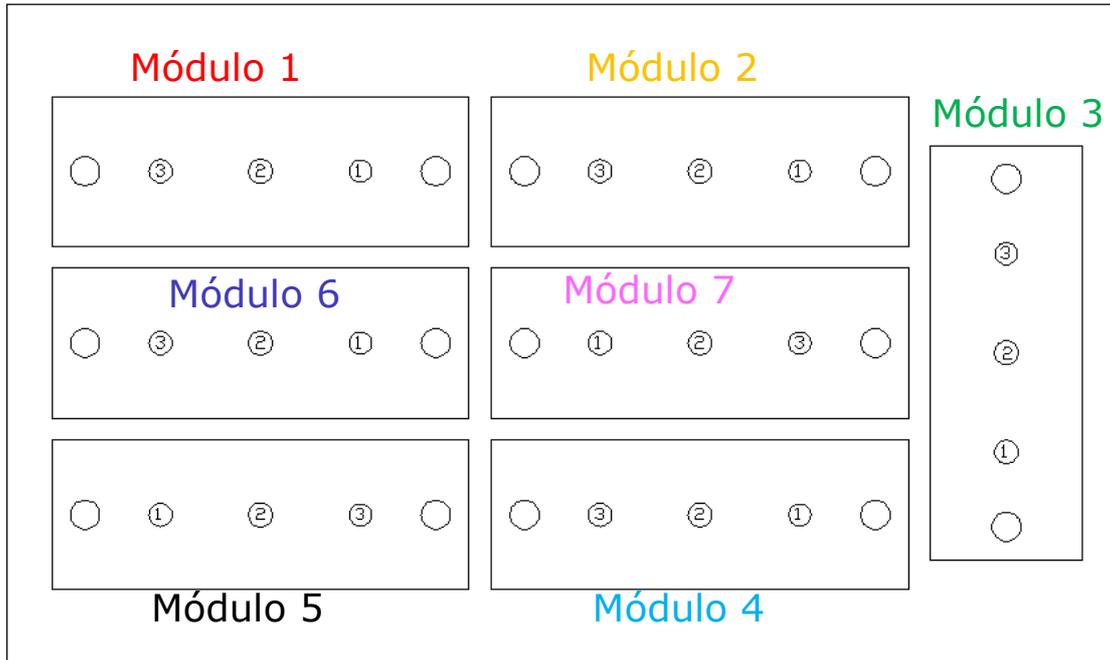


Fig. 34: Lay-out 1 del 5L-ANPC.

Lay-out 2:

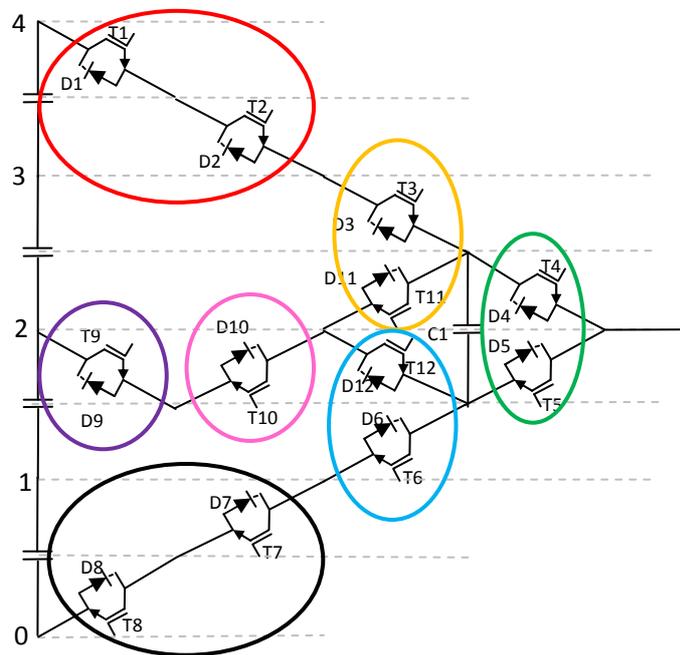
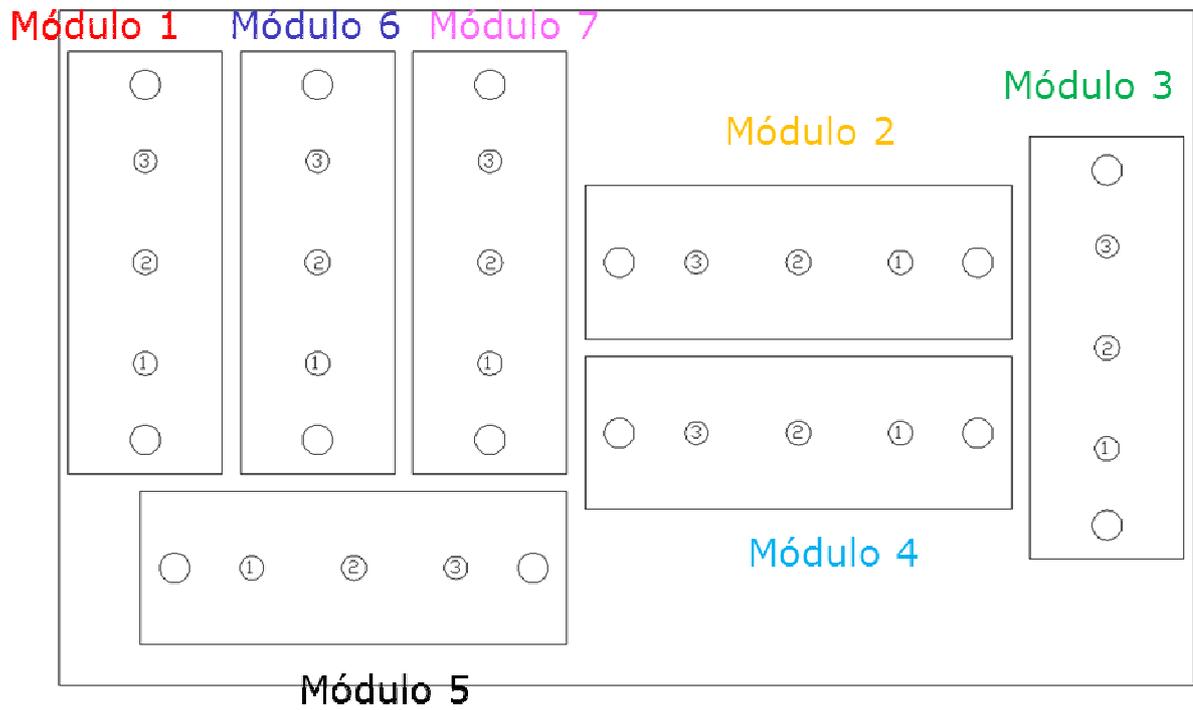


Fig. 35: Lay-out 2 del 5L-ANPC.

Lay-out 3:

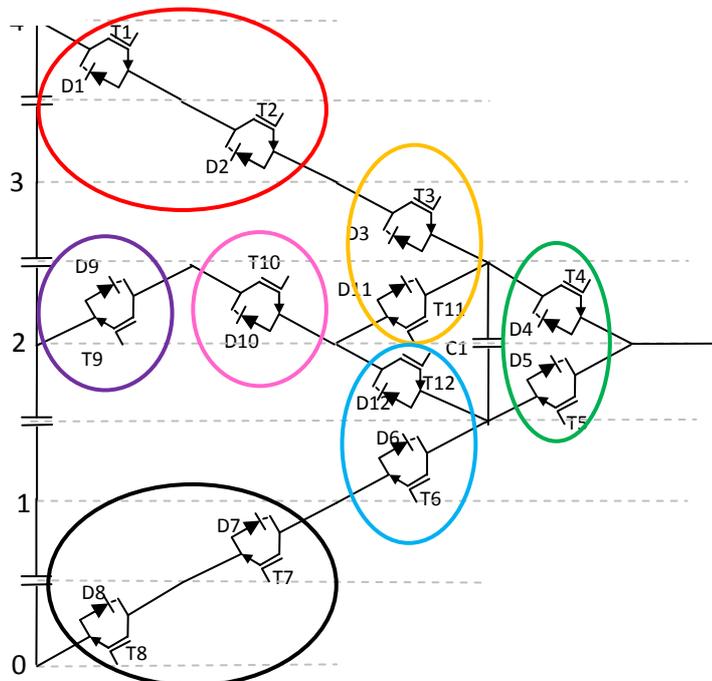
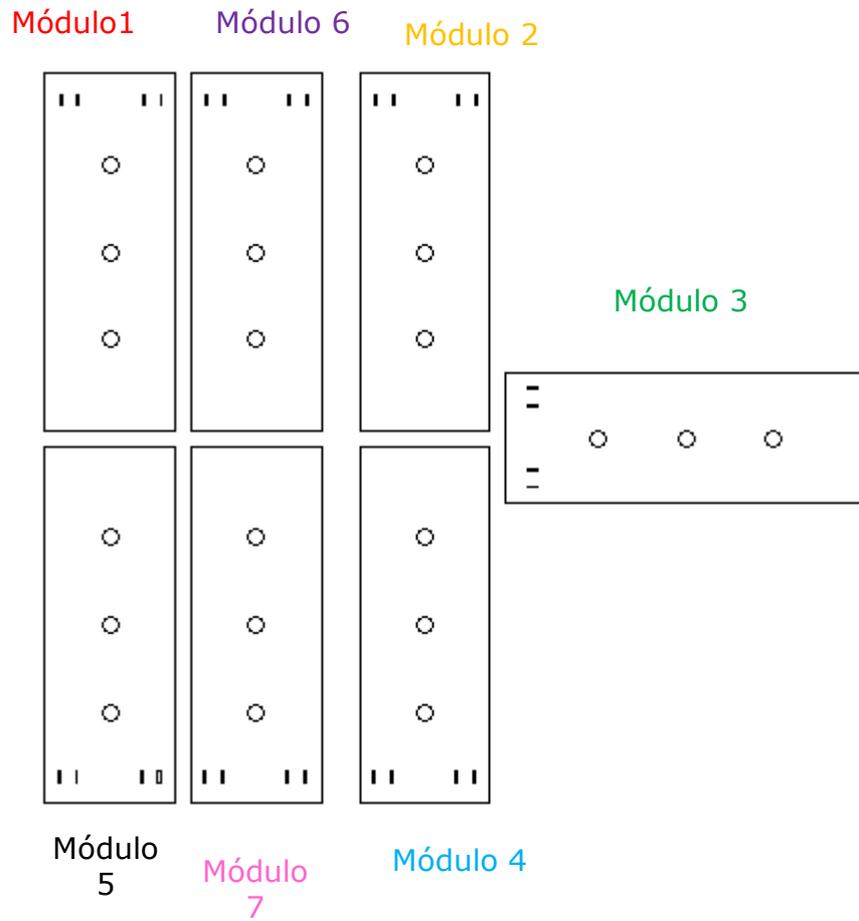


Fig. 36: Lay-out 3 del 5L-ANPC.

Lay-out 4:

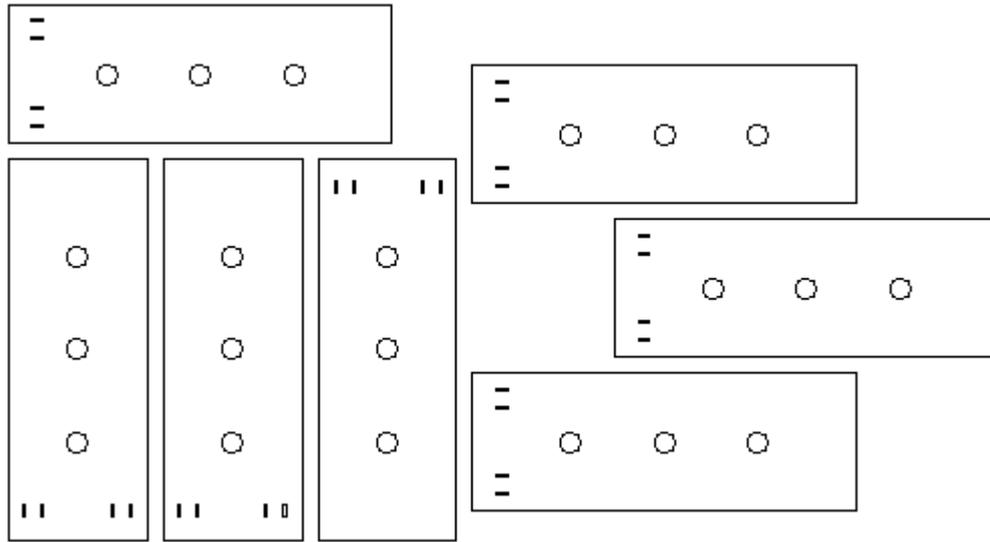


Fig. 37: Lay-out 4 del 5L-ANPC.

Lay-out 5:

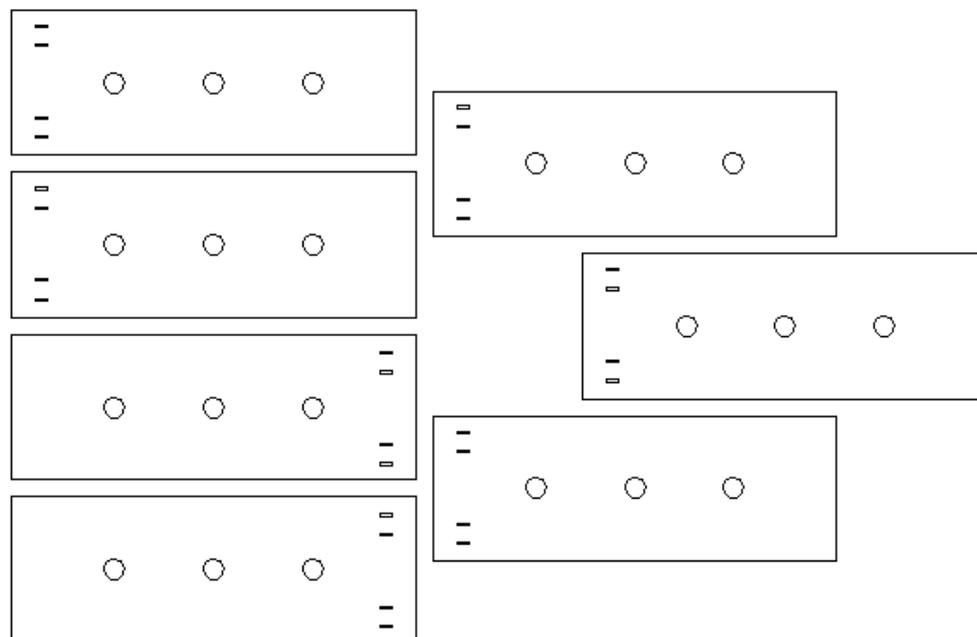


Fig. 38: Lay-out 5 del 5L-ANPC.

Lay-out 6:

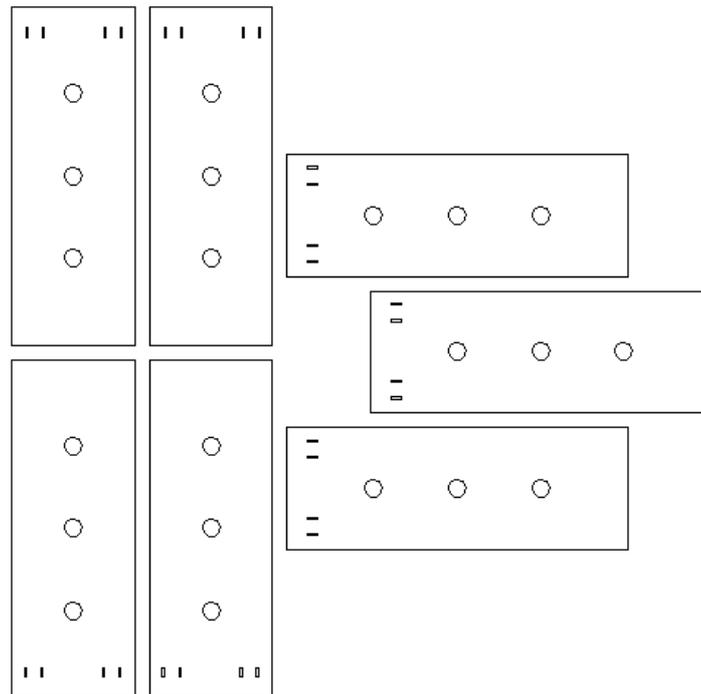


Fig. 39: Lay-out 6 del 5L-ANPC.

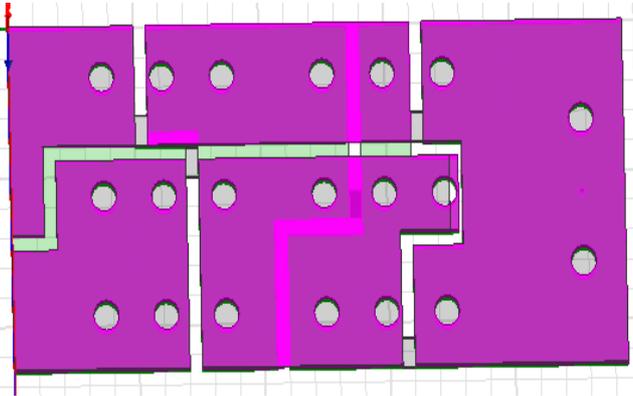
Se puede realizar un primer análisis de cómo serán los caminos por los que circulará la corriente para distintos Lay-Outs. De este primer análisis se eligen los Lay-outs que presentan unos caminos de corriente más pequeños, los cuales se simulan en el programa de elementos finitos. Tras el descarte de tres lay-out, se eligen los tres primeros, los cuales se simularán y se escogerá, en principio, el de menor inductancia parásita.

A simple vista se aprecia que el lay-out 1 es más ordenado y en principio parece más lógico ya que los módulos de la rama superior (1 y 2) están colocados arriba, los módulos de la rama inferior (4 y 5) están colocados abajo y los de la rama del medio (6 y 7) están en el medio.

