

DIODOS DE CARBONETO DE SILÍCIO (*SILICON CARBIDE*): UMA ANÁLISE COMPARATIVA COM DIODOS DE SILÍCIO EM UMA APLICAÇÃO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Bruno Allan Galvão dos Santos (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, Coordenação de Eletrônica) E-mail: brunoallang@gmail.com

Francisco José Viglus (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, Coordenação de Eletrônica) E-mail: frviglus@hotmail.com

Carlos Henrique Illa Font (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, Coordenação de Eletrônica) E-mail: illafont@utfpr.edu.br

Resumo: O presente artigo possui como principal objetivo apresentar um estudo comparativo entre duas tecnologias de diodos semicondutores de potência. Todo o estudo é realizado em torno dos diodos convencionais de Silício e dos modernos diodos que empregam Carboneto de Silício (*Silicon Carbide*). Para o desenvolvimento do estudo foram selecionados dois diodos com características próximas entre as tecnologias estudadas. Os resultados práticos foram obtidos em um conversor estático elevador de tensão do tipo Boost. Além da avaliação da eficiência dos diodos estudados, também são apresentadas as características de recuperação reversa destes em frequências elevadas. Por fim, o artigo apresenta de forma evidente o melhor desempenho da tecnologia de semicondutores de *Silicon Carbide*, assim como, avalia suas tendências e perspectivas futuras.

Palavras-chave: Eletrônica de potência, Diodos semicondutores de potência, Diodos de silício, Diodos de carboneto de silício, Conversor CC-CC Boost.

SILICON CARBIDE POWER DIODES: A COMPARATIVE ANALYSIS WITH SILICON DIODES IN A POWER ELECTRONICS APPLICATION

Abstract: This paper aims to present a comparative study between two technologies of power semiconductor diodes. The entire study is conducted around the silicon diodes and modern diodes that employ silicon carbide. To develop the study were selected two diodes with similar characteristics between the technologies studied. The practical results were obtained from a DC-DC Boost converter. Besides the evaluation of the efficiency of the diodes studied it also shows the reverse recovery characteristics in these high frequency diodes. Finally, the article presents clear the best performance of Silicon Carbide diodes, as well as evaluates the trends and future perspectives of Silicon Carbide technology in Power Electronics applications.

Keywords: Power electronics, Power diodes, Silicon diodes, Silicon carbide diodes, DC-DC Boost converter.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, em virtude da constante busca pela melhoria da eficiência energética em circuitos eletrônicos de potência, os dispositivos semicondutores passam por um processo de evolução contínua, tendo em vista que estes elementos são fundamentais para a maioria das aplicações que envolvem a Eletrônica de Potência.

Em circuitos de potência, principalmente em conversores estáticos de energia, os elementos semicondutores mais importantes são os transistores e os diodos. Desta forma, o desempenho destes dispositivos influencia diretamente no rendimento do sistema como um todo.

Nos semicondutores de potência, sempre se buscou a redução das perdas de condução e das perdas por comutação, as quais contribuem negativamente com o rendimento dos circuitos. As tecnologias atuais de semicondutores, essencialmente as de carboneto de silício (*Silicon Carbide* - SiC), têm cada vez mais conquistado mercado, por oferecerem vantagens

significativas em relação aos componentes convencionais de silício (Si). A utilização de dispositivos SiC, de uma maneira geral, amplia a área de aplicação do sistema em termos de frequência de comutação, bloqueio de tensão e temperatura de junção (FRIEDLI, 2008).

A frequência de operação do circuito é um fator que limita as tecnologias atuais. A tecnologia SiC permite a criação de diodos semicondutores de alta tensão, com alto rendimento e capacidade de operação em frequências elevadas (O'NEILL, 2005). Assim sendo, com as necessidades exigidas pelo mercado, juntamente com a evolução dos componentes de *Silicon Carbide*, surgem também novas aplicações em diferentes ramos da eletrônica de potência, essencialmente em conversores estáticos de energia elétrica e circuitos de acionamento de máquinas.

