



Relatório final de iniciação científica - PIBIC Edital ProPq 001/2019

Semicondutores de Potência Baseados em Tecnologias de Carbetto de Silício Aplicados à Eletrônica de Potência

Prof. Dr. Claudionor Francisco do Nascimento
Professor Orientador

Aluno
Pietro Pereira Bertuzzo

21 de outubro de 2020

Sumário

1. RESUMO DO PLANO INICIAL	5
2. INTRODUÇÃO	6
2.1. Semicondutores	6
2.2. Dispositivos	7
2.3. Transistores verticais e laterais	8
2.4. Desafios e perspectivas	8
3. METODOLOGIA	10
3.1. Escolha do componente	10
3.2. Simulação do componente	10
3.3. Efeito de temperatura	12
3.4. Conversor DC-DC	12
3.5. Montagem do circuito em laboratório	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
4.1. Testes de chaveamento com carga resistiva	15
4.2. Teste de condução em temperaturas extremas	16
4.3. Eficiência do conversor DC-DC em relação à frequência	17
5. CONCLUSÕES	19
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
7. PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA	21
8. AUTO-AVALIAÇÃO ASSINADA	22
9. AVALIAÇÃO DO ORIENTADOR ASSINADA	23
10. DESTINO DO ALUNO	24

1. RESUMO DO PLANO INICIAL

De acordo com o projeto, o plano inicial era avaliar a aplicabilidade de dispositivos semicondutores de potência baseados no material carbeto de silício (SiC) na eletrônica de potência. Mais especificamente, em conversores DC-DC *boost*.

Esta avaliação seria realizada primeiramente com um estudo de bibliografias e publicações modernas relacionadas ao assunto. Uma vez que o conhecimento fosse consolidado, o primeiro teste prático seria conduzido através de simulação. Conforme os resultados da simulação, um componente físico seria adquirido e um circuito montado em laboratório, em conjunto com um similar utilizando dispositivos baseados em silício.

Por fim, os resultados coletados nas fases anteriores seriam analisados, comparando-os às soluções similares baseadas em silício para chegar à uma conclusão quanto a as vantagens e desvantagens, teóricas e práticas, desses dispositivos.

2. INTRODUÇÃO

2.1. Semicondutores

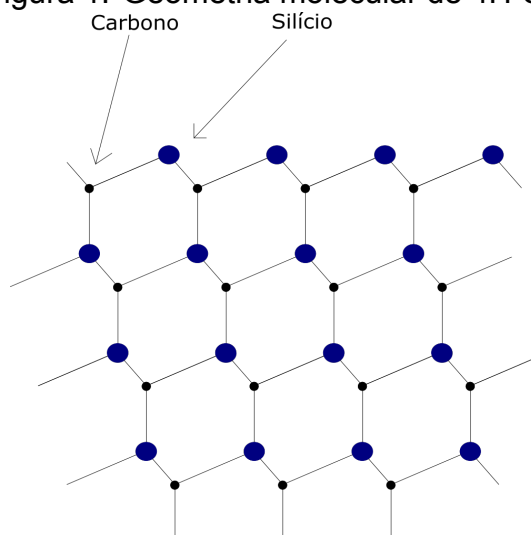
Materiais semicondutores são caracterizados como cerâmicos, compostos de uma estrutura cristalina de elementos não metálicos, mais especificamente, de elementos que possuem 4 elétrons em suas camadas de valência (Ex. Silício, Germânio, Carbono, etc...).

Estas estruturas cristalinas são dotadas de ligações covalentes relativamente estáveis, as quais completam a banda de valência dos átomos da estrutura. Entretanto, a energia térmica interrompe essa estabilidade, quebrando ligações, permitindo que elétrons fiquem livres e percorram a estrutura, ocupando as lacunas deixadas por outras ligações rompidas. Quando aplica-se um campo elétrico neste material, esse movimento eletrônico é ordenado, gerando assim uma corrente elétrica.

Esses elétrons livres, assim como as lacunas, são chamados de portadores de carga, e sua presença afeta diretamente a habilidade do material de conduzir corrente elétrica. Os materiais semicondutores possuem um valor intermediário de densidade de portadores de carga (entre $10^8/cm^3$ até $10^{19}/cm^3$), situado entre os chamados condutores (ordem de $10^{23}/cm^3$) e os chamados isolantes (ordem de $10^3/cm^3$).

O carbeto de silício (SiC), cuja geometria pode ser visualizada na Figura 1 é um composto semiconductor com propriedades muito interessantes para o uso em eletrônica de potência. Essas propriedades garantem maior eficiência e segurança em operações de alta potência, quando comparado os semicondutores comuns.

Figura 1: Geometria molecular de 4H-SiC



Em sistemas de eletrônica de potência, os agentes principais são MOSFETs, Transistores Bipolares de Porta Isolada (IGBTs) [1] diodos de potência e tiristores, por sua versatilidade e disponibilidade no mercado. Apesar disso, alternativas para a tecnologia baseada em silício foram elaboradas, com o objetivo de aprimorar as deficiências da mesma.[2]

2.2. Dispositivos

A princípio dois materiais foram apresentados como alternativas possíveis, o nitreto de gálio (GaN) e o carbeto de silício (SiC), ambos baseados no princípio de /textit-gaps de energia maiores e em uma maior eficiência de ação sob as condições de alta frequência, temperatura e tensão. A Tabela 1 mostra propriedades elétricas de alguns materiais semicondutores.

Tabela 1: Propriedades elétricas de materiais semicondutores[3].