5.1.2 Diseño de placas

Lay-out 1:

Nivel superior de placas



Nivel inferior de placas

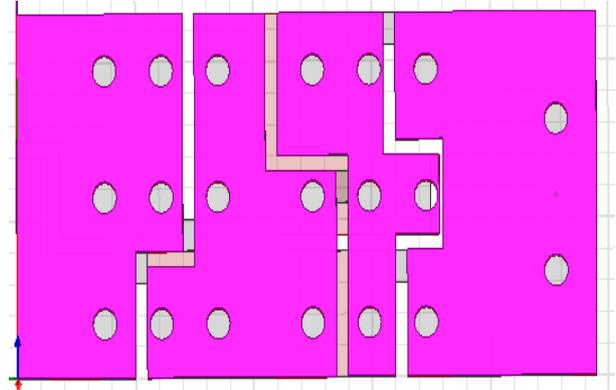
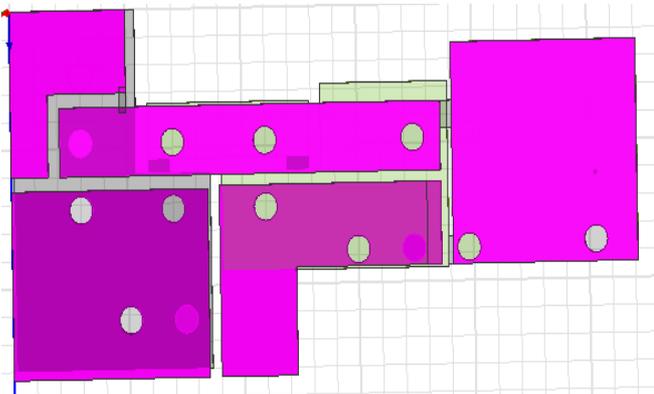


Fig. 40: Placas del lay-out 1 del 5L-ANPC.

Lay-out 2:

Nivel superior de placas



Nivel inferior de placas

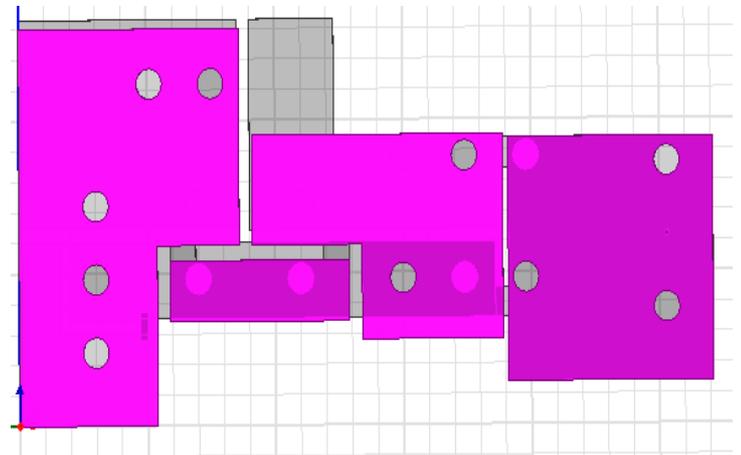
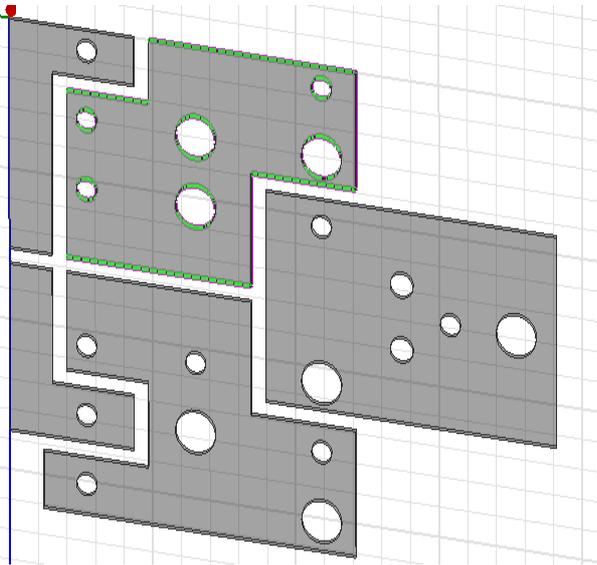


Fig. 41: Placas del lay-out 2 del 5L-ANPC.

Lay-out 3:

Nivel superior de placas



Nivel inferior de placas

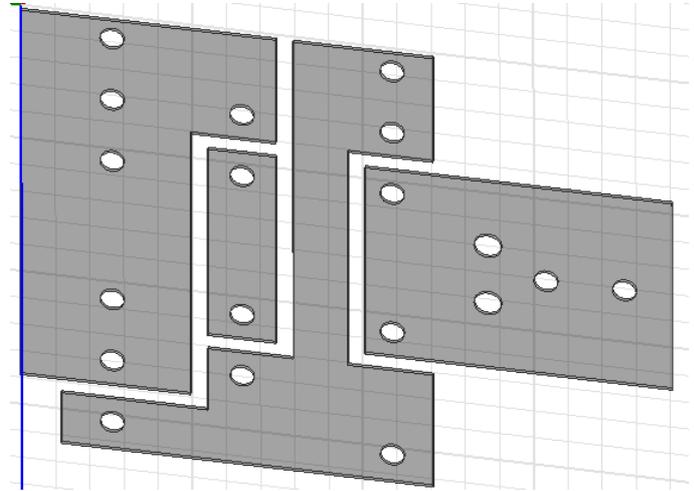


Fig. 42: Placas del lay-out 3 del 5L-ANPC.

Habría que destacar que este diseño no es definitivo ya que faltan las conexiones a las capacidades flotantes (ya sea de una o dos capacidades flotantes). Esto se verá en el apartado de Conexiones a las capacidades flotantes

5.1.3 Caminos de corriente y resultados

Se estudiarán dos caminos de corriente con la finalidad de comparar cuál de los lay-out da menor inductancia en ambos caminos. La corriente introducida es la de todas las simulaciones (**10A de amplitud, 1MHz de frecuencia**). Los caminos son los que se muestran en la Fig. 43:

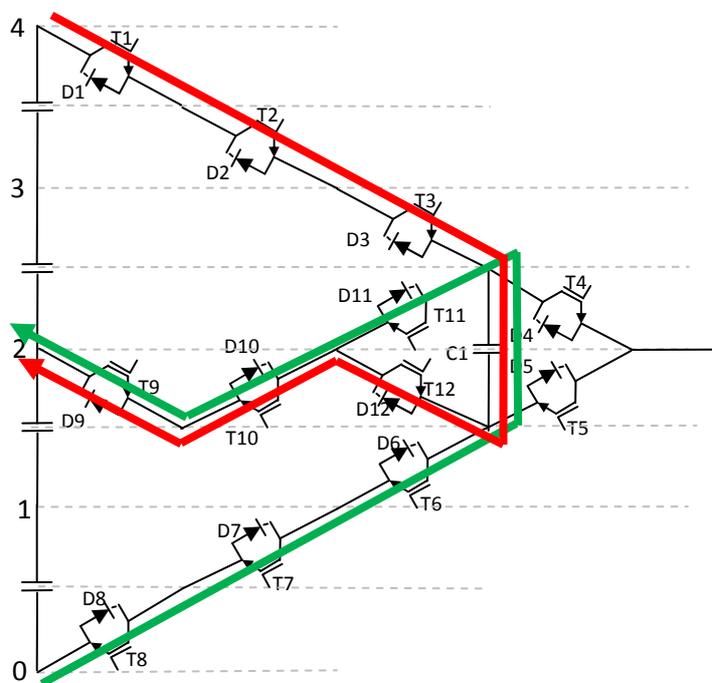


Fig. 43: Caminos de corriente simulados en el 5L-ANPC

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los dos lay-out:

	Lay-out 1	Lay-out 2	Lay-out3	Deferencia entre lay-out 1 y 2
Camino rojo	36.4 nH	34.2 nH	41 nH	6.05 %
Camino verde	39.6 nH	38.2 nH	43 nH	3.70 %

Tabla 15: Comparativa de las inductancias de los distintos lay-out en el 5L-ANPC.

Como se dijo anteriormente, el lay-out 1 parece más ordenado y parece que los módulos están colocados con más sentido. Sin embargo, el lay-out 2 da menor inductancia parásita en ambos caminos, aunque la diferencia no es muy significativa.

Una explicación puede ser que en el lay-out 2, el camino de ida de corriente (T1→T2→T3) y el de vuelta (D12→T10→D9), están solapados, es decir, uno pasa por encima del otro, lo que hace que el campo total se debilite y por lo tanto hace que la inductancia sea menor. Sin embargo, en el lay-out 1, los caminos de ida y de vuelta no están perfectamente solapados.

Como en la tabla anterior se observa que, en el prototipo, no tiene mucha importancia la configuración de los módulos, se escoge el **lay-out3** (a pesar de que su inductancia sea ligeramente superior a la de los otros dos lay out) ya que es el que mejor aprovecha el tamaño del radiador, es el que presenta mayores facilidades a la hora de diseñar las placas y, además, es el que más accesibles tiene las conexiones a la puerta y emisor de los IGBTs, por lo tanto las placas necesitan menos agujeros.

5.1.4 Influencia de IGBTs

En las simulaciones anteriores, las conexiones entre placas se han realizado directamente, es decir, sin tener en cuenta la influencia de los módulos. En este apartado se pretende estudiar de qué manera contribuyen los módulos al aumento de la inductancia parásita.

Para ello, se escoge el lay-out 2 del apartado anterior y se dibujan unos cubos que simulan los módulos.

Al igual que en el apartado anterior, se simularán los dos caminos de corriente:

Camino rojo

Camino verde

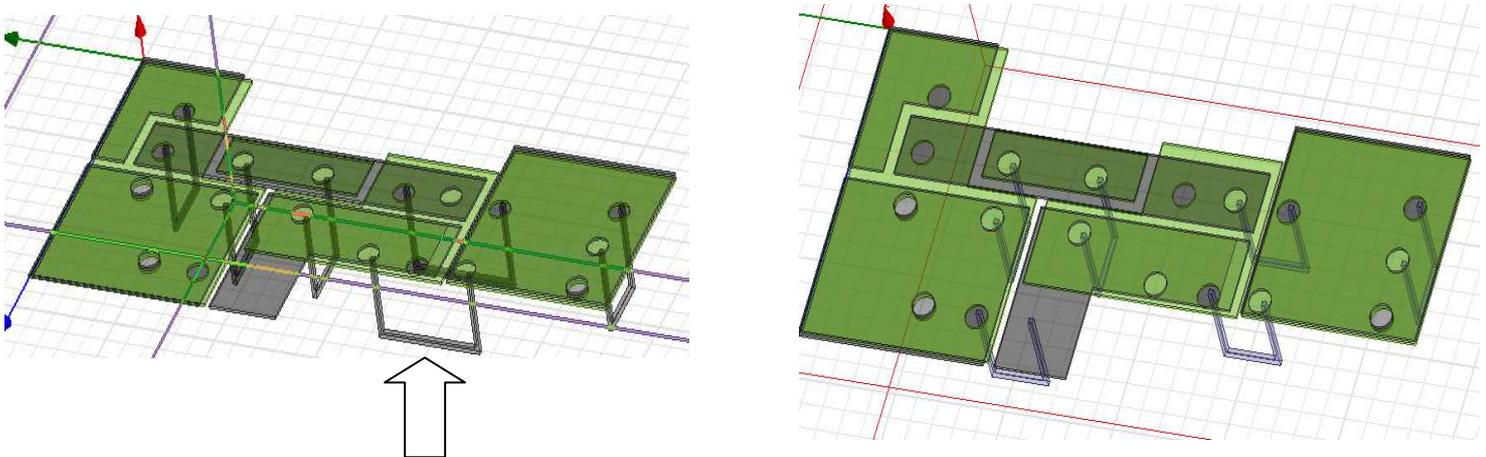


Fig. 44: Lay-out 2 con la conexión de los IGBTs.

El cubo señalado con la flecha es lo que simula el IGBT.

	Con módulos	Sin módulos	Deferencia (%)
Camino rojo (nH)	319.75	34.22	89.30
Camino verde (nH)	296.17	38.17	87.11

Tabla 16: Inductancias resultantes en el lay-out 2 del 5L-ANPC con y sin IGBTs.

Si nos fijamos en la tabla anterior, nos damos cuenta de que la influencia de los módulos es enorme, ya que estamos hablando que suponen cerca del 90% de la inductancia parásita total. Por lo tanto, se puede concluir que, en el caso del prototipo, la configuración de los módulos o lay-out, no es de gran importancia a la hora de reducir la inductancia parásita.

Como se verá en el siguiente apartado, esto no es así en el caso del convertidor real.

5.1.5 Conexiones a las capacidades flotantes

Como se ha dicho en el apartado 5.1.2, las simulaciones realizadas hasta ahora son sin tener en cuenta las conexiones a las capacidades flotantes. En este apartado se realizarán las mismas simulaciones que en el apartado 5.1.3, pero incluyendo las conexiones a las capacidades flotantes:

Una capacidad flotante:

El diseño de placas sufre un ligero cambio:

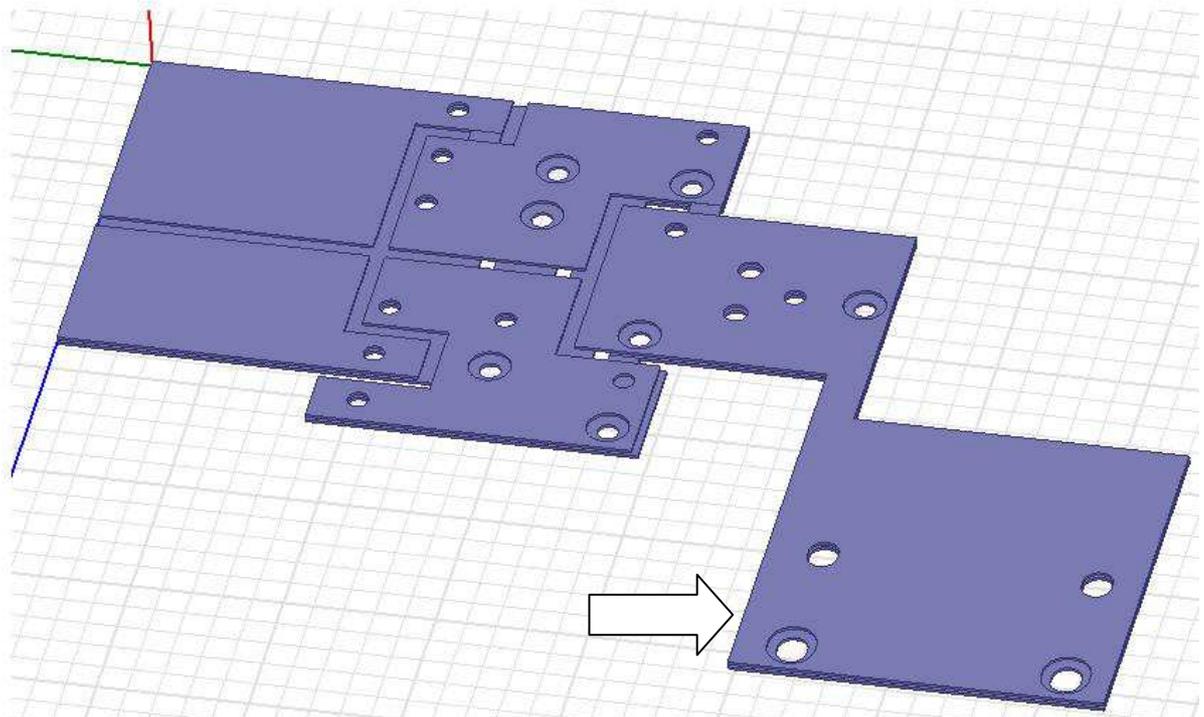


Fig. 45: 5L-ANPC con conexión a una CF.

En la figura anterior se indica, mediante una flecha, el trozo de placa que se le añade para poder realizar la conexión a la capacidad flotante. Al añadirle más cobre aumentara la inductancia parásita.

Dos capacidades flotantes:

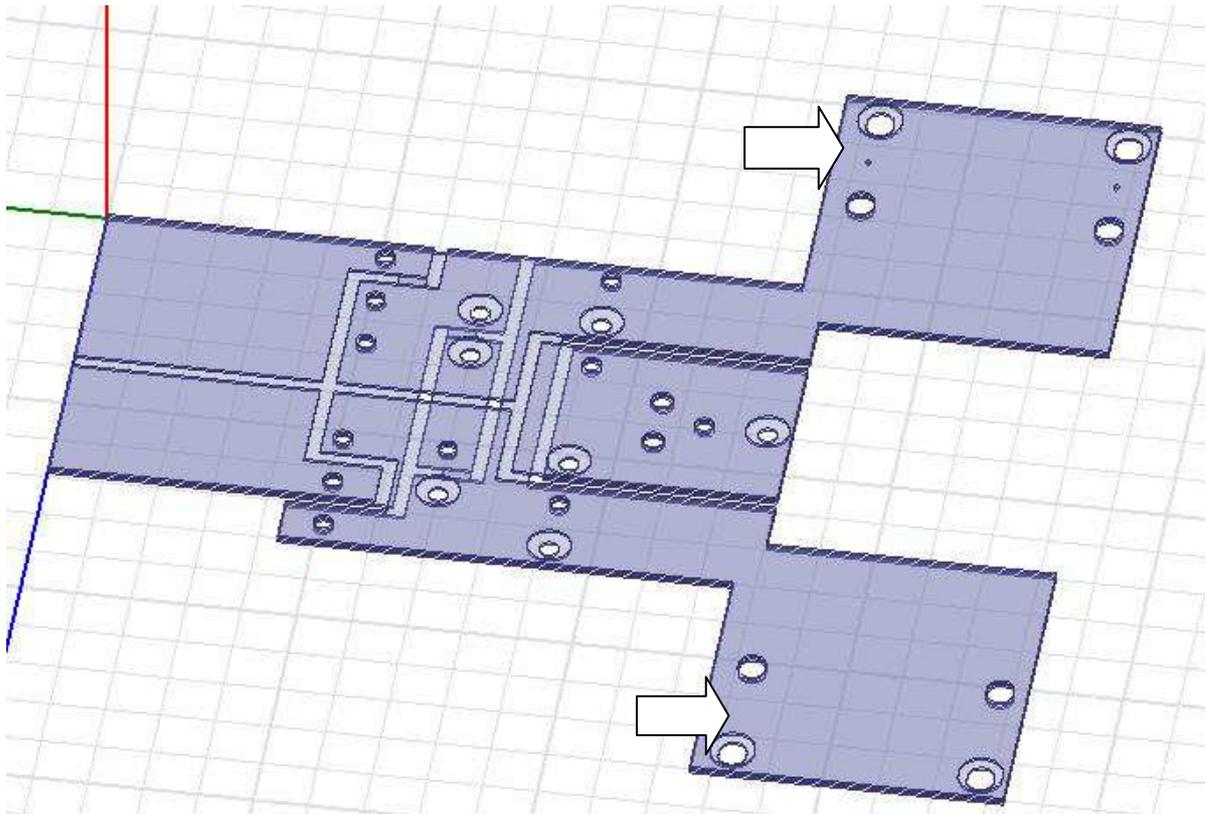


Fig. 46: 5L-ANPC con conexión a dos CF.

En el caso de dos capacidades flotantes se añaden dos trozos de placa, uno a cada lado. En cada uno se conectarán dos capacidades. En principio se tiende a pensar que la inductancia será mayor en el de dos capacidades flotantes ya que añades dos trozos más de placa.