Em meio a esse contexto, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um estudo comparativo entre diodos semicondutores de potência convencionais e diodos de *Silicon Carbide*. Para a realização dos estudos foi utilizado um conversor estático elevador de tensão do tipo Boost, em uma aplicação de conversão CC-CC.

2. CARACTERÍSTICAS DE DIODOS SIC

Em conversores estáticos de potência, para a diminuição do volume dos elementos passivos do circuito - indutores, transformadores e capacitores - é necessário o aumento da frequência de operação. Com a elevação da frequência de trabalho, os semicondutores de potência aumentam as suas perdas por comutação. Deste modo, a frequência de operação de um conversor estático fica limitada pela frequência de operação dos seus semicondutores de potência.

No caso de diodos semicondutores, durante o bloqueio, ocorre o fenômeno da Recuperação Reversa. A corrente que circula pelo diodo atinge um valor máximo negativo e então retorna a zero, bloqueando efetivamente o diodo. O valor máximo negativo da corrente é conhecido como Máxima Corrente Reversa (Irr), enquanto o tempo de duração do fenômeno de recuperação reversa é denominado como Tempo de Recuperação Reversa (trr).

O tempo de recuperação reversa é um parâmetro distinto que pode variar em cada diodo. Este tempo é utilizado para classificar os tipos de diodos em relação à frequência de operação em que os mesmos podem operar. Para diodos de silício tem-se a seguinte classificação:

- diodos lentos (*standard recovery*);
- diodos rápidos (*fast recovery*);
- diodos ultrarrápidos (*ultrafast recovery*);
- diodos Schottky.

Em uma dada frequência, o tempo de recuperação reversa torna-se relativamente significativo, fazendo com que o diodo opere com perdas em comutação elevadas, prejudicando deste modo o rendimento do circuito.

Para solucionar este tipo de problema utilizam-se diodos da família Schottky que possuem características de recuperação reversa baixa e são capazes de trabalhar em frequências elevadas.

Dentre as principais vantagens que podem ser citadas entre o diodo Schottky de silício

(Si) e os diodos comuns estão: baixa queda de tensão sobre seus terminais, o menor tempo de recuperação reversa e capacitância de junção reduzida.

Apesar de possuírem melhor rendimento em alta frequência, os diodos Schottky (Si) apresentam as seguintes limitações: capacidade de bloquear tensões da ordem de uma centena de volts, maior corrente de fuga e menores temperatura de operação.

Na busca de suprir as limitações apresentadas no diodos de silício (Si), a tecnologia de diodos de *Silicon Carbide* (SiC) apresenta: quarenta vezes menor corrente de fuga, de acordo com Davis (2011); maior condutividade térmica; minimização de perda de energia (devido à redução de perdas por recuperação reversa) e redução da influência de temperatura na comutação. Tais características promovem maior rendimento e, assim, um aumento da densidade de potência dos conversores que usam essa tecnologia.

Testes têm mostrado que diodos SiC proporcionam um aumento do rendimento de 0,5% a 1% em se tratando de aplicações com frequências elevadas (DAVIS, 2011).

Na Figura 1 é apresentada uma comparação entre as características de bloqueio de diodos SiC SBD (*Schottky Barrier Diode*) e diodos de Silício FRED (*Fast Recovery Epitaxial Diode*) sob diferentes temperaturas.