Propriedade	Si	4H-SiC	GaN
Estrutura	Octaedro	Hexagonal	Hexagonal
Gap de energia (eV)	1.12	3.26	3.5
Mobilidade de elétrons (cm^2/Vs)	1400	900	1250
Mobilidade de lacunas (cm^2/Vs)	600	100	200
Campo de colapso (V/cm) $\times 10^6$	0.3	3	3
Condutividade térmica (W/cmK)	1.5	4.9	1.3

Apesar de ambas tecnologias serem promissoras, carbeto de silício foi mais rapidamente adotado pelo mercado. Algumas empresas, como a japonesa de semicondutores *Rohm Semiconductors* e a franco-italiana *STMicroelectronics* disponibilizam diversos dispositivos semicondutores, como diodos e MOSFETs de potência em carboneto de silício, alegando maior eficiência, performance térmica e velocidade de chaveamento.

Estes dispositivos se tornam cada dia mais importante por causa do crescimento das fontes de energia renováveis, como a fotovoltaica, cuja tensão gerada é contínua, precisando ser transformada em corrente alternada para ser introduzida na rede elétrica. Para isso, é utilizado um inversor de potência, que transforma a corrente contínua em uma alternada senoidal.

Outra aplicação importante para os desenvolvimentos tecnológicos é o uso desses dispositivos de chaveamento em veículos elétricos, para controlar a potência entregue aos motores, assim controlando a velocidade do veículo.

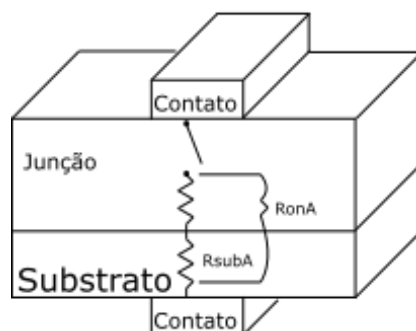
Em ambos os casos, a eficiência de conversão, seja DC-AC, DC-DC ou AC-AC é parte essencial da funcionalidade dessas aplicações. Portanto, o desenvolvimento de dispositivos semicondutores com melhores propriedades é de grande interesse para o mercado.

2.3. Transistores verticais e laterais

Passando das propriedades do material para fabricação, existem duas grandes características, que podem ser divididas cada em 2 grupos. As duas características são a polaridade e a disposição das camadas de semicondutor e substrato. Com relação à polaridade, um dispositivo pode ser classificado unipolar ou bipolar. Essa classificação diz a respeito dos portadores de carga. Um material unipolar depende do transporte de elétrons ou *holes* para o fluxo de corrente elétrica, enquanto um dispositivo bipolar utiliza os dois portadores simultaneamente.[4]

A disposição das camadas de semicondutor e substrato pode ser classificada em lateral e vertical. Esta distinção é importante por conta da consequência dessa disposição em propriedades do dispositivo, mais especificamente a resistência elétrica específica quando em estado de condução ($R_{on}A$). Dispositivos laterais possuem $R_{on}A$ menor, enquanto os dispositivos verticais possuem a resistência específica do material de substrato ($R_{sub}A$) adicionada à $R_{on}A$. As Figuras 2 e 3 ilustram a diferença.[4]

Figura 2: Disposição vertical



2.4. Desafios e perspectivas

A característica com maior potência dos dispositivos baseados em carbeto de silício é a maior frequência possível de chaveamento. Apesar de ganhos consideráveis

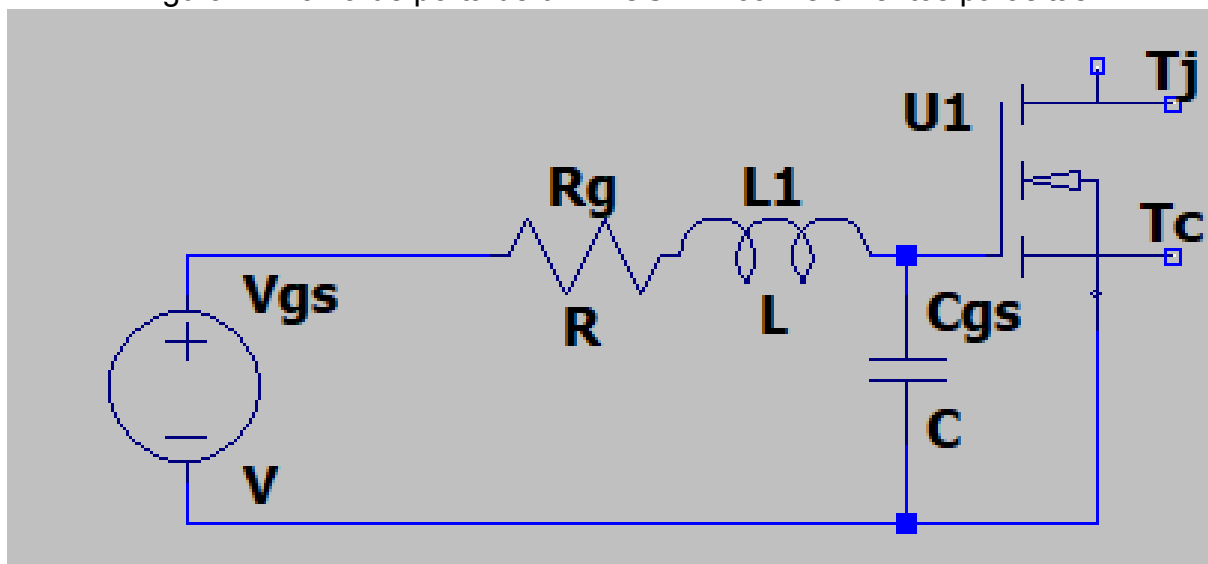
Figura 3: Disposição lateral



de eficiência, essa alta taxa de variação de tensão e corrente ($\frac{dv}{dt} e \frac{di}{dt}$) trazem problemas de oscilação de tensão e corrente, gerando *overshoot* e perdas, efeito *cross-talk*, interferência eletromagnética (IEM), entre outros. De fato, existe uma correlação entre uma diminuição de perdas de comutação e o aumento da geração de IEM.[5]

Para minimizar estes efeitos negativos, é preciso tomar algumas considerações durante o projeto do conversor. Para ligar o dispositivo o mais rápido possível, a indutância na malha da porta do MOSFET deve ser o menor possível, para que não entre em ressonância com a capacitância existente entre a porta (gate) e a fonte (source). Esta malha pode ser visualizada na Figura 4[5].

