

## V. RESULTADOS Y CONTRIBUCIONES

Para mostrar la influencia de la elección de los transistores MOSFETs sobre la eficiencia de los SBCs, se da el siguiente ejemplo:

En un SBC implementado en un circuito impreso como el mostrado en las figuras 4.5 y 4.6, para MOSFETs tipo CanPAK, el *high side* MOSFET se mantendrá fijo (dispositivo de Infineon Technologies BSF050N03LQ3G) y el impacto del *Low side* MOSFET en la eficiencia se ilustrará eligiendo tres diferentes dispositivos (BSB012N03LX3G, BSB017N03LX3G and BSB024N03LX3G).

Para esta prueba las condiciones del SBC serán:

$$V_{\text{DRIVER}} = 12 \text{ [V]}$$

$$F_{\text{sw}} = 300 \text{ [kHz]}$$

$$V_{\text{IN}} = 12 \text{ [V]}$$

$$V_{\text{OUT}} = 1.2 \text{ [V]}$$

Las dos últimas condiciones implican un ciclo de trabajo de 0.1. El valor de la resistencia de driver será  $R_{\text{DRIVER}}=1[\Omega]$ , el cual es un valor típico. El valor de la inductancia parásita debido al encapsulado de los MOSFETs y al circuito impreso utilizado en el laboratorio fue de 1 [nH], este valor será el que se utilice para el análisis teórico.

En la tabla 5.1 se resumen todos los parámetros relacionados con las pérdidas de potencia de los MOSFETs a evaluar. Los datos fueron obtenidos de las hojas de especificaciones de Infineon Technologies.

*NOTA: Para mayor información sobre las especificaciones véase <http://www.infineon.com/cms/en/product/channel.html?channel=ff80808112ab681d0112ab6a5d5404c8>*

PARÁMETRO	BSF050L	BSB012L	BSB017L	BSB024L
Rds_on [mΩ]	4	1	1.5	2.1
Qg [nC]	30	152	93	87
Qsw [nC]	13	72	42	41
Qoss [nC]	18	85	50	39
Qrr [nC]	16	50	50	50
Vsd [V]	0.82	0.77	0.79	0.79
Vth [V]	1.7	1.7	1.7	1.7
Vmiller [V]	3	3	3	3
Rgate [Ω]	0.4	0.5	0.5	0.6
Ciss [pF]	3000			

Tabla 5.1. Valores típicos a un voltaje driver de 12 [V].

El *high side* MOSFET se analiza primero para entender cuándo el SBC trabaja en el régimen limitado inductivamente o en el régimen limitado capacitivamente.

La relación  $dI/dt$  máxima posible, limitada inductivamente, está dada por la ecuación 3.24, para este caso:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_{IN}}{L_{stray}} = \frac{12}{1E-9} = 12 \left[ \frac{A}{ns} \right]$$

Calculando el tiempo  $t_{CL\_OFF}$  para el apagado capacitivo, ver ecuación 3.22:

$$t_{CL\_OFF} = -(0.4 + 1) \cdot 3000E-12 \cdot \ln\left(\frac{1.7}{3}\right) = 2.38[ns]$$

El rango de evaluación de corriente será de 0 [A] a 25 [A]. Debido a que la relación  $dI/dt$  bajo el régimen limitado capacitivamente depende directamente de la corriente, ver ecuación 3.23, el valor máximo de corriente es usado primero:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{25}{2.38E-9} = 10.45 \left[ \frac{A}{ns} \right]$$

La relación  $dI/dt$  capacitiva es menor que la relación  $dI/dt$  inductiva, para una corriente de 25 [A], la mayor a evaluar. Por lo anterior, se concluye que para todo el rango de corriente a evaluar, el SBC trabajará en el régimen limitado capacitivamente durante el apagado del MOSFET.

Calculando ahora el tiempo  $t_{CL\_ON}$  para el encendido capacitivo, ver ecuación 3.21:

$$t_{CL\_ON} = -(0.4 + 1) \cdot 3000E-12 \cdot \ln\left(\frac{12-3}{12-1.7}\right) = 0.566[ns]$$

A 6.8 [A] el incremento de corriente inductivo es igual al incremento de corriente capacitivo, usando la ecuación 3.23:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{6.8}{0.566E-9} = 12.00 \left[ \frac{A}{ns} \right]$$

Lo anterior implica que para valores de corriente de salida menores a 6.8 [A] el SBC trabajará bajo el régimen capacitivo, y las pérdidas por conmutación deben ser calculadas utilizando la ecuación 3.9 y para las corrientes mayores a 7 [A] el SBC trabajará bajo el régimen inductivo, para cuando el MOSFET enciende. Por lo tanto, las pérdidas por conmutación a partir del valor de corriente mencionado, deben ser calculadas utilizando la expresión 3.30, la cual es independiente de la corriente.

A continuación, será analizada la combinación de los transistores BSF050N03LQ3G y BSB017N03LX3G, como *high side* MOSFET y *low side* MOSFET, respectivamente.

Utilizando una hoja de cálculo de *Excel*, se crea una tabla, como la mostrada en la tabla 5.2, para obtener, primero, las pérdidas debidas al *high side* MOSFET. Para obtener la magnitud de las pérdidas descritas se introdujeron, en la hoja de cálculo de *Excel*, las fórmulas 3.4, 3.9, 3.10, 3.13 y 3.14, descritas anteriormente, evaluadas con las condiciones del SBC mencionadas, con los valores de la tabla 5.1 y para una corriente de carga,  $I_{OUT}$ , de 5 [A] (carga baja).

Pérdidas en <i>high side</i>	Magnitud	Unidad
Conducción	0.0100	W
Conm_ENC	0.0182	W
Conm_APAG	0.0546	W
Carga driver	0.1080	W
Coss	0.0324	W
SUMA	0.2232	W

Tabla 5.2. Pérdidas en el *high side* a 5 [A].

De la tabla anterior, gracias a las funciones de *Excel*, se obtiene la siguiente gráfica de pastel, donde se puede apreciar de mejor manera la distribución de las pérdidas.

