

Tecnología de los condensadores del tren de tracción del EV: condensadores del bus DC

Asier Matallana , Ander DeMarcos , Jon Andreu , Endika Robles , Markel Fernández , Adriano Navarro 

Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

e-mail: asier.matallana@ehu.eus

www.ehu.eus/es/web/apert

Resumen—Los organismos e instituciones internacionales consideran la electrificación del sector del transporte un factor clave para hacer frente a los retos ambientales y energéticos de los próximos años. Para que los vehículos eléctricos (EVs) sean sostenibles, deben cumplir una serie de metas, fijadas por diversos organismos gubernamentales, en cuanto a densidad de potencia, reducción de pérdidas, tamaño, costes y fiabilidad. Para esta última, el tiempo de vida de los componentes que integran el tren de tracción del EV es fundamental, siendo los condensadores elementos críticos de las etapas del convertidor de potencia del EV, debido a la cantidad de fallos que producen.

Por estos motivos, este trabajo analiza la tecnología de los condensadores del tren de tracción del EV, especialmente la del condensador del bus DC, indicando sus parámetros más críticos y la influencia de las condiciones de operación. Todo esto, para conseguir mejores prestaciones de los condensadores, tratando de reducir y evitar sus principales causas de ruptura.

Palabras Clave—Vehículo eléctrico (EV), bus DC, condensador, C_{DC} , Al-Cap, MLC-Cap, F-Cap, dieléctricos.

I. INTRODUCCIÓN

Según estudios realizados por organismos gubernamentales, como la agencia de protección ambiental (EPA) [1], el 28 % de los gases de efecto invernadero (GHG) corresponden al sector del transporte. Para el año 2050 se estima un crecimiento demográfico del 33 %, que implicará la existencia de más 2 billones de unidades de vehículos de carretera. Ante estas negativas expectativas ambientales, la solución pasa por la electrificación del sector, ya que, según el escenario *BLUE Map* (IEA [2]), los vehículos eléctricos e híbridos (EV/HEV) pueden reducir hasta el 30 % de las emisiones CO₂ del sector. Por otro lado, ante el auge de los EV/HEV, para el año 2030 se estima una demanda de 550-1000 TWh (x 5-11 la demanda actual), que supondrá el 2-6 % del consumo global de energía [2]. Para hacer frente a estos retos ambientales y tecnológicos, diversos organismos y programas internacionales como Horizonte 2020 [3], USCAR [4], DOE [5] y UN ESCAP [4] han fijado una serie de metas para cumplir el escenario *BLUE Map* y los requisitos de demanda energética:

- Incremento del 50 % de la densidad de potencia del convertidor (de 8,7 kW/l a 13,4 kW/l).
- Reducción de las pérdidas de potencia entorno a un 50 %.
- Reducción de los costes de la electrónica (8 \$/W).
- Simplificación del sistema de refrigeración.
- Reducción del tamaño y peso de todo el sistema, entorno a un 35-40 % (de 2,6 kW/l a 4 kW/l).

Para conseguir estas metas es necesario mejorar las distintas partes que componen el tren de tracción de los EVs (figura 1):

- 1) **Baterías**: se estima que en el 2030 la tecnología de litio-ión mejorará su eficiencia (95 %), alcance los 1100 Wh/l y los 10000 ciclos de carga y sea más fácil de reciclar [6].

- 2) **Convertidor de potencia**: se pretende mejorar la eficiencia gracias al uso de los semiconductores *WBG* [7], incorporar sistemas de refrigeración de menor coste y tamaño que permitan aumentar las densidades de potencia, implementar condensadores del bus DC más compactos y usar técnicas de diseño que reduzcan los elementos parásitos (mitigar altas di/dt y dv/dt) [7].
- 3) **Motor eléctrico**: uso de máquinas eléctricas de alta velocidad (≈ 15000 rpm) que permitan reducir el tamaño y lograr mayores densidades de potencia [7].

El incremento de las densidades de potencia, la reducción de costes, la mejora de la eficiencia, así como la fiabilidad y tiempo de vida de los componentes electrónicos juegan un papel importante para cumplir con la hoja de ruta trazada por los organismos internacionales [8]. Entre los componentes que integran el convertidor de potencia, uno de los elementos más críticos son los condensadores, ya que provocan el 30 % [9] de los fallos (figura 2(a)) debido al estrés que sufren (figura 2(b)). Entre estos condensadores, destacan los de la etapa bus DC, ya que son elementos costosos y de grandes dimensiones que limitan la densidad de potencia del tren de tracción. Dichos condensadores deben presentar un valor capacitivo (y resto de características) lo más estables posible ante las variaciones de temperatura de la aplicación. Además, deben ser lo más robustos y fiables para conseguir así [8], [10]:

- Reducir el rizado de la tensión del bus DC, tanto en régimen estacionario como transitorio.
- Almacenar energía que permita el balance instantáneo entre la potencia de entrada y de salida del convertidor.

Este trabajo analiza la tecnología de condensadores del tren de tracción de los EV, describiendo los distintos condensadores que participan en cada una de las etapas que componen el convertidor. Entre dichos condensadores, la tecnología del condensador del bus DC se analiza con detalle, debido a su papel fundamental en el sistema de tracción.

