

MOSFET Não Liga Instantaneamente: O Segredo Que Limita a Velocidade de Comutação!



Descrição

Descrição para YouTube

Muita gente acha que o MOSFET liga e desliga como uma chave perfeita. Mas, na prática, ele precisa carregar capacitâncias internas, atravessar o platô de Miller, vencer a limitação do driver de gate e ainda enfrentar indutâncias parasitas nos terminais e nas trilhas da placa.

Neste tutorial, vamos entender de forma simples e técnica por que a velocidade de comutação de um MOSFET depende do gate, do driver, do resistor de gate, do layout, da carga e das perdas de chaveamento.

Parece magia, mas é tecnologia.

www.bairrospd.com

VISITE O SITE DO PROFESSOR BAIROS LÁ EM O PDF E MUITO MAIS.

PARA AULAS ONLINE CONTATE VIA SITE.

www.bairrospd.com

<https://www.youtube.com/@professorbairros>



Sumário

1.1.	A pergunta perigosa: qual é a velocidade máxima de um MOSFET?.....	3
1.2.	O gate do MOSFET é um capacitor escondido	4
1.3.	Corrente de gate: o pulso que faz o MOSFET acordar	5
1.4.	O platô de Miller: quando o gate parece travar	6
1.5.	Durante a transição, o MOSFET esquenta	7
1.6.	O resistor de gate controla a agressividade da comutação	8
1.7.	Indutância parasita: o coice dos terminais e trilhas	9
1.8.	Rápido demais também dá problema.....	10
1.9.	Frequência máxima real: quem manda é o conjunto	11
1.10.	Conclusão: MOSFET rápido não é MOSFET mágico	12

1.1. A pergunta perigosa: qual é a velocidade máxima de um MOSFET?



Professor Bairos:

“Hoje a pergunta parece simples, mas esconde uma armadilha: qual é a máxima velocidade de comutação de um MOSFET?”

Arthurzinho:

“Professor, então é só olhar no datasheet e procurar a velocidade máxima?”

Professor Bairos:

“Seria bom se fosse assim, Arthurzinho. Mas o MOSFET não é uma chave ideal. Ele não liga e desliga instantaneamente.”

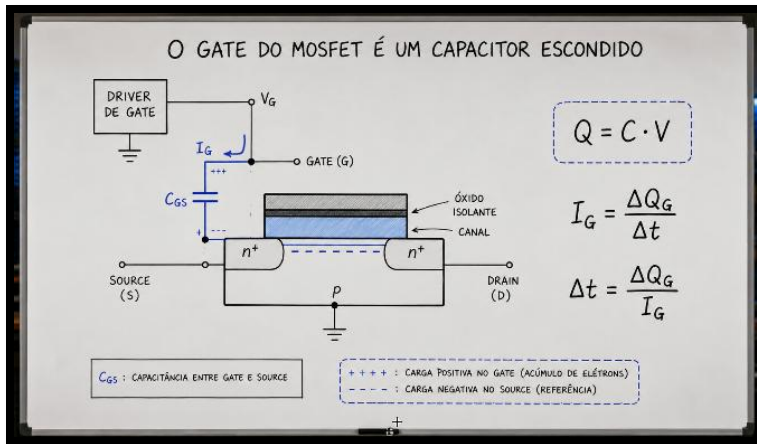
Negativino:

“Ah, pronto... então o MOSFET é uma chave que antes de ligar precisa tomar café, respirar fundo e pensar na vida?”

Professor Bairos:

“Quase isso, Negativino. O MOSFET é rápido, mas não é mágico. A velocidade máxima depende da capacitância de gate, do platô de Miller, do driver, do resistor de gate, do layout da placa, da corrente da carga e do quanto de ruído e aquecimento o projeto pode tolerar.”