Figura 4: Malha de porta de um MOSFET com elementos parasitas



3. METODOLOGIA

Neste projeto serão realizadas simulações de MOSFETs, tanto de dispositivos baseados em carbeto de silício quanto baseados em silício. Os resultados destas simulações serão comparados e as vantagens do componente de carbeto de silício pontuadas.

Uma vez que as vantagens estiverem explícitas, será montado um conversor DC-DC boost com MOSFETs de ambos materiais para uma análise de eficiência energética.

3.1. Escolha do componente

O componente baseado em carbeto de silício escolhido deve cumprir alguns requisitos: deve ser disponível no mercado, de relativo baixo custo e possuir parâmetros que permitam uma comparação direta com um componente de silício, seja ele MOSFET ou IGBT.

O componente escolhido foi o MOSFET C3M0280090D, da fabricante *Wolfspeed/Cree*. A tabela 2 descreve seus parâmetros mais interessantes. Na Figura 5 é possível visualizar o componente adquirido.

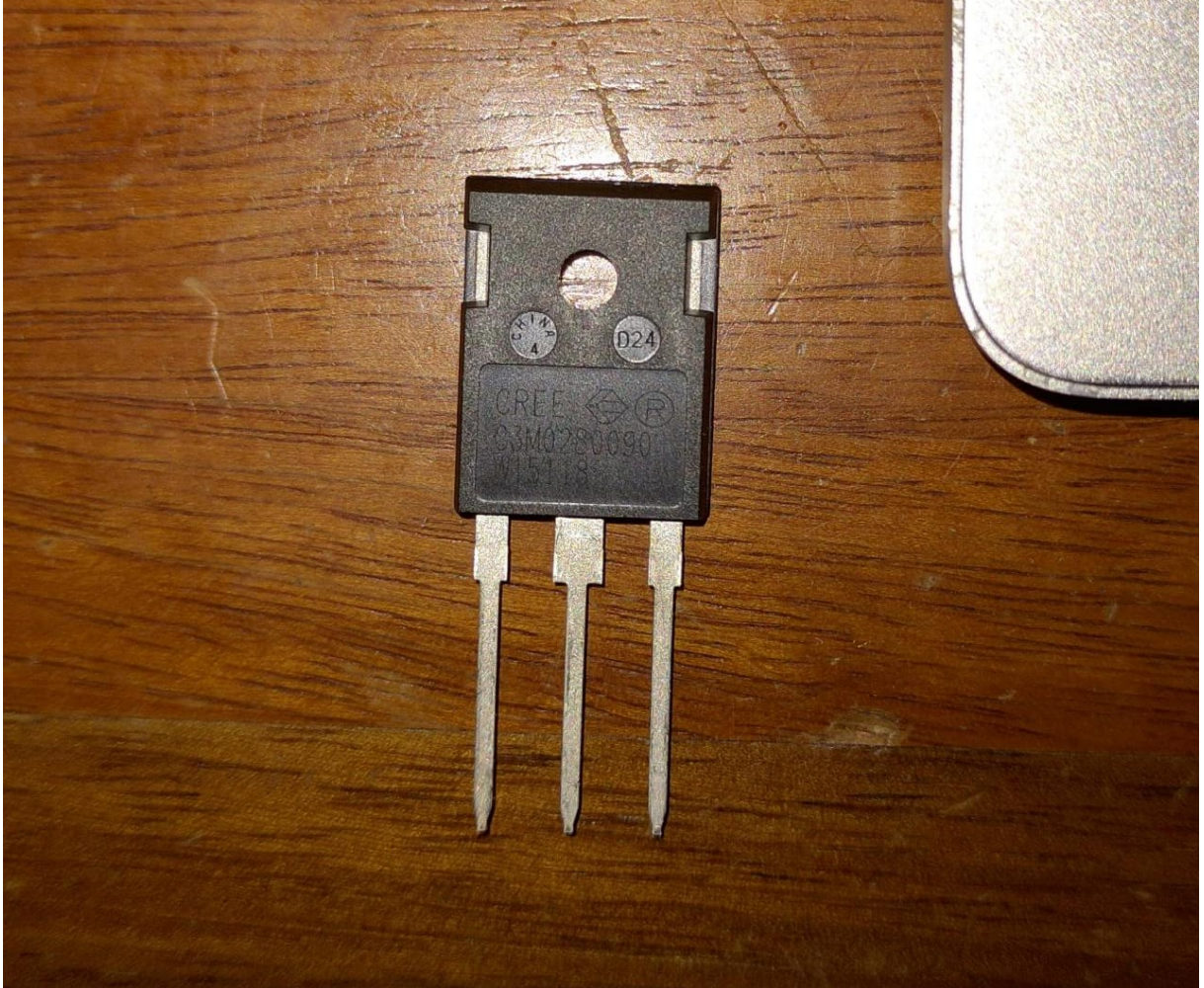
Tabela 2: Parâmetros principais do MOSFET C3M0280090D [6]