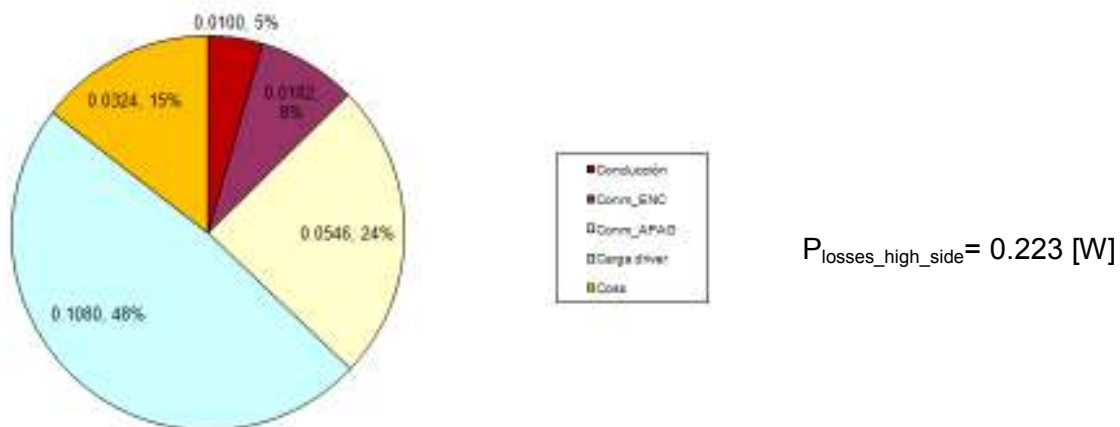


Figura 5.1. Pérdidas en el *high side* a 5[A].

Para las pérdidas debidas al *low side* MOSFET se crea la tabla 5.3., pero ahora para obtener la magnitud de las pérdidas descritas se introdujeron, en la hoja de cálculo de *Excel*, las fórmulas 3.5, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14, evaluadas, siendo

redundante para no olvidar, con las condiciones del SBC mencionadas, con los valores de la tabla 5.1 y para una corriente de carga,  $I_{OUT}$ , de 5 [A] (carga baja).

Pérdidas en <i>low side</i>	Magnitud	Unidad
Conducción	0.0338	W
Conm_ENC	0.0012	W
Conm_APAG	0.0036	W
Carga driver	0.3348	W
Coss	0.0900	W
Diodo cuerpo	0.0474	W
Qrr	0.0900	W
SUMA	0.6007	W

Tabla 5.3. Pérdidas en el *low side* a 5 [A].

Su consecuente gráfica de pastel se ilustra en la figura 5.2.

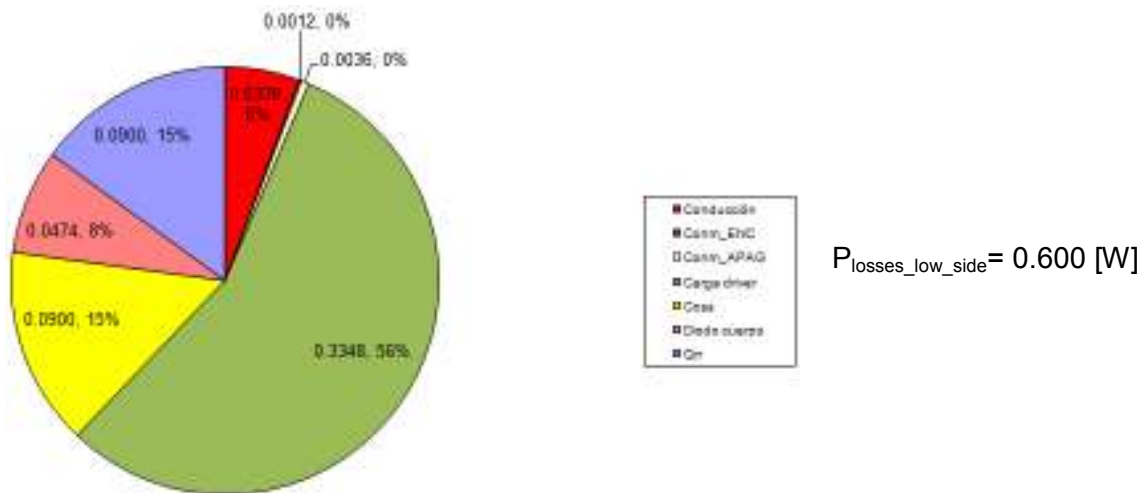


Figura 5.2. Pérdidas en el *low side* a 5[A].

Una observación interesante en este momento es que las pérdidas debidas al *low side* MOSFET son considerablemente mayores a las debidas al *high side* MOSFET, 600 [mW] contra 223 [mW]. Esto ocurre para una carga de 5 [A], veamos qué sucede con cargas mayores.

Sumando las pérdidas debidas a ambos MOSFETs, resulta un valor de:

$$P_{\text{total}_5A} = 0.823 \text{ [W]}$$

Desafortunadamente el valor anterior no nos dice mucho sobre la distribución de pérdidas debida a ambos MOSFETs. Para tener una mejor apreciación de la distribución mencionada se crea la tabla 5.4.

Pérdidas totales 5 [A]	Magnitud	Unidad
Conducción_HS	0.0100	W
Conm_ENC_HS	0.0182	W
Conm_APAG_HS	0.0546	W
Carga_driver_HS	0.1080	W
Coss_HS	0.0324	W
Conducción_LS	0.0338	W
Conm_ENC_LS	0.0012	W
Conm_APAG_LS	0.0036	W
Carga_driver_LS	0.3348	W
Coss_LS	0.0900	W
BodyDiode_LS	0.0474	W
Qrr	0.0900	W
SUMA	0.8239	W

Tabla 5.4. Pérdidas en el *totales* a 5 [A].

De la tabla anterior surge la gráfica de distribución de pérdidas de ambos MOSFETs. Ver figura 5.3.

Para una corriente de 5 [A], se puede observar que las pérdidas dominantes son las debidas a la carga de compuerta por *driver* del *low side* MOSFET con un 41% del total de pérdidas. Le siguen las pérdidas debidas a la carga de compuerta por *driver* del *high side* MOSFET con un 13% del total. Otras pérdidas considerables, mayores a 10%, son las debidas a la capacitancia de salida del *low side* y a la recuperación inversa del diodo de cuerpo. A cargas bajas las pérdidas por conducción, por conducción del diodo de cuerpo y por conmutación forman una pequeña parte del total de pérdidas, sumadas todas ellas llegan a un 14%.

