

Universidade Federal de Santa Catarina  
Departamento de Engenharias da Mobilidade  
Eletrônica Analógica - EMB5116



## Eletrônica Analógica - Trabalho 2

Dr. Prof. Milton Evangelista de Oliveira Filhos

André Stein - 22201053  
Danilo Machado - 22203056  
Pedro Lauxen - 22201064

Joinville  
2025

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Transistores de Efeito de Campo</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>FET de junção(JFET)</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>FET de Metal-Óxido-Semicondutor(MOSFET)</b>	<b>3</b>
4.1	Estrutura do MOSFET . . . . .	4
4.2	Modos de operação do MOSFET . . . . .	5
4.3	Circuitos práticos . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Transistor Bipolar de Porta Isolada(IGBT)</b>	<b>7</b>
5.1	Tiristor . . . . .	8
5.2	Estrutura do IGBT . . . . .	8
5.3	Modelagem matemática e física do IGBT . . . . .	8
5.4	Design do componente . . . . .	8
5.5	. . . . .	8
5.6	. . . . .	8
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>8</b>

# 1 Introdução

Dispositivos transistores são utilizados comumente como meios de amplificar, ou chavear um circuito, de forma que o mesmo opere da maneira desejada no circuito. Dentre os transistores existentes os tipos mais comuns são os bipolares de junção, cujo são componentes formados pela junção de semicondutores, de forma que os agregando em conjuntos do tipo NPN ou PNP, forma-se um dispositivo que opera conforme é configurada sua polarização, porém assim como há a existência de componentes específicos dentro do mundo dos capacitores e resistores, dentro do mundo dos transistores existem os transistores de efeito de campo, que utilizam outra forma de controlar o fluxo de corrente por semicondutores. Neste trabalho serão descritos diferentes transistores de efeito de campo (FET) como, FET de junção (JFET), FET de Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET) e por último o Transistor Bipolar de Porta Isolada (IGBT) determinando como funciona cada um desses componentes, assim como será feita a comparação entre os mesmos, e por fim a comparação direta com transistores bipolares de junção.

## 2 Transistores de Efeito de Campo

### 3 FET de junção(JFET)

### 4 FET de Metal-Óxido-Semicondutor(MOSFET)

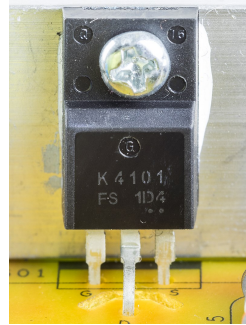


Figura 1: MOSFET de potência.

O transistor MOSFET (acrônimo de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, ou transistor de efeito de campo semicondutor de óxido metálico — TECMOS), é o tipo mais comum de transistores de efeito de campo em circuitos tanto digitais quanto analógicos. Seu princípio básico foi proposto pela primeira vez por Julius Edgar Lilienfeld, em 1925.

Os transistores de efeito de campo diferentemente dos transistores bipolares comuns são típicos amplificadores de tensão e não de corrente. Enquanto a corrente de coletor de um transistor comum é função da corrente de base, num transistor de efeito de campo, a corrente de dreno é função da tensão de comporta, conforme indica a figura 2.

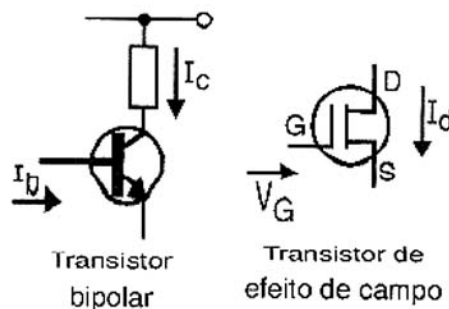


Figura 2: comparação entre transistor bipolar e transistor de efeito de campo.

