

## AValiação DO DESEMPENHO DE TRANSISTORES DE SI E GAN EM CONVERSORES BUCK SÍNCRONOS PARA ALIMENTAÇÃO DE LEDS DE POTÊNCIA

RENAN R. DUARTE, GUILHERME F. FERREIRA, MARCO A. DALLA COSTA

*Universidade Federal de Santa Maria  
Av. Roraima, 1000, Santa Maria, RS, Brasil*

*E-mails: {renan.duarte, guilhermefarias, marcocdc}@gedre.ufsm.br*

J. MARCOS ALONSO

*Universidad de Oviedo  
Campus de Viesques, Edificio 3, Gijón 33204, Espanha  
E-mail: marcos@uniovi.es*

**Abstract**— Wide bandgap (WBG) semiconductors have emerged as an attractive option for silicon (Si) replacement in the recent years. Among the new materials, gallium nitride (GaN) has been considered as the most promising candidate. This paper presents a comparison between Si and GaN switching devices in a family of synchronous buck converters designed for LED lighting applications. Ten 48 V to 28.3 V at 22.6 W converters were designed under the same parameters at five different switching frequencies, ranging from 100 kHz to 1 MHz. Efficiency and temperatures were recorded in four different scenarios: with and without an external diode in parallel with the low-side switch and for two different dead time values, 25 ns and 50 ns. GaN based converters presented higher efficiency and lower operating temperatures in all cases, with a maximum efficiency of 96.8% and a minimum of 94.5%. Besides, Si-based converters exhibited a higher performance degradation as switching frequency and dead time increase.

**Keywords**— Gallium Nitride Transistor, GaN, GaN HEMT, LED Driver, Switching Power Supply, Synchronous Buck Converter

**Resumo**— Semicondutores de *bandgap* largo surgiram nos últimos anos como uma opção atrativa para a substituição dos semicondutores de silício (Si). Dentre os novos materiais, o nitreto de gálio (GaN) tem sido considerado o candidato mais promissor. Este artigo apresenta uma comparação entre interruptores de Si e GaN em uma família de conversores buck síncronos concebidos para aplicações de iluminação LED. Dez conversores 48 V para 28,3 V e 22,6 W foram projetados com os mesmos parâmetros em cinco diferentes frequências de comutação, variando de 100 kHz a 1 MHz. Eficiência e temperaturas foram medidas em quatro diferentes cenários: com e sem um diodo externo em paralelo com o interruptor de roda-livre e com dois diferentes valores de tempo morto, 25 ns e 50 ns. Os conversores com transistores GaN apresentaram maior eficiência e menores temperaturas em todos os casos, com uma eficiência máxima de 96,8% e uma mínima de 94,5%. Além disso, os conversores Si exibiram uma maior degradação de desempenho à medida que a frequência de comutação e o tempo morto aumentam.

**Palavras-chave**— Transistor de Nitreto de Gálio, GaN, GaN HEMT, LED Driver, Fonte Chaveada, Conversor Buck Síncrono

### 1 Introdução

Atualmente diodos emissores de luz (LEDs) estão se tornando bastante atrativos em sistemas de iluminação devido, principalmente, a sua durabilidade, eficácia, características luminosas e estrutura ecologicamente correta (Wang et al. 2015; Alonso et al. 2012; Thomas & Pforr 2009; Li et al. 2015). Nos últimos anos, pesquisadores têm dedicado seus esforços em desenvolver tecnologias, circuitos e *layouts* para obter o máximo desempenho possível de sistemas LED.

A substituição das lâmpadas convencionais incandescentes e de descarga por LEDs exige circuitos de acionamento (*drivers*) com alta eficiência e volume reduzido. Maiores frequências de comutação têm sido consideradas, por muito tempo, o fator chave para o desenvolvimento de fontes mais compactas (Wu et al. 2008; Mantooth et al. 2014;

Lim et al. 2016). Porém, mesmo com as muitas melhorias feitas nos MOSFETs de silício nas últimas décadas, o aumento da frequência de comutação ainda é limitado pelas perdas no semicondutor. Recentemente, transistores de nitreto de gálio de alta mobilidade de elétrons (GaN HEMTs) surgiram como uma opção promissora devido às suas menores perdas em altas frequências devido as suas menores capacitâncias e maiores tensões de ruptura (Wu et al. 2008; Huang et al. 2014).