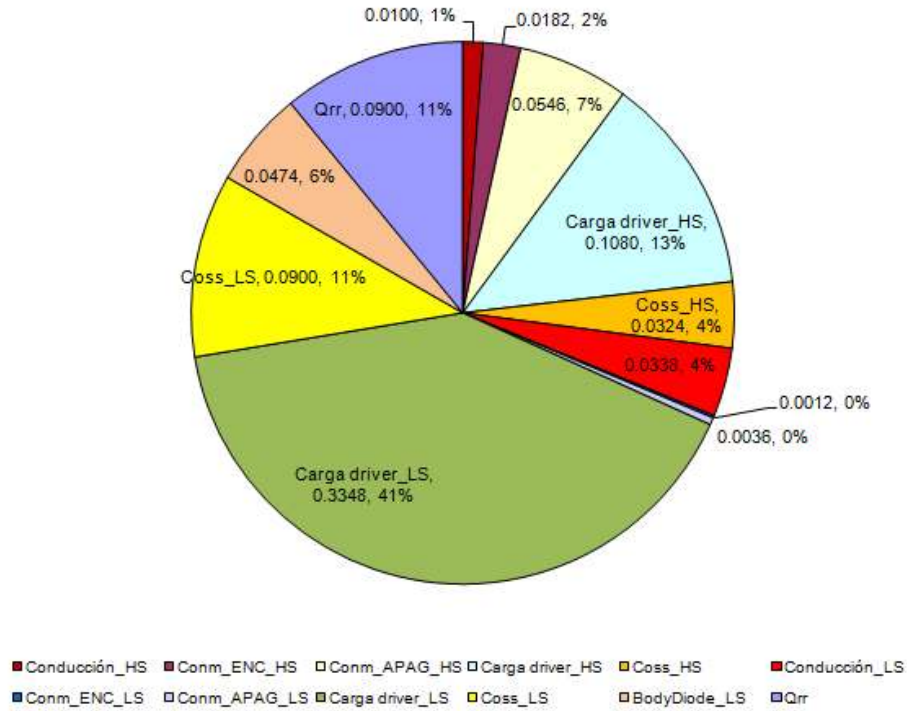


Figura 5.3. Pérdidas totales a 5A.

Para calcular la eficiencia teórica a 5 [A] se emplean las ecuaciones 1.1, 1.3 y 1.4. No se puede emplear solamente la ecuación 1.1 ya que no se conoce la potencia de entrada,  $P_{IN}$ , pero despejando la potencia de entrada de la ecuación 1.3, tenemos que:

$$P_{IN} = P_{OUT} + P_{Losses} \dots\dots\dots ec. 5.1$$

Sustituyendo la ecuación anterior junto con la ecuación 1.4 en la ecuación 1.1, resulta la siguiente expresión:

$$\eta_{5A} = \frac{P_{OUT}}{P_{OUT} + P_{Losses}} = \frac{V_{OUT} I_{OUT}}{V_{OUT} I_{OUT} + P_{Losses}} \dots\dots\dots ec. 5.2$$

Sustituyendo los valores respectivos, la eficiencia a 5[A], es:

$$\eta_{5A} = \frac{V_{OUT} I_{OUT}}{V_{OUT} I_{OUT} + P_{total\_5A}} = \frac{1.2(5)}{1.2(5) + 0.823} = 0.879$$

Una vez creadas las tablas 5.2, 5.3 y 5.4 en *Excel*, para una corriente de 15 [A], carga media, se cambia el valor de la corriente de salida,  $I_{OUT}$ , de 5 [A] a 15 [A], aunque se debe cambiar la ecuación de pérdidas por conmutación durante el encendido del MOSFET, la ecuación 3.9 por la 3.30, ya que ahora el encendido trabaja bajo el régimen limitado inductivamente, obteniéndose las gráficas de distribución de pérdidas de las figuras 5.4, 5.5 y 5.6.

En la figura 5.4 se observa ahora que, en el *high side* MOSFET, las pérdidas por conducción casi igualan a las pérdidas por la carga de compuerta por driver, que a carga baja eran las dominantes. Las últimas han sido desplazadas por las pérdidas por conmutación durante el apagado.

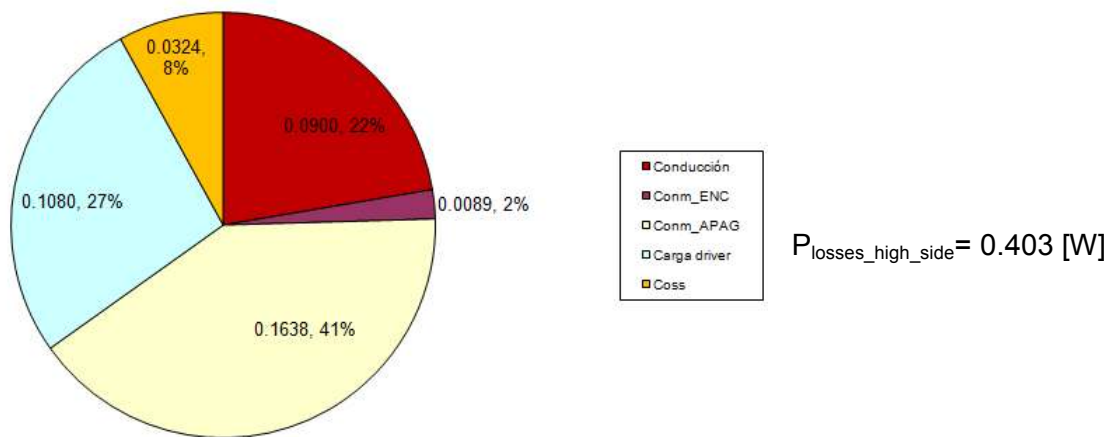


Figura 5.4. Pérdidas en el *high side* a 15 [A].

Para el *low side* MOSFET a 15 [A], ver figura 5.5, las pérdidas por conducción casi igualan a las pérdidas, antes claramente dominantes, por carga de compuerta. Las pérdidas relacionadas a efectos capacitivos empiezan a perder impacto en las pérdidas de potencia, ya que han permanecido constantes al cambio de corriente, mientras que la conducción del diodo de cuerpo ha empezado a generar pérdidas considerables, pasó de un 8% a un 15% respecto a las pérdidas totales en el *low side*.