	Sin conexiones a las capacidades flotantes	Una capacidad flotante	Dos capacidades flotantes
Camino rojo	41 nH	72 nH	50nH
Camino verde	43 nH	81 nH	54nH

Tabla 17: Inductancias resultantes en el 5L-ANPC con conexiones a una y dos CF y sin conexión a las mismas.

En la Tabla 17 se observan dos cosas. Por una parte, se observa cómo al añadirle las conexiones a las capacidades flotantes la inductancia aumenta, como era de esperar. Por otro lado, se observa que es bastante mayor la inductancia en el caso de una capacidad flotante que en el de dos

capacidades flotantes, siendo un 30,6% mayor en el camino rojo y un 33,3% mayor en el camino verde.

Estos resultados tienen una explicación obvia y muy gráfica:

Camino inferior del convertidor de una capacidad flotante:

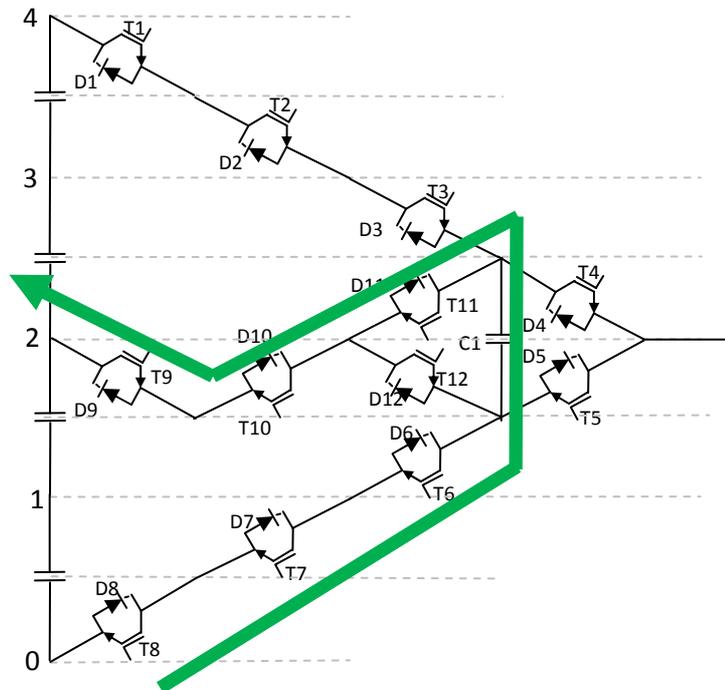


Fig. 47: Camino de corriente verde en el 5L-ANPC de una CF.

Camino inferior del convertidor de dos capacidades flotantes:

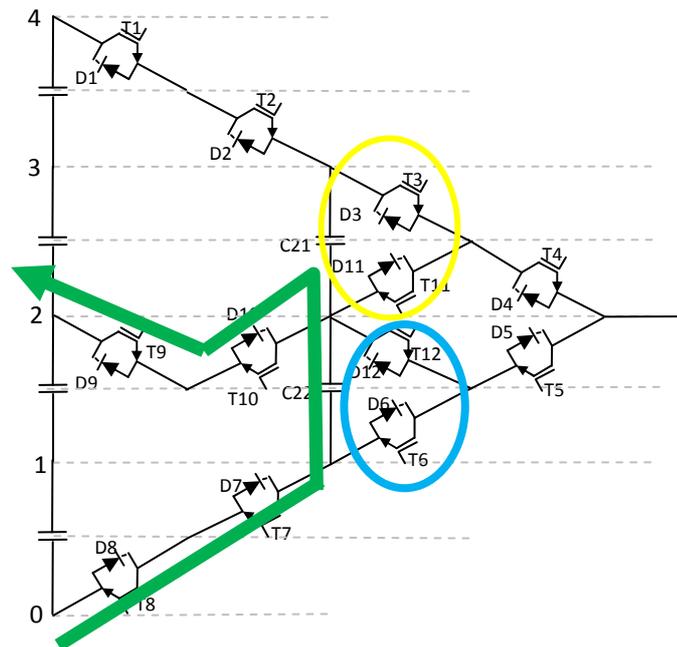


Fig. 48: Camino de corriente verde en el 5L-ANPC de dos CF.

A simple vista se observa que el camino de corriente, y por lo tanto la espira, es más corto en el caso de dos capacidades flotantes, de ahí que su inductancia sea menor. Aún sería mayor la diferencia si se tuviese en cuenta la inductancia provocada por los módulos, ya que en el caso de dos capacidades flotantes, la corriente no pasa por los módulos redondeados en la figura superior.

5.1.6 Calculo experimental de la inductancia de las placas

En este punto se realizan las mediciones experimentales, mediante el medidor de impedancias, del busbar de una capacidad flotante y de dos capacidades flotantes.

Al igual que en las simulaciones de Maxwell, se estudiará la inductancia de dos caminos de corriente (rojo y verde). Para realizar las conexiones entre las distintas placas se utilizan unas pequeñas láminas de cobre con el fin de que no alteren mucho la inductancia parásita resultante.

En la Fig. 49 se observa la conexión realizada para medir la inductancia parásita en el busbar de una capacidad flotante.

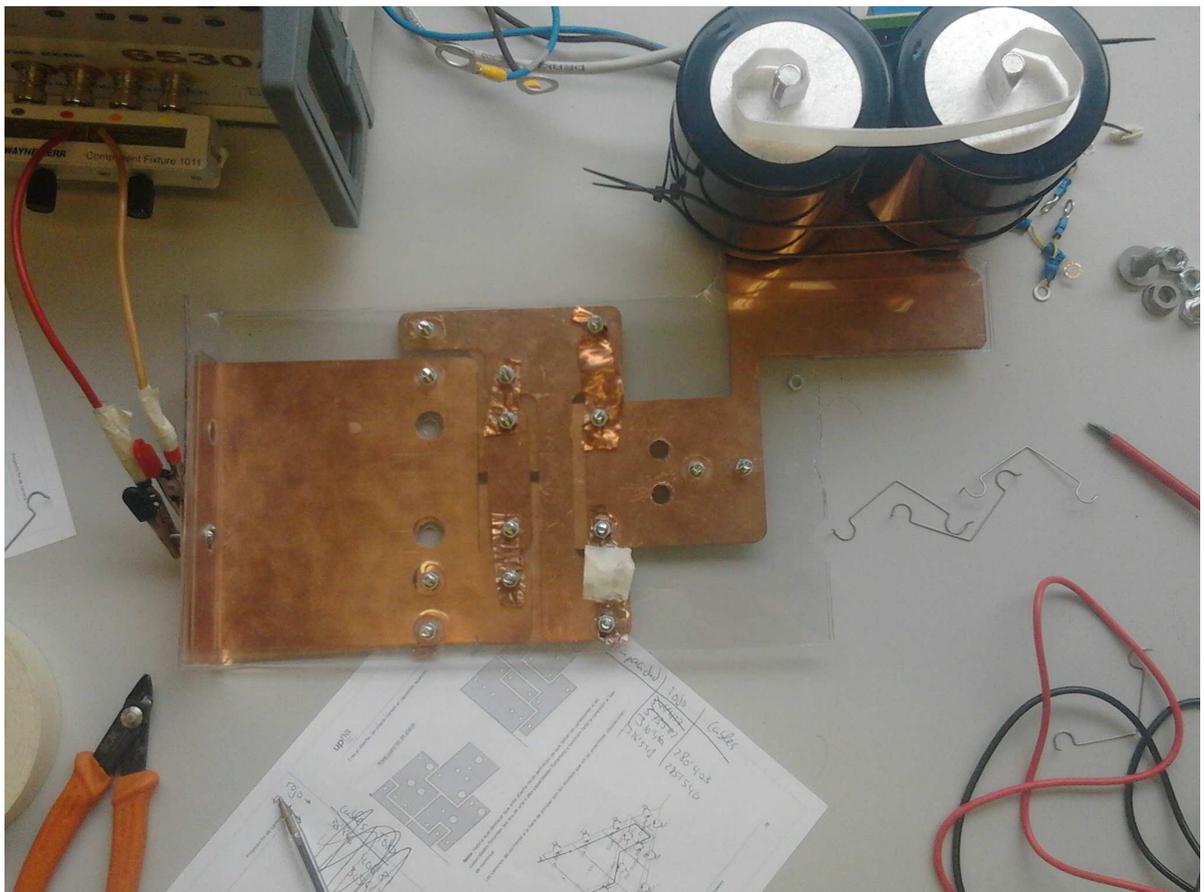


Fig. 49: Conexión del busbar de 1CF al medidor de impedancias

La Fig. 50 muestra la conexión realizada para medir la inductancia parásita del busbar de dos capacidades flotantes.

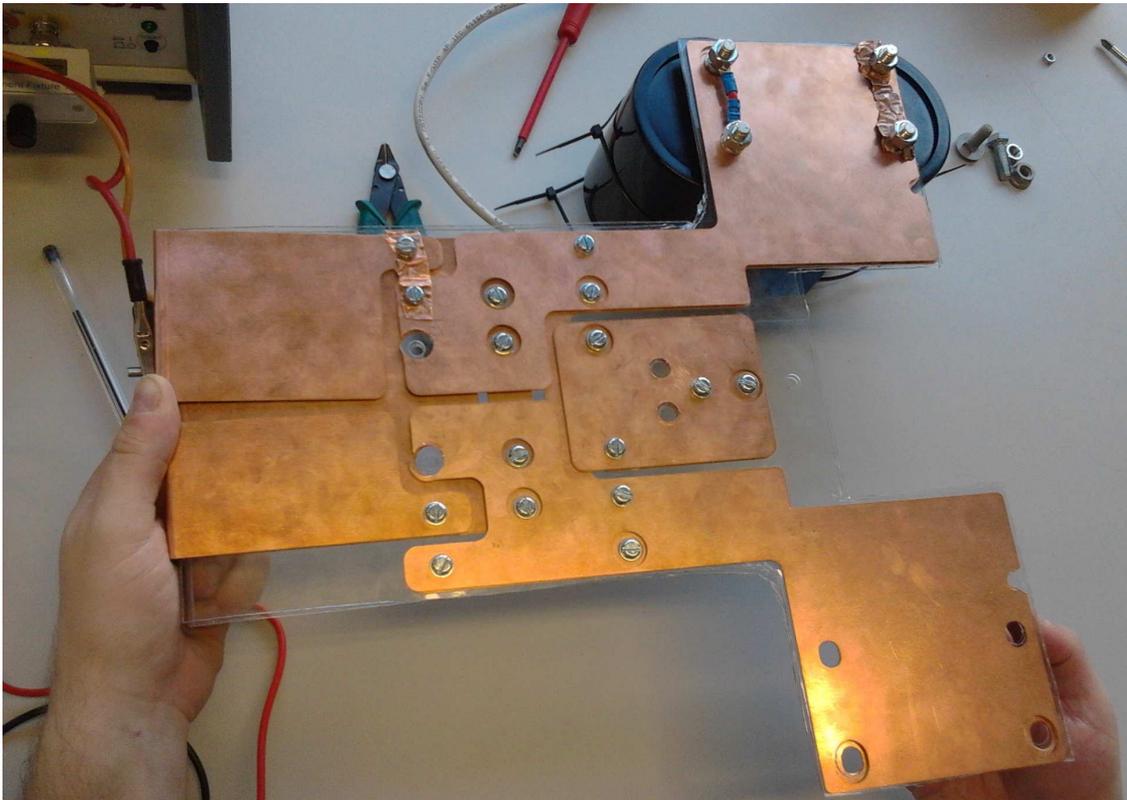


Fig. 50: Conexión del busbar de 2CF al medidor de impedancias.

En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos para el busbar de una capacidad flotante y se comparan con los obtenidos en las simulaciones de Maxwell.

	L.total	L.cables	L.placas	L.simulación
Camino rojo	388 nH	302 nH	86 nH	72 nH
Camino verde	382 nH	294 nH	88 nH	81 nH

Tabla 18: Resultados experimentales del busbar de 1CF.

A simple vista parece que los resultados no son muy buenos, pero hay que tener en cuenta que la inductancia de los cables comparada con la inductancia que se quiere medir es muy grande. Esa es la principal causa de la diferencia entre los valores simulados y los reales. Aun y todo, los resultados son bastante buenos y se consideran como satisfactorios.

La Tabla 19 muestra los valores obtenidos en el caso del busbar de dos capacidades flotantes.

	L. total	L.cables	L. placas	L. simulación
Camino rojo	291 nH	228 nH	63 nH	50 nH
Camino verde	393 nH	336 nH	57 nH	54 nH

Tabla 19: Resultados experimentales del busbar de 2CF.

En este caso, los resultados experimentales obtenidos son muy similares a los resultados de las simulaciones.

5.2 Industrial

Una vez realizadas todas las simulaciones en el prototipo, se pasó a diseñar las placas del convertidor industrial. Para este convertidor se utilizan los módulos de ABB llamados **5SNA1200G450300**.



Fig. 51: IGBT (5SNA1200G450300) utilizado para el convertidor real.

La tensión máxima que soportan estos módulos es de 2800V y su corriente máxima es de 1200A, por lo tanto, el convertidor de 5 niveles podrá tener una potencia máxima de:

$$V_{IGBT} = 2800V$$

$$I_{IGBT} = \frac{1200}{\sqrt{2}}$$

$$V_{linea} = V_{IGBT} \times \frac{4}{\sqrt{2}}$$

$$P = \sqrt{3} \times V_{linea} \times I_{IGBT}$$

$$P_{real} = \frac{P}{1.1} = 10,6MW$$

Otra de las ventajas de éstos módulos es que su circuito interno está compuesto por tres conjuntos de IGBT+diodo conectados en paralelo.

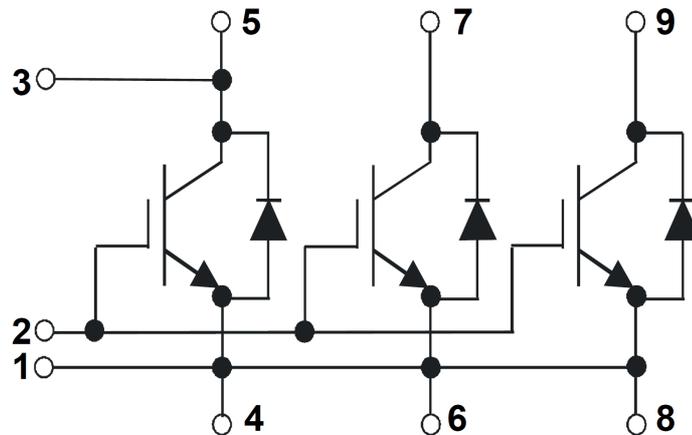


Fig. 52: Circuito eléctrico del IGBT (5SNA1200G450300).

Lo cual hace que, para ciertas aplicaciones se ahorre espacio e inductancia, ya que se colocarían menos módulos. En el caso del convertidor de 5 niveles no es así ya que se necesitan colocar 12 módulos, mientras que en el prototipo se colocan 7. Esto hará que la inductancia aumente debido a las inductancias provocadas por los módulos. Estos módulos tienen una inductancia de 18nH, menor que la de los módulos utilizados en el prototipo.

El tamaño de estos módulos es mucho mayor (190x140mm), de tal manera que las placas diseñadas también tendrán un tamaño mucho mayor que en el prototipo y por tanto la inductancia será mayor.

5.2.1 Lay-out

Lay-out 1:

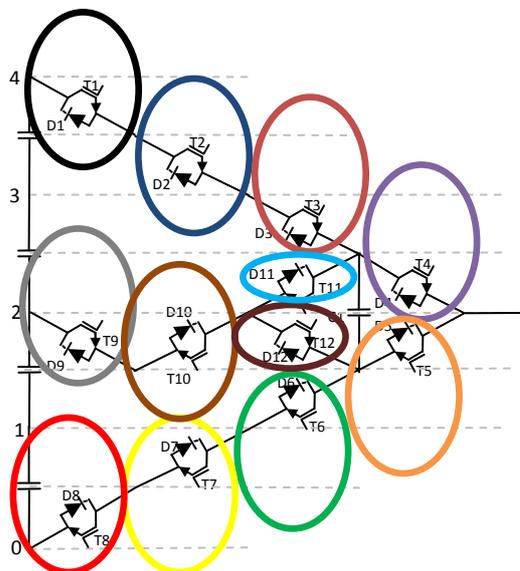
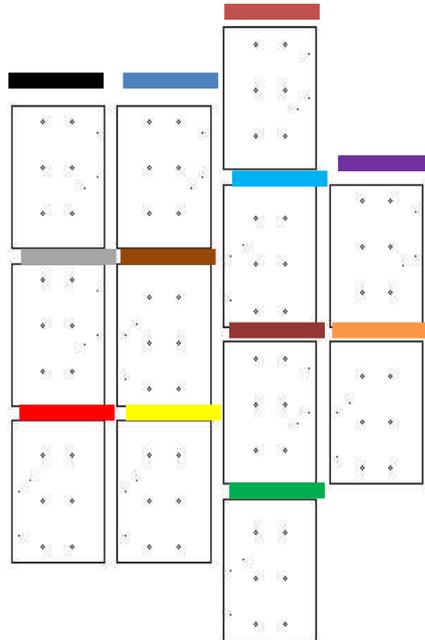


Fig. 53: Lay-out 1 del 5L-ANPC industrial.

Lay-out 2:

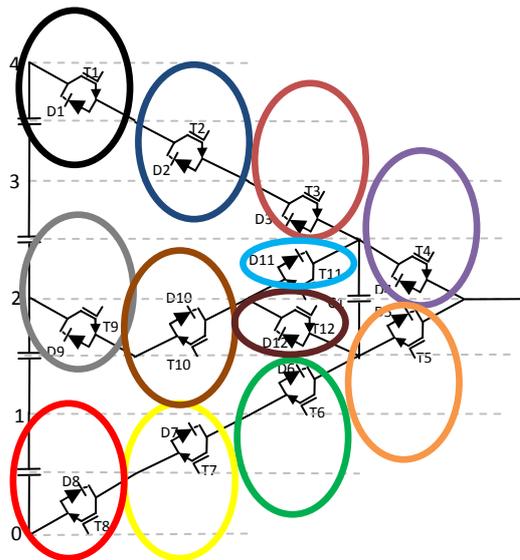
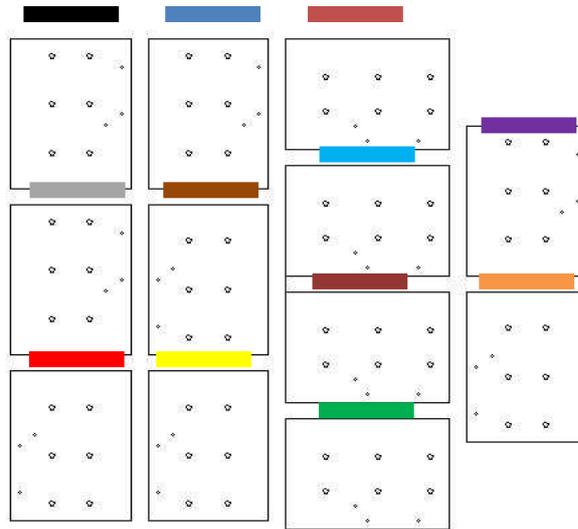


Fig. 54: Lay-out 2 del 5L-ANPC industrial.