II. CONDENSADORES DEL SISTEMA DE TRACCIÓN DEL EV

En el sistema de tracción eléctrico del EV intervienen diferentes de condensadores con distintas funciones y objetivos (figura 1) [11], [12]:

- Etapa de filtrado EMI (figura 1-(2a)): se suelen emplear condensadores X e Y de tecnología F-Caps ($\approx 1-10 \mu\text{F}$) para el filtrado en modo común y diferencial del bus DC (figura 1-(2b)). Éstos deben estar situados lo más cerca posible a la fuente de ruido, el inversor (figura 1-(2c)).
- Etapa del bus DC (figura 1-(2b)): debe situarse lo más cerca posible de los semiconductores de la etapa inversora, de modo que se minimicen las pérdidas resistivas y

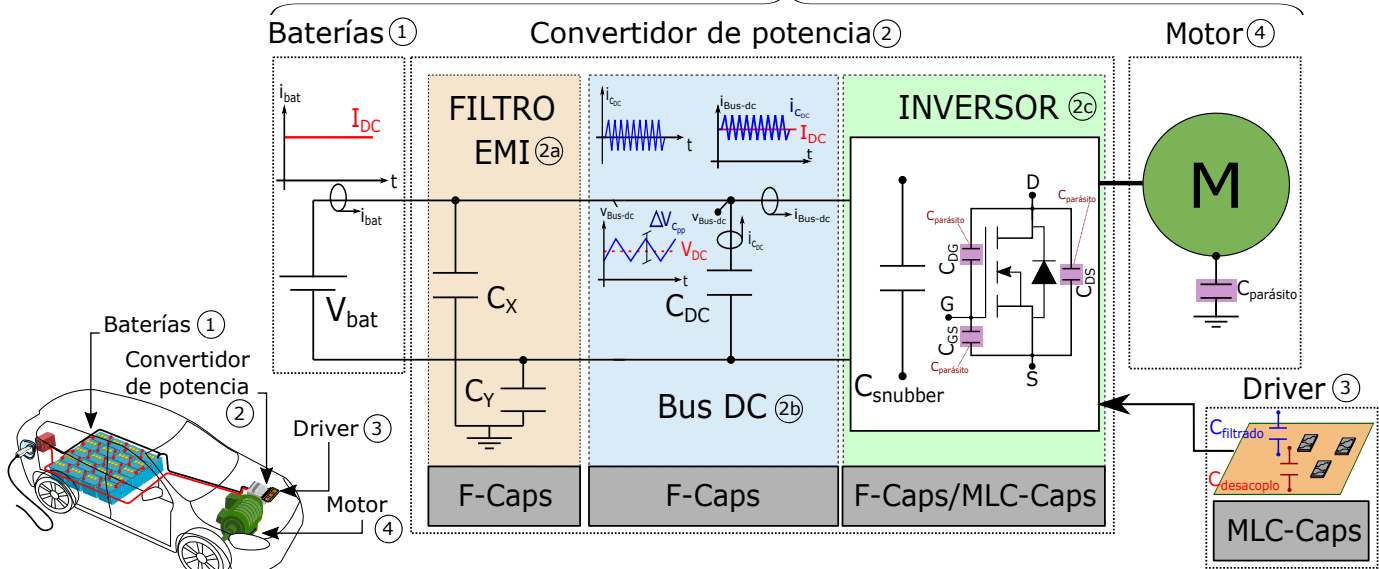


Figura 1. Partes que componen el tren de tracción de un EV.

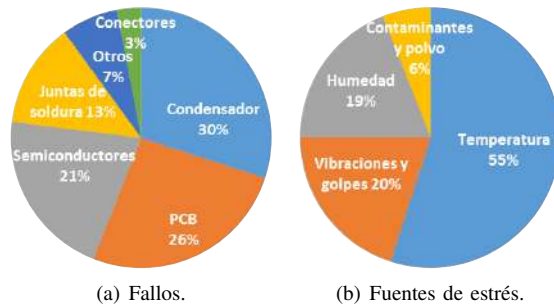


Figura 2. Principales fuentes de estrés y fallos en los convertidores.

el efecto de las altas transiciones, que ligadas a las inductancias parásitas, provocan sobretensiones. Normalmente, se usan condensadores F-Caps entorno a los 500-1000 μF .

- Etapa del inversor (figura 1-(2c)): con el objetivo de mejorar las conmutaciones y proteger los semiconductores es útil incorporar (lo más cerca posible a éstos) *snubbers*. Es típico emplear MLC-Caps y F-Caps, con valores que oscilan entre unos pocos nF y varios μF ($\approx 22 \text{ nF} - 5 \mu\text{F}$). Por otro lado, los dispositivos de potencia tienen capacidades parásitas (C_{iss} , C_{oss} y C_{rss})¹ que condicionan el proceso de encendido y apagado, velocidad, pérdidas de conmutación y acoplos entre las etapas de potencia y excitación que originan oscilaciones y efectos EMI [13].
- Etapa del driver (figura 1-(3)): aunque se usan señales de baja tensión es necesario mitigar ruidos y otros efectos dañinos. Es habitual emplear junto a los circuitos integrados condensadores de desacoplo, que normalmente, combinan distintas capacidades ($\approx 10 \text{ nF} - 10 \mu\text{F}$) de tecnología cerámica X5R/X7R (no se prima la estabilidad, pero sí su pequeño tamaño y bajas ESR y ESL). Asimismo, es habitual emplear condensadores cerámicos de tecnología NP0 ($\approx 10 \text{ nF}$, pequeño tamaño y gran estabilidad capacitiva) para las etapas de filtrado, temporización, etc.
- Etapa del motor (figura 1-(4)): la presencia de la capacidad parásita entre los devanados, el rotor y la tierra, junto con la aplicación por parte del convertidor de tensiones

moduladas (altas dv/dt) hacen que aparezcan tensiones de modo común (CMV), provocando corrientes no deseadas (del orden de los mA a decenas de A), tensiones inducidas y efectos EMI que pueden dañar el motor [14].