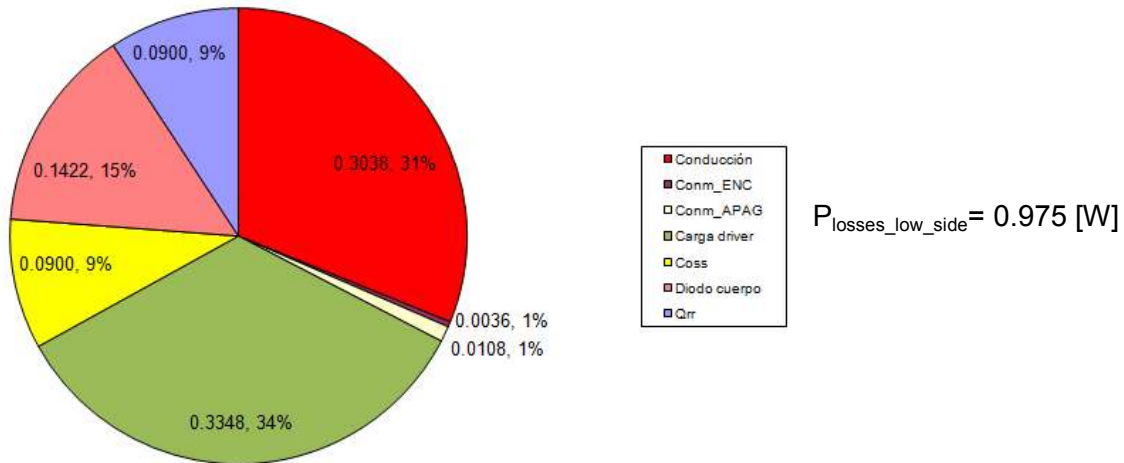


Figura 5.5. Pérdidas en el *low side* a 15 [A].

Sumando las pérdidas debidas a ambos MOSFETs, resulta un valor de:

$$P_{\text{total\_15A}} = 1.378 \text{ [W]}$$

El valor anterior es mayor que el de las pérdidas totales a 5 [A], por lo que se puede comentar que a corrientes mayores, mayores serán las pérdidas de potencia.

Sustituyendo los valores respectivos en la ecuación 5.2, la eficiencia a 15[A], es:

$$\eta_{15A} = 0.928$$

A pesar de tener más pérdidas de potencia, la eficiencia a 15 [A] es mayor que a la eficiencia a 5 [A], esto indica que la potencia a la entrada ha aumentado más que las pérdidas.

Como se puede ver en la figura 5.6, en las pérdidas de potencia debidas a ambos MOSFETs, para una corriente de 15 [A] no hay un claro parámetro tecnológico dominante, algunos de ellos empiezan a manifestar sus efectos de mayor manera, como el diodo de cuerpo. Las pérdidas por conducción juegan un papel más importante para esta corriente de carga, junto con las pérdidas por carga de compuerta por *driver* del *low side* MOSFET.



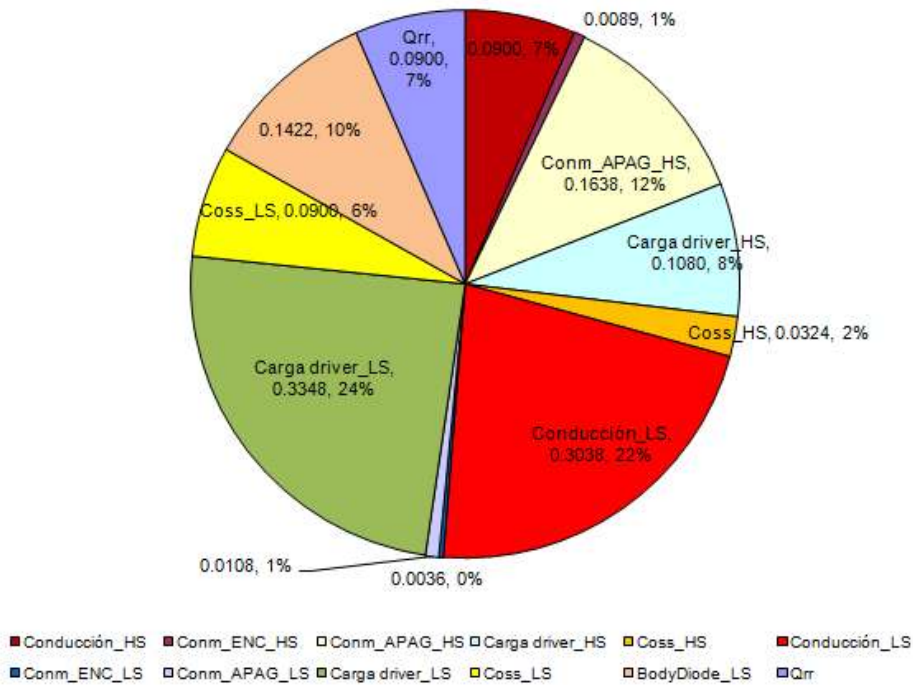


Figura 5.6. Pérdidas totales a 15 [A].

Para una corriente de 25 [A], carga alta, las gráficas de distribución de pérdidas de potencia son las mostradas en las figuras 5.6, 5.7 y 5.8.

En la figura 5.6 se observa ahora que para carga alta, en el *high side* MOSFET, las pérdidas por la carga de compuerta por driver han sido rebasadas, por mucho, por las pérdidas debidas a la  $R_{ds\_on}$ , pérdidas por conducción, y por las pérdidas por conmutación durante el apagado del MOSFET.

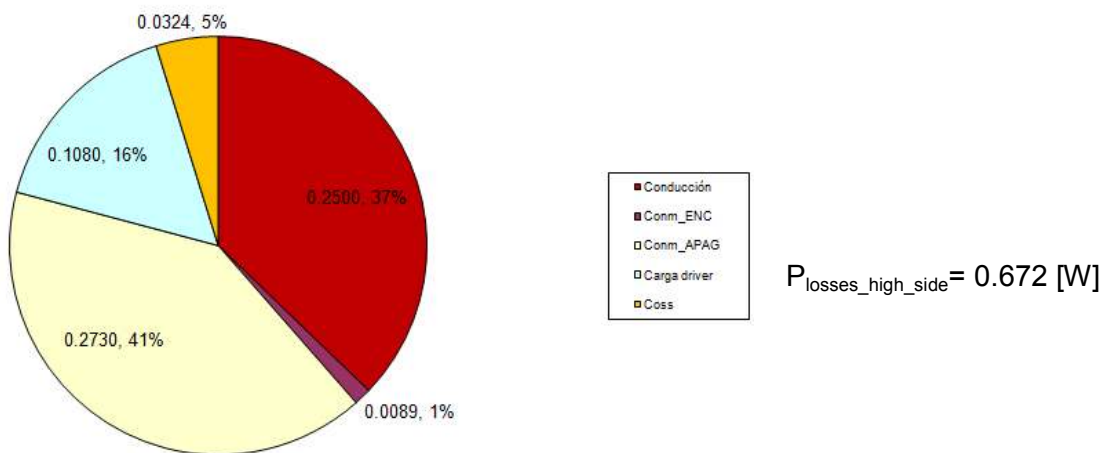


Figura 5.7. Pérdidas en el *high side* a 25[A].