Uma fina película de óxido de metal isola a região de comporta da região do canal que liga o dreno à fonte. Isso faz com que a impedância de entrada do MOSFET seja muito alta, o que significa que ele consome muito pouca corrente da fonte de sinal que está dirigindo a comporta. Essa característica torna os MOSFETs ideais para circuitos de alta impedância, como amplificadores de áudio e circuitos digitais. Além disso, os MOSFETs são capazes de operar em frequências muito altas, tornando-os adequados para aplicações em rádio frequência (RF) e micro-ondas.

A palavra "metal" no nome é um anacronismo vindo dos primeiros chips, onde as comportas (gates) eram de metal. Os chips modernos usam comportas de polissilício, mas

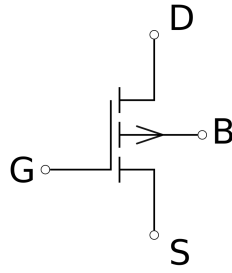


Figura 3: Símbolo de esquema elétrico de um MOSFET.

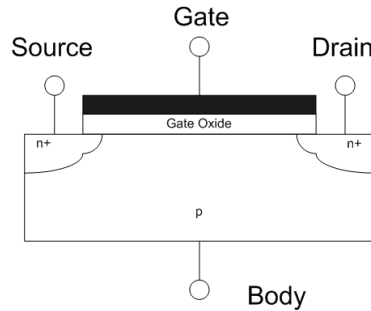


Figura 4: Símbolo de esquema elétrico de um MOSFET.

ainda são chamados de MOSFETs. Um MOSFET é composto de um canal de material semiconductor de tipo N ou de tipo P e é chamado respectivamente de NMOS ou PMOS. Geralmente o semiconductor escolhido é o silício, mas alguns fabricantes, principalmente a IBM, começaram a usar uma mistura de silício e germânio (SiGe) nos canais dos MOSFETs. Infelizmente muitos semicondutores com melhores propriedades elétricas do que o silício, tais como o arsenieto de gálio, não formam bons óxidos nas comportas e portanto não são adequados para os MOSFETs. O IGFET é um termo relacionado que significa Insulated-Gate Field Effect Transistor, e é quase sinônimo de MOSFET, embora ele possa se referir a um FET com comporta isolada por um isolante não óxido.

O terminal de comporta é uma camada de polissilício (silício policristalino) colocada sobre o canal, mas separada do canal por uma fina camada de dióxido de silício isolante. Quando uma tensão é aplicada entre os terminais comporta (gate) e fonte (source), o campo elétrico gerado penetra através do óxido e cria uma espécie de "canal invertido" no canal original abaixo dele. O canal invertido é do mesmo tipo P ou tipo N, como o da fonte ou do dreno, assim, ele cria um condutor através do qual a corrente elétrica possa passar. Variando-se a tensão entre a comporta e a fonte se modula a condutividade dessa camada e torna possível se controlar o fluxo de corrente entre o dreno e a fonte. Existem também modelos de Amplificador operacional baseados na tecnologia FET/MOSFET, muito úteis e com grande utilização na indústria eletrônica.

## 4.1 Estrutura do MOSFET

O MOSFET é um dispositivo de quatro terminais: dreno (drain), fonte (source), porta (gate) e substrato (bulk). Em dispositivos discretos o substrato costuma estar ligado à fonte, de modo que apenas três terminais são acessíveis. Dois parâmetros geométricos importantes são a largura do canal  $W$  e o comprimento do canal  $L$ . A espessura da camada de óxido da porta,  $t_{ox}$ , determina a capacitância por unidade de área  $C_{ox}$ ; em

geral, quanto menor  $t_{ox}$ , maior  $C_{ox}$  e maior a influência da tensão de porta sobre o canal.

## 4.2 Modos de operação do MOSFET

A operação do MOSFET (assumindo NMOS) pode ser dividida em três regimes principais:

- **Região de corte:** quando  $V_{GS} < V_{th}$ . O canal não está formado e o transistor permanece desligado (apenas corrente de fuga).
- **Região linear (triode):** quando  $V_{GS} > V_{th}$  e  $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ . Nesta região o canal está formado por toda a extensão entre dreno e fonte e o MOSFET se comporta aproximadamente como um resistor controlado por  $V_{GS}$ . Uma expressão aproximada da corrente de dreno é

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left( (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right),$$

onde  $\mu_n$  é a mobilidade dos portadores e  $C_{ox}$  a capacitância do óxido por unidade de área.

