

# Comparação entre MOSFETs Si e SiC e Seus Elementos Parasitas sob Diferentes Estratégias de Comando

**Palavras-Chave:** Elementos Parasitas, Altas frequências, Carbetto de Silício

**Autores(as):**

**João Pedro Souza Pascon, FEEC – UNICAMP**

**Prof. Dr. José Antenor Pomilio (orientador) ,FEEC – UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

Os conversores eletrônicos de potência estão cada vez mais presentes em diversas aplicações de engenharia. Com o aumento recente das energias renováveis, eletrificação veicular e automação, a necessidade de controlar formas de onda e qualidade de corrente elétrica cresceu, aumentando as aplicações para esses conversores [1]. Dada essa crescente demanda, vem o interesse em melhorar esses dispositivos, diminuindo sua massa, volume, distorções harmônicas, perdas e custo.

Uma variável de grande importância para alcançar essas melhorias é a frequência que as chaves internas realizam suas comutações. A maioria dessas chaves semicondutoras são de uma tecnologia denominada Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBTs), que são escolhidas por possuírem boa capacidade de lidar com potência e razoável frequência de chaveamento (na ordem de dezenas de quilohertz). No entanto, as perdas nos IGBTs são relativamente elevadas, seja nas comutações (perdas de chaveamento) ou durante a passagem de corrente (perda de condução), o que sugere o uso de chaves de outras tecnologias como os Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET), que possuem maiores capacidades de lidar com frequências altas. Além disso, um fator determinante para essa transição são os materiais denominados *Wide-Bandgap* (WBG) que permitem esses conversores atingirem uma maior frequência de comutação por fatores que serão melhor explicados no corpo do texto.

Todavia, o aumento da frequência traz consigo grandes taxas de variação de tensão ( $dv/dt$ ) e de corrente ( $di/dt$ ), que em associação com elementos parasitas dos dispositivos e das conexões, podem ocasionar problemas de funcionamento dos dispositivos e dos circuitos que são aplicados. Em principal a diferença de modelagem que alguns elementos têm quando tratados em altas frequências, por exemplo, pequenos elementos indutivos, que em baixas frequências são irrelevantes, podem mudar completamente a dinâmica do sistema; elementos de medições perdem sua precisão em altas frequências e cabos ideais se transformam em linhas de transmissão.

Neste trabalho foi feita uma forte revisão bibliográfica no início dos estudos, com o intuito de revisar noções básicas de química, materiais semicondutores e estrutura física de chaves MOSFET. Após isso, foram escolhidos e simulados diferentes exemplares de MOSFET (um Si 650V, um SiC 650V e um SiC 1700V) com o intuito de se familiarizar com o software de simulação e validar os modelos SPICE. Depois disso, foram estudadas as influências de elementos parasitas e suas correlações como indutâncias e capacitâncias parasitas, resistências e tempos de subida de gate driver e não idealidades da carga e cabos. Mais ainda, algumas opções de correções para alguns desses problemas foram estudadas e destrinchadas.

## Atividades:

Materiais semicondutores do tipo *wide-bandgap*, são caracterizados por uma maior energia de banda necessária para o elétron passar da camada de valência para a camada de condução. Em detrimento disso, algumas características físicas são encontradas nesses materiais quando comparados com os semicondutores convencionais, tornando-os ótimas opções para determinadas aplicações. Na imagem abaixo, algumas das diferenças mais significativas são retratadas, como por exemplo a alta mobilidade de elétrons que o carbeto de silício (SiC) e nitreto de gálio (GaN) possuem, responsável pelo aumento das frequências de chaveamento.

Além disso, o alto campo elétrico crítico por comprimento é responsável por permitir que chaves de carbeto de silício sejam mais finas em relação às chaves de silício. Isso faz com que uma menor resistência equivalente seja encontrada nesses dispositivos, além de um aumento na frequência de chaveamento.