Lay-out 4:

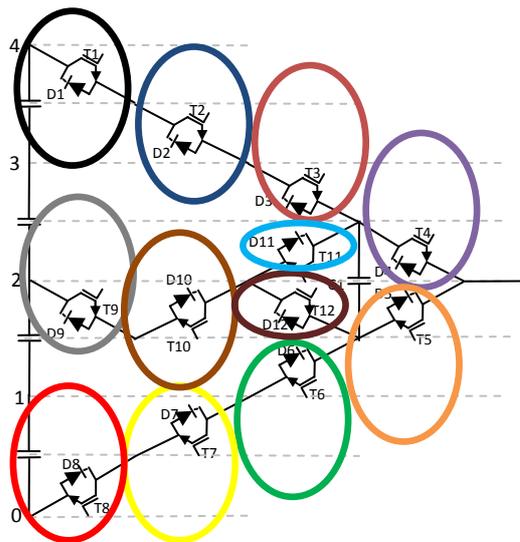
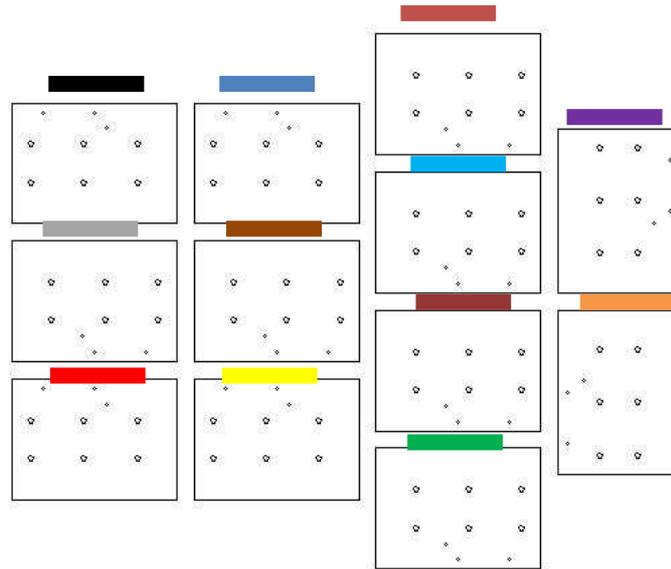


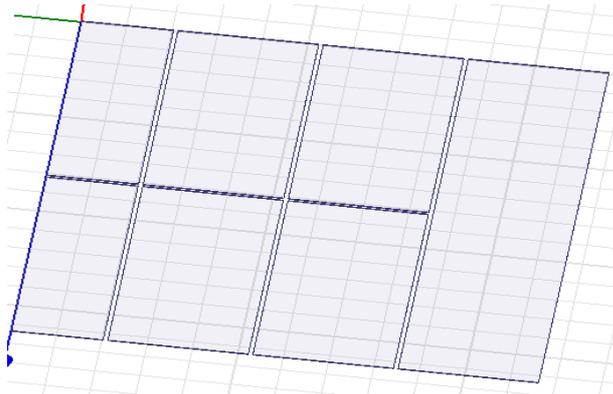
Fig. 56: Lay-out 4 del 5L-ANPC industrial.

5.2.2 Diseño de placas

Como se ha dicho antes, la inductancia parásita provocada por estas placas será mayor que en el prototipo debido a que su tamaño es mayor. En este caso no se han incluido agujeros en las placas.

Lay-out 1:

Nivel superior de placas



Nivel inferior de placa

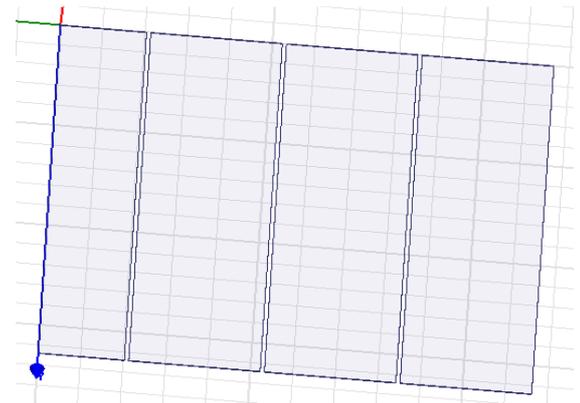
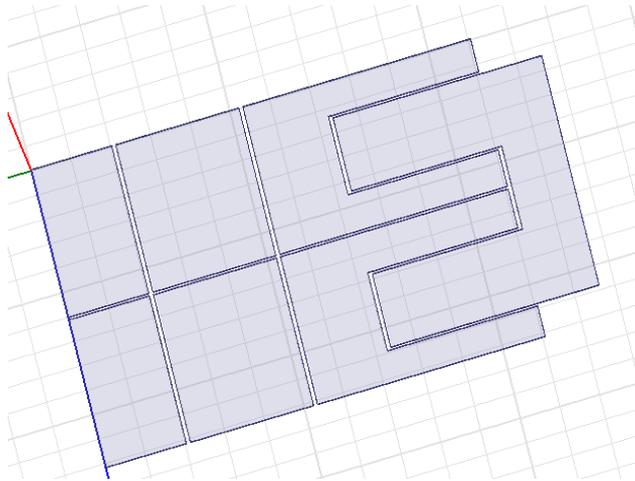


Fig. 57: Diseño de placas del Lay-out 1 del 5L-ANPC industrial.

Lay-out 2:

Nivel superior de placas



Nivel inferior de placa

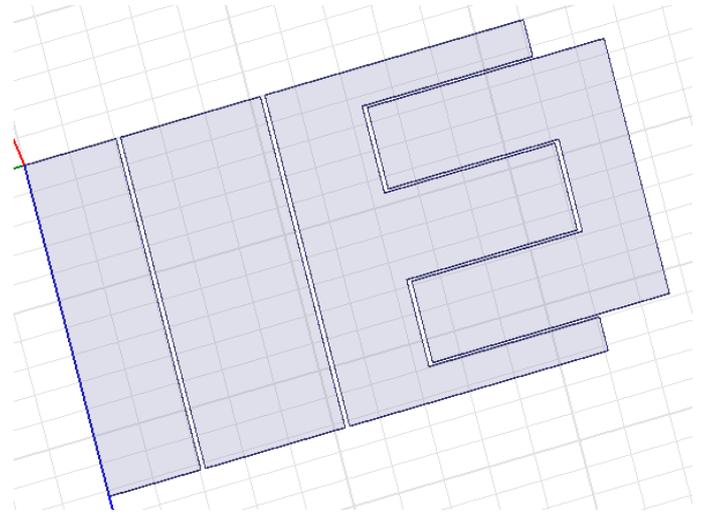
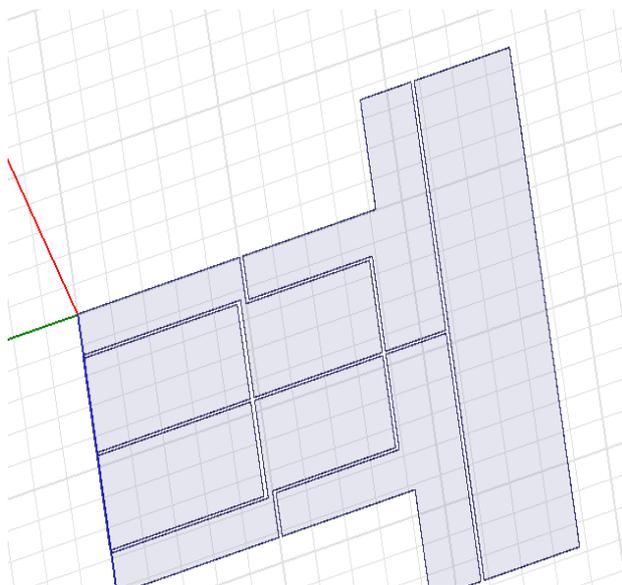


Fig. 58: Diseño de placas del Lay-out 2 del 5L-ANPC industrial.

Lay-out 3:

Nivel superior de placas



Nivel inferior de placa

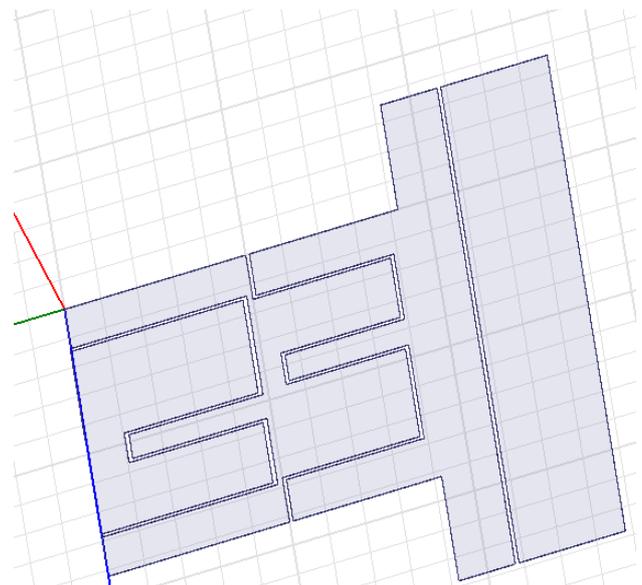


Fig. 59: Diseño de placas del Lay-out 3 del 5L-ANPC industrial.

Lay-out 4:

Nivel superior de placas

Nivel inferior de placa

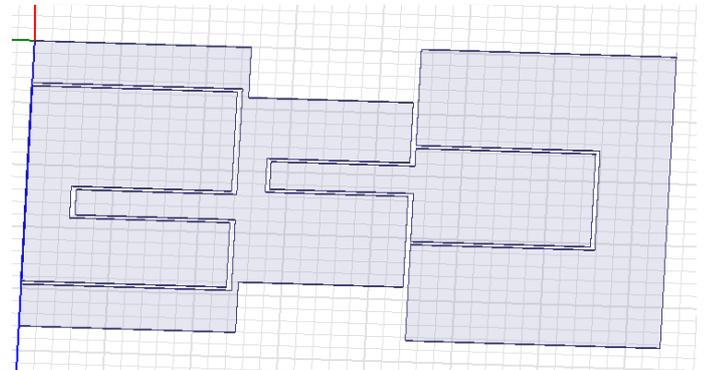
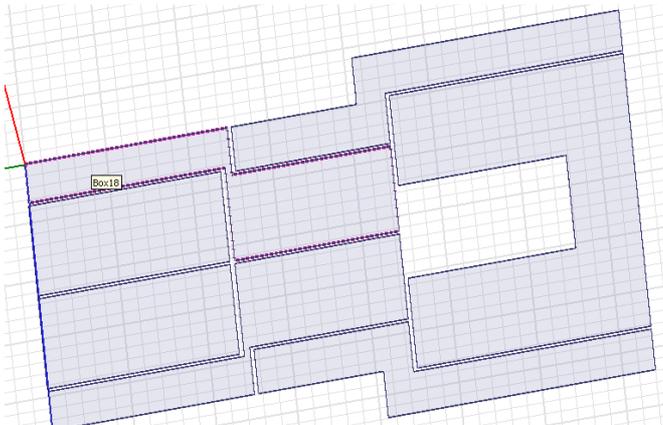


Fig. 60: Diseño de placas del Lay-out 4 del 5L-ANPC industrial.

A simple vista se observa que las placas del lay-out 1 tienen una forma más sencilla a la hora de fabricarlas y están perfectamente superpuestas. Además la espira de corriente es menor ya que la ida (T1-T2-T3) y la vuelta (T12-T10-T9) de corriente están más cercanas entre sí que en el resto de lay-out. Por lo tanto, en principio parece que es el que menor inductancia va a tener.

En el caso del prototipo, a pesar de que algún lay-out parecía que era bastante mejor que el resto, cuando se realizaron las simulaciones se descubrió que la inductancia parásita era similar en todos los lay-out estudiados. En este caso veamos que ocurre.

5.2.3 Caminos de corriente y resultados

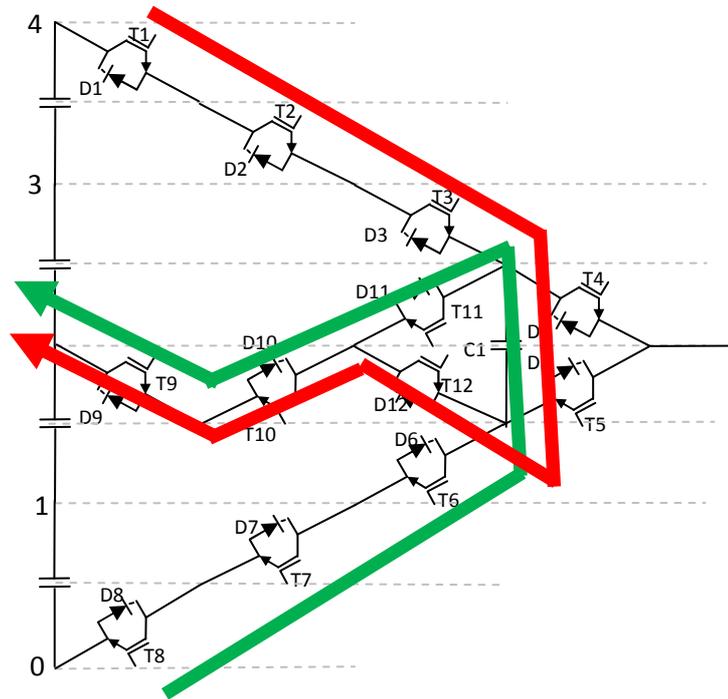


Fig. 61: Caminos de corriente simulados en el 5L-ANPC industrial.

	Camino rojo	Camino verde
Lay-out 1	67nH	65nH
Lay-out2	161nH	157nH
Lay-out3	216nH	210nH
Lay-out4	294nH	237nH

Tabla 20: Inductancias resultantes en el 5L-ANPC industrial para los dos caminos de corriente y para cada lay-out.

En concordancia con lo que a priori se podía pensar, el lay-out 1 es el que menor inductancia parásita produce. A diferencia del prototipo, en el caso del convertidor real sí que existe gran diferencia entre las inductancias provocadas por el busbar.

Por ejemplo, entre el lay-out1 (el de menor inductancia) y el lay-out4 (el de mayor inductancia), existe una diferencia de alrededor del 75% en ambos caminos de corriente. Por lo tanto, a la hora de diseñar el busbar del convertidor real, sí que es interesante prestar mayor atención a su diseño con el fin de disminuir la inductancia parásita. Sin embargo, en el prototipo el diseño del busbar es importante en cuanto al aprovechamiento del espacio del radiador, facilitar el montaje, realizar el

mínimo número de agujeros, accesibilidad y cercanía de las conexiones de los drivers..., es decir, importancia constructiva y no importancia en cuanto a reducción de la inductancia parásita.

5.2.4 Influencia de agujeros

En este apartado, se le añaden los agujeros a las placas del lay-out1, ya que es el que menor inductancia parásita tenía en ambos caminos de corriente, tanto en el rojo como en el verde.

En este caso sólo simularé el camino de corriente rojo:

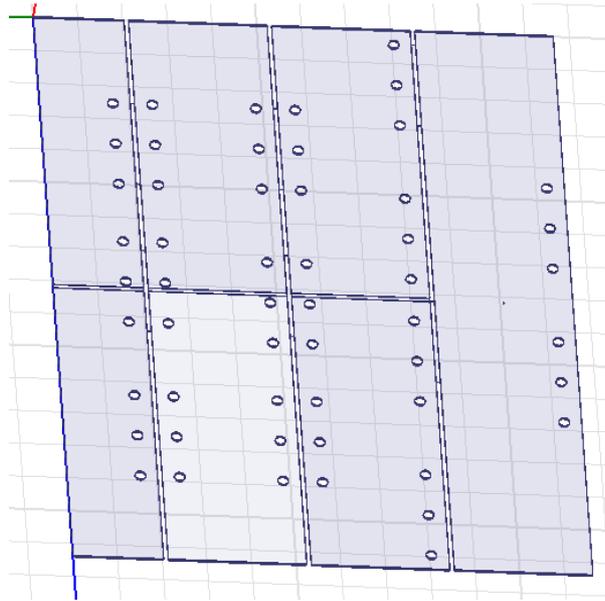


Fig. 62: Placas del lay-out 1 del 5L-ANPC con agujeros.

	Lay-out 3 con agujeros
Camino rojo	68nH

Tabla 21: Inductancia resultantes en el 5L-ANPC industrial al añadirle los agujeros al lay-out1.

El resultado nos indica que al introducirle los agujeros, la inductancia aumenta, pero no de manera significativa ya que es un aumento de 1nH.

5.2.5 Aumento de la distancia entre nivel superior e inferior de placas

En este apartado se estudia el cambio de la inductancia parásita que provoca el ir aumentando la distancia entre el nivel superior e inferior de las placas del busbar. Se estudia también el lay-out 1 y el camino de corriente rojo.

Separación entre niveles	Camino de corriente rojo
1mm	68nH
2mm	90nH
6mm	160nH
12mm	236nH

Tabla 22: Inductancia resultantes en el 5L-ANPC industrial lay-out 1 separando los niveles superior e inferior.

A continuación se mostrará una gráfica que indica la variación de la inductancia parásita en función del aumento de la distancia entre nivel superior e inferior de placas.

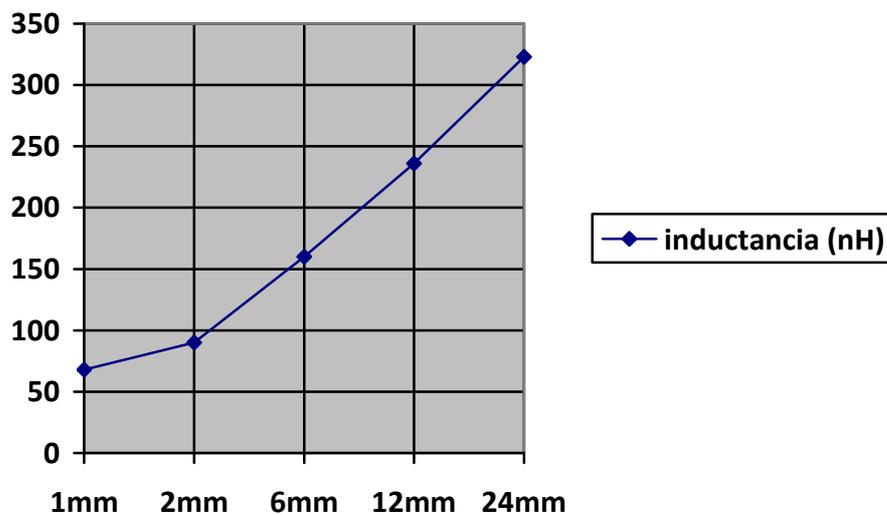


Fig. 63: Gráfica de variación de inductancia en función de la distancia entre nivel superior e inferior.