- **Região de saturação:** quando  $V_{GS} > V_{th}$  e  $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{th}$ . O canal sofre "pinch-off" próximo ao dreno e a corrente de dreno aproxima-se de

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2.$$

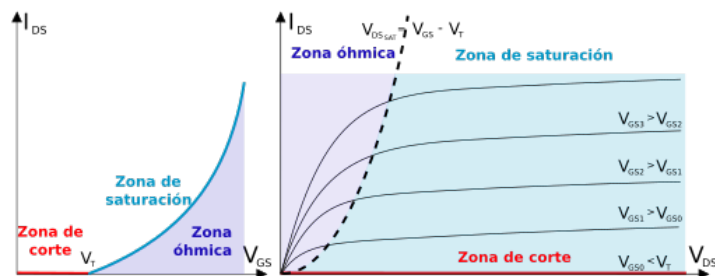


Figura 5: Diagrama das regiões de operação do MOSFET.

Em circuitos digitais, os MOSFETs são usadas preferencialmente as regiões de corte e região ôhmica. Em circuitos analógicos é usado o transistor em modo de saturação, o que costuma fazer confusão com o modo de saturação dos transistores bipolares de junção que são substancialmente diferentes. A saturação nos MOS é análoga a Zona Ativa Direta dos TBJ.

## 4.3 Circuitos práticos

- **AMPLIFICADOR DE BANDA LARGA:** O circuito mostrado na figura 6 pode amplificar sinais que vão desde a faixa de áudio até 10 MHz.

A faixa muito larga de frequências de operação e sua impedância de entrada da ordem de 1 M $\Omega$  o torna ideal como etapa de entrada para instrumentos tais como freqüencímetros ou mesmo osciloscópio.

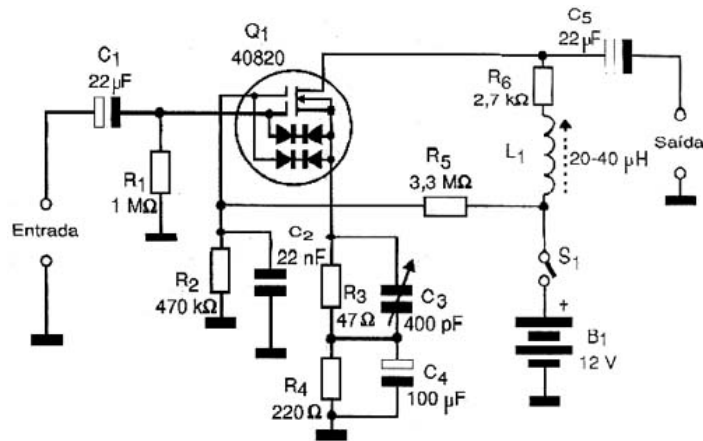


Figura 6: Circuito do amplificador de banda larga.

A intensidade máxima do sinal de entrada (a partir do qual temos a saturação) é da ordem de 100 mVrms.

A amplitude máxima do sinal de saída é de 1 Vrms.

O indutor que serve de carga para a saída é ajustado para se obter com o trimmer o ganho máximo do circuito na frequência de 10 MHz, mas dependendo da aplicação estes componentes podem ser alterados.

Observe que uma das comportas tem uma polarização fixa dada por R2 e R3 de modo a levar o componente a uma corrente de repouso ideal para a aplicação.

- **SEGUIDOR DE FONTE:** Um seguidor de fonte é um amplificador que tem um ganho de tensão unitário, porém uma elevadíssima impedância de entrada e uma impedância muito baixa de saída. O circuito da figura 7 mostra uma aplicação deste tipo que pode ser considerada equivalente ao seguidor de tensão normalmente feito com amplificadores operacionais.