Desde a sua inserção no mercado, semicondutores GaN ganharam espaço na comunidade científica à medida que mostravam potencial para melhorar o desempenho e reduzir significativamente volume, peso e custo de conversores. Apesar dessas vantagens, sua parcela do mercado ainda é extremamente pequena quando comparada com outros semicondutores de silício. Todavia, é esperado que no ano de 2020, semicondutores de *bandgap* largo (e.g. GaN and SiC) representem 5% de todo o mercado dos dispositivos de potência (Gueguen

2015).

Por esta razão, este trabalho avalia os impactos da utilização de diferentes tecnologias de semicondutor em um circuito de acionamento de LEDs de potência. Tal análise será feita explorando os efeitos de diferentes frequências, tempos mortos e a presença ou ausência de um diodo externo para conduzir a corrente durante o tempo morto na eficiência do conversor.

O resto deste artigo está organizado da seguinte maneira: A Seção 2 apresenta a metodologia utilizada neste trabalho, incluindo a topologia do conversor, circuitos de acionamento dos interruptores e o método de aquisição dos dados. Na Seção 3 são apresentados os resultados e a discussão e finalmente, na Seção 4, são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Topologia do conversor

O conversor utilizado neste trabalho é um *buck* síncrono operando em modo de condução contínua (CCM). O circuito do conversor é apresentado na Figura 1. Cinco frequências de comutação foram escolhidas: 100 kHz, 250 kHz, 500 kHz, 750 kHz e 1 MHz.

Para garantir uma comparação justa entre os semicondutores de Si e GaN, dois conversores idênticos foram construídos para cada frequência de comutação, um utilizando interruptores de silício e outro utilizando nitreto de gálio.

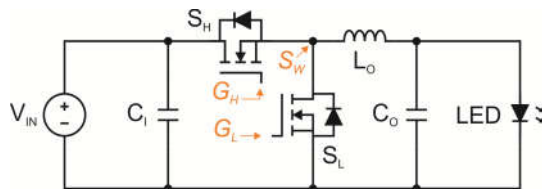


Figura 1. Conversor buck síncrono.

A carga utilizada em todos os casos é um LED de potência BXRC-50C4000-F-24 da marca Bridgelux. Os parâmetros principais de cada conversor são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros dos conversores.

| Especificações                                        | Valor    |
|-------------------------------------------------------|----------|
| Tensão de entrada $V_{IN}$ (V)                        | 48       |
| Tensão de saída $V_{OUT}$ (V)                         | 28,3     |
| Corrente de saída $I_{OUT}$ (A)                       | 0,8      |
| Potência de saída $P_{OUT}$ (W)                       | 22,6     |
| Frequência de comutação $f_{SW}$ (kHz)                | 100-1000 |
| Ondulação de corrente no indutor ( $\Delta I_{L_O}$ ) | 30%      |
| Ondulação de tensão na saída ( $\Delta V_O$ )         | 1%       |

Nos conversores com semicondutores de Si utilizou-se o MOSFET IRF7492 da empresa International Rectifier. Para os conversores baseados em GaN, utilizou-se o MOSFET do tipo intensificação EPC2012 da empresa Efficient Power Conversion. Tais componentes foram selecionados devido a sua similaridade, especialmente no que se refere as tensões e correntes suportadas. Os principais parâmetros dos interruptores são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros dos interruptores

| Especificações            | IRF7492 | EPC2012 |
|---------------------------|---------|---------|
| Tensão drain-source (V)   | 200     | 200     |
| Corrente de dreno (A)     | 3,7     | 3       |
| Resistência do canal (mΩ) | 79      | 100     |
| Carga total do gate (nC)  | 39      | 1,5     |
| Encapsulamento            | SO8     | LGA     |