Para el *low side* MOSFET a 25 [A], ver figura 5.8, las pérdidas por conducción son, claramente, las pérdidas dominantes.

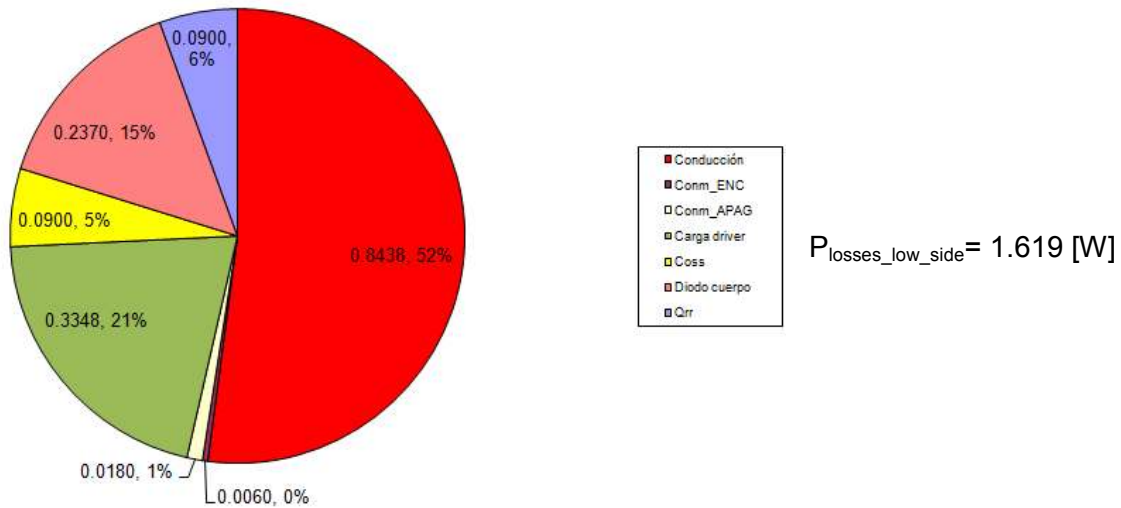


Figura 5.8. Pérdidas en el *Low side* a 25[A].

Las pérdidas totales, debidas a los dos MOSFETs, a 25 [A], son:

$$P_{\text{total\_25A}} = 2.292 \text{ [W]}$$

La eficiencia del SBC para la corriente analizada es de:

$$\eta_{25A} = 0.929$$

El cambio entre las eficiencias de 15 [A] a 25 [A] fue menor que entre las eficiencias de 5 [A] a 15 [A]. Si se siguiera aumentando la corriente, se llegaría un máximo en el valor de eficiencia para después decrecer y tender a un valor cero.

En la figura 5.9 vuelve a apreciar que mientras más grande sea la corriente de carga, mayores serán las pérdidas de potencia, pero ahora se observa que las pérdidas culpables de este fenómeno son las pérdidas por conducción, en especial, las del *low side* MOSFET.

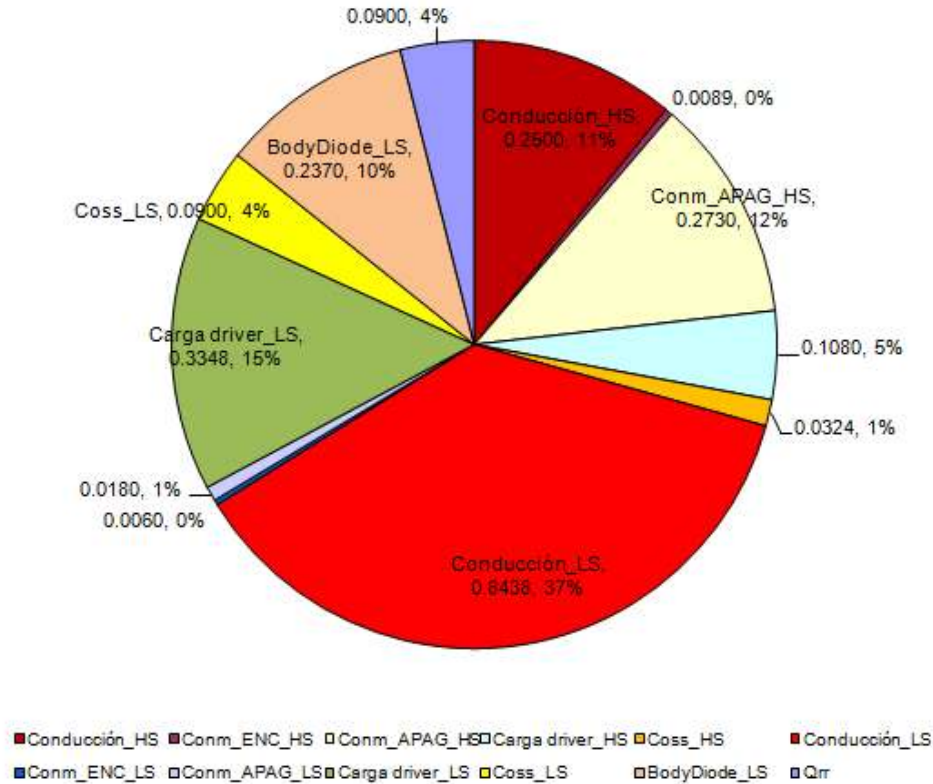


Figura 5.9. Pérdidas totales a 25 [A].

NOTA: Es posible apreciar en las figuras 5.2, 5.5 y 5.8 el efecto de la llamada conmutación de voltaje cero del *low side* MOSFET. Las pérdidas por conmutación de este MOSFET son despreciables, como había páginas antes.