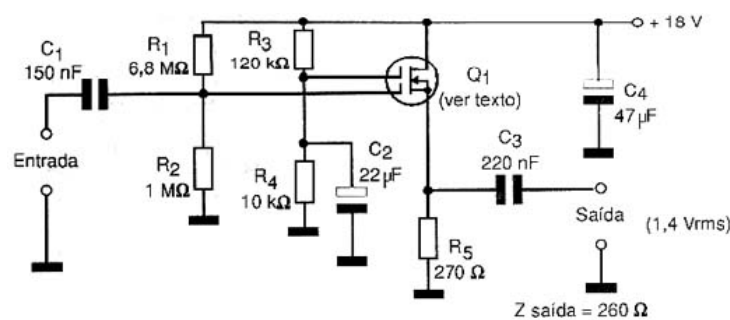


Figura 7: Circuito do seguidor de fonte.

Neste caso a amplitude máxima do sinal de entrada antes do qual se obtém a saturação é da ordem de 2 volts e a amplitude máxima do sinal de saída é da ordem de 1,5 Vrms.

Dentre as aplicações recomendadas para este circuito podemos citar o casamento de impedância de fontes de sinais de áudio como, por exemplo, microfones.

- **PROVADOR DE BOBINAS E CAPACITORES:** O circuito da figura 8 é uma ponte que serve tanto para medida de capacitâncias como indutâncias e faz

uso de um transistor de efeito de campo MOS de canal duplo alimentado por uma tensão de 9 V.

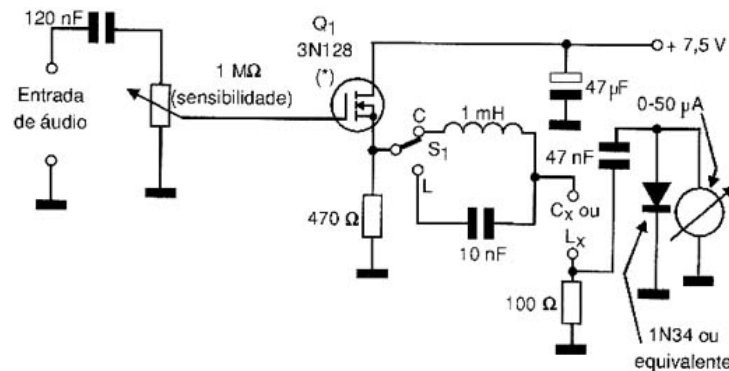


Figura 8: Circuito do provador de bobinas e capacitores.

O princípio de funcionamento é simples: aplica-se o sinal de um gerador de sinais na entrada, a frequência vai depender da ordem de grandeza da indutância ou da capacitância medida - normalmente ela estará entre 20 Hz e 20 kHz para medidas de capacitância entre 50 nF e 50 000  $\mu$ F e indutâncias entre 5 mH e 6000 Hz com os valores de capacitância e indutância de referência usados.

- **ELETROSCÓPIO:** O circuito mostrado na figura 9 é de um simples eletroscópio eletrônico que pode ser usado com vantagem nas aulas de física substituindo o tradicional eletroscópio de folhas de ouro.

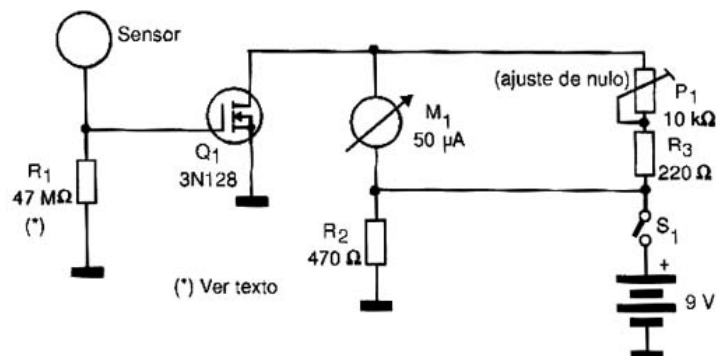


Figura 9: Circuito do eletroscópio.