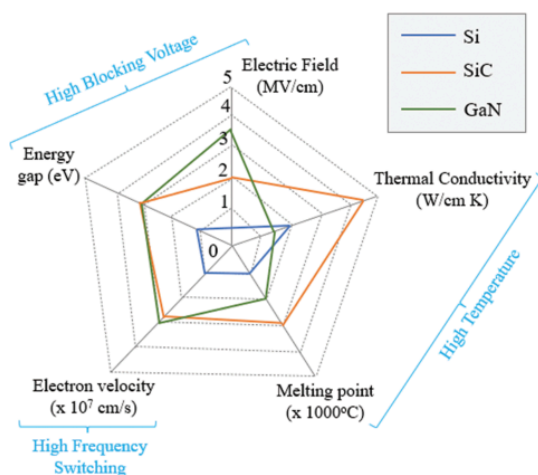


Figura 1: Comparação entre materiais.

Em relação às simulações, elas avançaram com o uso do MOSFET de SiC modelo SCT3060AL (650V) da Rohm Semiconductor. Foi elaborado um esquemático em carga resistiva a fim de que, a partir das simulações, fosse possível entender um pouco dos elementos parasitas que um circuito desse tipo possui. Dentre eles, é possível citar: Indutâncias do MOSFET; Indutâncias do Caminho de Potência; Tempo de  $dv/dt$ ; Resistência de gate; Capacitores parasitas e Resistência em estado de condução.

Os quatro primeiros elementos citados foram alterados ao longos das diversas baterias de simulações feitas, com o objetivo de analisar as influências que tais elementos causam e que, mesmo que seus valores sejam muito pequenos (ordem de nanossegundos e nanohenrys) eles alteram completamente a dinâmica do sistema. Uma tabela de resultados observando energia dissipada, overshoot, frequência e tempos de transiente foi montada.

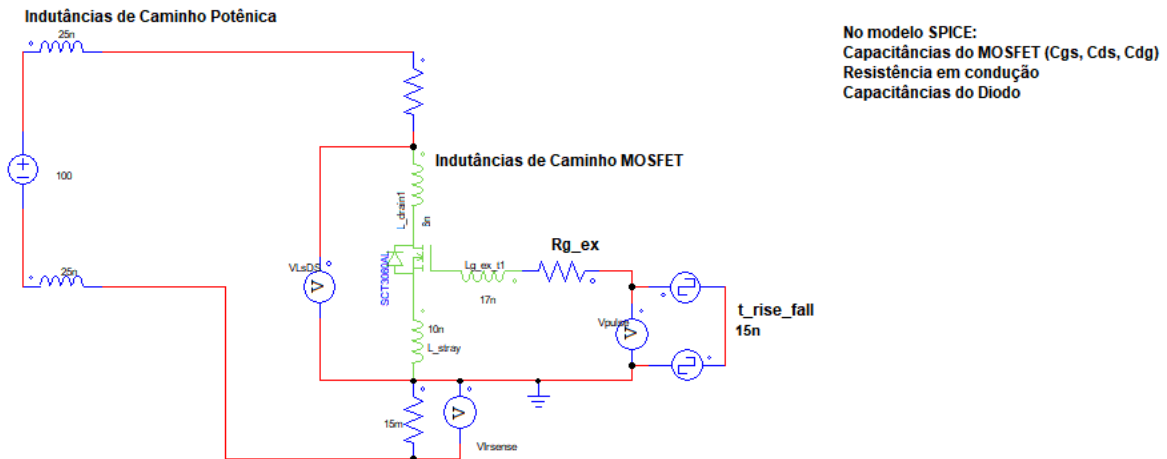


Figura 2: Circuito de carga resistiva com todos os elementos parasitas.

Mesmo pequenas indutâncias presentes em um resistor “ideal” se tornam significantes o suficiente para requererem uma modelagem específica se a frequência for alta o suficiente. De forma que esse comportamento foi modelado e analisado, assim como alguns elementos de correção para esses efeitos. Na figura abaixo, pode-se observar como, para frequências a partir de 300 kHz, o resistor já começa a possuir um comportamento indutivo.