Símbolo	Descrição	Valor	Condições de teste
V_{DSmax}	Tensão de ruptura dreno - fonte	900 V	$V_{GS} = 0, I_D = 100\mu A$
V_{GSmax}	Tensão porta - dreno (dinâmico)	-8/+19 V	Corrente alternada ($f > 1$ Hz)
V_{GSop}	Tensão porta - dreno (estático)	-4/+15 V	Corrente contínua
I_D	Corrente de dreno contínua	11,5 A	$V_{GS} = 15V, T_C = 25C$
		7,5 A	$V_{GS} = 15V, T_C = 100C$
$I_{D(pulso)}$	Corrente de dreno pulsada	22 A	
P_{Dmax}	Máxima potência dissipável	54 W	$T_C = 25C, T_J = 150C$

3.2. Simulação do componente

Com o componente selecionado, este será modelado em SPICE para realização de testes preliminares. Na Figura 6 é possível visualizar o circuito de testes para comportamento de chaveamento, simulado no software *LTSpice*. Este software foi escolhido por ser grátis e por ser ao mesmo tempo de fácil manuseio e de conseguir simular componentes com grande detalhe.

Figura 5: MOSFET C3M0280090D em encapsulamento TO-247-3.

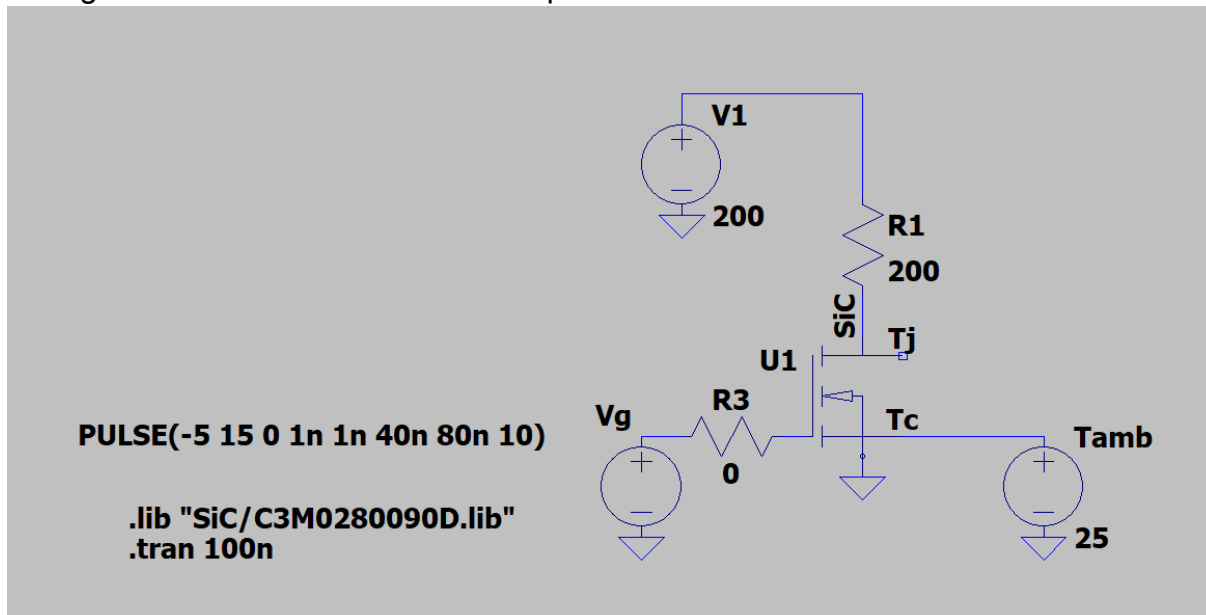


As perdas podem ser medidas em energia dissipada por comutação ou em potência dissipada média. A energia dissipada E pode ser calculada utilizando a equação 1. A potência média P pode ser calculada usando a equação 2.[1] Em ambas, potência instantânea, tensão instantânea e corrente instantânea são denominados $p(t)$, $v(t)$ e $i(t)$ respectivamente.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} v(t)i(t) dt \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t)i(t) dt \quad (2)$$

Figura 6: Circuito de teste de comportamento dinâmico durante chaveamento.



3.3. Efeito de temperatura

Um dos pontos mais interessantes para as aplicações de eletrônica de potência é a performance de componentes em altas temperaturas. As propriedades do material SiC opere em ambientes de temperaturas mais altas, por conta da sua menor resistividade térmica.

No caso do C3M0280090D, com limites de operação de temperatura de junção entre -55 e 250°C [6]. Para um teste preliminar da operação do dispositivos em temperaturas no extremo desse intervalo, foi realizada uma simulação na qual a temperatura no encapsulamento do componente varia linearmente entre 0 e 250°C , conforme demonstra a Figura 7