1.2. O gate do MOSFET é um capacitor escondido

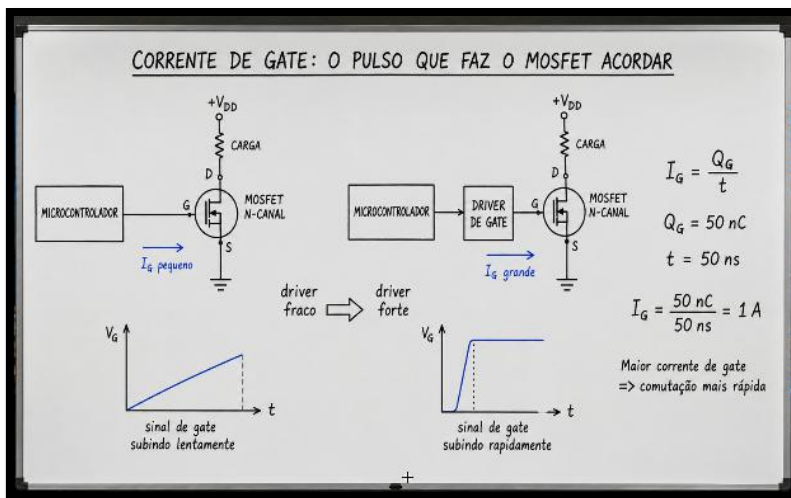


O primeiro limite está no gate. O gate do MOSFET é isolado do canal por uma camada microscópica de óxido. Essa estrutura funciona como um capacitor.

Para ligar o MOSFET, o driver precisa colocar carga elétrica no gate. Para desligar, precisa retirar essa carga. A equação mostra que a carga depende da capacitância e da tensão aplicada.

Na prática, quanto maior for a corrente que o driver consegue fornecer ou retirar do gate, menor será o tempo de comutação. Por isso, em eletrônica de potência, o gate não deve ser visto como uma entrada comum. Ele deve ser visto como uma capacitância que precisa ser carregada e descarregada rapidamente.

1.3. Corrente de gate: o pulso que faz o MOSFET acordar

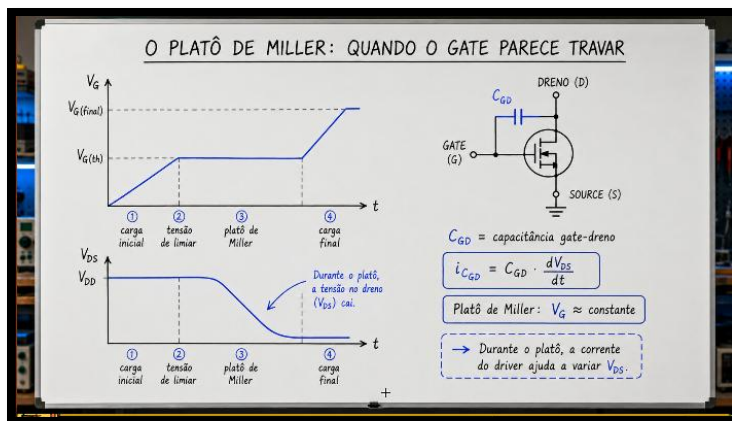


Veja este exemplo. Se um MOSFET tem carga de gate de cinquenta nanocoulombs e queremos carregar esse gate em cinquenta nanossegundos, a corrente média necessária é de 1A.

Isso não significa que o gate consome um ampère o tempo todo. Em regime permanente, depois de carregado, o gate praticamente não consome corrente. Mas durante a comutação ele precisa receber ou devolver carga rapidamente.

É aqui que entra o driver de gate. Um pino de microcontrolador pode fornecer apenas alguns miliampères. Um driver de MOSFET pode fornecer pulsos de corrente muito maiores. Essa diferença muda completamente a velocidade de comutação.