No conversor *buck* síncrono, os interruptores operam de forma complementar com um tempo morto entre a saída de condução de um e a entrada em condução do outro. Durante este pequeno intervalo, a corrente do conversor circula pelo diodo intrínseco do interruptor de roda-livre ( $S_L$ ). Transistores GaN não apresentam um diodo intrínseco de junção p-n, porém conduzem corrente pelo canal quando reversamente polarizados. Esta característica garante perdas nulas por recuperação reversa porém adiciona uma queda de tensão maior (aproximadamente o dobro da queda de tensão dos diodos intrínsecos de Si) no caminho de corrente quando conduzindo neste modo de operação (Han & Sarlioglu 2015).

Para mensurar os efeitos desse comportamento no desempenho do conversor, cada protótipo foi testado com e sem um diodo externo (MBR2H100 da empresa On Semiconductor) conectado em paralelo com a chave de roda-livre. Além disso, dois valores diferentes de tempo morto foram testados em cada caso, 25 ns e 50 ns.

O indutor e os capacitores de entrada e saída dos conversores foram dimensionados de acordo com as especificações apresentadas anteriormente, sendo adotado, em cada caso, o valor comercial mais próximo do calculado. A Tabela 3 apresenta os valores selecionados para cada frequência.

O mesmo *layout* de placa de circuito impresso (PCB) foi utilizado para ambas as tecnologias de semicondutor em todas as frequências a fim de minimizar possíveis variações causadas por componentes parasitas das trilhas como resistências e indutâncias. Devido aos níveis de tensão diferente necessários para a operação de cada interruptor, duas PCBs separadas foram feitas para os circuitos de *driver*. As conexões entre cada placa de *driver* e o

conversor foram feitas usando pinos metálicos, como será detalhado na próxima seção. Na Figura 2 são exibidos os conversores desenvolvidos para ambos os tipos de semiconductor. Como pode ser visto, um *footprint* genérico que comporta tanto encapsulamentos SO8 quanto LGA foi utilizado para os interruptores.

Tabela 3. Valores dos componentes passivos.

| Frequência | Componente | Valor       |
|------------|------------|-------------|
| 100 kHz    | $C_i, C_o$ | 940 nF      |
|            | $L_o$      | 470 $\mu$ H |
| 250 kHz    | $C_i, C_o$ | 570 nF      |
|            | $L_o$      | 220 $\mu$ H |
| 500 kHz    | $C_i, C_o$ | 200 nF      |
|            | $L_o$      | 100 $\mu$ H |
| 750 kHz    | $C_i, C_o$ | 200 nF      |
|            | $L_o$      | 68 $\mu$ H  |
| 1000 kHz   | $C_i, C_o$ | 94 nF       |
|            | $L_o$      | 47 $\mu$ H  |

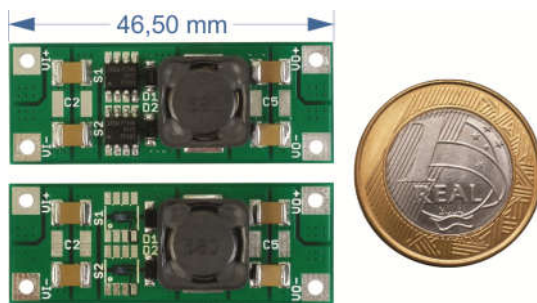


Figura 2. Protótipo do conversor empregando Si (acima) e GaN (abaixo).

## 2.2 Gate Drivers

Dois sinais PWM complementares foram usados para comandar as chaves do conversor *buck*. Estes sinais foram gerados por um DSP F28377S da empresa Texas Instruments com frequência, razão cíclica e tempo morto selecionáveis. O módulo de PWM de alta resolução foi utilizado de forma a garantir tempos de comutação precisos mesmo em altas frequências. Os parâmetros mencionados acima foram definidos manualmente antes da operação do conversor de forma a se obter a potência de saída adequada em todos os casos.