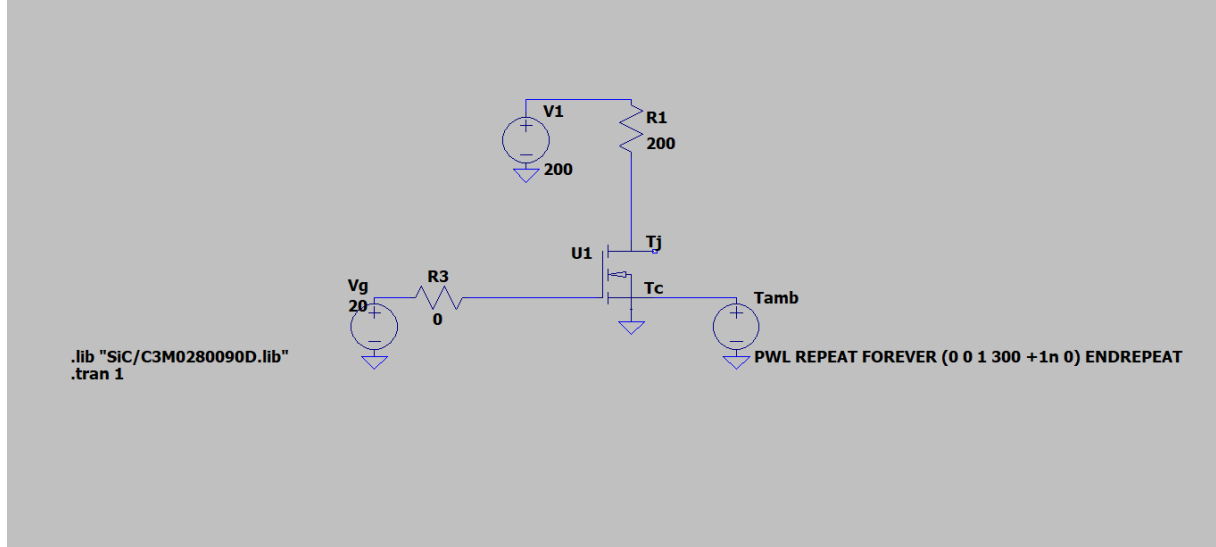
3.4. Conversor DC-DC

Para um teste aplicado do componente, será simulado um conversor DC-DC do tipo Boost para verificar sua eficiência. Esse conversor foi escolhido por conta de suas diversas aplicações em sistemas baseados em baterias, nos quais eficiência energética é essencial.

Os requisitos do conversor são conforme segue:

- ❖ Tensão de entrada $V_s = 9\text{V}$

Figura 7: Circuito de teste de comportamento de condução sob temperatura.



- ❖ Tensão de saída desejada $V_o = 100V$
- ❖ Carga resistiva $R = 50\Omega$
- ❖ *Ripple* de saída $\frac{\Delta V_o}{V_o} < 1\%$
- ❖ Frequência de chaveamento $f = 100kHz$

A topologia do circuito pode ser visualizada na Figura 8. Os valores de capacitância C , indutância mínima L_{mn} e *duty cycle* D podem ser obtidos utilizando respectivamente às equações 3, 4 e 5[1].

$$C = \frac{D}{R(\Delta V_o/V_o)f} \quad (3)$$

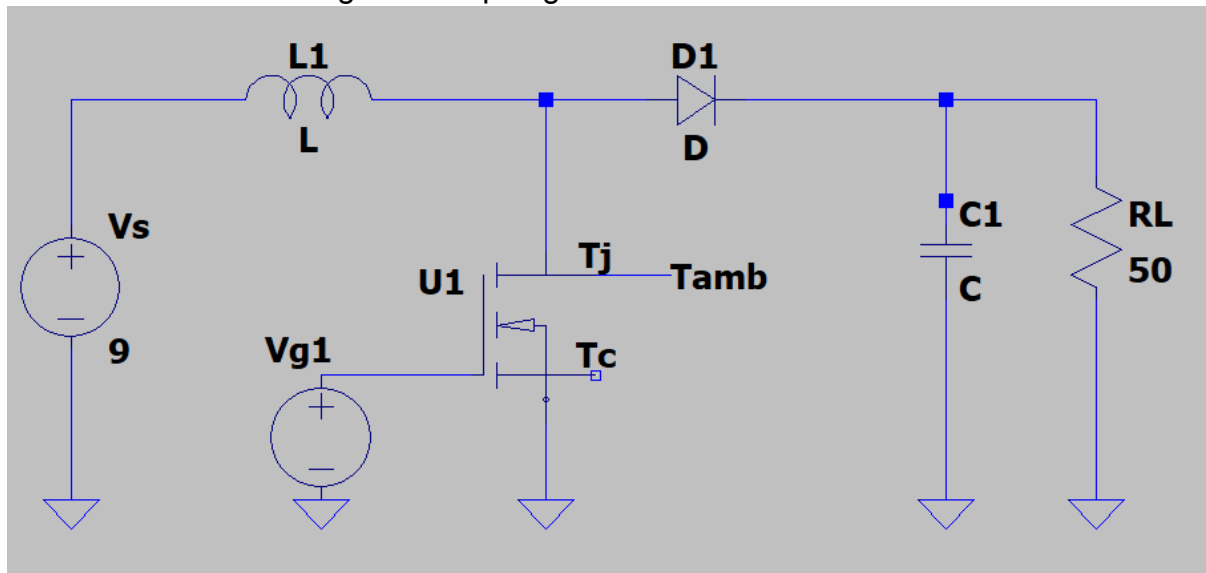
$$L_{mn} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (4)$$

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o} \quad (5)$$

Outros parâmetros, mais importantes para a construção física do conversor, serão exploradas posteriormente.

Com os requisitos explicitados anteriormente, obtemos os valores de capacitância $C = 18,2\mu F$, uma indutância mínima $1,84\mu H$ e *duty cycle* de 91%. Observado as equações 3 e 4, é possível observar que um aumento da frequência de chaveamento

Figura 8: Topologia de conversor utilizada.



permite a utilização de valores de componentes menores. Essa frequência depende diretamente das propriedades da chave utilizada, sendo que o período não pode ser maior que o tempo que o dispositivo leva para comutar de estado.

Os parâmetros de componentes passivos serão alterados conforme a necessidade por conta variação da frequência do conversor.