Como el interés de este informe de actividades profesionales es mostrar el impacto de las características de los MOSFETs de potencia en la eficiencia de los convertidores *buck* síncronos, ahora es menester crear las curvas de eficiencia asociadas a cada combinación de MOSFETs. Para ello se crea una tabla, como la mostrada en la tabla 5.5, donde el rango de corriente fue dividido de forma tal para coincidir con las corrientes evaluadas experimentalmente. Se incluyen las pérdidas debidas a todos los parámetros explicados anteriormente. En la columna “SUMA”, se suman, valga la redundancia, las pérdidas de potencia respectivas a las características técnicas que afectan a cada MOSFET. En la columna “Total”, están considerados los efectos de ambos MOSFETs. Finalmente, la eficiencia se calcula apoyándose en la ecuación 5.2.

HIGH SIDE MOSFET							LOW SIDE MOSFET									
Iout	Cond	Sw ON	Sw OFF	Qg	Coss	SUM	Cond	Sw ON	Sw OFF	Qg	Coss	Diodo	Qrr	SUM	Total	Eff
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1080	0.0648	0.1728	0.0000	0.0000	0.0000	0.3110	0.1404	0.0000	0.1800	0.6314	0.8042	0.0000
1.3670	0.0008	0.0050	0.0149	0.1080	0.0648	0.1935	0.0040	0.0003	0.0010	0.3110	0.1404	0.0130	0.1800	0.6497	0.8433	0.6605
2.7180	0.0033	0.0099	0.0297	0.1080	0.0648	0.2157	0.0160	0.0007	0.0020	0.3110	0.1404	0.0258	0.1800	0.6758	0.8915	0.7853
4.0690	0.0075	0.0148	0.0444	0.1080	0.0648	0.2395	0.0358	0.0010	0.0029	0.3110	0.1404	0.0386	0.1800	0.7097	0.9492	0.8372
5.4200	0.0132	0.0197	0.0592	0.1080	0.0648	0.2649	0.0635	0.0013	0.0039	0.3110	0.1404	0.0514	0.1800	0.7515	1.0164	0.8648
6.7680	0.0206	0.0246	0.0739	0.1080	0.0648	0.2920	0.0989	0.0016	0.0049	0.3110	0.1404	0.0642	0.1800	0.8010	1.0930	0.8814
8.1210	0.0297	0.0296	0.0887	0.1080	0.0648	0.3207	0.1425	0.0019	0.0058	0.3110	0.1404	0.0770	0.1800	0.8587	1.1794	0.8920
9.4700	0.0404	0.0345	0.1034	0.1080	0.0648	0.3510	0.1937	0.0023	0.0068	0.3110	0.1404	0.0898	0.1800	0.9240	1.2750	0.8991
10.8210	0.0527	0.0394	0.1182	0.1080	0.0648	0.3830	0.2529	0.0026	0.0078	0.3110	0.1404	0.1026	0.1800	0.9973	1.3804	0.9039
12.1700	0.0666	0.0443	0.1329	0.1080	0.0648	0.4166	0.3199	0.0029	0.0087	0.3110	0.1404	0.1154	0.1800	1.0784	1.4950	0.9071
13.5210	0.0823	0.0492	0.1476	0.1080	0.0648	0.4519	0.3949	0.0032	0.0097	0.3110	0.1404	0.1282	0.1800	1.1675	1.6194	0.9092
14.8710	0.0995	0.0541	0.1624	0.1080	0.0648	0.4888	0.4777	0.0036	0.0107	0.3110	0.1404	0.1410	0.1800	1.2643	1.7532	0.9105
16.2210	0.1184	0.0590	0.1771	0.1080	0.0648	0.5274	0.5683	0.0039	0.0117	0.3110	0.1404	0.1538	0.1800	1.3691	1.8965	0.9112
17.5700	0.1389	0.0640	0.1919	0.1080	0.0648	0.5675	0.6668	0.0042	0.0126	0.3110	0.1404	0.1666	0.1800	1.4816	2.0492	0.9114
18.9220	0.1611	0.0689	0.2066	0.1080	0.0648	0.6094	0.7734	0.0045	0.0136	0.3110	0.1404	0.1794	0.1800	1.6023	2.2118	0.9112
20.2720	0.1849	0.0738	0.2214	0.1080	0.0648	0.6529	0.8877	0.0049	0.0146	0.3110	0.1404	0.1922	0.1800	1.7307	2.3836	0.9108
21.6220	0.2104	0.0787	0.2361	0.1080	0.0648	0.6980	1.0098	0.0052	0.0155	0.3110	0.1404	0.2050	0.1800	1.8670	2.5650	0.9100
22.9720	0.2375	0.0836	0.2509	0.1080	0.0648	0.7447	1.1399	0.0055	0.0165	0.3110	0.1404	0.2178	0.1800	2.0111	2.7558	0.9091
24.3240	0.2662	0.0885	0.2656	0.1080	0.0648	0.7932	1.2780	0.0058	0.0175	0.3110	0.1404	0.2306	0.1800	2.1633	2.9565	0.9080
25.6720	0.2966	0.0934	0.2803	0.1080	0.0648	0.8432	1.4236	0.0062	0.0185	0.3110	0.1404	0.2434	0.1800	2.3230	3.1661	0.9068

Tabla 5.5. Pérdidas totales y eficiencia.

Una vez obtenidas las tablas respectivas a cada combinación a evaluar, se grafican la columna de corriente y la de eficiencia. Con lo cual se puede obtener una gráfica como la mostrada en la figura 5.10.

Con esta información, el diseñador de SBCs, puede seleccionar la combinación de MOSFETs que considere mejor para las condiciones del SBC dadas. La combinación de MOSFETs BSF050L-BSB012L, parece ser la peor para el rango de corriente y las condiciones del SBC dados. La elección entre las otras dos combinaciones de MOSFETs dependerá de dónde se requiera una mayor eficiencia, carga baja o carga alta. Sin embargo, la diferencia en carga baja es menor que la diferencia en carga alta, de aquí que para el rango de corriente dado, la mejor opción sería trabajar con los MOSFETs BSF050L y BSB017L.