5.2.6 Uso de otros materiales

Una de las cosas más importantes a la hora de diseñar el busbar es elegir un buen material, considerando como buen material aquel que tiene buenas características eléctricas (buen conductor de corriente eléctrica), buenas características mecánicas (resistente) y lo más barato posible.

Debido a la importancia del material en el diseño, se ha decidido añadir éste apartado en el que se compararán tres materiales distintos (cobre, acero no ferromagnético y hierro). Pero solo se compararán desde el punto de vista eléctrico ya que se simulará la inductancia parásita producida por cada uno de ellos en las mismas condiciones de trabajo. La simulación se realizará en el lay-out 1 y el camino de corriente será el rojo. El valor de la corriente es el mismo que en el resto de las simulaciones realizadas con anterioridad.

	Camino de corriente rojo
cobre	66,99nH
Acero no ferromagnético	67,37nH
hierro	7,93μH

Tabla 23: Inductancia resultantes en el 5L-ANPC industrial lay-out 1 cambiando el material de las placas.

En la tabla se observa que no existe gran diferencia entre la inductancia provocada cuando el material es cobre y cuando el material es acero no ferromagnético, sin embargo, el hierro provoca una inductancia mucho mayor que las dos anteriores, por lo tanto, el hierro no sería una buena elección a la hora de fabricar el busbar. Entre cobre y acero, habría que compararlos en cuanto a precio y características mecánicas para saber cuál elegir.

5.2.7 Influencia de la frecuencia

En función de la frecuencia de la corriente que está circulando por las placas del busbar, la inductancia parásita inducida en las mismas variará. Para comprobar la influencia de la frecuencia, se realizan varias simulaciones variando la frecuencia de la corriente. Como en todos los apartados anteriores se simulará el lay-out 1 y el camino de corriendo de corriente rojo

Frecuencias	Camino de corriente rojo
1MHz	66,99nH
0,1MHz	67,13nH
0,01MHz	67,5nH
0,001MHz	68,5nH

Tabla 24: Inductancia resultantes en el 5L-ANPC industrial lay-out 1variando la frecuencia de la corriente.

6. Conclusiones

La primera conclusión importante es a cerca de los programas de elementos finitos. En un principio, se utilizó **Flux**. Cuando se intentó realizar la simulación del apartado **Caso práctico: busbar real** el programa comenzó a dar muchos problemas a la hora de realizar la malla. Tras varios intentos y leer varios manuales acerca de cómo realizar mallas, se decidió cambiar de programa y se comenzó a utilizar **Maxwell**, el cual no ha mostrado ninguna dificultad a la hora de realizar ningún tipo de diseño y, además, realizaba las simulaciones de manera más rápida. Por lo tanto, recomiendo utilizar Maxwell a la hora de realizar simulaciones en 3D.

En cuanto al prototipo, las diferencias entre las inductancias parásitas provocadas por los distintos lay-outs eran despreciables ya que eran muy similares. Por consiguiente, se decidió elegir el lay-out que mejor disposición tenía, es decir, en el que menos agujeros, el que más accesibles y cercanos tenía los drivers y el que permitiese un mejor montaje Fig. 36. Por otro lado, la inductancia provocada por las placas en comparación con la inductancia que producen los módulos es insignificante, ya que éstos provocan alrededor de un 90% de la inductancia total. Por lo tanto, en lo que se refiere al prototipo sería más importante investigar cómo reducir la inductancia parásita modificando la tecnología de los semiconductores.

Con lo que se refiere a las conexiones de las capacidades flotantes, se comparó la inductancia que producía el de una capacidad con la que producía el de dos capacidades y se llegó a la conclusión de que presentaba una menor inductancia la estructura de dos capacidades flotantes. En este caso las diferencias si eran significativas. Pero por otro lado, el de dos capacidades flotantes ocupa más espacio y es necesario controlar la tensión de dos capacidades flotantes, mientras que en el de una CF, solo se necesita controlar la tensión de dicha capacidad. Esto se puede observar en el apartado (Conexiones a las capacidades flotantes).

En lo que respecta al convertidor industrial, los módulos utilizados tienen un tamaño mayor que los utilizados en el prototipo, por tanto, ya se sabía que la inductancia iba a ser mayor, ya que las placas debían tener también un tamaño mayor. En este caso se estudiaron 4 lay-out distintos y se observó que sí existían diferencias significativas entre los distintos lay-out. Tanto es así que, en este caso sí se consigue reducir la inductancia parásita mediante el diseño del busbar. También hay que tener en cuenta que la inductancia producida por estos módulos es menor que la producida por los módulos del prototipo, con lo cual, se produce un mayor equilibrio entre la inductancia provocada por el busbar y la producida por los módulos. A pesar de ello, sigue pesando mucho la inductancia provocada por los módulos. Esto se puede ver en el apartado (5.2 Industrial).

7. Bibliografía

- [1] Manual Flux
- [2] Manual Maxwell
- [3] Proyecto Fin de Master de Eduardo Burguete Archel
- [4] Hoja de características del módulo 5SNA 1200G450300
- [5] Hoja de características del módulo SKM50GB12T4
- [6] Libro de máquinas eléctricas (Luis Marroyo y Pablo Sanchis).
- [7] Revista ABB (el convertidor de cinco niveles).
- [8] ECSE 2100 Two-Wire and Parallel Plate Transmission Lines.
- [9] Busbar Design: How to Spare Nanohenries? JM.Guichon¹, J.Aimé¹, JL.Schanen¹, C.Martin¹, J.Roudet¹, E.Clavel¹, M.Arpillière², R.Pasterczyk³, Y.Le Floch⁴

8. Anexo 1

En este anexo, se muestran imágenes sobre cómo quedaría el convertidor. En la Fig. 64 se puede ver las tres fases con el busbar de 2CF y en la Fig. 65 se muestran las tres fases con el busbar de 1 CF.

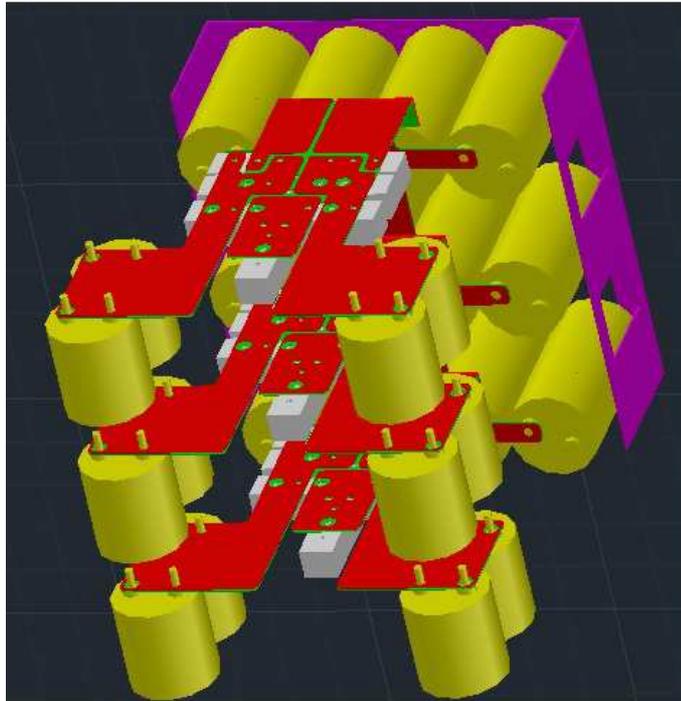


Fig. 64: Diseño del convertidor con dos capacidades flotantes.

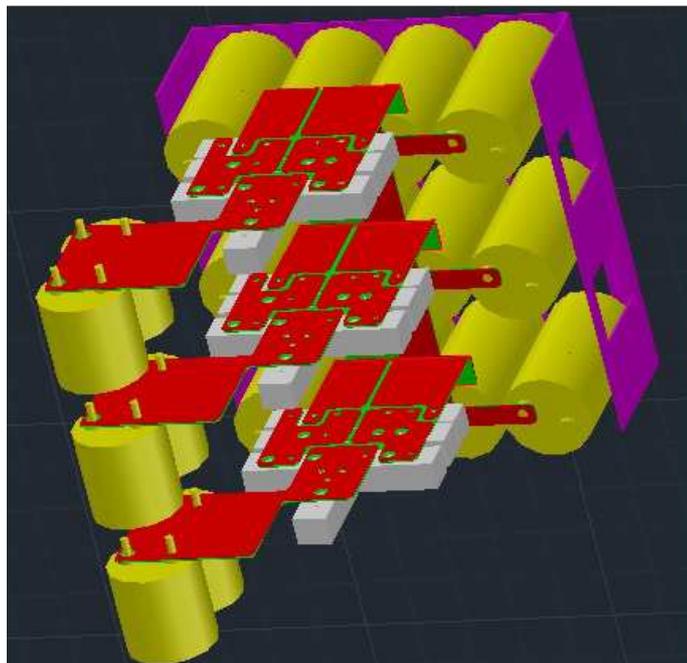
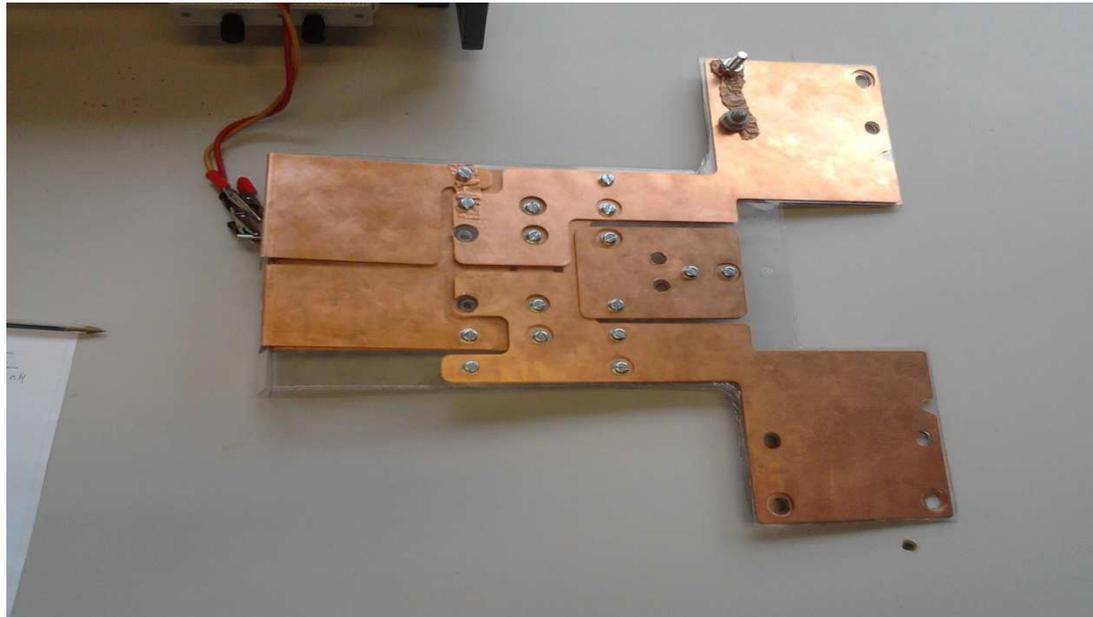


Fig. 65: Diseño del convertidor con una capacidad flotante.

Diseño de busbar para convertidores multinivel



31 de Mayo de 2013

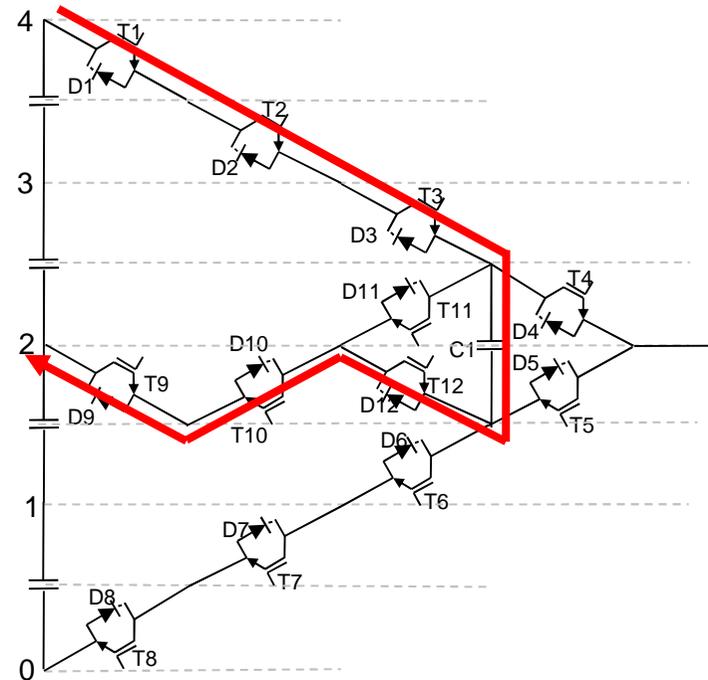
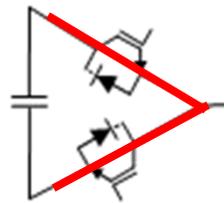
Alumno: Iñigo Pastor Matías
Tutores: Jesús López Taberna
Eduardo Burguete Archel

CONTENIDO

1. Objetivo
2. Validación del programa de simulación de elementos finitos
3. Características importantes en el diseño del busbar
4. Convertidor de 3 niveles (NPC)
5. Convertidor de 5 niveles (prototipo)
6. Resultados experimentales
7. Convertidor 5 niveles (industrial)
8. Conclusiones

1. OBJETIVO

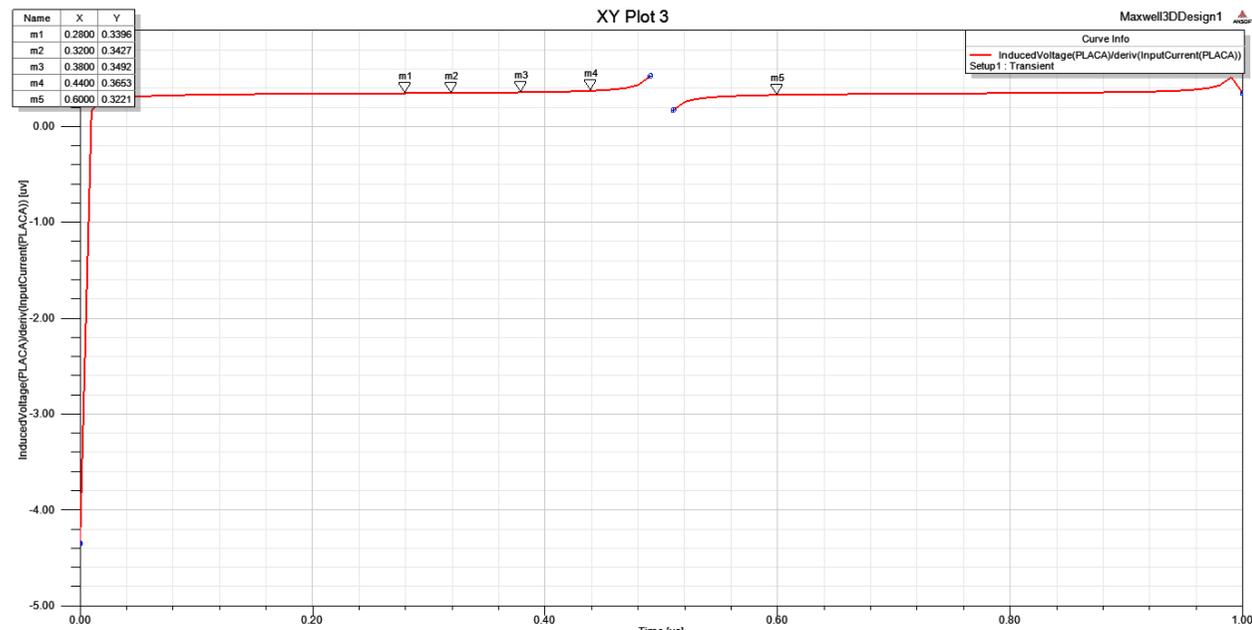
Finalidad: Estudio de la inductancia del busbar y su importancia en un convertidor multinivel



1. OBJETIVO

Metodología empleada

- Flux
- Maxwell

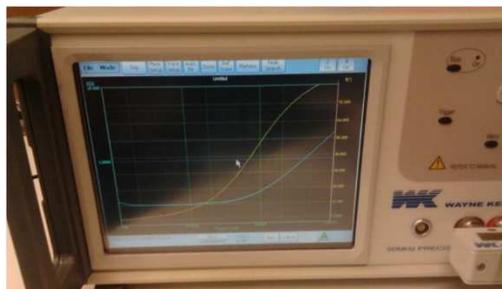


2. VALIDACION DEL PROGRAMA

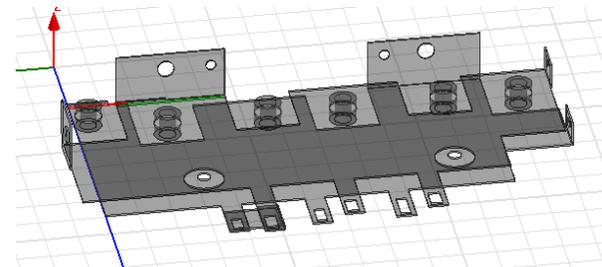
Uso busbar real del laboratorio



Comparación resultados experimentales con simulación



Analizador de impedancias



Maxwell

2. VALIDACION DEL PROGRAMA

Montaje del ensayo y resultados obtenidos

Conexión para
inductancia total



Conexión para
inductancia de cables



	Ensayo real	Simulaciones en Maxwell
Inductancia total	372,15 nH	
Inductancia cables	350,06 nH	
Inductancia placas	22,09 nH	33,04 nH

Los resultados son del mismo orden de magnitud

2. VALIDACION DEL PROGRAMA

Validación mediante conductores infinitos y placas infinitas

Conductores
 infinitos

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\pi} \cdot \cos^{-1}\left(\frac{d}{2a}\right)$$