O esquemático do *driver* para os semicondutores de Si é apresentado na Figura 3. O circuito é baseado no circuito integrado (CI) MAX15019 da empresa Maxim Integrated com um diodo de *bootstrap* externo para reduzir a dissipação de potência no interior do encapsulamento. Os diodos D1 e D2 foram adicionados para fornecer um caminho mais rápido para a corrente durante a saída de condução. Os resistores R1 e R2 (ambos 10  $\Omega$ ) limitam os

tempos de entrada em condução. A tensão de alimentação do circuito é 10 V.

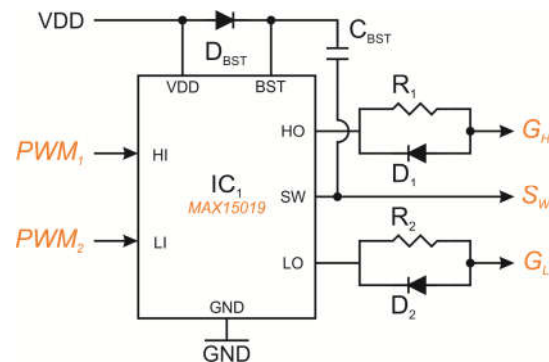


Figura 3. Circuito de driver – Si.

Para o *driver* GaN utilizou-se o circuito integrado LM5113 da National Semiconductor. Este CI é projetado especificamente para transistores GaN do tipo intensificação pois garante uma tensão de saída regulada na chave superior para evitar danos ao semiconductor à medida que a carga de saída aumenta. A Figura 4 apresenta o esquemático do circuito. Devido à presença de pinos dedicados no CI para a carga e descarga do *gate*, um caminho rápido para a corrente na saída de condução é obtido simplesmente conectando tais pinos diretamente ao *gate* da chave. R3 e R4 (22  $\Omega$ ) têm a mesma função de R1 e R2. A tensão de alimentação do circuito é 5 V.

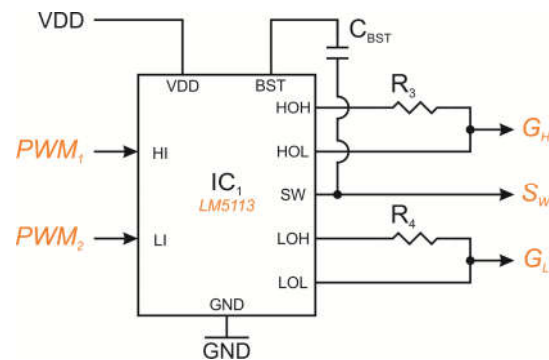


Figura 4. Circuito de driver – GaN.

Como mencionado anteriormente, a placa de circuito impresso de cada *driver* foi separada da placa do conversor para manter os *layouts* os mais similares possível. A PCB do *driver* Si é exibida na Figura 5. Como pode ser visto, a placa do conversor é mantida no lugar por parafusos e as conexões elétricas são feitas por pinos que podem ser vistos no centro da imagem. Os conectores SMA no topo servem para medição das tensões das chaves e da corrente no indutor.

## 2.3 Aquisição de dados

A eficiência do conversor foi medida com um analisador de potência WT1800 da marca Yokogawa enquanto as temperaturas foram adquiridas com uma

câmera térmica Fluke Ti32. A potência consumida pelos drivers não foi considerada.

Os resultados foram adquiridos após a estabilização térmica do conversor. As únicas exceções foram os protótipos Si operando em 750 kHz e 1 MHz nos quais a temperatura na chave superior ( $S_H$ ) atingiu níveis que poderiam causar danos ao semicondutor. Nesses casos o teste foi encerrado e os resultados gravados quando a temperatura da chave excedeu 100 °C. Nenhum dissipador ou sistema de ventilação forçada foi utilizado nos protótipos.