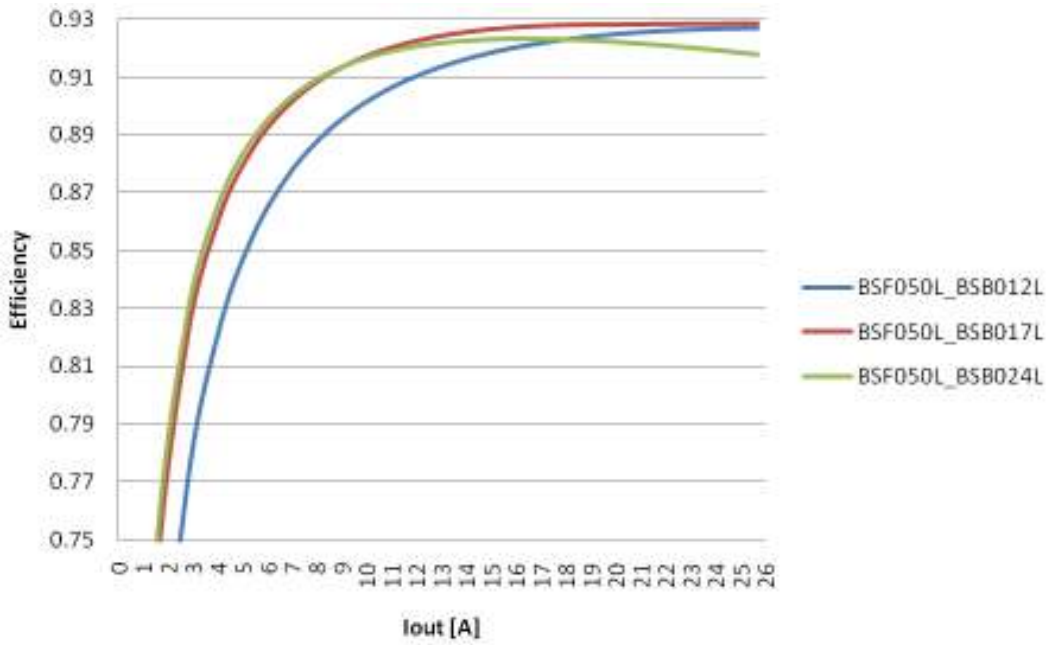


Figura 5.10. Curvas teóricas para un voltaje de manejo de 12 [V].

La figura 5.11 muestra las curvas de eficiencia experimentales, obtenidas como fue explicado en el capítulo IV.

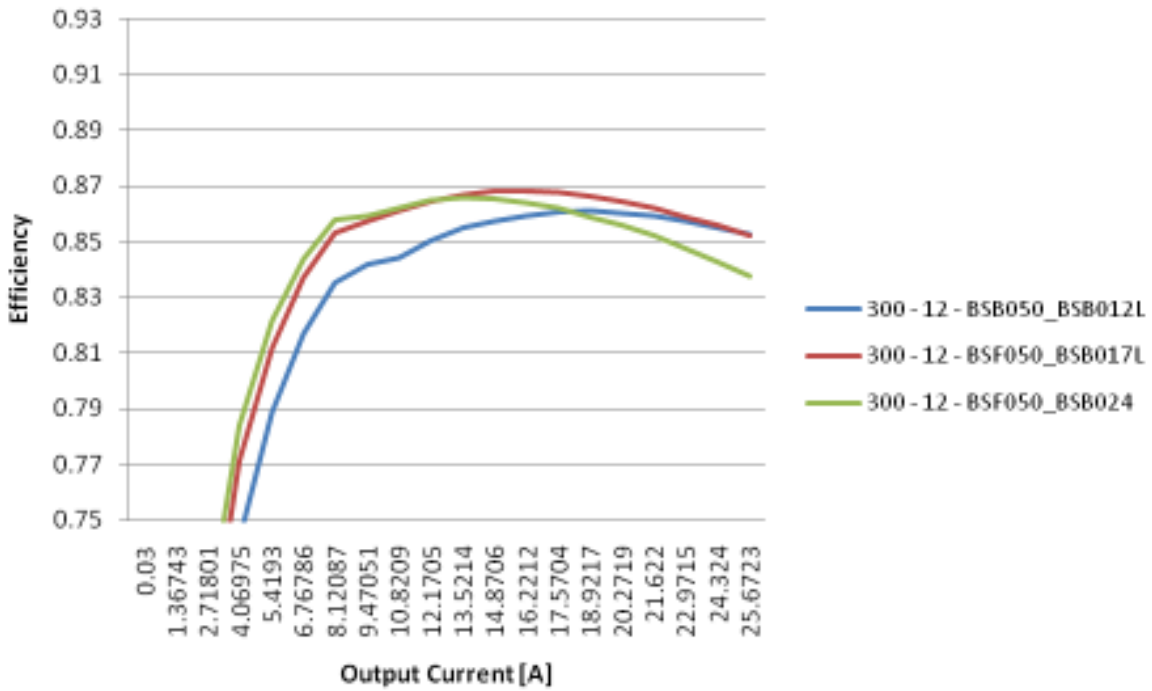


Figura 5.11. Curvas experimentales para un voltaje de manejo de 12 [V].

Comparando las curvas teóricas y experimentales, se puede ver que los puntos de cruce entre curvas son muy similares pero las curvas experimentales muestran una eficiencia menor. Las razones para esta diferencia son: las pérdidas de potencia debidas a otros componentes (elementos pasivos, circuito impreso, circuito *driver*...) no fueron considerados en el cálculo. Además, los efectos de la temperatura (como el incremento del valor de  $R_{ds\_on}$  cuando aumenta la temperatura) tampoco se tomó en cuenta en el cálculo. Si los componentes pasivos fueran componentes ideales y el circuito impreso no tuviera parásitos, las curvas experimental y teórica estarían más cercanas la una con la otra. La otra opción para acercar las curvas experimentales y teóricas sería incluir las pérdidas que no fueron consideradas en este texto.

Si el voltaje *driver* es cambiado ahora a 6.8 [V] y el resto de las condiciones para el SBC se mantienen igual que en el ejemplo anterior, los parámetros tecnológicos de los MOSFETs de potencia cambiarán, ver tabla siguiente.

PARÁMETRO	BSF050L	BSB012L	BSB017L	BSB024L
Rdson [mΩ]	4.6	1.2	1.7	2.3
Qg [nC]	18	88	56	50
Qsw [nC]	8	42	27	24
Qoss [nC]	18	85	50	39
Qrr [nC]	16	50	50	50
Vsd [V]	0.82	0.77	0.79	0.79
Vth [V]	1.7	1.7	1.7	1.7
Vmiller [V]	3	3	3	3
Rgate_LS [Ω]	0.4	0.5	0.5	0.6
Ciss [pF]	3000			

Tabla 5.6. Valores típicos a un voltaje driver de 6.8 [V].