3.5. Montagem do circuito em laboratório

Para comparar com a simulação, foi proposto a montagem de uma placa de circuito impressa especial, buscando minimizar indutâncias parasitas que podem afetar o funcionamento do MOSFET, considerando a magnetude de $\frac{dv}{dt}$ envolvidos no chaveamento em altas frequências.

Foram adquiridos 3 MOSFETs C3M0280090D e 3 diodos SBD SiC para a montagem em laboratório. A placa seria usinada utilizando as ferramentas dos laboratórios de engenharia elétrica da UFSCar, tal qual os equipamentos de medição e fontes.

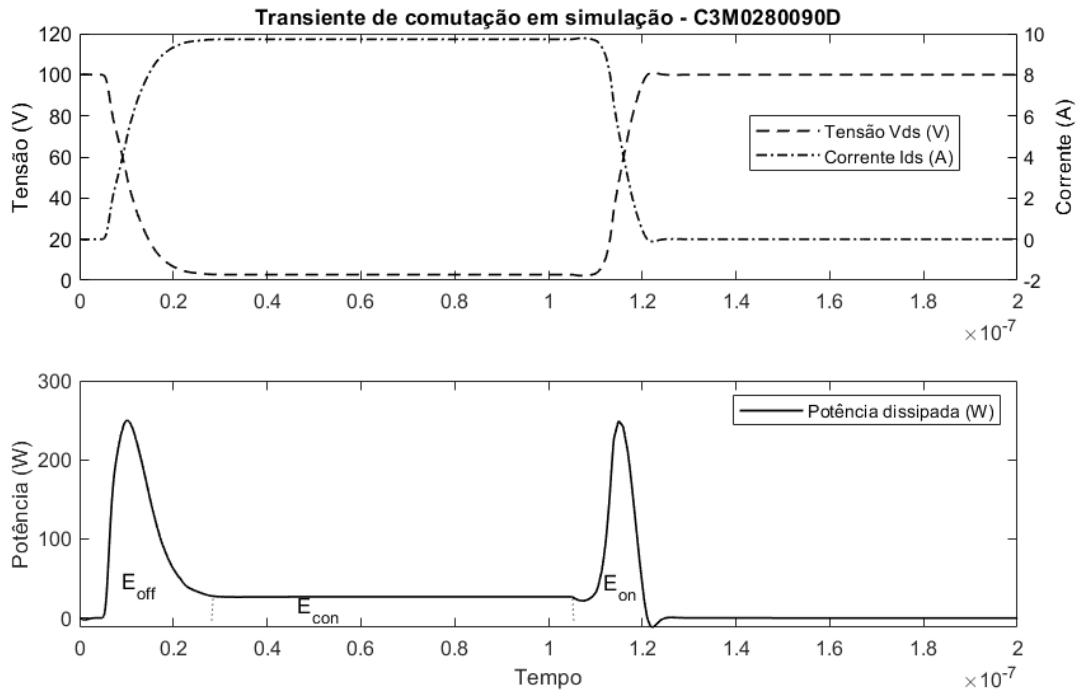
Infelizmente, em decorrência da pandemia causada pelo vírus SARS-COVID-19, essa montagem não pode ser realizada a e será executada em um trabalho posterior.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Testes de chaveamento com carga resistiva

Na Figura 9, podemos observar a relação entre corrente, tensão e potência dissipada. A potência dissipada durante a variação de corrente e tensão será denominada perdas de comutação, separado em perdas durante o processo de ligar (P_{on} , E_{on} e perdas no processo de desligar (P_{off} , E_{off}). A potência dissipada durante o período de tensão e corrente constante será denominado perdas de condução (P_{con} , E_{con}).

Figura 9: Relação de perdas de um MOSFET em comutação.



Observa-se que a energia dissipada durante a comutação é maior que a energia dissipada de condução. Assim, é desejável que a comutação ocorra o mais rápido possível. Este tempo depende, especificamente, das características construtivas do componente e da resistência de porta externa (R_G).

Na tabela 3 é possível visualizar o resultado numérico das simulações, nas quais foram calculadas energia dissipada (E_d) e potência média dissipada (P_d) em relação à resistência externa da porta do dispositivo (R_G)

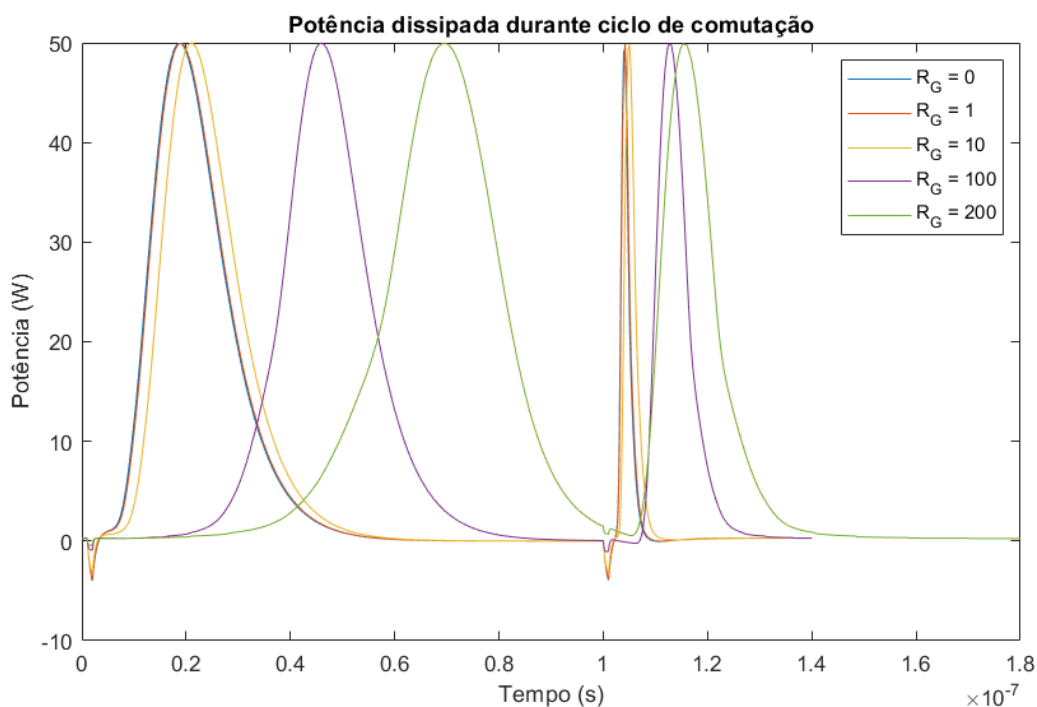
Na Figura 10, é possível visualizar essa diferença nas curvas de R_G mais elevado,