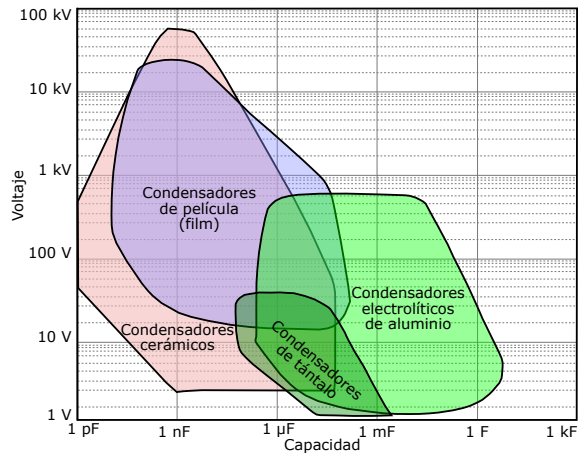
III. TECNOLOGÍA DE CONDENSADORES DEL BUS DC

Los condensadores del bus DC están condicionados a los rangos de tensión, corriente y potencia de la aplicación donde se integran. Generalmente, las baterías de los EV (V_{bat}) rondan los 300-400 V, mientras que para los vehículos pesados la tensión es alrededor de los 800 V [7]. Los valores de corriente están condicionados, entre otros, por la potencia (nominal y de pico) de la aplicación y el mapa de par/potencia/velocidad del motor. En este contexto, para sistemas trifásicos de 50-70 kW las corrientes rondan los 255 A y para sistemas de 125 kW las corrientes rondan los 480 A [7].

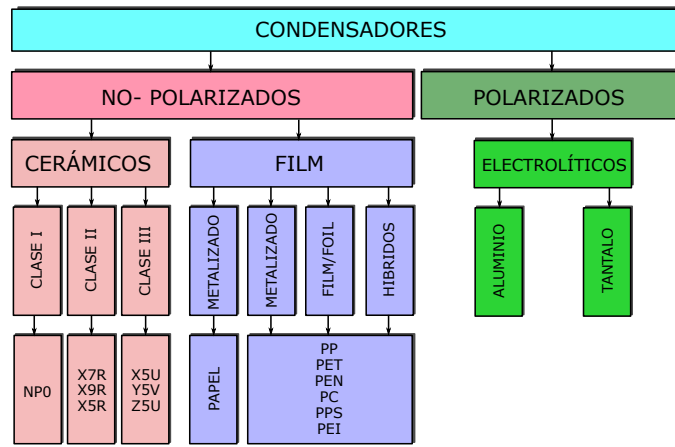
Ante dichos valores de tensión y corriente el valor capacitivo del bus DC debe ser lo más grande posible (típicamente 500-1000 μF para aplicaciones del EV) para almacenar la energía y reducir al máximo el rizado de tensión. Además, el condensador también debe cumplir los requisitos de densidad de potencia, temperaturas de operación, estabilidad, robustez y fiabilidad [8]. Las figuras 3(a) y 3(b) [15] muestran los rangos (tensión-capacidad) y la clasificación tecnológica (electrodos y dieléctricos) de las principales familias de condensadores, cuya idoneidad para el bus DC del EV (figura 1) conviene analizar. Sus principales características son comparadas en la figura 4 [16] y descritas, a continuación:

- **Al-Caps** (electrolíticos de aluminio): estos condensadores se caracterizan, principalmente, por las propiedades del dieléctrico Al_2O_3 , y por tener grandes valores de capacidad por unidad de volumen [17]. A su vez, éstos presentan los costes más bajos respecto a los MLC-Caps y F-Caps [16], [17]. Sin embargo, las desventajas de esta tecnología son: la polaridad, la inestabilidad de sus parámetros a altas temperaturas de operación, altos valores de ESR y altas corrientes de fuga ($I_{leakage}$) [16], [17]. Además, esta tecnología no soporta el estrés provocado por las corrientes que le atraviesan (distintas componentes frecuenciales) y hacen aumentar notablemente

¹SiC MOSFET discretos $\approx 0.2-1 \text{ nF}$ y SiC MOSFET módulos $\approx 1-30 \text{ nF}$



(a) Condensadores según tensión y capacidad.



(b) Tecnologías de los condensadores para EV.

Figura 3. Condensadores empleados en convertidores industriales que son objeto de estudio para su uso en las distintas etapas del EV.