1.4. O platô de Miller: quando o gate parece travar



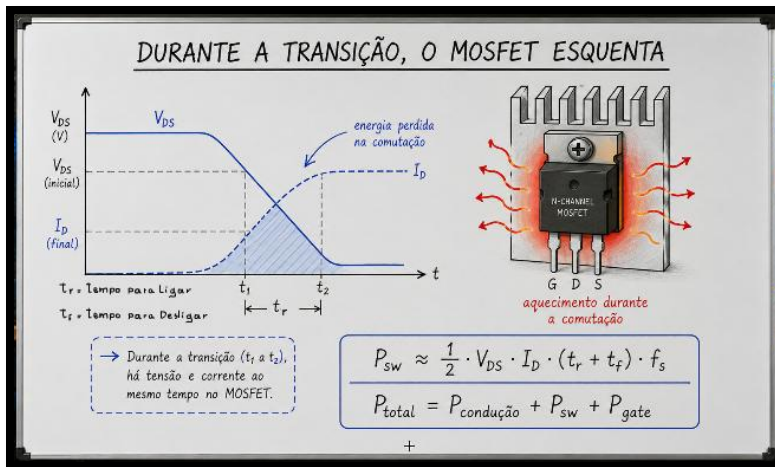
O segundo grande limite é o platô de Miller. O MOSFET tem uma capacitância parasita entre gate e dreno, chamada capacitância gate-dreno.

Durante a comutação, a tensão entre dreno e source muda rapidamente. Essa variação faz circular corrente pela capacitância gate-dreno. O resultado é que a tensão no gate parece ficar presa em um patamar.

Esse trecho é chamado platô de Miller. O driver continua fornecendo corrente, mas boa parte dessa corrente está sendo usada para mudar a tensão no dreno, e não para aumentar rapidamente a tensão do gate.

Quanto mais fraco for o driver, mais tempo o MOSFET fica nesse platô. E quanto mais tempo ele fica no platô, mais tempo ele permanece na região de dissipação.

1.5. Durante a transição, o MOSFET esquenta



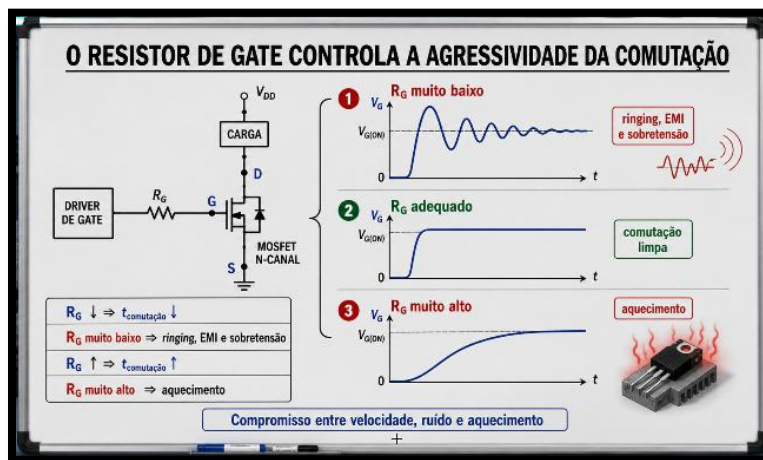
Durante a transição, o MOSFET não está totalmente desligado nem totalmente ligado. Existe corrente passando pelo dreno e existe tensão entre dreno e source ao mesmo tempo.

Essa sobreposição gera perda de chaveamento. A aproximação no quadro mostra que a perda aumenta com a tensão, com a corrente, com o tempo de subida, com o tempo de descida e com a frequência de chaveamento.

Então, se o MOSFET comuta devagar, ele esquenta mais. E se a frequência PWM aumenta, esse aquecimento pode crescer muito rapidamente.

Por isso, não basta perguntar se o MOSFET aguenta a corrente. Também é preciso perguntar se ele consegue comutar naquela frequência sem ultrapassar o limite térmico.