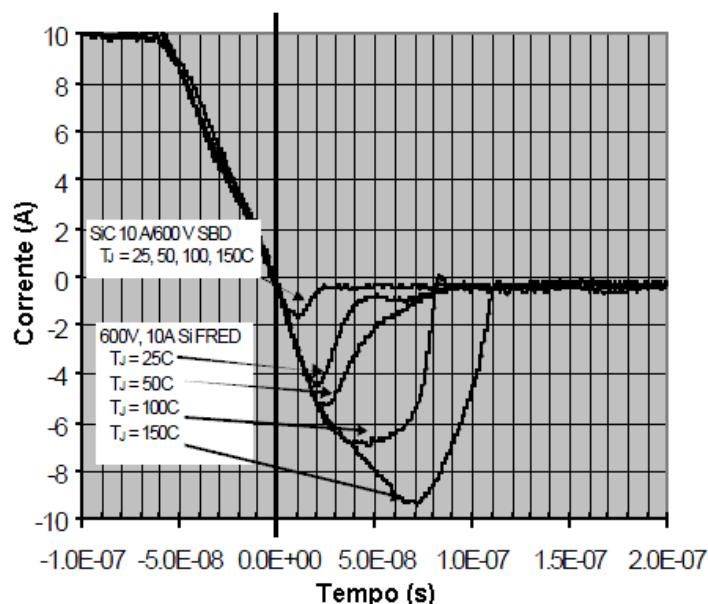


Figura 1 – Curvas comparativas entre diodos SiC SBD e diodos Si FRED. Fonte: SINGH, 2002.

Devido ao diodo SiC SBD não possuir quaisquer portadores minoritários armazenados, não há corrente de recuperação reversa associada ao regime transitório até o bloqueio efetivo. O que existe é apenas uma pequena quantidade de corrente necessária para carregar a capacitância da junção do SBD durante o regime transitório. Através da Figura 1, pode-se verificar que o desempenho de ambos os diodos se manteve igual até a origem do gráfico, mesmo sob diferentes temperaturas de junção. A partir deste ponto é possível observar significativas mudanças no funcionamento dos diodos perante variações de temperatura.

Em contraste com o diodo SiC SBD, o Diodo Si apresenta uma grande quantidade de carga reversa (Q_{rr}) e que aumenta drasticamente com a temperatura. Em aplicações típicas de correção de fator de potência, esta quantidade excessiva de Q_{rr} aumenta as perdas de comutação, colocando uma enorme sobrecarga sobre o interruptor e o diodo.

3. APLICAÇÕES EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Na eletrônica de potência, inúmeras são as aplicações onde se faz necessária a presença de diodos. Neste sentido, atualmente os componentes SiC são as melhores soluções em se tratando de aumento de eficiência em topologias do conversor elevador de tensão tipo Boost (O'NEILL, 2008).

Atualmente, as principais aplicações do SiC estão voltadas à correção de fator de potência, em fontes de alimentação chaveadas. Porém ainda existe um fator limitante à utilização desta tecnologia: o custo elevado. Deste modo, esses dispositivos ainda demandam tempo para se difundir no ramo industrial.

Projeções indicam que o tamanho do mercado mundial de dispositivos SiC em 2013 deverá atingir aproximadamente 70 milhões de dólares (YOLE, 2010). Outra projeção é a de que haverá um grande aumento de tamanho deste mercado entre o período de 2013 e os seis anos seguintes, elevando assim este valor de 70 milhões de dólares para a marca dos 800 milhões de dólares ao final de 2019. Isto representa um aumento de aproximadamente onze vezes em sete anos e, com isso, espera-se uma redução do custo desta tecnologia.

Grande parte deste aumento de mercado ocorrerá devido ao aumento de aplicações de SiC em veículos elétricos/híbridos (*EV/HEV - Electric Vehicle/Hybrid Electric Vehicle*) e também em inversores para sistemas fotovoltaicos (*PV Inverters/ Photovoltaic Inverters*) (YOLE, 2010). Estes dois últimos deverão se tornar os dois novos carros-chefes da tecnologia SiC, em substituição ao antigo domínio principal de atuação dos SiC aplicados em correção do fator de potência (*PFC - Power Factor Correction*).

No que diz respeito a sistemas eletrônicos para *EV/HEV*, através da implementação de equipamentos eletrônicos com diodos SiC, a Toyota conseguiu melhorar o consumo de combustível em 10% de um veículo híbrido *Prius* devido a melhorias em sistemas de iluminação e melhoramentos na conversão de energia (YOLE, 2010). As características do SiC em relação ao Si proporcionaram à Toyota reduzir o tamanho e a massa de dissipadores de conversores CC-CC utilizados em seu veículo em 57,9% e 58,5%, respectivamente.