Placas infinitas

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot h}{W}$$

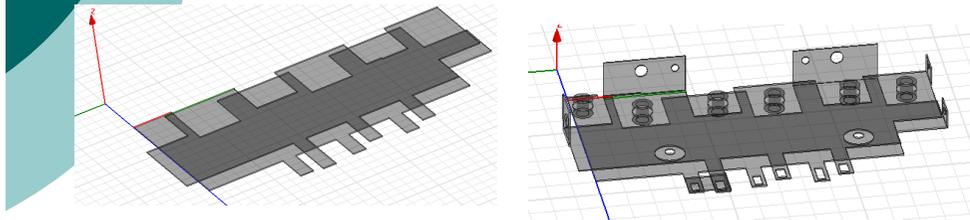
Cálculo teórico	Simulación Maxwell
120 nH	122 nH

Cálculo teórico	Simulación Maxwell
13,194 nH	12,8530 nH

Características importantes en el diseño del busbar

Influencia de agujeros

Superposición de placas



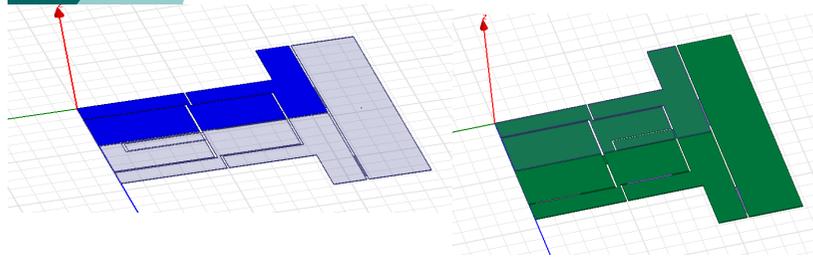
Inductancia sin agujeros ni aletas	Inductancia del busbar completo	Aumento
27.326 nH	33.043 nH	17%

Placas superpuestas	Placas no superpuestas (10 mm)	Placas no superpuestas (50 mm)
18,96 nH	18,99 nH	21,22 nH

La inductancia aumenta un 17%

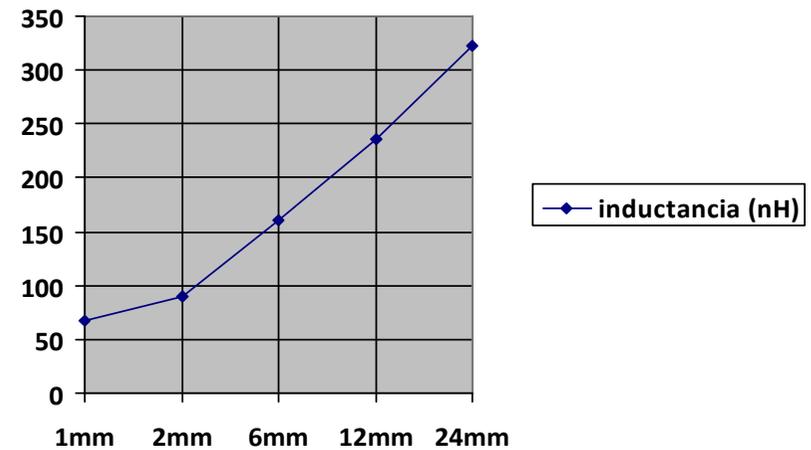
Características importantes en el diseño del busbar

Influencia de placas no activas



Geometría completa	Solo placas activas
206 nH	210 nH

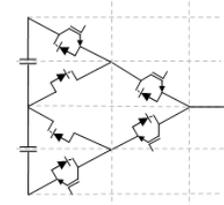
Distancia entre niveles



Separación entre niveles	Camino de corriente rojo
1 mm	68 nH
2 mm	90 nH
6 mm	160 nH
12 mm	236 nH

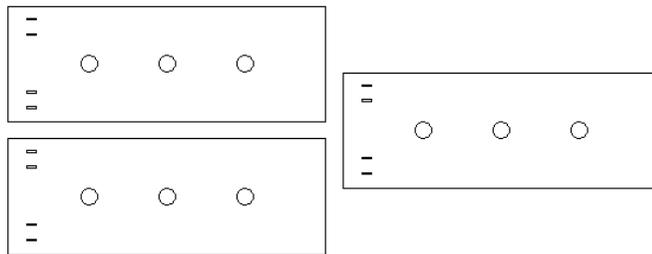
4. Convertidor de 3 niveles (NPC)

- Topología: NPC
- 2 Distribuciones (Lay-Out)

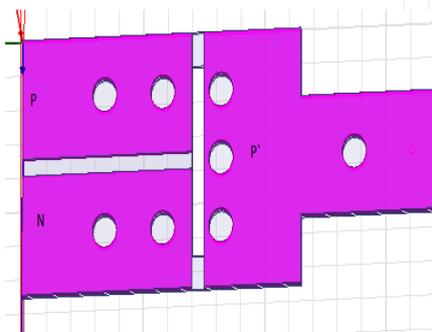


Topología: NPC

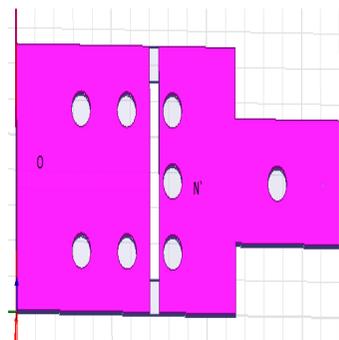
Lay-Out 1



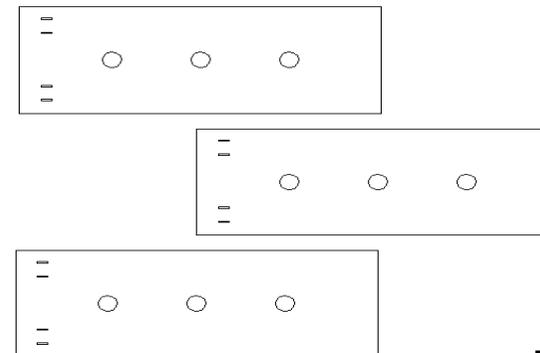
Nivel superior



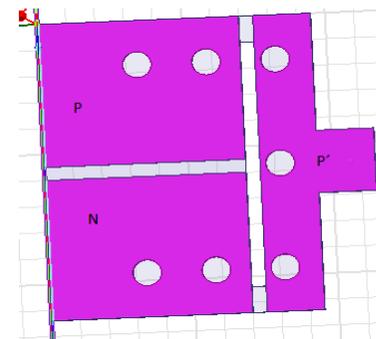
Nivel inferior



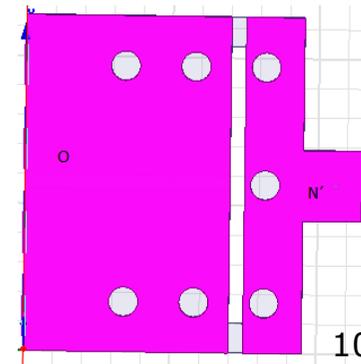
Lay-Out 2



Nivel superior

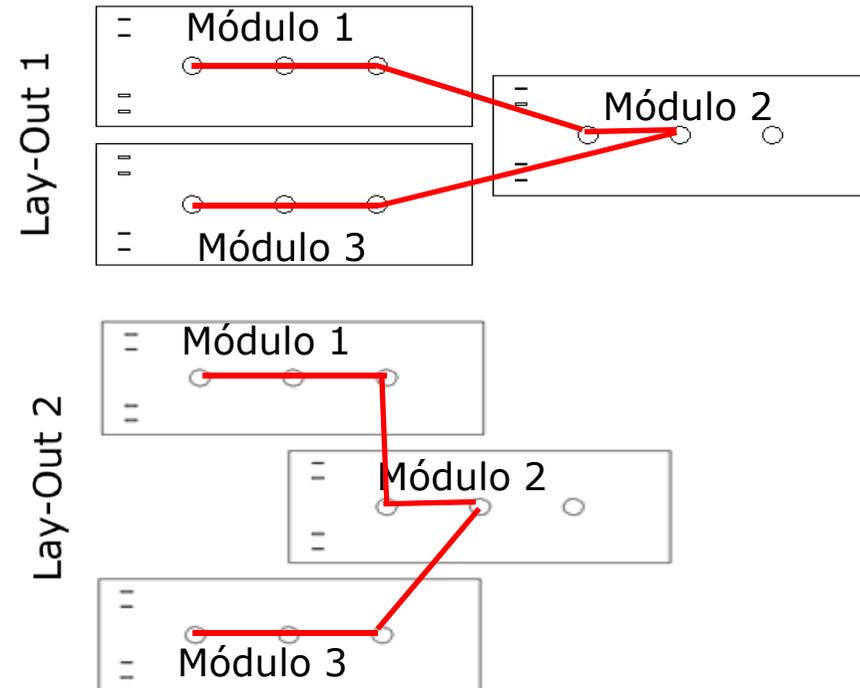
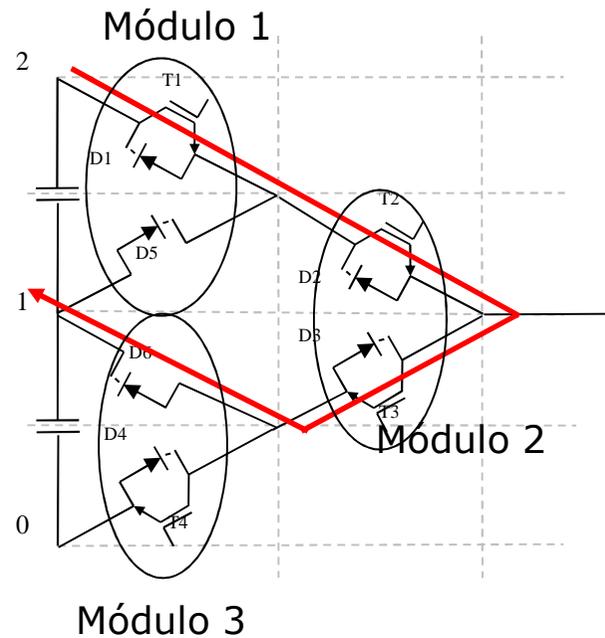


Nivel inferior



4. Convertidor de 3 niveles (NPC)

Camino de corriente y resultados

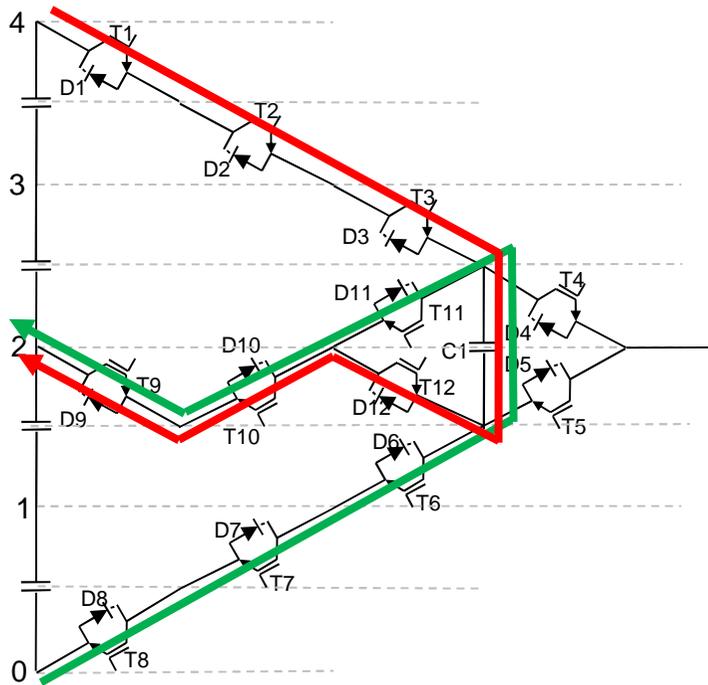


	Lay-Out 1	Lay-out 2
Inductancia (nH)	21.547	27.33
Diferencia (%)		21

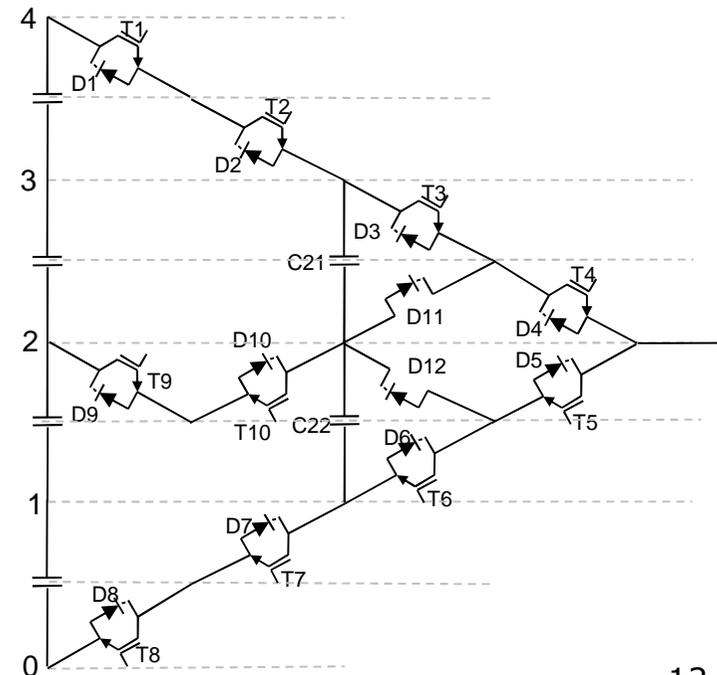
5. Convertidor de 5 niveles (prototipo)

- Topología: 5L-ANPC
- 3 Distribuciones (Lay-Out)

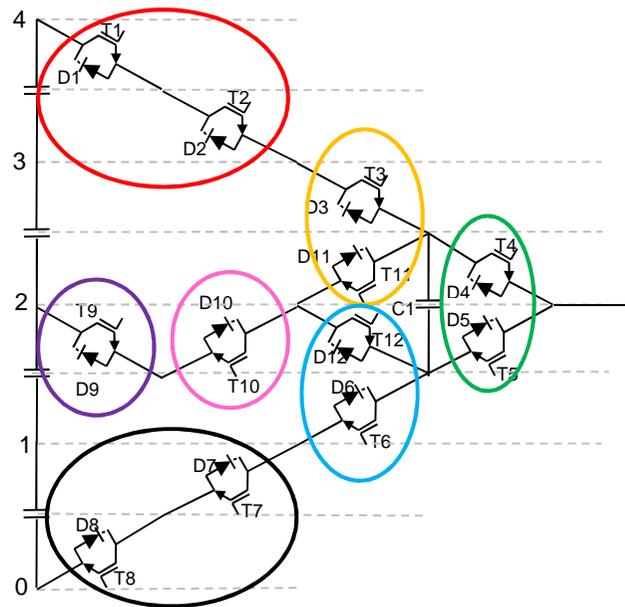
Una capacidad flotante



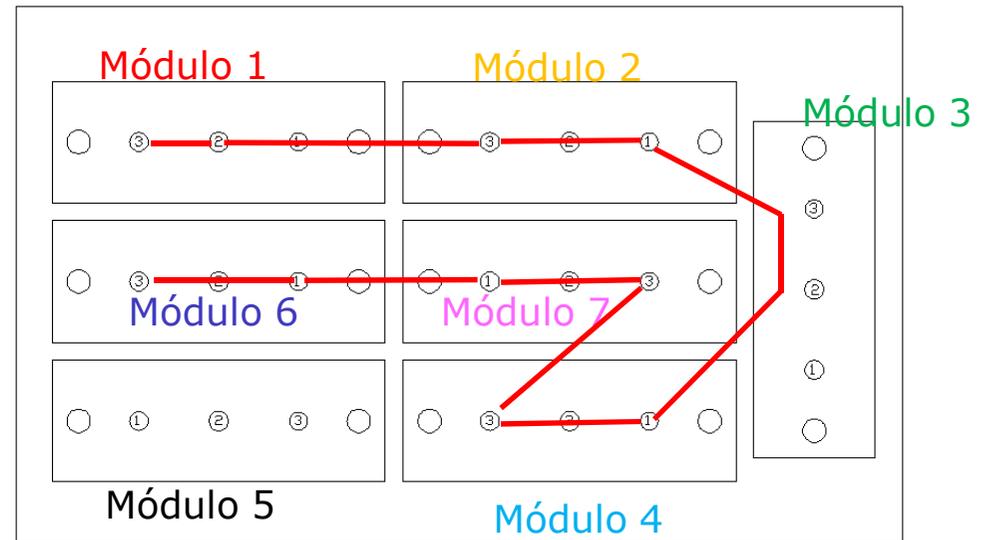
Dos capacidades flotantes



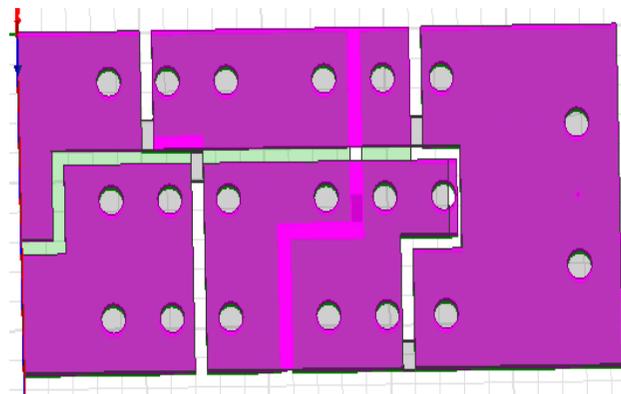
5. Convertidor de 5 niveles (prototipo)