Tabela 3: Relação entre R_G , E_d e P_d

	Energia (μJ)	Potência média (W)
$R_G = 0 \Omega$	0,976	5,420
$R_G = 1 \Omega$	0,980	5,442
$R_G = 10 \Omega$	1.012	5.625
$R_G = 100 \Omega$	1.369	7.604
$R_G = 200 \Omega$	1,937	10.760

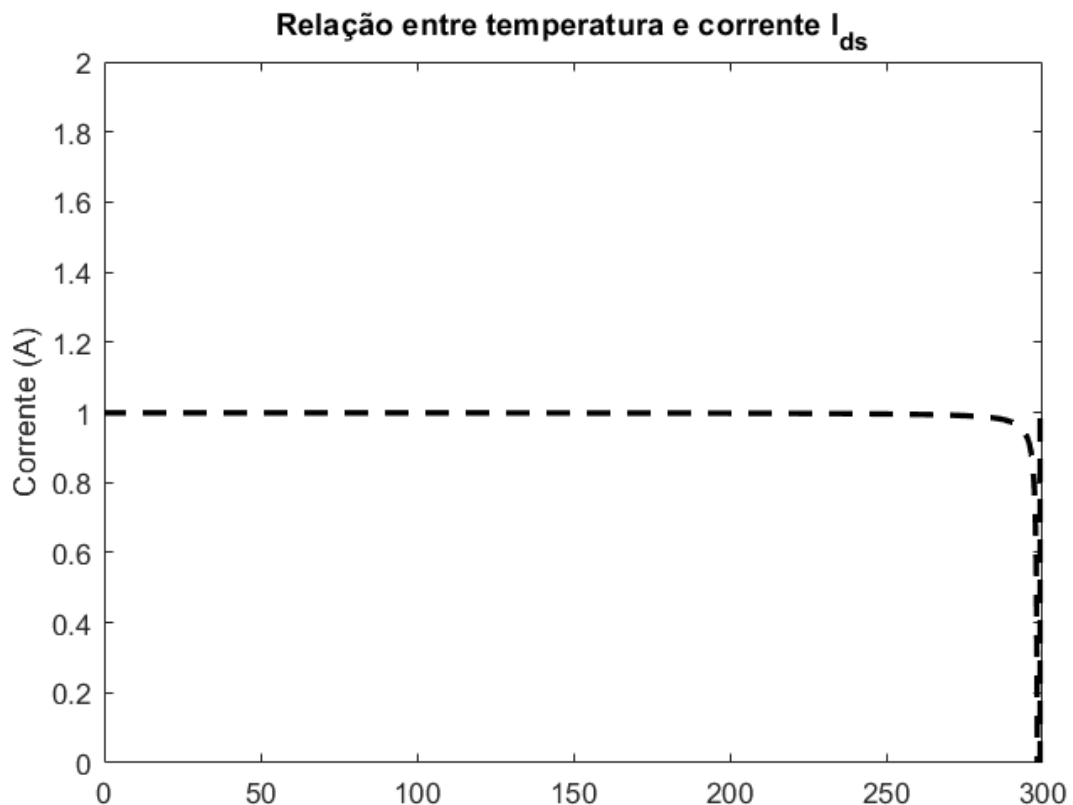
que possuem maior área, em decorrência de um maior tempo de subida e descida da tensão e corrente.

Figura 10: Potência dissipada instantânea durante um ciclo de comutação para diferentes valores de R_G



4.2. Teste de condução em temperaturas extremas

O Figura 11 mostra os resultados da simulação demonstrada na Figura 7. Mais especificamente, a relação entre temperatura e a corrente I_{ds} . Observa-se que, mesmo em um modelo em simulador, é possível ver os efeitos de uma temperatura no limite do intervalo de operação.

Figura 11: Relação entre temperatura de encapsulamento e corrente I_{ds} .

4.3. Eficiência do conversor DC-DC em relação à frequência

Os resultados de eficiência do conversor com os dispositivos baseados em SiC e Si podem ser visualizados na tabela 4.

Tabela 4: Eficiência de conversores em relação material da chave e frequência.