1.6. O resistor de gate controla a agressividade da comutação



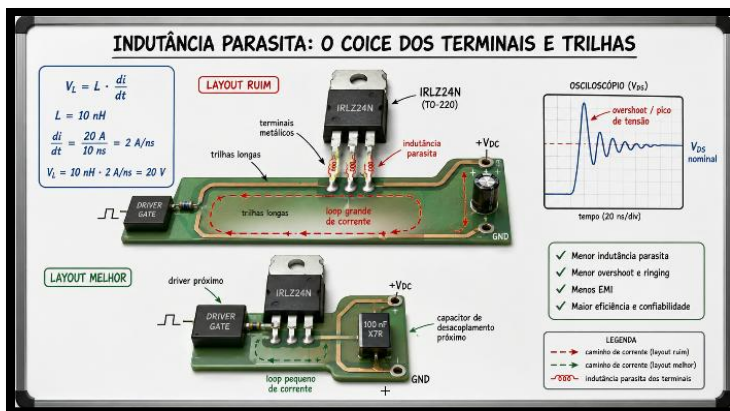
O resistor de gate é o controle de agressividade da comutação. Se o resistor for de baixo valor, a corrente de gate aumenta e o MOSFET comuta mais rápido.

Mas existe um limite. Se o resistor for baixo demais, a comutação fica muito brusca. Isso pode gerar ringing, oscilações, isso gera interferência eletromagnéticas e picos de tensão.

Se o resistor for alto demais, o gate carrega devagar, o MOSFET passa mais tempo na região linear e as perdas aumentam, o MOSFET pode esquentar demais.

Na prática, o resistor de gate é um compromisso entre velocidade, ruído, sobre-tensão e aquecimento. Ele não deve ser escolhido no chute. Ele deve ser ajustado de acordo com o MOSFET, o driver, a placa e a carga.

1.7. Indutância parasita: o coice dos terminais e trilhas



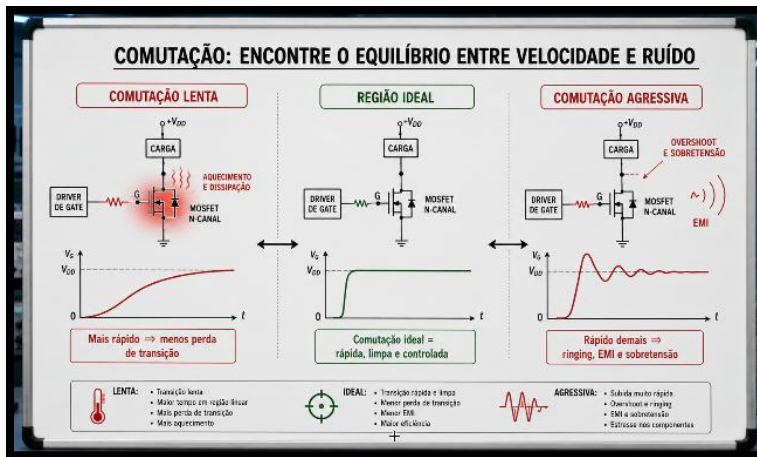
Mesmo com um driver forte, existe outro gargalo: a indutância parasita. Os terminais metálicos do MOSFET, as trilhas da placa e os fios da carga se comportam como pequenas indutâncias.

A equação mostra que a tensão sobre uma indutância depende da velocidade de variação da corrente. Se a corrente muda vinte ampères em dez nanossegundos, temos dois ampères por nanossegundo.

Com apenas dez nanohenrys de indutância parasita, já aparece um pico de vinte volts. E dez nanohenrys é um valor perfeitamente possível de encontrar em terminais, trilhas e conexões físicas.

Por isso, em eletrônica de potência, layout não é detalhe estético. Layout é parte elétrica do circuito. Loop grande, trilha comprida e capacitor longe podem transformar uma comutação rápida em oscilações, gerando ruído elétrico e sobretensão.