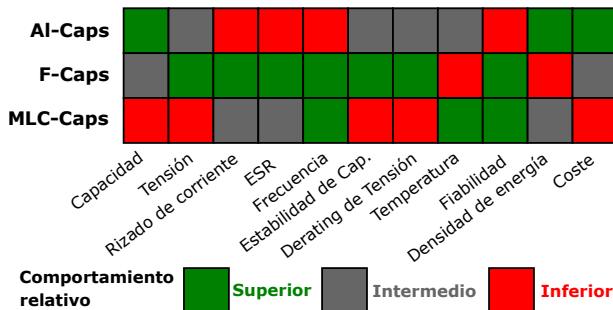
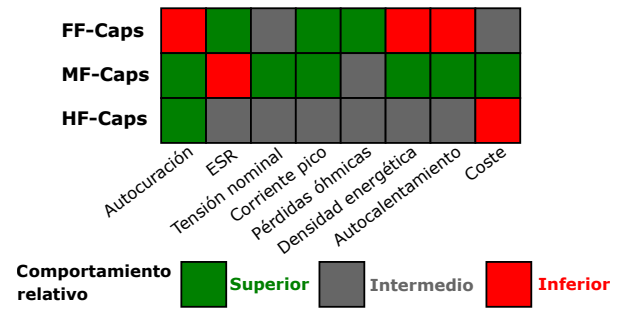


Figura 4. Comparación relativa de Al-Caps, MLC-Caps, F-Caps.

Figura 5. Tipos de condensadores *Film Capacitors* (F-Caps).

la temperatura del condensador. Por estos motivos, y por la falta de autocuración, los Al-Caps suelen descartarse para su uso en el bus DC del EV [12].

- **MLC-Caps** (cerámicos multicapa): esta familia de condensadores se caracteriza por tener un tamaño pequeño, bajos valores de resistencia e inductancia parásita (ESR y ESL), un rango de frecuencias amplio, una temperatura nominal alta (de hasta 200°C) y una permitividad del dieléctrico (ϵ) mucho más elevada que el Al_2O_3 . Sin embargo, tienen un mayor coste, son mecánicamente muy sensibles y presentan una baja tensión continua [16], [17]. Los condensadores cerámicos se clasifican en los siguientes grupos (figura 3(b)) según su coeficiente de temperatura [18]: i) A la clase I pertenecen los condensadores con un coeficiente de temperatura ultra-estable (NPO) y pueden ser usados como *snubbers* (figura 1-2c) o como condensadores de filtrado (figura 1-3); ii) La clase II engloba a los condensadores considerados como estables con una variación térmica entorno a un $\pm 15\%$ (X5R, X7R y X9R), pudiéndose usar como condensadores de desacoplo en la etapa de *drivers* (figura 1-3); iii) La clase III recoge los condensadores de propósito general con grandes variaciones en el coeficiente de temperatura, como $+22/-82\%$ (X5U, Y5V y Z5U) [18], descartables para la aplicación del EV.
- **F-Caps** (película): éstos presentan una menor densidad energética comparada con las otras tecnologías, sin embargo, tienen mejores prestaciones a la hora de incorporarlos en el bus DC de inversores de media y alta potencia. Éstos proporcionan unas buenas prestaciones para los requisitos de tensión y capacidad ($\approx 200-1000$ V,

$\approx 500-1000 \mu F$), coste medio y baja ESR [16]. Además, su capacidad de autocuración (condensadores de película metalizados) aumenta su tolerancia a fallos y, por lo tanto, su fiabilidad, lo cuál es ideal para el bus DC del EV [16].

IV. CONDENSADORES DE PELÍCULA: F-CAPS

Esta tecnología consta de dos electrodos a los cuales se les añade una serie de metalizaciones de distinto espesor, separadas por un material dieléctrico [19]. Atendiendo al tipo de electrodo, los F-Caps se clasifican en: a) condensadores de película o *film-foil* (FF-Caps), b) condensadores de película metalizada (MF-Caps) y c) condensadores híbridos (HF-Caps) [20]. Sus características se resumen en la figura 5.

A. F-Caps: Capacidad y elementos característicos

La figura 6 presenta el modelo equivalente de los condensadores F-Caps, mostrando sus elementos parásitos (ESR, L_s y R_{ins}), los cuales dependen de la temperatura, humedad y frecuencia [21]–[23], lo que constata la influencia del entorno y régimen de operación del EV sobre ellos.

- **Capacidad nominal** (C_R), figura 6-A: la variación de temperatura es crítica para la estabilidad del valor C_R de los condensadores, que será mayor o menor según el material dieléctrico empleado, pudiendo éste tener un coeficiente positivo o negativo respecto a la temperatura (PET y PEN \oplus , PP \ominus), unido al aumento de temperatura del condensador debido a las pérdidas de potencia de su ESR, hace necesario trabajar con dieléctricos térmicamente estables para evitar las pérdidas de capacidad [7]. Además, cualquier cambio de temperatura provoca un cambio en la humedad (pueden