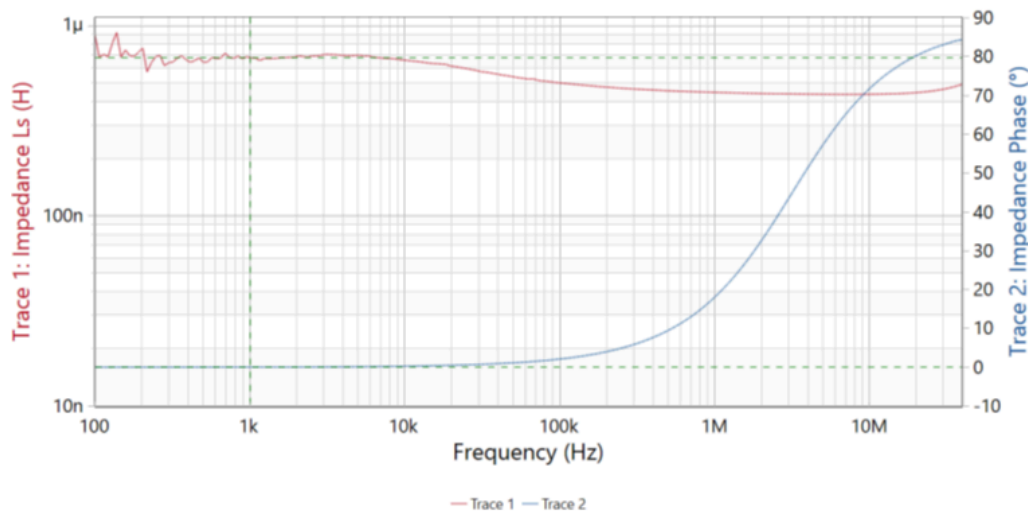


Figura 3: Gráfico entre indutância e fase em função da frequência de operação.

Por fim, cabos e cargas foram modelados considerando seus elementos parasitas, a fim de entender quais frequências fariam com que o cabo ideal em baixas frequências necessitasse de uma modelagem como linha de transmissão. Nesse sentido foi simulado a seguinte linha de transmissão:

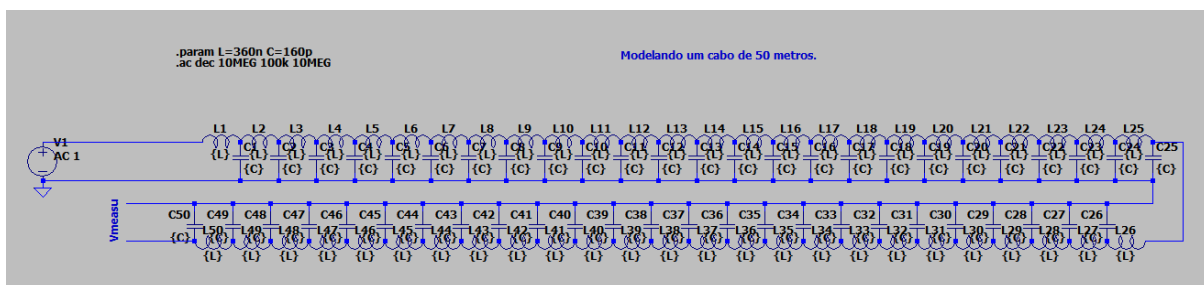


Figura 4: Linha de transmissão do cabo.

## Discussões e Conclusões :

A diferença das curvas de  $r_{ds(on)}$  em função da temperatura para os materiais de silício e carbeto de silício é um fator de grande relevância para projetos de conversores.

É preciso lembrar que a resistência de um MOSFET pode ser aproximada por três parcelas:  $R_{ch}$ ;  $R_{jfet}$ ; e  $R_{drift}$ . Além disso, para entender o fenômeno é preciso ter em mente que, devido às características físicas dos materiais WBG, uma maior tensão pode ser suportada por um layer menor, implicando uma diminuição significativa na resistência de drift nestes em MOSFET com tecnologia WBG.

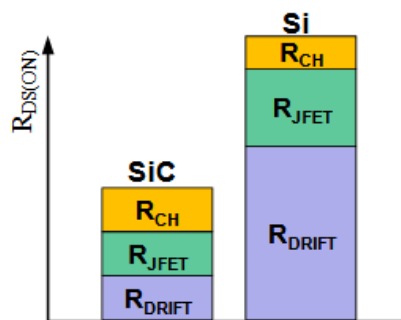


Figura 5: Comparação da composição das resistências.

É sabido que o aumento da temperatura faz com que as moléculas vibrem mais. Com isso, um aumento na resistência de  $R_{jfet}$  e  $R_{drift}$  é observado quando acontece um aumento da temperatura. Em contrapartida, o aumento da temperatura diminui a  $R_{ch}$  devido à diminuição da tensão de threshold e aumento na mobilidade dos elétrons.