1.8. Rápido demais também dá problema



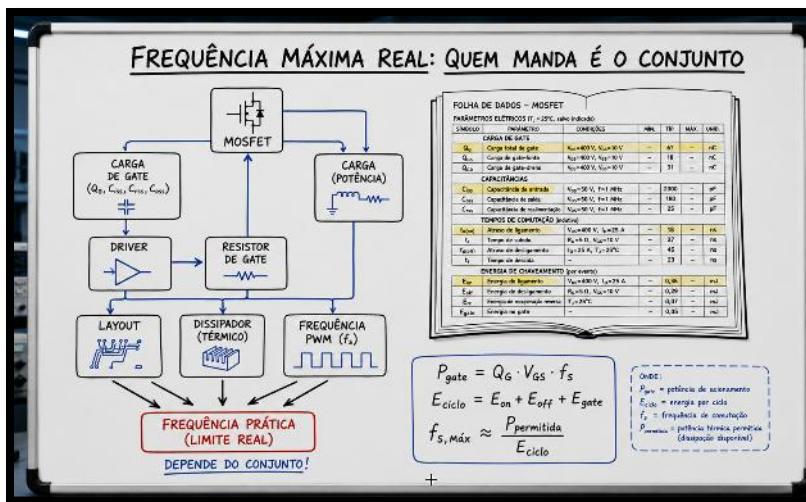
A solução não é simplesmente chavar o mais rápido possível. Comutação lenta aumenta as perdas de transição e aquece o MOSFET.

Mas comutação rápida demais aumenta a variação de tensão e a variação de corrente. Isso pode gerar oscilações, interferências eletromagnéticas, sobretensão e disparos falsos em outros pontos do circuito.

O objetivo é encontrar uma comutação rápida, limpa e controlada. Para isso, podemos usar driver adequado, resistor de gate bem escolhido, trilhas curtas, bom desacoplamento e um layout com baixa indutância parasita.

Em baixa potência, muitos erros passam despercebidos. Em alta corrente e alta frequência, cada detalhe aparece no osciloscópio.

1.9. Frequência máxima real: quem manda é o conjunto



A frequência máxima real não é determinada por um único número mágico no datasheet. Ela depende do conjunto.

O datasheet informa carga de gate, capacitâncias, tempos de comutação em condições específicas e, em alguns casos, energias de chaveamento. Mas quem define a frequência prática é o circuito completo.

A potência gasta apenas para carregar e descarregar o gate aumenta com a frequência. Além disso, a energia perdida em cada ciclo de liga e desliga também se repete a cada chaveamento.

Por isso, a frequência máxima prática aparece quando a energia perdida por ciclo, multiplicada pela frequência, ainda cabe dentro da potência que o projeto consegue dissipar.

Se passar desse limite, o MOSFET pode até funcionar por alguns segundos, mas vai aquecer, perder eficiência e reduzir a confiabilidade.

1.10. Conclusão: MOSFET rápido não é MOSFET mágico



Professor Bairros:
“Então, qual é a máxima velocidade de comutação de um MOSFET? A resposta correta é: depende do conjunto.”

Arthurzinho:

“Depende da carga de gate, das capacitâncias internas, do platô de Miller, do driver, do resistor de gate, do layout e da indutância parasita.”

Professor Bairros:

“Perfeito, Arthurzinho. Comutar bem não significa apenas comutar rápido. Significa comutar rápido o suficiente, limpo o suficiente e frio o suficiente.”

Negativino:

“Então o MOSFET não é uma chave mágica... é uma chave mimada! Quer driver forte, trilha curta, resistor certo, capacitor perto e ainda reclama se esquentar!”

Professor Bairros:

“Exatamente. MOSFET de potência trabalha bem quando é tratado do jeito certo.”

Arthurzinho:

“E se tratar errado, ele esquentar, chia, gera ruído e pode até queimar.”

Negativino:

“Agora eu entendi. MOSFET rápido sem layout bom é igual carro de corrida em estrada de chão: até anda, mas faz poeira, barulho e prejuízo!”