Em aplicações de altas potências, essencialmente aquelas em que o rendimento é um fator determinante, os componentes de *Silicon Carbide* podem contribuir de maneira positiva com as necessidades de projeto.

4. ENSAIO EXPERIMENTAL

Como dito anteriormente, para a realização dos ensaios experimentais foi empregado um conversor CC-CC elevador de tensão Boost. O objetivo principal dos testes é comparar a eficiência e o tempo de recuperação reversa de diodos de silício e diodos SiC. De forma geral, o ensaio experimental foi realizado em duas partes. Em um primeiro momento foram realizados testes com o conversor CC-CC Boost utilizando diodo Si e em um segundo momento utilizando diodo de *Silicon Carbide*.

A Figura 2 apresenta a topologia de um conversor CC-CC Boost. O componente que será alvo de estudo deste artigo está em destaque.

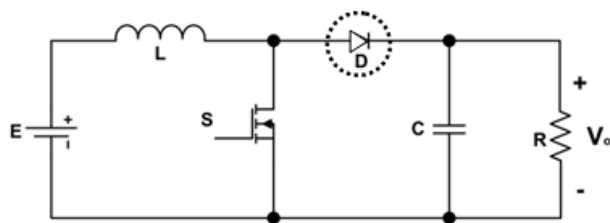


Figura 2 – Topologia do conversor CC-CC Boost.

Para o comando do conversor Boost é utilizado um circuito de acionamento com base no circuito integrado LM3524, o qual é específico para aplicações do gênero. O protótipo utilizado opera em malha aberta e suas principais características estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados do conversor CC-CC Boost.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão de entrada	V_e	100V
Tensão de saída	V_s	200V
Potência	P_s	500W
Frequência de comutação	f_c	20kHz
Ondulação da tensão de saída	ΔV_s	10%
Ondulação da corrente de entrada	ΔI_e	20%

Na Figura 3, tem-se a foto do protótipo utilizado nos testes.

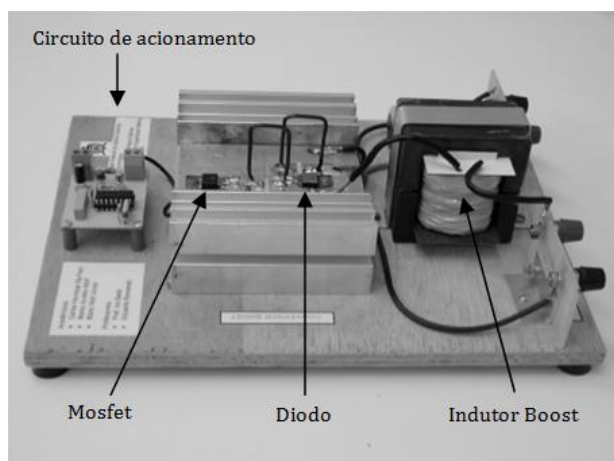


Figura 3 – Foto do protótipo utilizado nos testes – conversor CC-CC Boost.

Os diodos utilizados no experimento são os seguintes:

- Diodo de Si, modelo HEXFRED HFA30PB120, fabricante IR – International Rectifier;
- Diodo de SiC, tipo Schottky, modelo CSD20120, fabricante CREE.

A Figura 4 apresenta os encapsulamentos dos diodos utilizados no experimento.

Ambos utilizam encapsulamento da série TO-247. As Tabelas 2 e 3 apresentam os dados dos diodos utilizados no experimento baseado nos dados dos *datasheets* dos componentes.

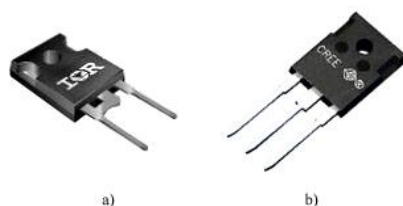


Figura 4 – Encapsulamentos: a) diodo Si IR HFA30PB120 e b) diodo SiC CREE CSD2012.
Fontes: Adaptado de CREE (2004) e International Rectifier (2004).