A análise de distribuição de perdas foi feita utilizando simulações no *software* LTspice. Para garantir boa correlação entre os resultados medidos e os de simulação, os modelos fornecidos pelos fabricantes de cada componente foram utilizados.

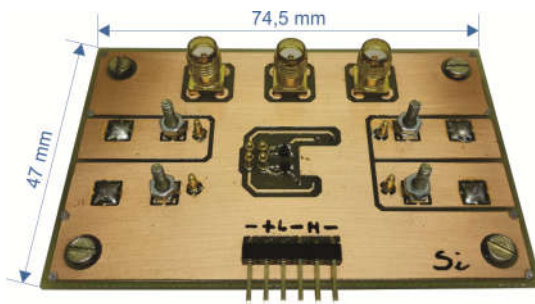


Figura 5 - PCB do driver Si

### 3 Resultados e Discussão

Os gráficos da eficiência para os conversores com e sem o diodo paralelo são exibidos na Figura 6 e Figura 7, respectivamente.

As tabelas completas com todos os dados medidos podem ser vistas no apêndice deste artigo.

Como pode ser notado, não apenas os conversores com GaN apresentam maiores eficiências em praticamente todos os cenários, como também apresentam uma menor degradação no desempenho com o aumento da frequência de comutação. Ao longo de toda a faixa de frequência, de 100 kHz à 1 MHz, a diferença entre a maior e a menor eficiência foi de apenas 2,3% para o *buck* com GaN no pior caso, com diodo externo e tempo morto de 25 ns. Sem o diodo externo, a diferença cai a 1,8% para o mesmo tempo morto, evidenciando que apesar de apresentar maiores queda de tensão do que o Si, a ausência de perdas por recuperação reversa se mostra vantajosa em aplicações onde a chave de roda-livre conduz corrente reversamente polarizada por pequenos intervalos de tempo. Nos conversores com Si, as quedas de eficiência foram de 5,4% e 4,5% nas mesmas condições.

No que diz respeito às temperaturas no indutor, um comportamento decrescente é observado até 500 kHz, seguido de um aumento de temperatura em

frequências de comutação maiores. As altas temperaturas nas baixas frequências são causadas principalmente pelas maiores resistências dos enrolamentos dos indutores, enquanto as perdas no material magnético se tornam mais significativas em frequências maiores do que 500 kHz, causando um aumento de temperatura.

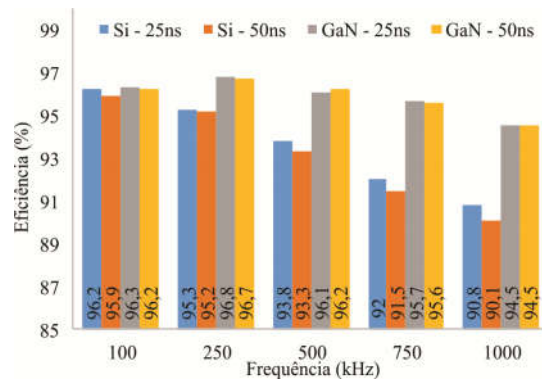


Figura 6. Eficiência medida. Conversores com diodo externo em paralelo com a chave de roda-livre para tempos mortos de 25 ns e 50 ns.

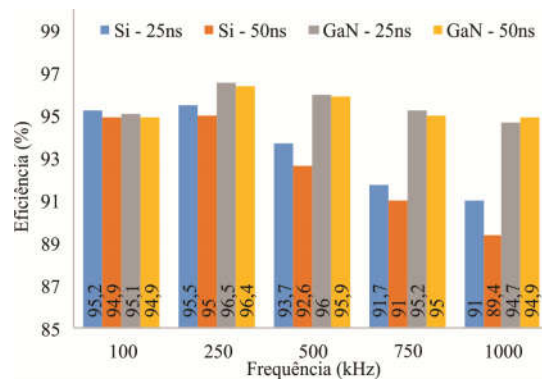


Figura 7. Eficiência medida. Conversores sem diodo externo em paralelo com a chave de roda-livre para tempos mortos de 25 ns e 50 ns.