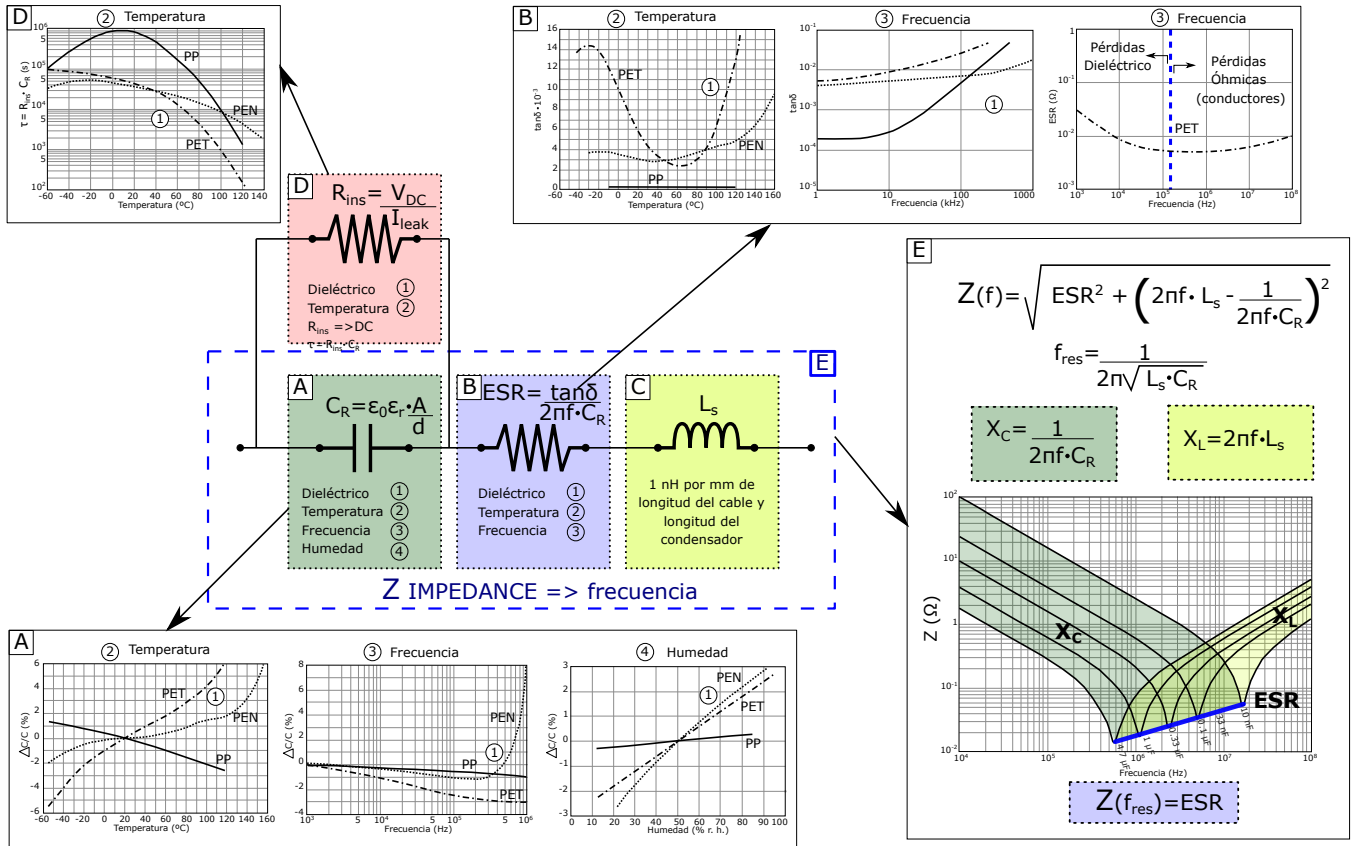


Figura 6. Circuito equivalente de los condensadores F-Cap, indicando la influencia de la temperatura, frecuencia y humedad sobre cada elemento parásito.

producirse grandes variaciones en aplicaciones hostiles, como la del EV), que afecta a la estructura interna del condensador y, por consiguiente, a su valor C_R . Al igual que ocurre con la temperatura, hay dieléctricos que se ven afectados en mayor o menor medida, destacando el PP por su estabilidad ante las variaciones de humedad. Por último, la conmutación de los semiconductores del EV genera un espectro de frecuencias muy variado, que afectan al valor C_R , especialmente a partir de los 100 kHz para dieléctricos como el PET y el PEN, siendo necesario buscar materiales estables con la frecuencia. Por todo esto, para la aplicación del EV, se suelen usar condensadores MF-Cap de PP.

- **Resistencia serie equivalente (ESR) y factor de disipación ($\tan \delta$)**, figura 6-[B]: las distintas componentes frecuenciales de corriente que circulan a través del condensador causan una disipación de energía en la ESR que produce un incremento de la temperatura o auto-calentamiento. Ese incremento de temperatura viene definida por la potencia generada en el condensador:

$$P_{gen} = \sum_{f_i} V_{RMS,i}^2 \cdot (2\pi f_i \cdot C_R)^2 \cdot ESR = \sum_{f_i} V_{RMS,i}^2 \cdot 2\pi f_i \cdot C_R \cdot \tan \delta \quad (1)$$

El valor de ESR depende del material dieléctrico, la temperatura a la que se encuentre el condensador y la frecuencia. Según esta última, se distinguen dos tipos de comportamiento:

- A bajas frecuencias, el valor de ESR viene determinado por el dieléctrico ($\tan \delta$) del condensador y decrece con la frecuencia.

- A altas frecuencias, el valor ESR viene definido por las partes conductoras del condensador (parte óhmica), siendo prácticamente constante.

Los condensadores de PP presentan valores bajos de ESR (entorno a 3-5 mΩ@1 kHz) con una $\tan \delta$ de, aproximadamente, 20-50·10⁻³@10 kHz (MF-Caps de 400-1200 μF).