Tabela 2 – Dados do diodo Si HEXFRED HFA30PB120 do fabricante IR.

Simbologia	Valor Típico	Valor Máximo	Descrição
V _{rrm} [V]	1200	1200	Tensão reversa máxima
I _{av} [A]	30	-	Corrente média
T _j [°C]	-55 a 150	-	Temperatura de junção
V _{fm} [V] I _F =30A; T _j =125°C	2,3	4,0	Queda de tensão direta
I _{rr} [A] V _R =200V; T _j =125°C	16	24	Corrente reversa máxima
Q _{rr} [nC] V _R =200V; T _j =125°C	1540	2310	Carga total

Fonte: Adaptado de International Rectifier (2004)

Tabela 3 – Dados do diodo SiC Zero Recovery Rectifier CSD20120 do fabricante CREE.

Simbologia	Valor Típico	Valor Máximo	Descrição
V _{rrm} [V]	1200	1200	Tensão reversa máxima
I _{av} [A]	20	-	Corrente média
T _j [°C]	-55 a 175	-	Temperatura de junção
V _{fm} [V] I _F =10A; T _j =25°C	1,6	1,8	Queda de tensão direta (1)
V _{fm} [V] I _F =10A; T _j =175°C	2,5	3,0	Queda de tensão direta (2)
I _{rr} [μA] V _R =1200V; T _j =175°C	20	1000	Corrente reversa máxima
Q _{rr} [nC] V _R =1200V; I _F =10A; T _j =25°C	61	-	Carga total

Fonte: Adaptado de CREE (2004)

Para o ensaio de rendimento (neste artigo chamado de Ensaio Experimental 1) decidi-se por incrementar degraus de carga em intervalos de tempo de dez minutos de forma a aumentar gradativamente a potência até atingir 400W na saída. A cada degrau foi realizada a coleta dos dados através da medição de quatro multímetros digitais que forneciam os dados de tensão de entrada, tensão de saída, corrente de entrada e corrente de saída. A medição de potência foi realizada de forma indireta através dos valores de tensão e corrente. Desta forma foi possível traçar uma curva de rendimento em função da potência de saída. Os resultados numéricos coletados do ensaio experimental 1 são exibidos nas Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 – Resultados do ensaio experimental 1 utilizando Diodo Si Schottky HEXFRED.

Degrau de carga	V_i (V)	I_i (A)	P_i (W)	V_o (V)	I_o (A)	P_o (W)	η
1	98,9	0,68	67,25	201,0	0,32	64,32	0,956
2	98,5	1,02	100,47	200,0	0,48	96,00	0,956
3	99,7	1,38	137,59	202,0	0,66	133,32	0,969
4	99,1	2,06	204,15	199,0	0,99	197,01	0,965
5	99,5	2,74	272,63	199,0	1,33	264,67	0,971
6	99,7	3,41	339,98	198,0	1,65	326,70	0,961
7	98,8	4,01	396,19	194,0	1,94	376,36	0,950

Tabela 5 – Resultados do ensaio experimental 1 utilizando Diodo SiC CSD20120.

Degrau de carga	V_i (V)	I_i (A)	P_i (W)	V_o (V)	I_o (A)	P_o (W)	η
1	98,2	0,67	65,79	200,0	0,32	64,00	0,973
2	98,8	1,01	99,79	200,0	0,48	96,00	0,962
3	98,9	1,36	134,50	200,0	0,65	130,00	0,967
4	99,0	2,05	202,95	199,0	1,00	199,00	0,981
5	99,6	2,73	271,91	199,0	1,33	264,67	0,973
6	101,0	3,45	348,45	201,0	1,68	337,68	0,969
7	100,5	4,07	409,04	198,0	2,00	396,00	0,968

A Figura 5 apresenta o gráfico do rendimento. Pode-se concluir que o rendimento do diodo SiC foi superior em seis dos sete degraus de carga. Através da linha de tendência polinomial de segunda ordem fica claro o desempenho superior do componente de *Silicon Carbide* em relação ao de silício.