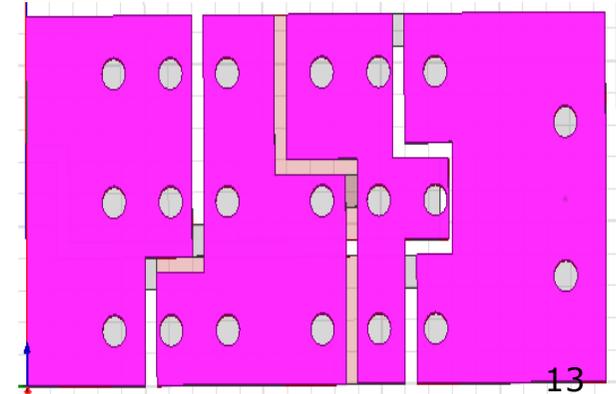
Lay-out 1



Nivel superior

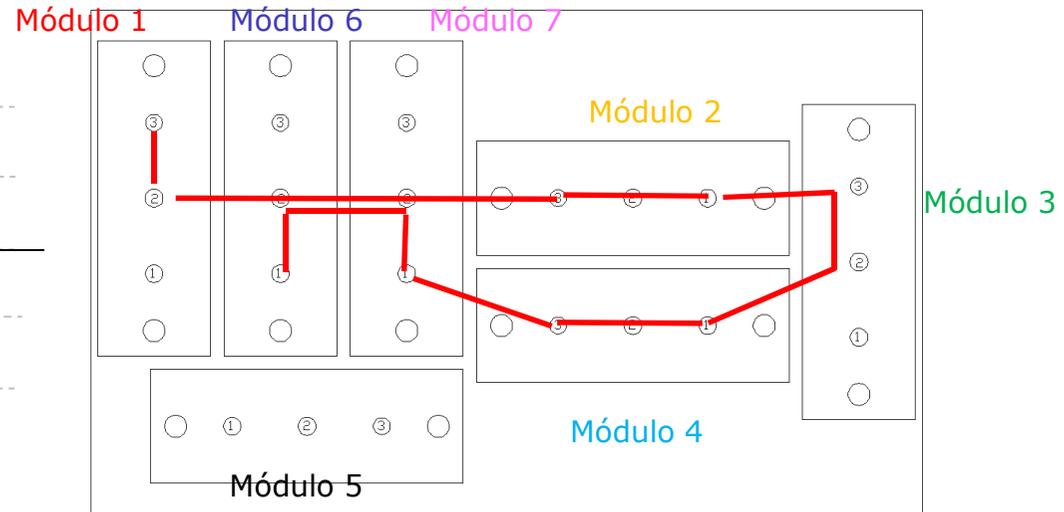
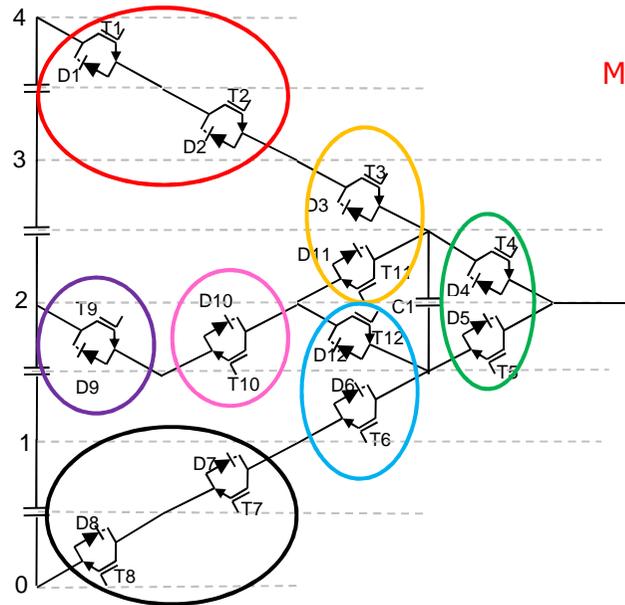


Nivel inferior

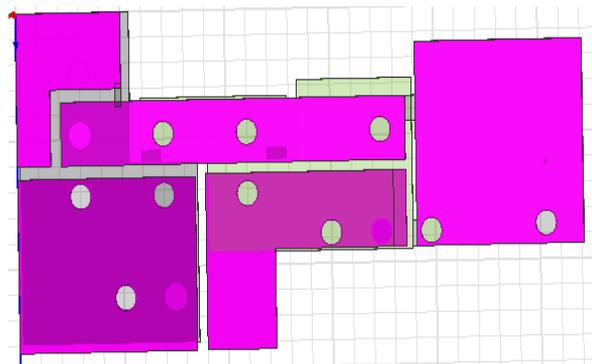


5. Convertidor de 5 niveles (prototipo)

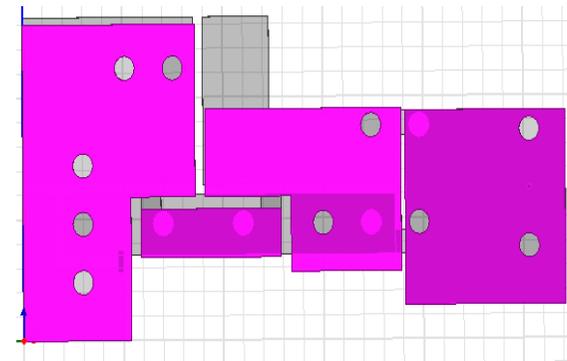
Lay-out 2



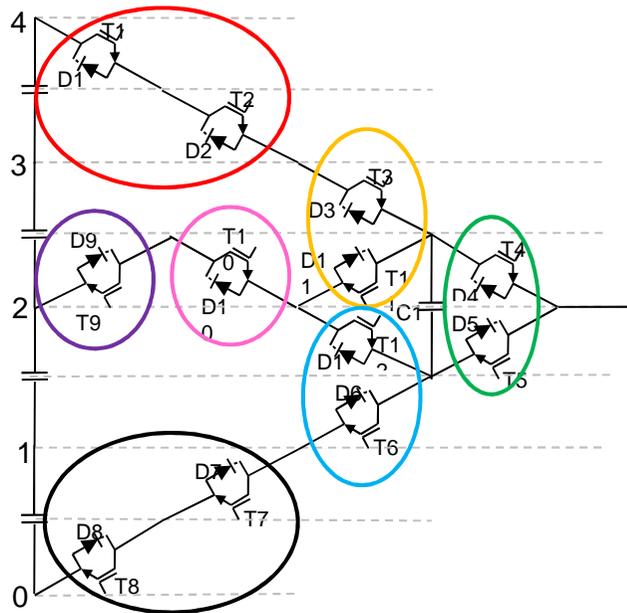
Nivel superior



Nivel inferior

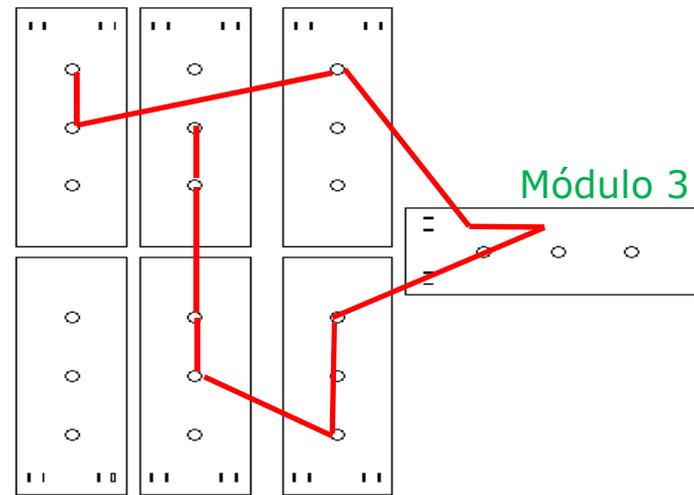


5. Convertidor de 5 niveles (prototipo)

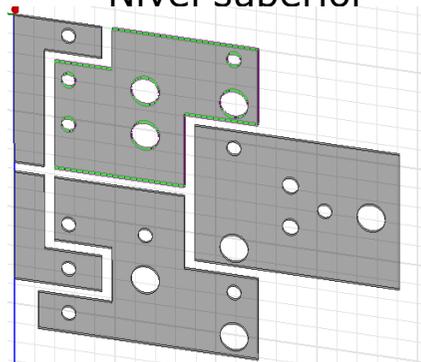


Lay-out 3

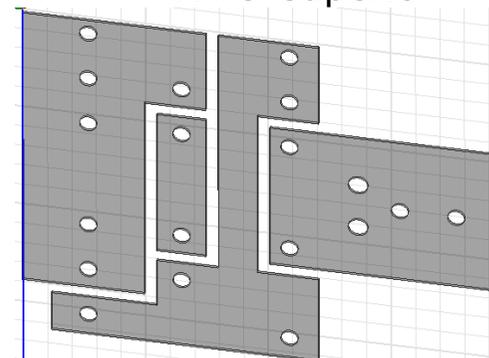
Módulo 1 Módulo 6 Módulo 2



Nivel superior

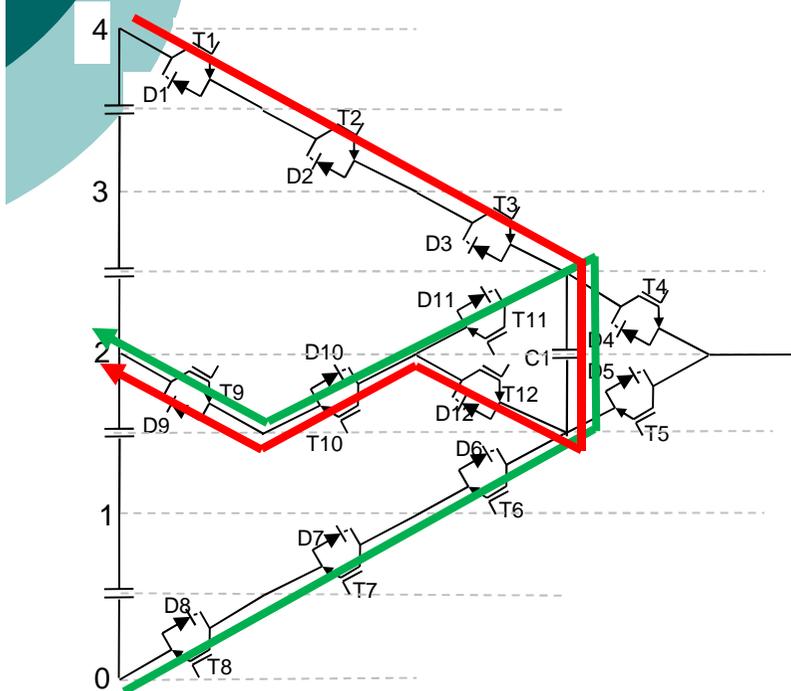


Nivel superior



5. Convertidor de 5 niveles (prototipo)

Caminos de corriente y resultados



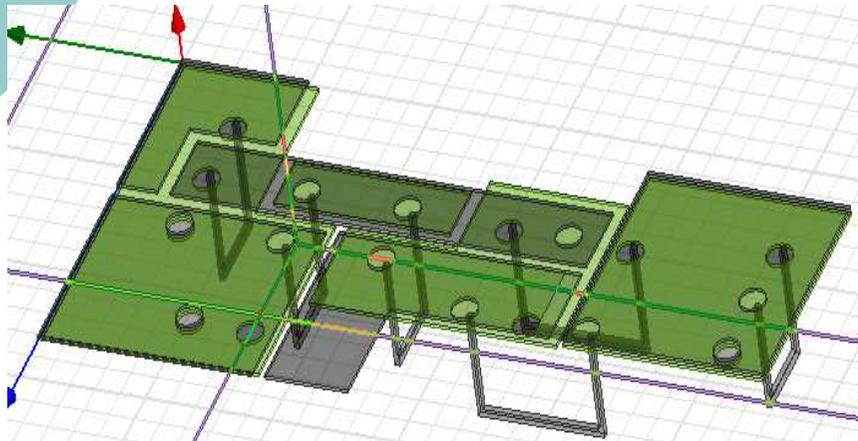
	Lay-out1	Lay-out 2	Lay-out 3
Camino rojo	36.4 nH	34.2 nH	41 nH
Camino verde	39.6 nH	38.2 nH	43 nH

Se observa que el lay-out 2 es mejor tanto en el camino rojo como en el verde.

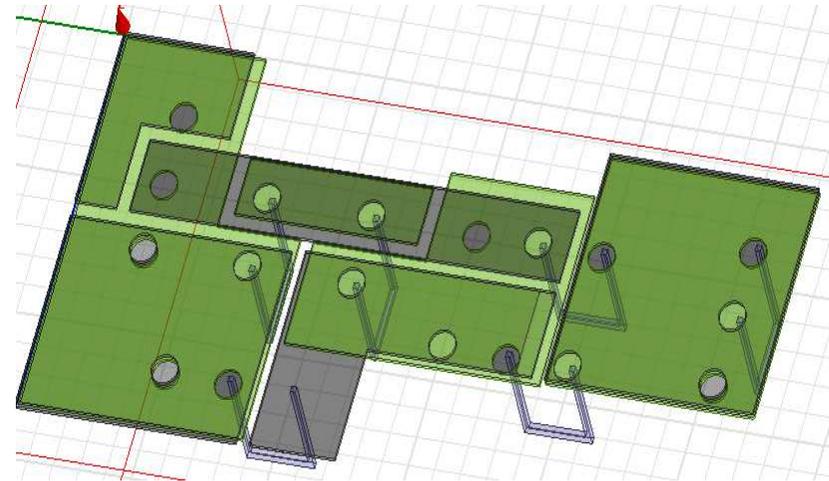
5. Convertidor de 5 niveles (prototipo)

Influencia de los IGBTs en el Lay-Out 2

Camino rojo



Camino verde

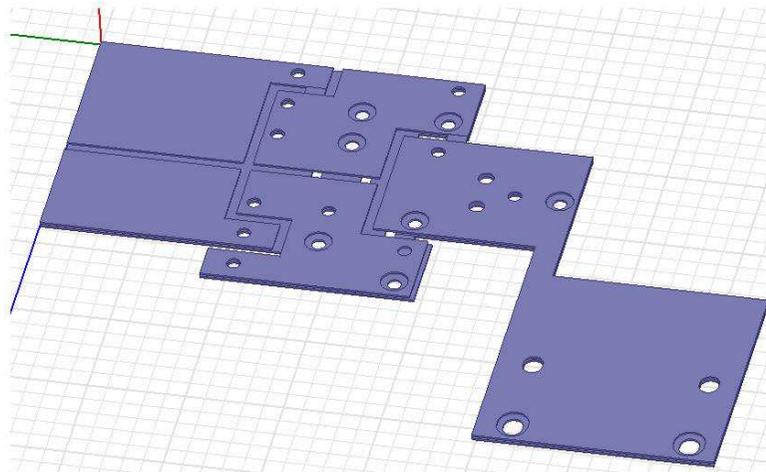


	Con IGBTs	Sin IGBTs	Diferencia (%)
Camino rojo (nH)	319.750	34.222	89.30
Camino verde (nH)	296.17	38.168	87.11

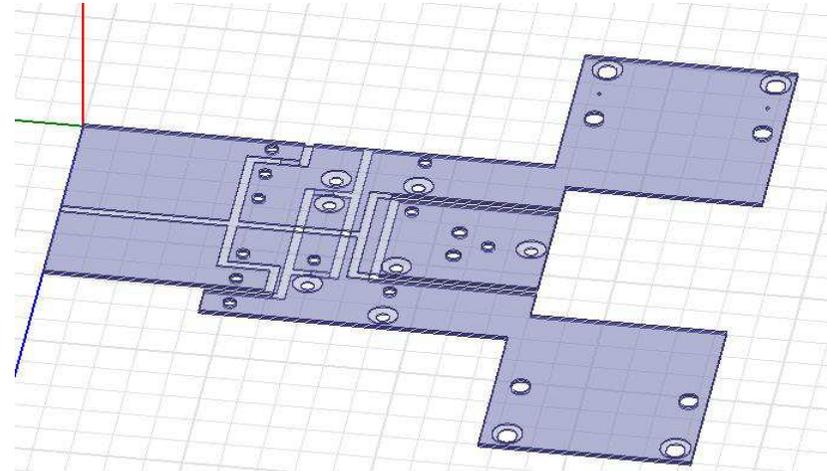
5. Convertidor de 5 niveles (prototipo)

Conexiones a las capacidades flotantes

Una capacidad flotante



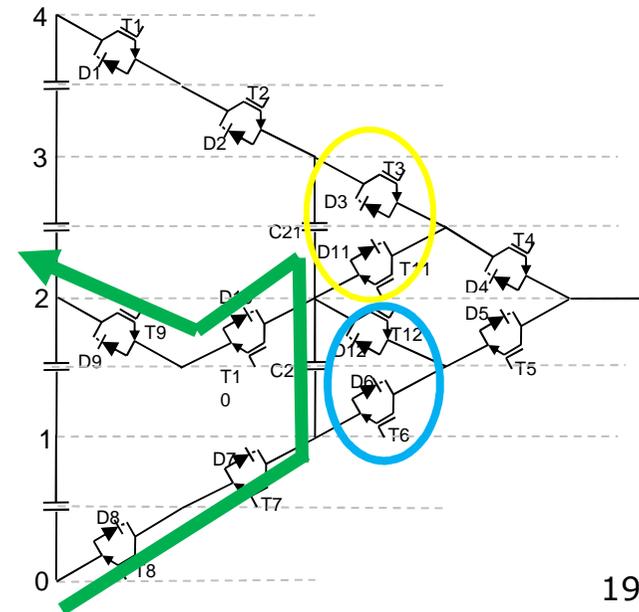
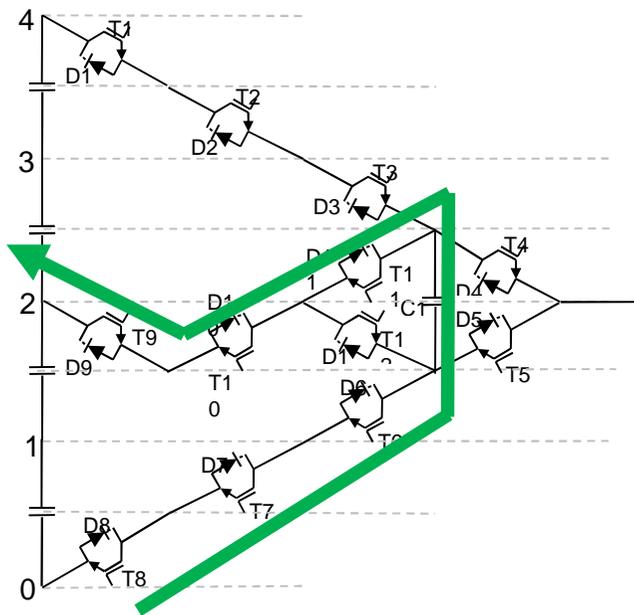
Dos capacidades flotantes



5. Convertidor de 5 niveles (prototipo)

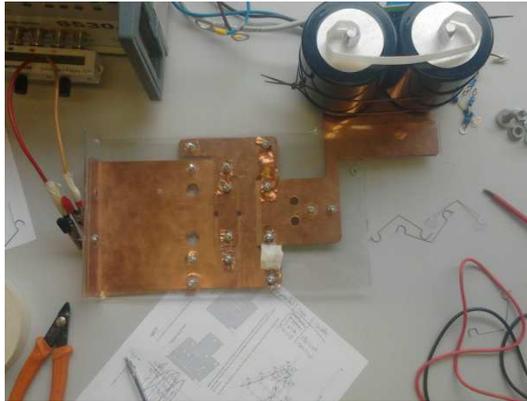
Resultados

	Sin conexiones a las capacidades flotantes	Una capacidad flotante	Dos capacidades flotantes
Camino rojo	41 nH	72 nH	50nH
Camino verde	43 nH	81 nH	54nH