- **Autoinductancia (L_s)**, figura 6-[C]: los electrodos, las metalizaciones internas y las terminaciones hacen que exista un efecto inductivo (\approx 1-20 nH), que debe ser lo más pequeño posible en el bus DC para evitar efectos oscilantes (altas frecuencias) y sobretensiones en los bucles de conmutación (\approx 10-15 kHz) del EV.
- **Resistencia de aislamiento (R_{ins})**, figura 6-[D]: existe una pequeña corriente DC que fluye ($I_{leakage}$) a través del dieléctrico que provoca la pérdida de carga del condensador. La R_{ins} depende del dieléctrico y la temperatura, siendo mayor la $I_{leakage}$ a mayor temperatura. Los condensadores F-Cap tienen grandes R_{ins} , destacando los condensadores de PP con valores entre 10⁵-10⁷ MΩ.
- **Impedancia característica (Z)**, figura 6-[E], (2): destaca la frecuencia de resonancia (f_{res}) donde el valor de Z equivale al valor de ESR. En la f_{res} el condensador solo tiene componente resistiva, lejos de proporcionar el valor C_R que requiere el bus DC del EV.

$$Z = \sqrt{ESR^2 + \left(2\pi f \cdot L_s - \frac{1}{2\pi f \cdot C_R}\right)^2} \quad (2)$$

B. F-Caps: Tensiones máximas de operación

Las condiciones de operación de los condensadores vienen limitadas por los valores máximos de tensión DC, AC y

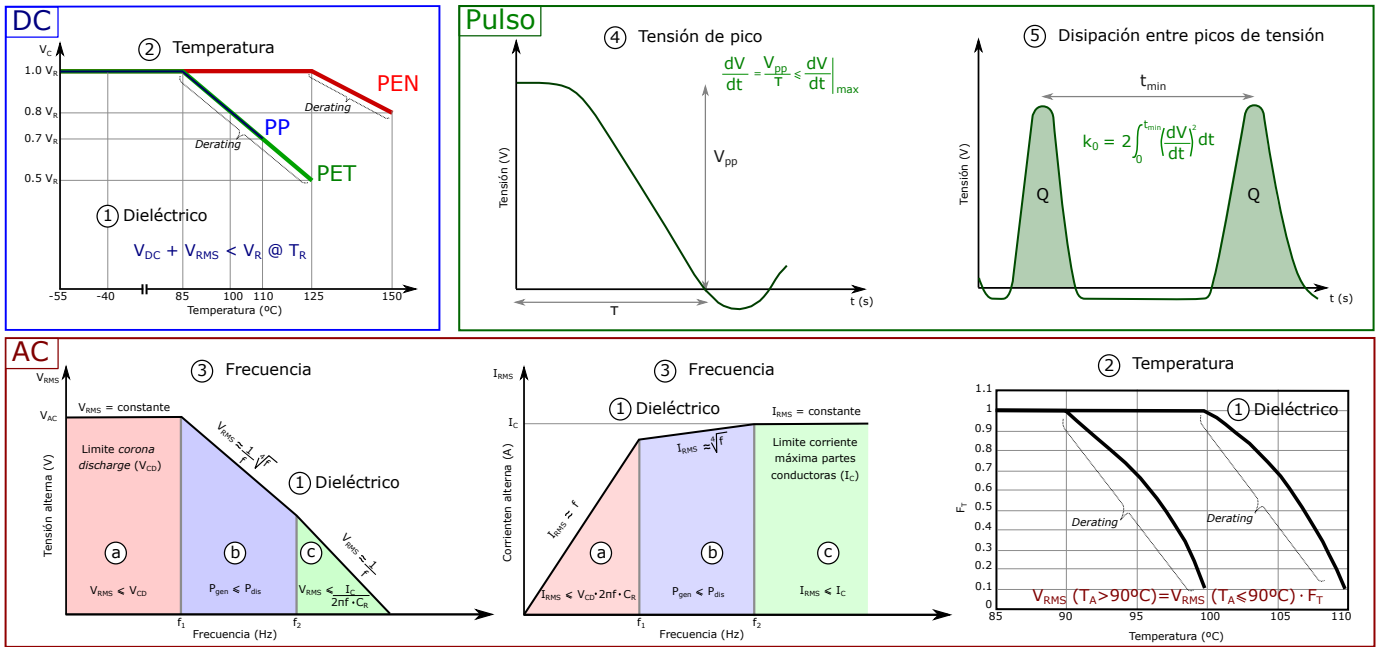


Figura 7. Tensiones de operación de los condensadores F-Caps junto a los efectos del dieléctrico, temperatura y frecuencia.

pulsada. Dichos valores, varían con la temperatura y la frecuencia, y no deben excederse para asegurar la integridad de los condensadores.

- **Tensión continua (DC)**, figura 7-DC: la tensión que se aplica de forma constante al condensador (V_{DC}), junto a su valor de rizado (ΔV_{AC}), no debe exceder la tensión máxima de operación (V_R) definida por el fabricante. Esta V_R se ve afectada por la temperatura del condensador, ya que existe un umbral de temperatura (T_R) a partir del cual la tensión V_R se reduce (*derating*).
- **Tensión alterna (AC)**, figura 7-AC: en la V_{RMS} máxima del condensador se distinguen 3 zonas de operación:
 - 1) $f \leq f_1$: la tensión máxima V_{RMS} viene determinada por la tensión *corona discharge* (V_{CD}), a partir de la cuál se pierde C_R o se produce la ruptura del mismo.
 - 2) $f_1 < f \leq f_2$: la V_{RMS} debe reducirse según aumenta la frecuencia y conseguir que P_{gen} (1) sea inferior a la potencia máxima (P_{dis}) que puede disipar el dispositivo ($P_{gen} \leq P_{dis}$):

$$P_{dis} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T, \quad (3)$$

siendo α el coeficiente de transferencia térmica y ΔT el coeficiente de auto-calentamiento.