Dessa forma, a resistência de canal ocupa uma proporção muito mais significativa na composição da resistência em dispositivos WBG de layers finos. Sendo assim, para baixas temperaturas é observado uma diminuição de  $R_{ds(on)}$  à medida que a temperatura cresce até certo ponto. Esse fenômeno perde intensidade em MOSFETs SiC de maior tensão (por exemplo 1700V) pois seu layer é maior do que MOSFETs de menor tensão.

Em relação aos elementos parasitas estudados na figura 2, a seguinte tabela resumida foi elaborada:

Modelo	Lp	Rgex	t <sub>r_f</sub>	[Ld, Lg, Ls]	td(on)	tr	ton	td(off)	tf	toff	Overshoot	Energ. on	Energ. off	Freq.
Modelo 0000	0	0	1ps	[0, 0, 0]	4,83	16,12	20,95	5,08	4,76	9,84	-	3,57	0,97	-
Modelo 1111	25nH	2	15ns	[6n, 17n, 10n]	15,18	31,34	46,52	16,79	3,90	20,69	167V	4,99	3,68	47MHz

É importante perceber a relevância dos elementos parasitas considerados. Quando a linha de cima é comparada com a linha de baixo, percebe-se um aumento significativo no tempos de transiente, na energia dissipada, e mais ainda, na criação de um fenômeno de overshoot e ringing.

Observando o gráfico abaixo, é possível reconhecer que quanto mais longe a frequência da primeira ressonância do cabo estiver da frequência fundamental do input, maior será a influência do slew rate no sistema. Além disso, um aumento no slew rate proporciona uma diminuição nas componentes de alta frequências.

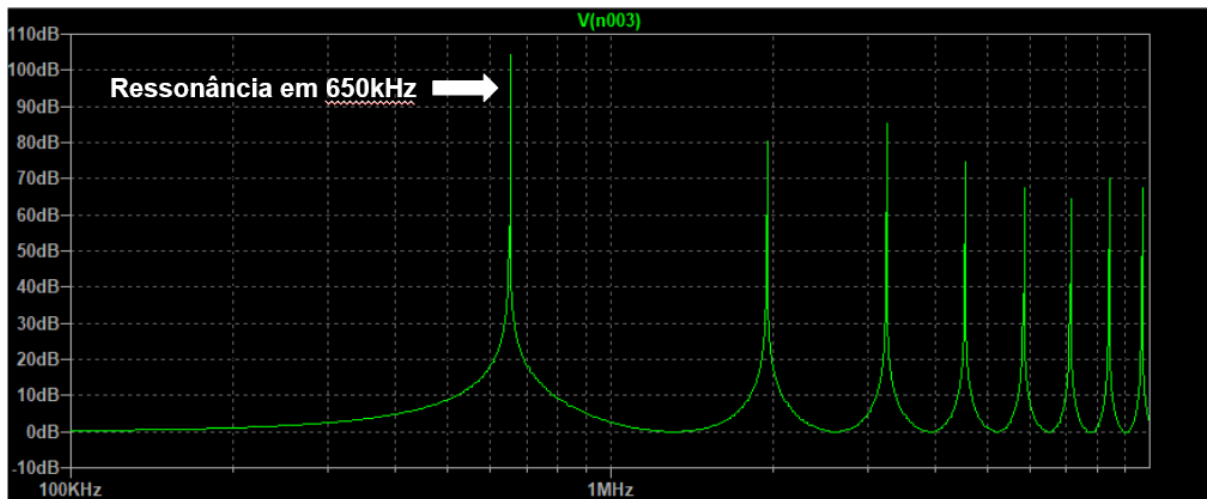


Figura 6: Ressonância no cabo.

Isso significa que para maiores frequências, a onda está mais próxima de atingir uma frequência de ressonância no cabo. Mais ainda, uma onda com diversas frequências, está mais propícia a atingir algum comprimento de onda referente a uma ressonância no cabo.

## BIBLIOGRAFIA

[1] Guerreiro, J.F., Júnior, H.G., & Pomilio, J.A. (2019). Design Procedures and Prototyping of a Full-Bridge High Frequency Power Inverter. 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 1-6.

[2] Princípios de Química - Peter Atkins, Loreta Jonnes, 5ª ed, 2011.