A maior discrepância entre as temperaturas do indutor nos protótipos com Si e GaN em altas frequências pode estar relacionada com as perdas nos interruptores. Como pode ser observado na distribuição das perdas da Figura 8, para todas as frequências, semicondutores de silício apresentam maiores perdas, principalmente em comutação. Isso, aliado a maior massa térmica do encapsulamento SO8, pode produzir um aquecimento cruzado dos indutores.

Nos interruptores, como esperado, as temperaturas se relacionam de forma direta com a frequência de comutação. Entretanto, devido às suas menores capacitâncias, transistores GaN apresentam menores perdas em comutação. A maior temperatura registrada na chave superior do conversor GaN foi 88°C em regime permanente com uma frequência de chaveamento de 1 MHz. Para o mesmo caso, o conversor com Si atingiu 110 °C em cerca de 40 segundos, forçando o teste a ser encerrado. As perdas

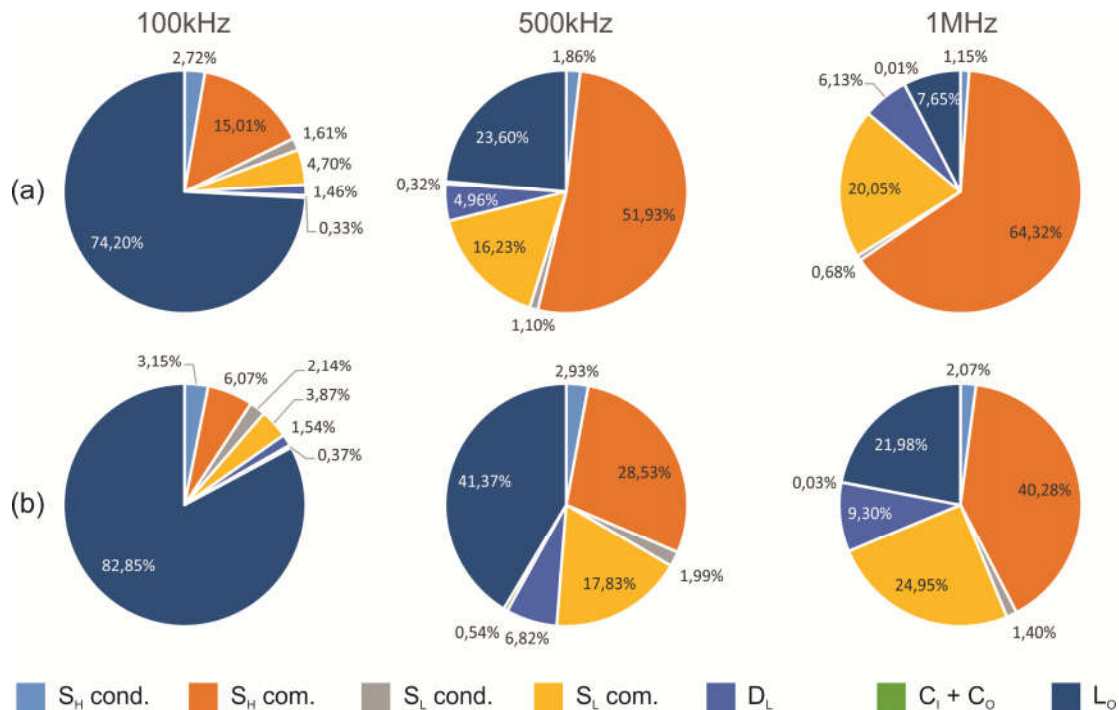


Figura 8. Distribuição de perdas em simulação - Conversores Si (a) e GaN (b) com diodo em paralelo com a chave de roda-livre e tempo morto de 25 ns.  $S_H$  cond. e  $S_L$  cond. representam as perdas por condução na chave superior e inferior, respectivamente;  $S_H$  com. e  $S_L$  com. representam as perdas por comutação na chave superior e inferior, respectivamente;  $D_L$  representa as perdas no diodo externo;  $C_i + C_o$  representa as perdas nos capacitores e  $L_o$  representa as perdas no indutor.

em comutação na chave superior representam 40,28% das perdas totais no conversor GaN e 64,32% no conversor Si, conforme os resultados de simulação apresentados na Figura 8.