- 3) $f > f_2$: la tensión máxima que se puede aplicar en el condensador viene limitada por el valor máximo de corriente (I_C) que pueden soportar sus partes conductoras. Por último, la tensión V_{RMS} máxima que se puede aplicar al condensador también depende de la temperatura. A partir de una determinada temperatura (típicamente 90°C) es necesario aplicar un factor de *derating* (F_T) sobre V_{RMS} .

- **Tensión pulsada (Pulse)**, figura 7-Pulso: los condensadores presentan unos valores máximos dv/dt generados por los picos de corriente (I_{peak}) que se producen en el circuito. Para evitar exceder el valor máximo dv/dt ($\text{V}/\mu\text{s}$) definido por el fabricante, se deben minimizar las inductancias parásitas del circuito (bucles de conmutación,

$\approx 10\text{-}20$ nH), así como los rápidos encendidos y apagados de los dispositivos (siendo más acentuados en los semiconductores *WBG*) que constituyen convertidor. Además, también debe ser controlado el tiempo entre los picos de corriente consecutivos para que el condensador pueda disipar la temperatura generada. Este último parámetro se define a través del valor k_0 ($\text{V}^2/\mu\text{s}$).

C. F-Caps: Dieléctricos

Los dieléctricos más empleados en la fabricación de condensadores de película son el PP y el PET, debido a su madurez tecnológica y fiabilidad probada. Las altas exigencias térmicas en los EVs hacen que los F-Caps se usen muy cerca de sus límites eléctricos y térmicos. Por este motivo, están surgiendo nuevos polímeros para la fabricación de F-Caps (COC-PP@TDK, T_{max} de 125°C). A continuación, se resumen las características más importantes de dieléctricos más usados (tabla I):

- PP (polipropileno): presenta muy bajas pérdidas y tiene altas resistencias de aislamiento [24]. El factor de disipación cambia mínimamente con la temperatura y la frecuencia, siendo una opción atractiva para los EV. Además, el PP prácticamente no varía su capacidad frente a la humedad y la temperatura. La mayor limitación es su T_{max} , 105°C , convirtiendo la gestión térmica fundamental para su uso en los EVs [19].
- PET (tereftalato de polietileno): la alta rigidez dieléctrica del PET proporciona un menor tamaño y un menor coste en comparación con el PP. Asimismo, puede trabajar a 125°C y muestra excelentes propiedades de autocuración [24]. Sin embargo, a temperaturas y/o frecuencias elevadas, su factor de disipación $\tan\delta$ se incrementa, aumentando el autocalentamiento. No son recomendables en aplicaciones de alta corriente y frecuencia.
- PEN (naftalato de polietileno): la variabilidad de $\tan\delta$, en función de la temperatura y la frecuencia, es similar al del PET debido a la similitud de sus estructuras internas. Aun así, el PEN puede funcionar a temperaturas más altas

Tabla I
POLÍMEROS DIELECTRICOS PARA F-CAPS [25], [26]

Polímero	T_{max} (°C)	BDS ⁽¹⁾ (V/ μ m)	$\tan\delta$ ⁽²⁾ (10^{-2})	ΔC_R ⁽³⁾ (%)	Coste
PP	105	820	<0.02	5	✓✓
PET	125	570	<0.5	12	✓✓✓
PEN	125	550	<0.15	11	✓
PC	150	820	-	6	✗
PPS	200	550	<0.03	6	✗
PEI	200	550	0.2	-	✗

(1) BDS: *Breakdown Field Strength*. (2) $\tan\delta$ obtenida a 25°C y 1 kHz.
(3) ΔC_R obtenida a 85°C y 1 kHz.

[25]. Su desventaja es que su coste es superior al PET debido a un proceso de fabricación no tan avanzado.

- PC (poli-carbonato): es empleado en aplicaciones de media frecuencia y temperatura máxima de 125°C [25]. Sin embargo, solo está disponible a través de un único fabricante (Electronic Concepts).
- PPS (polisulfuro de fenileno): se trata de un polímero propuesto como sustituto del PC al presentar propiedades dieléctricas similares. Los condensadores PPS pueden utilizarse de forma estable por encima de los 150°C [25], por lo que son interesantes para los EVs. Sin embargo, el proceso de producción es mucho más costoso y complicado comparado con el PP y el PET.
- PEI (polimida): este polímero tiene una alta $\tan\delta$, estabilidad a altas temperaturas (185°C), presenta una buena autocuración y coste bajo [26]. Su principal desventaja es que se encuentra en fase de desarrollo.

V. CONCLUSIONES

Los retos tecnológicos fijados para el EV obligan a centrar los esfuerzos de investigación en las distintas partes que constituyen su tren de tracción. Respecto al convertidor de potencia, se persigue aumentar su densidad de potencia (13,4 kW/l), reducir pérdidas (50 %), tamaño (35-40 %) y coste (8 \$/W), así como aumentar la fiabilidad. En esta última, los condensadores, especialmente los del bus DC, son elementos críticos causantes del 30 % de los fallos y rupturas. Para mejorar la fiabilidad de estos condensadores, fundamentales para reducir el rizado de tensión del bus DC y almacenar energía para el balance instantáneo de potencias, es necesario seleccionarlos correctamente para los requisitos del EV.

Las baterías del EV rondan los 300-400 V y las potencias nominales se sitúan sobre los 50-70 kW, que suponen corrientes de unos 250 A. Ante dichos valores, el bus DC debe tener un valor C_R que ronde los 500-1000 μ F. La tecnología que mejor se adapta a estos requisitos, son los F-Caps, especialmente los MF-Caps (condensadores de película metalizada) de dieléctrico PP. Dichos condensadores tienen la propiedad de autocuración, impidiendo que se produzca la ruptura por cortocircuito y proporcionando gran tolerancia a fallos a la aplicación del EV. Esta tecnología de condensadores también presenta valores C_R bastante estables ante las variaciones de temperatura (5 %), frecuencia (1 %) y humedad (1 %).