Para o teste de recuperação reversa (neste artigo chamado de Ensaio Experimental 2) foi elevando-se gradativamente a tensão de entrada até o valor nominal, com carga nominal. Neste momento, através da utilização do osciloscópio, foram realizadas as aquisições de imagens. As Figuras 6 e 7 demonstram o desempenho de cada um dos diodos.

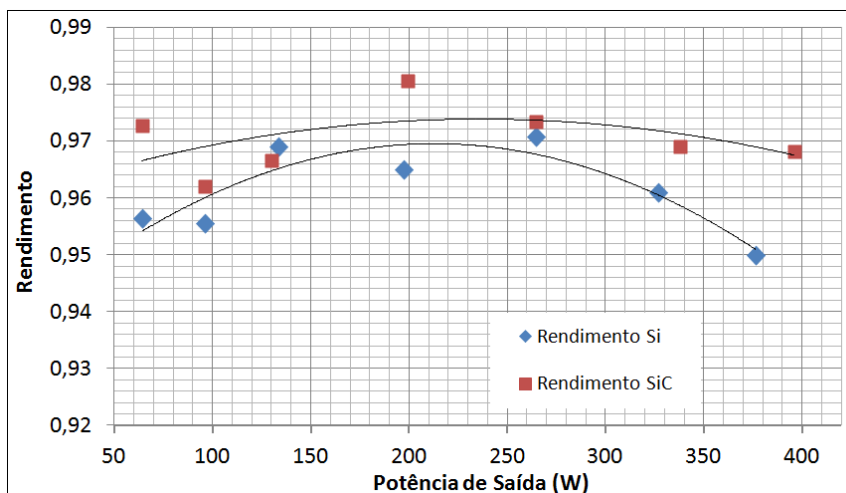


Figura 5 – Rendimento em função da potência de saída.

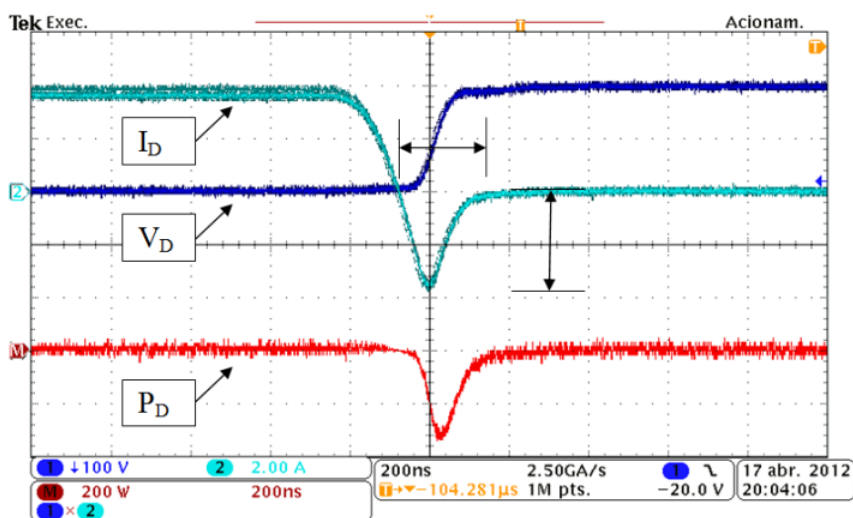


Figura 6 – Resultados do ensaio experimental 2 utilizando o diodo Si (v: 100V/div; i: 2A/div; t: 200ns/div).