	20kHz	50kHz	100kHz
Si	82,1%	81,8%	81,2%
SiC	90,1%	91,1%	91,9%

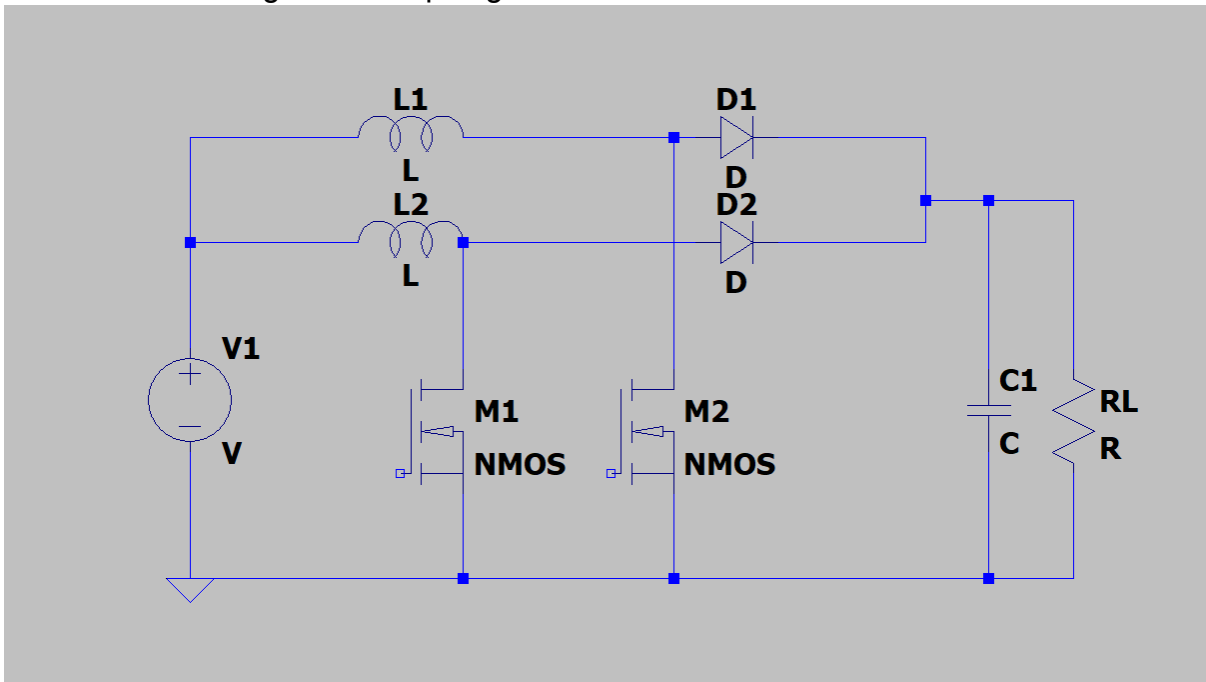
Conforme as expectativas baseadas na teoria de funcionamento do circuito e na bibliografia, o circuito com o dispositivo de SiC se mostrou mais eficiente. Além disso, demonstrou-se também que o aumento da frequência de chaveamento também resultou num aumento de eficiência.

Outra alternativa para um aumento ainda maior de eficiência é a utilização de outras topologias de conversores, como um boost interleaved, cujo circuito pode ser

visualizado na Figura 12, ou até mesmo um conversor LLC ressonante.

A utilização dessas topologias mencionadas, junto com a implementação de MOSFETs de SiC será explorado em um trabalho futuro.

Figura 12: Topologia interleaved de conversor boost.



Apesar da relativa simplicidade do circuito de conversor boost utilizado, cada simulação no software *LTSpice* demorou mais de 24 horas para chegar no ponto de regime estacionário do conversor, escalando com a frequência de chaveamento.

Isso ocorre principalmente por conta da grande complexidade do modelo de MOSFET utilizado. Toda vez que a chave comuta, são necessários muitos cálculos para simular a mudança gradual entre os estados.

5. CONCLUSÕES

Apesar das dificuldades, o plano inicial, ou seja, demonstrar o benefício dos dispositivos eletrônicos baseados em carbeto de silício na aplicação de conversores de tensão utilizando dados comparativos foi alcançado.

Apesar disso, os resultados são preliminares e, conforme discutido durante o relatório, existem diversos fatores a mais que precisam ser considerados quando migrando de uma simulação para um circuito real.

Independente, mesmo com os resultados preliminares é possível ver que, levadas as considerações de design que dificultam a implementação destes dispositivos, estes tem a capacidade de revolucionar, se já não estão sendo implementadas atualmente, áreas como veículos elétricos, geração distribuída de energia, smart grids e aplicações industriais de alta potência através de melhorias na funcionalidade e eficiência de conversores de tensão, inversores e acionamentos, entre outros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências

- [1] P. Daniel W. Hart, Power Electronics. McGraw-Hill Education, 2010.
- [2] J. Loncarski, M. Ricco, V. Monteiro, and V. G. Monopoli, “Efficiency comparison of a dc-dc interleaved converter based on sic-mosfet and si-igbt devices for ev chargers,” in 2020 IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), vol. 1, pp. 517–522, 2020.
- [3] T. P. Chow, “Wide bandgap semiconductor power devices for energy efficient systems,” in 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), pp. 402–405, Nov 2015.
- [4] K. Mochizuki, Vertical GaN and SiC Power Devices. Artech House microwave library, Artech House, 2018.
- [5] X. Yuan, I. D. Laird, and S. Walder, “Opportunities, challenges and potential solutions in the application of fast-switching silicon carbide (sic) power devices and converters,” IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 1–1, 2020.
- [6] “C3m0280090d silicon carbide power mosfet c3m mosfet technology.” <https://www.wolfspeed.com/media/downloads/825/C3M0280090D.pdf>. Acessado em: 2020-10-20.

7. PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

8. AUTO-AVALIAÇÃO ASSINADA

Pietro Pereira Bertuzzo
Aluno de ICT

9. AVALIAÇÃO DO ORIENTADOR ASSINADA

Prof. Dr. Claudionor Francisco do Nascimento
Professor Orientador

10. DESTINO DO ALUNO