Los tres primeros parámetros han cambiado ahora, ya que son dependientes del voltaje *driver*. Siguiendo un procedimiento igual al explicado anteriormente, se llega a las curvas de eficiencia para un voltaje *driver* de 6.8 [V]. Mostradas en la figura 5.12, donde se observa que la combinación de MOSFETs BSF050L-BSB012L es ahora la mejor a valores de corriente altos, mientras que a un voltaje *driver* de 12 [V] fue la peor durante todo el rango de corriente.

El cambio de un parámetro de las condiciones del SBC puede conllevar a una diferencia significativa en la eficiencia. Lo anterior dice que un MOSFET inadecuado para alguna aplicación puede ser la elección correcta para otra.

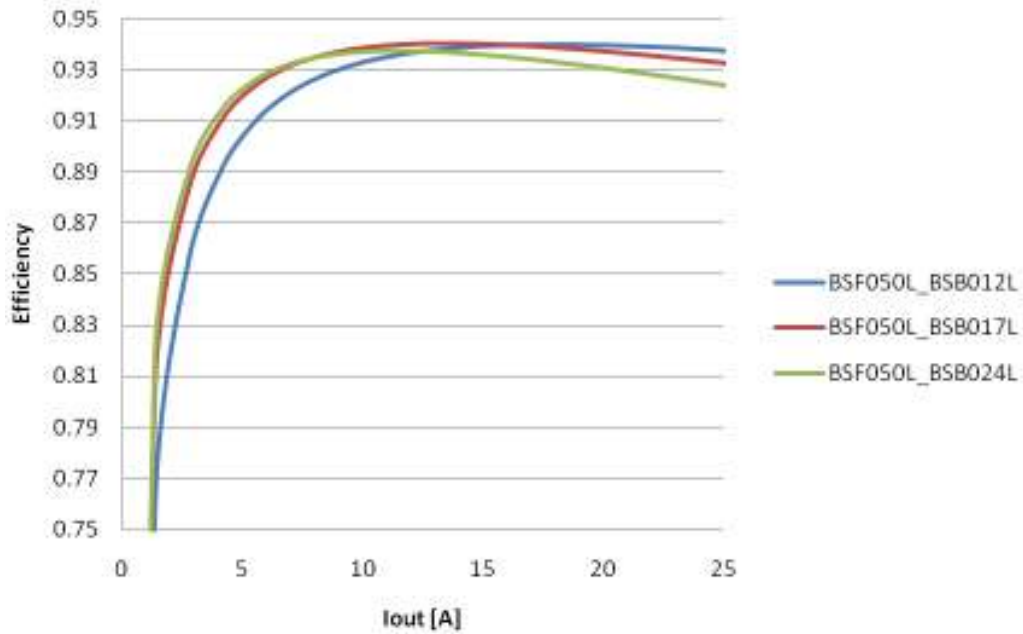


Figura 5.12. Curvas teóricas para un voltaje de manejo de 6.8 [V].

Las curvas experimentales para un voltaje *driver* de 6.8 [V] se muestran en la figura 5.13.

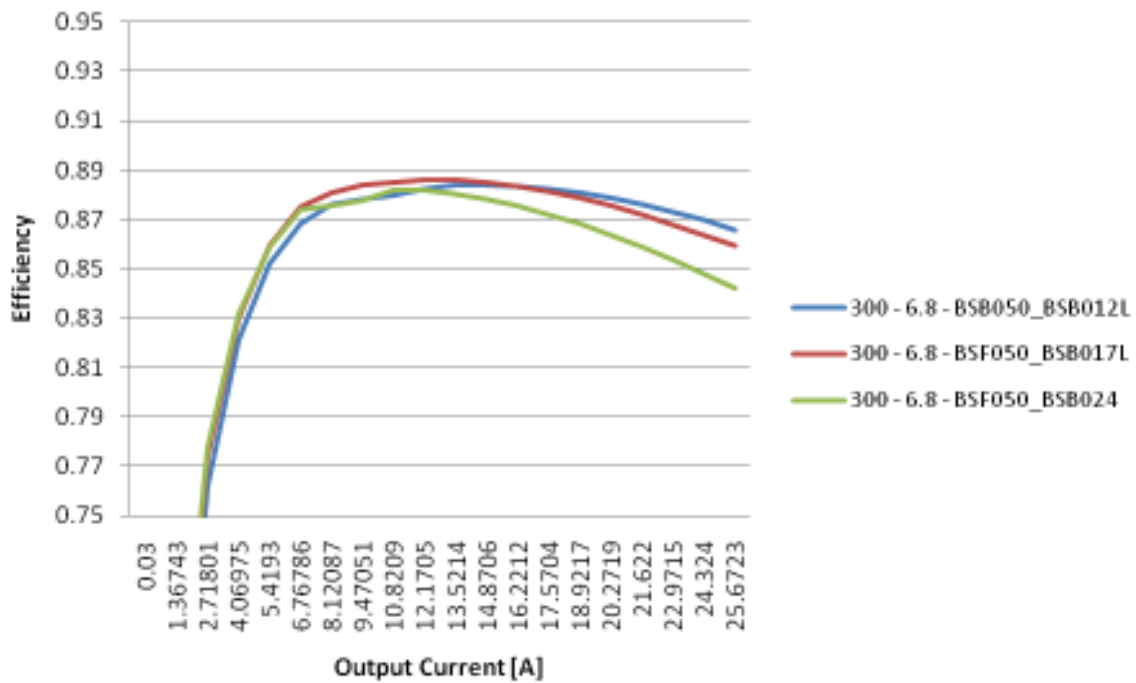


Figura 5.13. Curvas experimentales para un voltaje de manejo de 6.8 [V].

Comparando las curvas de eficiencia de las figuras 5.12 y 5.13 con las de las figuras 5.10 y 5.11, respectivamente, se aprecia que el intervalo de eficiencia creció de 0.92 a 0.94 para los resultados teóricos y de 0.87 a 0.89 para los resultados experimentales tan sólo por el cambio de voltaje de manejo de 12 [V] a 6.8 [V]. Se confirma pues, que una combinación de MOSFETs inadecuada para alguna aplicación puede ser la elección correcta para otra.