Além disso, os transistores GaN se mostraram menos sensíveis a variações do tempo morto, mantendo uma temperatura constante independentemente do valor usado para esse parâmetro. Essa independência não foi observada nos MOSFETs de silício, que apresentaram elevações de temperatura com tempos mortos maiores.

#### 4 Conclusões

Neste artigo, o desempenho dos tradicionais MOSFETs de silício foi comparada com os novos transistores GaN através da análise da eficiência e temperaturas em um conjunto de conversores *buck* síncronos usados como *driver* para um LED de alta potência. Diferentes frequências e tempos mortos foram considerados. Além disso, os impactos da presença de um diodo externo em paralelo com o interruptor de roda-livre foram mensurados em ambas as tecnologias de semicondutor.

Os resultados mostraram um desempenho superior dos transistores de nitreto de gálio em praticamente todos os casos. Apesar de ter uma resistência em condução maior do que o IRF7492, as menores capacitâncias do EPC2012 demonstraram que as perdas em comutação contribuem de forma mais significativa para as perdas totais do conversor,

especialmente em altas frequências, como evidenciado pela evolução da distribuição das perdas.

Isso evidencia o potencial do GaN como substituto do silício no mercado de eletrônica de potência nos próximos anos. À medida que a demanda por conversores mais compactos e mais eficientes aumenta, a necessidade de semicondutores de elevado desempenho também cresce. Isso, aliado ao fato da tecnologia do silício estar se aproximando dos seus limites teóricos, cria um incentivo para a inserção do nitreto de gálio no mercado.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a EPCOS Brasil e ao GSEC/UFES pelas contribuições na realização deste trabalho, à PRPGP/UFES pelo suporte, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Proc. 407837/2013-2), ao governo brasileiro através do programa CAPES/PROEX e ao governo espanhol (ENE2013-41491-R) pelo suporte financeiro.

#### Apêndice

Na Tabela 4 são exibidos os valores medidos para os conversores com a presença do diodo externo no interruptor de roda-livre. Já na Tabela 5 são exibidos os resultados para os conversores sem o diodo externo.

Tabela 4. Resultados medidos - Com diodo paralelo

| Frequência | $\eta$ (%) | $T_{SH}$ (°C) | $T_{SL}$ (°C) | $T_{LO}$ (°C) |
|------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| Si 25 ns   |            |               |               |               |
| 100 kHz    | 96,2       | 41            | 39            | 53            |
| 250 kHz    | 95,3       | 47            | 42            | 43            |
| 500 kHz    | 93,8       | 62            | 51            | 42            |
| 750 kHz    | 92         | 79            | 61            | 46            |
| 1 MHz      | 90,8       | 92            | 69            | 50            |
| Si 50 ns   |            |               |               |               |
| 100 kHz    | 95,9       | 44            | 42            | 54            |
| 250 kHz    | 95,2       | 52            | 46            | 45            |
| 500 kHz    | 93,3       | 68            | 56            | 42            |
| 750 kHz    | 91,5       | 86            | 70            | 47            |
| 1 MHz      | 90,1       | 103           | 80            | 53            |
| GaN 25 ns  |            |               |               |               |
| 100 kHz    | 96,3       | 41            | 39            | 53            |
| 250 kHz    | 96,8       | 45            | 40            | 41            |
| 500 kHz    | 96,1       | 56            | 46            | 38            |
| 750 kHz    | 95,7       | 75            | 53            | 42            |
| 1 MHz      | 94,5       | 76            | 54            | 46            |
| GaN 50 ns  |            |               |               |               |
| 100 kHz    | 96,2       | 41            | 39            | 54            |
| 250 kHz    | 96,7       | 46            | 40            | 43            |
| 500 kHz    | 96,2       | 57            | 43            | 40            |
| 750 kHz    | 95,6       | 76            | 53            | 42            |
| 1 MHz      | 94,5       | 76            | 54            | 46            |