Además, poseen bajos valores de ESR (3-5 m Ω) y $\tan\delta$ (20-50 \cdot 10⁻³@10 kHz), que producen bajas pérdidas. Por todo ello, y su bajo coste, son una de las mejores opciones para el EV. Sin embargo, sus T_{max} oscilan entre los 85-105°C (según fabricante y encapsulado), convirtiéndose en fundamental la gestión térmica del condensador dentro del EV, a pesar de estar apareciendo nuevas variantes del PP (COC-PP@TDK) para poder operar a 125°C que simplifican dicha gestión.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido generado y patrocinado por el Gobierno Vasco en base a las ayudas para apoyar las actividades de grupos de investigación del sistema universitario vasco IT978-16, el programa ELKARTEK con el proyecto ENSOL2(KK-2020/00077). Así como, la ayuda del programa predoctoral de la UPV/EHU (PIF20-305) y el soporte técnico y humano de TDK.

REFERENCIAS

- [1] "Inventory of U.S. greenhousegas emissions and sinks: 1990-2015," U. S. Environmental Protection Agency (EPA), Tech. Rep., 2017.
- [2] "Global EV outlook," International Energy Agency (IEA), Tech. Rep., 2020.
- [3] "Horizon 2020 Work Programme 2016-2017: Smart, green and integrated transport," European Commission, Tech. Rep., 2016.
- [4] Energy Efficiency & Renewable Energy, "Multi-Year Program Plan 2011-2015: Vehicle Technologies Program," Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Tech. Rep., 2010.
- [5] "Overview of the DOE VTO Electric Drive Technologies R&D Program," U. S. Department of Energy: Energy Efficiency and renewable energy, Tech. Rep., 2016.
- [6] "Battery Innovation Roadmap 2030," Association of EUAutomotive and Industrial Battery Manufacturers (EURO-BAT), Tech. Rep., 2019.
- [7] A. Matallana, E. Ibarra, I. López, J. Andreu, J. I. Garate, X. Jordá, and J. Rebollo, "Power module electronics in HEV/EV applications: New trends in wide-bandgap semiconductor technologies and design aspects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, p. 109264, 2019.
- [8] I. López, E. Ibarra, A. Matallana, J. Andreu, and I. Kortabarria, "Next generation electric drives for HEV/EV propulsion systems: Technology, trends and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 114, pp. 1–23, 2019.
- [9] U. Choi, F. Blaabjerg, and K. Lee, "Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter Systems," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, pp. 2517–2533, 2015.
- [10] H. Wen, W. Xiao, X. Wen, and P. Armstrong, "Analysis and evaluation of dc-link capacitors for high-power-density ev drive systems," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 7, pp. 2950–2964, 2012.
- [11] "Application Guides: Industrial and energy-EV Fast Charger," TDK product center, Tech. Rep., 2020.
- [12] "Application Guides: Automotive xEV-Motor Inverter," TDK product center, Tech. Rep., 2020.
- [13] I. Aretxabaleta, I. M. de Alegría, J. I. Garate, A. Matallana, and J. Andreu, "Wide-Bandgap Semiconductor HF-Oscillation Attenuation Method With Tuned Gate RLC Filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 8, pp. 8025–8033, 2020.
- [14] E. Robles, M. Fernandez, J. Andreu, E. Ibarra, and U. Ugalde, "Advanced power inverter topologies and modulation techniques for common-mode voltage elimination in electric motor drive systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, p. 110746, 2021.
- [15] H. Liu, Z. Zhou, Y. Li, W. Wu, J. Jiang, and E. Shi, *Impedance Source Inverters*. Springer, 2020.
- [16] H. Wang and F. Blaabjerg, "Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters-An Overview," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, pp. 3569–3578, 2014.
- [17] "AN109-2: Capacitors Basics II, Capacitors Types," CalRamic Technologies LLC, Tech. Rep., 2011.
- [18] "AN109-4: Capacitors Basics VI, Ceramic Material Designations," CalRamic Technologies LLC, Tech. Rep., 2014.
- [19] N. Valentine, M. H. Azarian, and M. Pecht, "Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review," *Microelectronics Reliability*, vol. 92, pp. 123–135, 2019.
- [20] Cornell Dublier, "Power film capacitor application guide," Cornell Dublier, Tech. Rep., 2017.
- [21] "Introduction to capacitor technologies," Kemet, Tech. Rep., 2013.
- [22] "Film Capacitors: General technical info," TDK, Tech. Rep., 2018.
- [23] Nippon Chemi-Con, "Judicious use of aluminum electrolytic capacitors," Nippon Chemi-Con, Tech. Rep., 2011.
- [24] "Application Guide, Film Capacitors," CDE, Tech. Rep.
- [25] J. S. Ho and S. G. Greenbaum, "Polymer Capacitor Dielectrics for High Temperature Applications," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 10, no. 35, pp. 29189–29218, 2018.
- [26] M. Streibl, R. Karmazin, and R. Moos, "Materials and applications of polymer films for power capacitors with special respect to nanocomposites," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 6, pp. 2429–2442, 2018.