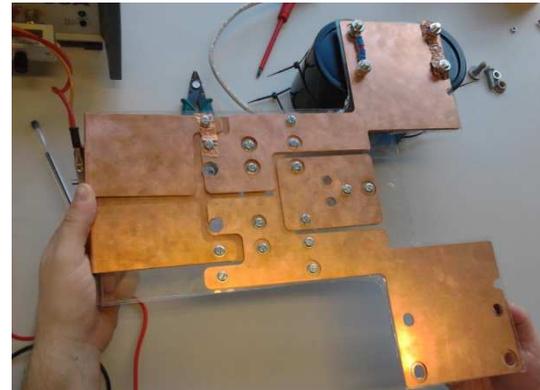


6. Resultados experimentales

Una capacidad flotante



Dos capacidades flotantes

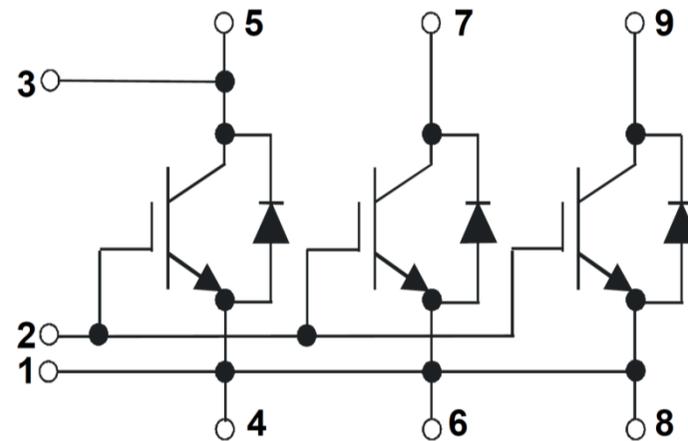


	L_total	L_cables	L_placas	L_Maxwell
Camino rojo	388 nH	302 nH	86 nH	72 nH
Camino verde	382 nH	294 nH	88 nH	81 nH

	L_total	L_cables	L_placas	L_Maxwell
Camino rojo	291 nH	228 nH	63 nH	50 nH
Camino verde	393 nH	336 nH	57 nH	54 nH

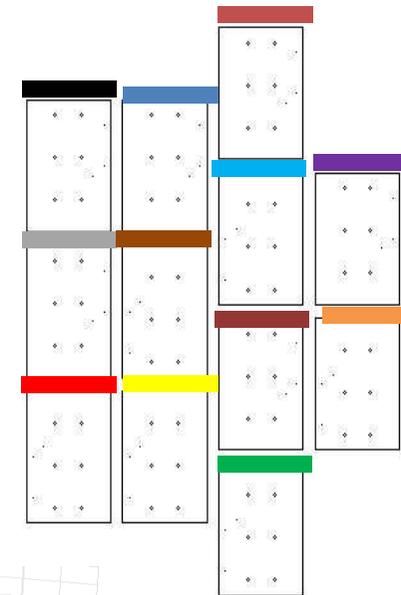
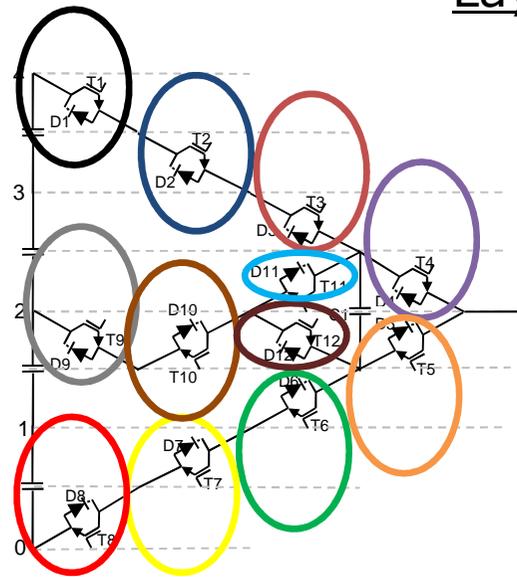
7. Convertidor de 5 niveles (industrial)

- Topología: 5L-ANPC
- 4 Distribuciones (Lay-Out)

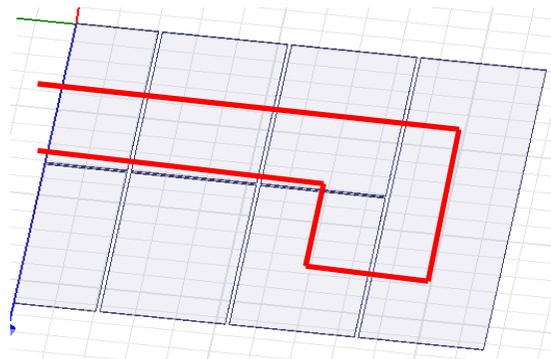


7. Convertidor de 5 niveles (industrial)

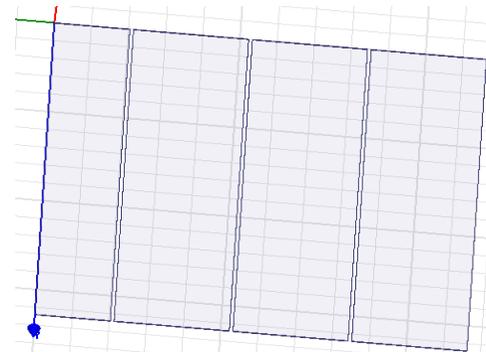
Lay-out 1



Nivel superior

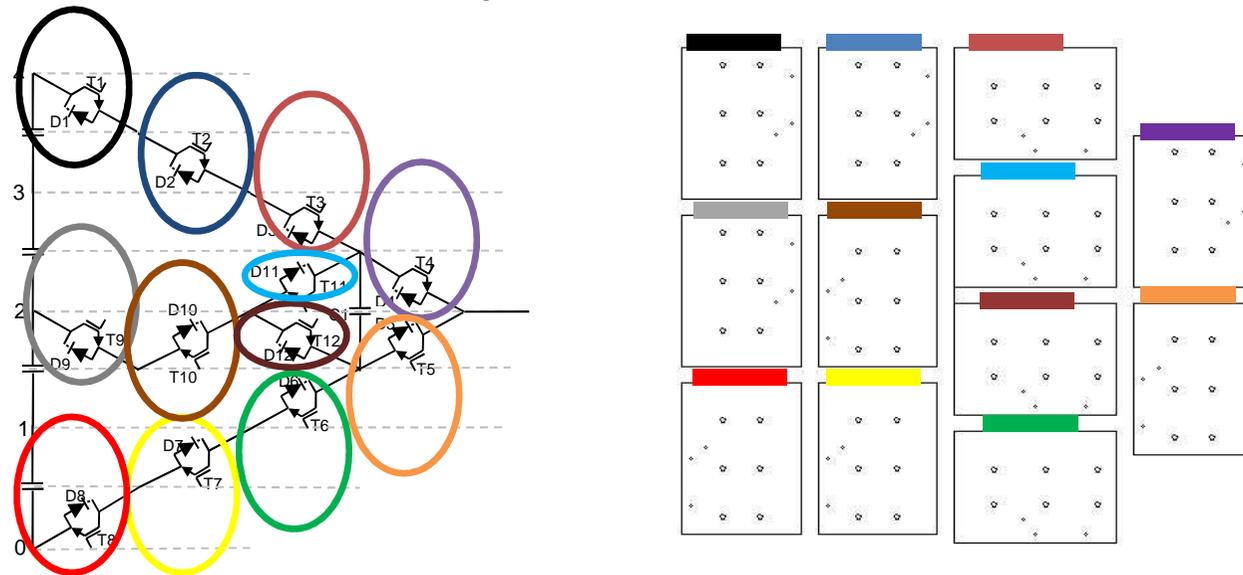


Nivel inferior



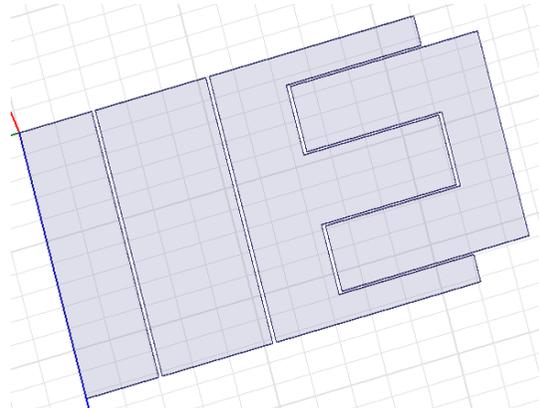
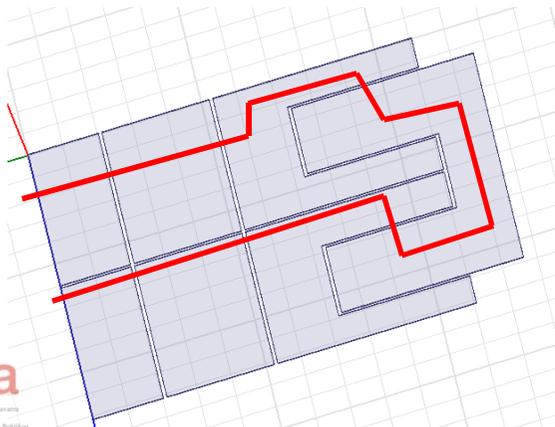
7. Convertidor de 5 niveles (industrial)

Lay-out 2



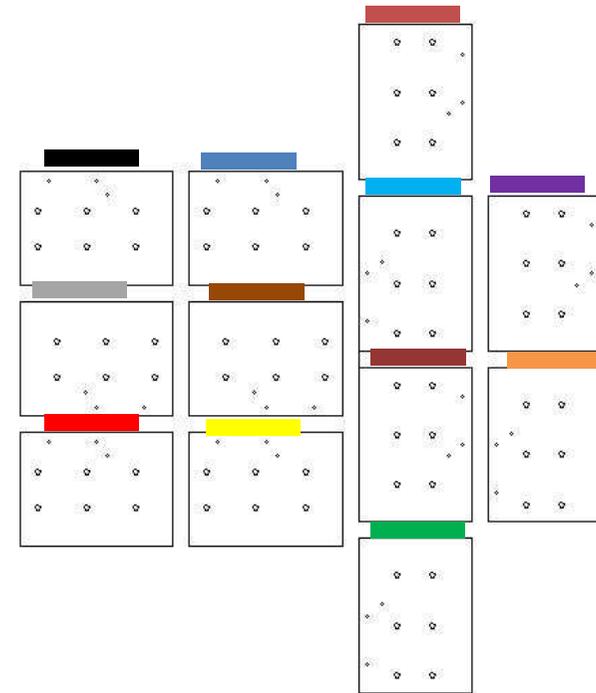
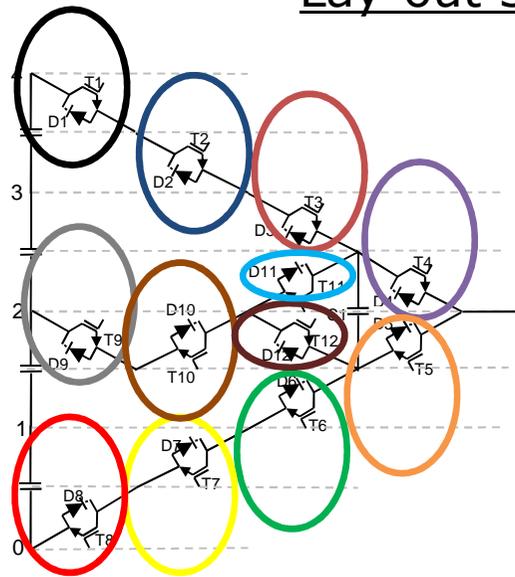
Nivel superior

Nivel inferior

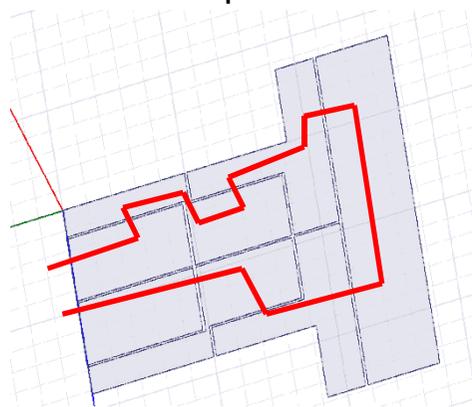


7. Convertidor de 5 niveles (industrial)

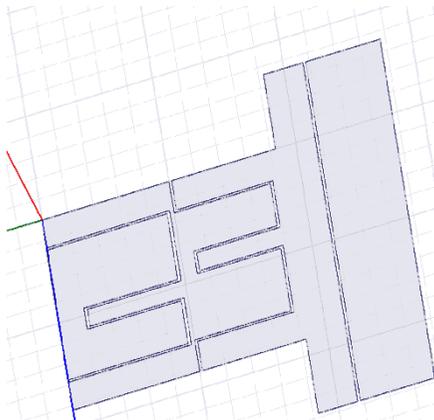
Lay-out 3



Nivel superior

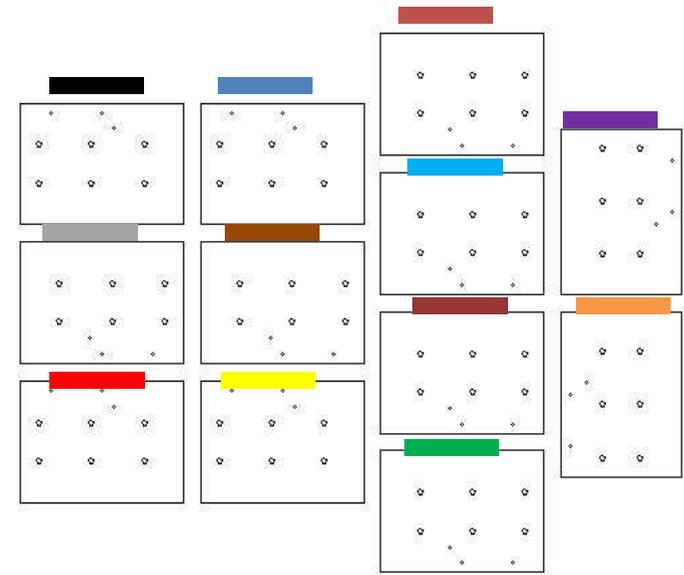
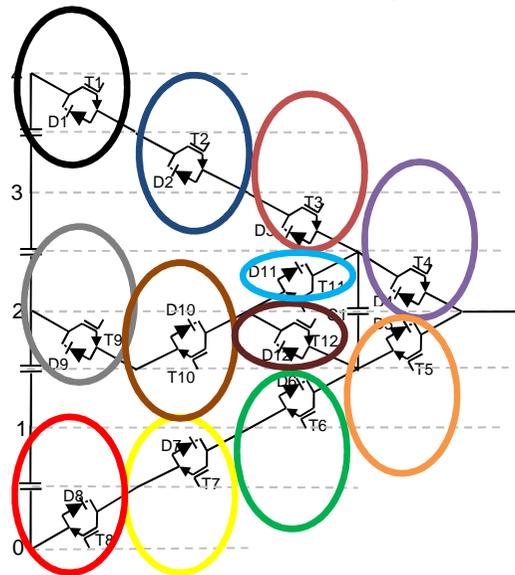


Nivel inferior

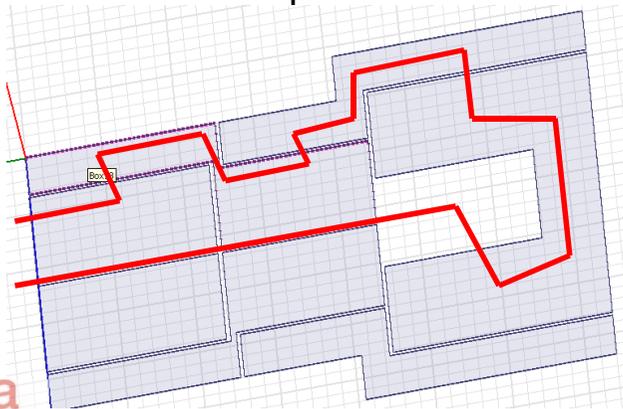


7. Convertidor de 5 niveles (industrial)

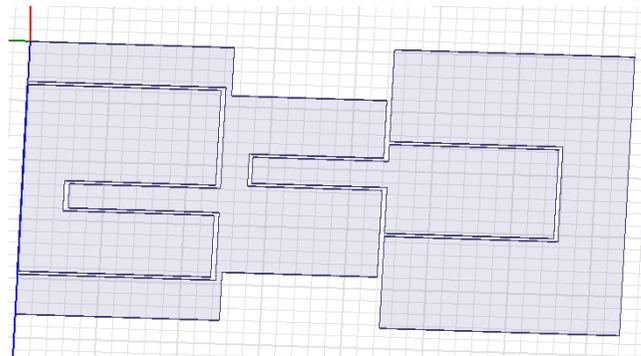
Lay-out 4



Nivel superior

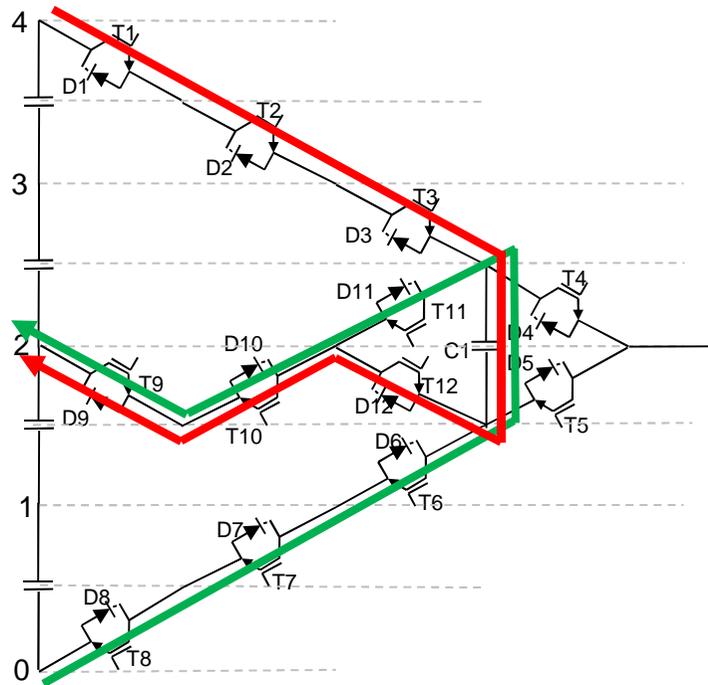


Nivel inferior



7. Convertidor de 5 niveles (industrial)

Resultados



	Camino rojo	Camino verde
Lay-out 1	67nH	65nH
Lay-out 2	161nH	157nH
Lay-out 3	216nH	210nH
Lay-out 4	294nH	237nH

En este caso si hay un lay-out
 mucho mejor que el resto

8. Conclusiones

- Sobre metodología:
 - Maxwell > Flux
 - Las simulaciones se ajustan bien a la realidad
- Prototipo:
 - Poca diferencia entre layouts
 - Importancia de los semiconductores
- Versión industrial:
 - Diferencias mayores en layouts
 - Aun y todo significativo el semiconductor
- Multinivel: + semiconductores -> + L