Tabela 5. Resultados medidos - Sem diodo paralelo

| Frequência | $\eta$ (%) | $T_{SH}$ (°C) | $T_{SL}$ (°C) | $T_{LO}$ (°C) |
|------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| Si 25 ns   |            |               |               |               |
| 100 kHz    | 95,2       | 44            | 42            | 50            |
| 250 kHz    | 95,5       | 53            | 46            | 45            |
| 500 kHz    | 93,7       | 66            | 53            | 40            |
| 750 kHz    | 91,7       | 87            | 67            | 44            |
| 1 MHz      | 91         | 102           | 74            | 50            |
| Si 50 ns   |            |               |               |               |
| 100 kHz    | 94,9       | 48            | 46            | 54            |
| 250 kHz    | 95         | 56            | 50            | 44            |
| 500 kHz    | 92,6       | 69            | 64            | 45            |
| 750 kHz    | 91         | 102           | 74            | 50            |
| 1 MHz      | 89,4       | 110           | 81            | 50            |
| GaN 25 ns  |            |               |               |               |
| 100 kHz    | 95,1       | 46            | 42            | 53            |
| 250 kHz    | 96,5       | 48            | 40            | 41            |
| 500 kHz    | 96         | 59            | 45            | 38            |
| 750 kHz    | 95,2       | 83            | 53            | 42            |
| 1 MHz      | 94,7       | 88            | 55            | 46            |
| GaN 50 ns  |            |               |               |               |
| 100 kHz    | 94,9       | 47            | 43            | 54            |
| 250 kHz    | 96,4       | 50            | 42            | 44            |
| 500 kHz    | 95,9       | 62            | 48            | 40            |
| 750 kHz    | 95         | 78            | 56            | 44            |
| 1 MHz      | 94,9       | 80            | 58            | 47            |

## Referências Bibliográficas

- Alonso, J.M. et al., 2012. Reducing storage capacitance in off-line LED power supplies by using integrated converters. In *2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. pp. 1–8.
- Gueguen, P., 2015. How power electronics will reshape to meet the 21st century challenges? In *2015 27th IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD)*. pp. 17–20.
- Han, D. & Sarlioglu, B., 2015. Dead-Time Effect on GaN-Based Synchronous Boost Converter and Analytical Model for Optimal Dead-Time Selection. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(1), pp.601–612.
- Huang, X. et al., 2014. Analytical loss model of high voltage GaN HEMT in cascode configuration. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(5), pp.2208–2219.
- Li, S. et al., 2015. A Survey, Classification and Critical Review of Light-Emitting Diode Drivers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, PP(99), p.1.
- Lim, S., Otten, D.M. & Perreault, D.J., 2016. New AC-DC Power Factor Correction Architecture Suitable for High-Frequency Operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(4), pp.2937–2949.
- Mantooth, H.A., Glover, M.D. & Shepherd, P., 2014. Wide Bandgap Technologies and Their Implications on Miniaturizing Power Electronic Systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2(3), pp.374–385.
- Thomas, W. & Pforr, J., 2009. A novel low-cost current-sharing method for automotive LED-lighting systems. In IEEE, ed. *2013 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*. Barcelona: IEEE, pp. 1–10.
- Wang, Y. et al., 2015. A Single-Stage LED Driver Based on Interleaved Buck-Boost Circuit and LLC Resonant Converter. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(3), pp.732–741.
- Wu, Y. et al., 2008. A 97.8% Efficient GaN HEMT Boost Converter With 300-W Output Power at 1 MHz. *IEEE Electron Device Letters*, 29(8), pp.824–826.