O circuito é alimentado por uma bateria de 9 V e o eletrodo sensor pode ser uma pequena argola de fio descascado ou ainda uma esfera de metal.

Para testar atrite um pente ou caneta num pedaço de tecido e aproxime-o do sensor. A agulha do instrumento indicador deve oscilar fortemente.

## 5 Transistor Bipolar de Porta Isolada(IGBT)

O tipo de transistor IGBT, pode ser definido de maneira técnica como um transistor formado com 3 terminais formando uma espécie de chave eletrônica, tendo como principal objetivo combinar alta eficiência com comutação rápida. A sua semelhança com o tiristor



pode causar certa confusão pois sua definição também inclui a chave tripla, porém a ação do tiristor é diferente no sentido de, permitir apenas a ação do transistor presente, na faixa de operação do tiristor.

## 5.1 Tiristor

O tiristor diferente do IGBT, é um componente constituído de camadas que formam uma junção PNPN constituindo 4 camadas de formação tornando assim sua composição uma espécie de junção entre transistores do tipo PNP e NPN, seus terminais possuem ânodo, cátodo, e uma porta que funciona como um interruptor, possuindo como modo de operação bloqueio reverso, direto e condução direta para controlar o fluxo de corrente no circuito. Suas aplicações são voltadas para sistemas de controle como controle de potência, motores e circuito de alarme.

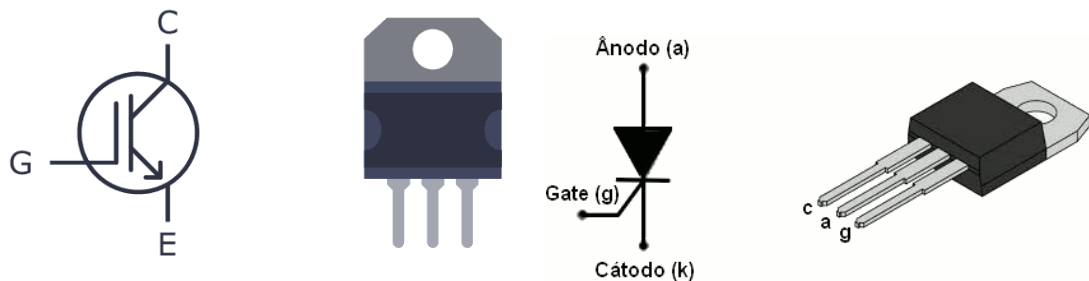


Figura 10: À esquerda: IGBT. À direita: Tiristor.

## 5.2 Estrutura do IGBT

A célula IGBT é construída semelhante ao MOSFET, porém a mudança está em que a parte  $n^+$  é substituída por uma camada coletora  $p^+$  desse modo forma um transistor PNP vertical, tal região coletora cria uma espécie de conexão do tipo Transistor Bipolar PNP com um MOSFET com a parte  $n^+$  na superfície, juntando assim o "melhor" dos dois dispositivos formando uma estrutura NPNP.

## 5.3 Modelagem matemática e física do IGBT

## 5.4 Design do componente

## 5.5

## 5.6

# 6 Conclusões

Com este trabalho foi possível compreender de forma mais clara os tipos e funcionalidades dos resistores e capacitores em diferentes circuitos eletrônicos, abordando desde materiais de fabricação dos componentes a casos especiais de aplicações específicas. Com isso evidenciando que a escolha do tipo adequado de componente é parte fundamental na construção de qualquer tipo de circuito, dependendo diretamente das condições de operação do circuito, sendo necessário considerar a tolerância, dissipação de potência,

tensão de trabalho, resistência interna do capacitor e estabilidade térmica necessária para cada caso.

Dessa forma, vemos que os resistores e capacitores não devem ser vistos apenas como elementos básicos em um esquema eletrônico, mas como peças-chave que definem o desempenho, a segurança e a confiabilidade de um projeto. Sua seleção adequada exige não apenas conhecimento técnico, mas também compreensão prática das condições reais de operação.