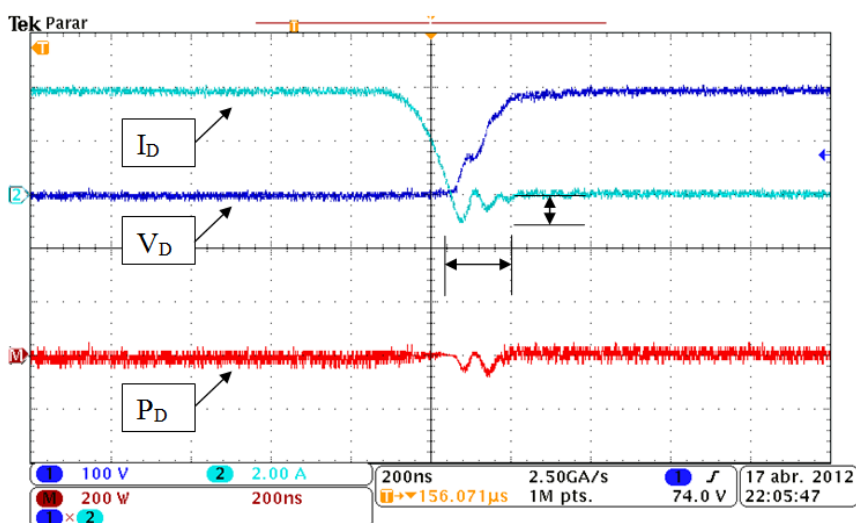


Figura 7 – Resultados do ensaio experimental 2 utilizando o diodo SiC (v: 100V/div; i: 2A/div; t: 200ns/div).

Com relação ao tempo de recuperação reversa, foi verificado que o diodo de Si apresentou 217,1 ns contra 160ns do SiC, representando, assim, uma redução de 26,3% neste quesito. Já com relação ao pico de corrente reversa, foi verificado que o diodo de Si apresentou 3,92 A contra 1,05 A do SiC, representando, assim, uma redução de 73,2% neste quesito.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um estudo comparativo entre diodos de silício e diodos de *Silicon Carbide*. O artigo mostrou de forma evidente a diferença de desempenho oferecida pelas tecnologias de diodos estudadas. Deste modo, é possível observar que em certas aplicações, onde o rendimento é um fator essencial, os diodos SiC apresentam melhores desempenhos.

Em virtude da diferença significativa de preço existente entre os dispositivos aqui estudados, e considerando que na maioria das aplicações os diodos de silício convencionais apresentam um rendimento aceitável, pode-se afirmar que os diodos de *Silicon Carbide* ainda dependem de uma redução de custos para serem empregados no mercado industrial dos dias de hoje.

As projeções de mercado mostram que em 2019 estes componentes terão preços acessíveis e é possível que diodos e transistores de *Silicon Carbide* promovam uma verdadeira revolução no mercado de conversores estáticos de potência, onde os equipamentos terão reduzidos peso e volume e elevado rendimento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa CREE Inc. pela doação dos diodos de Silicon Carbide utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

CREE Inc. *CSD20120 datasheet*. Disponível em <<www.cree.com>>, 2004.

DAVIS, S. *Schottky diodes: the old ones are good, the new ones are better*. Power Electronics Technology Magazine, March, 2011.

FRIEDLI, T.; ROUND, S. D.; HASSLER, D.; KOLAR, J. W. *Design and performance of a 200 kHz all-SiC JFET current source converter*. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting - IAS '08, p. 1-8, 2008.

INTERNATIONAL RECTIFIER. *HFA30PB120 datasheet*. Disponível em <<www.irf.com>>, 2004.

O'NEILL, M. *SiC puts new spin on motor drives*. Power Electronics Technology Magazine, January, 2005.

O'NEILL, M. *Silicon carbide MOSFETs challenge IGBTs*. Power Electronics Technology Magazine, September, 2008.

SINGH, R.; RICHMOND J. *SiC power schottky diodes in power factor correction circuits*. Cree Inc. – Application Note, 2002.

YOLE DÉVELOPPEMENT. *SiC 2010 Report - 2009-2019: 10 year market projection*. Applied Power Electronics and Exposition – APEC 2010. Special Presentation, 2010.