

# FET: JFET E MOSFET

Elder Peixoto Xavier - 93535

Ives de Oliveira Furtado - 93538

# História

- Onde tudo começou:



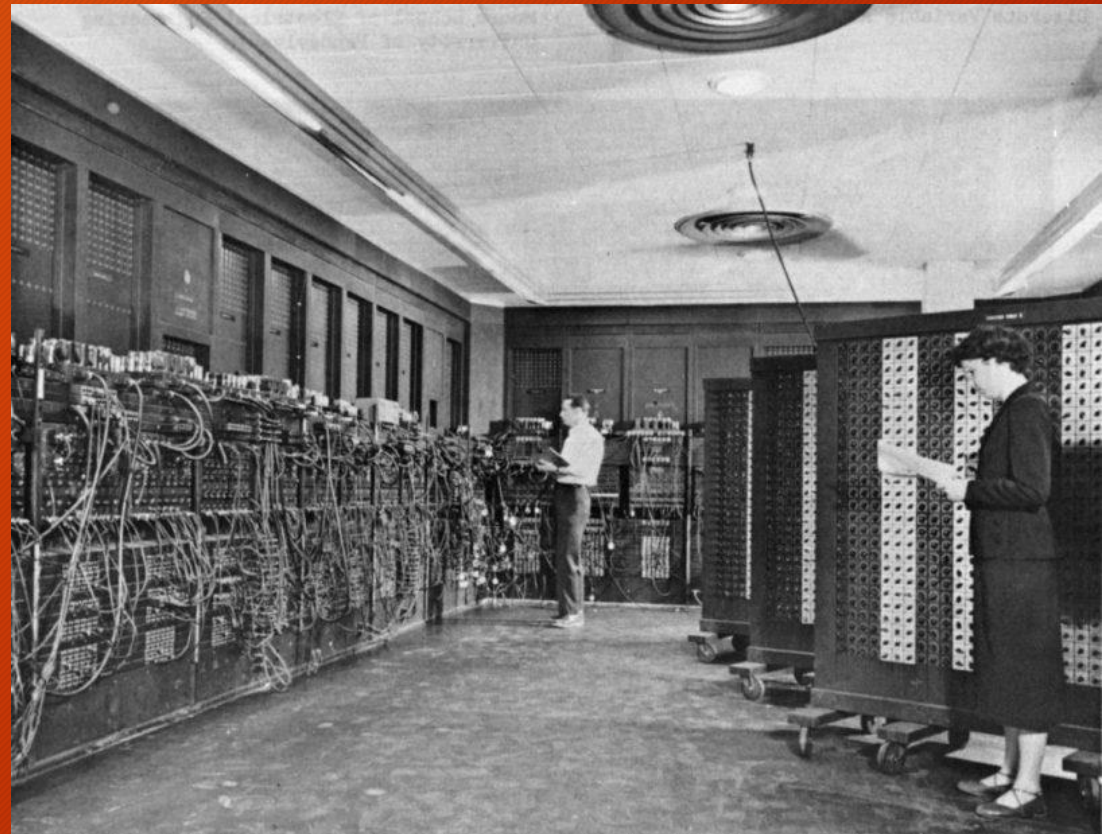


# História

- A física dos semicondutores revolucionou a sociedade moderna ao possibilitar a construção de dispositivos e máquinas cada vez menores e mais potentes.
- Nas pesquisas iniciais com transmissão de ondas de rádio, no fim do século XIX, os cientistas conseguiram codificar e transmitir sons na forma de ondas eletromagnéticas. No entanto, para detectá-las à distância, havia dois problemas: o primeiro, era retirar a informação da onda que a carregava. O segundo, era que a onda chegava com baixa intensidade.
- Em 1904, o físico inglês John Ambrose Fleming criou a chamada válvula diodo, que retificava a onda e entregava a informação de volta. Por sua vez, o americano Lee De Forest inventou, no ano de 1906, a válvula triodo, que amplificava a informação, gerando o som novamente em volume suficiente para ser utilizado em aplicações práticas.

# História: Eniac, o primeiro computador do mundo!

- Electronic Numerical Integrator And Computer;
- Começou a ser desenvolvido em 1943;
- Possuía 17468 válvulas;
- 6000 chaves manuais;
- Aproximadamente 50 metros de comprimento;
- 5000 operações por segundo;
- 160kw de consumo;
- Complexos cálculos de balística passaram a realizar-se em alucinantes 30 segundos, quando com as calculadoras manuais que até aí se usavam levava 12 horas para se obter o mesmo resultado.





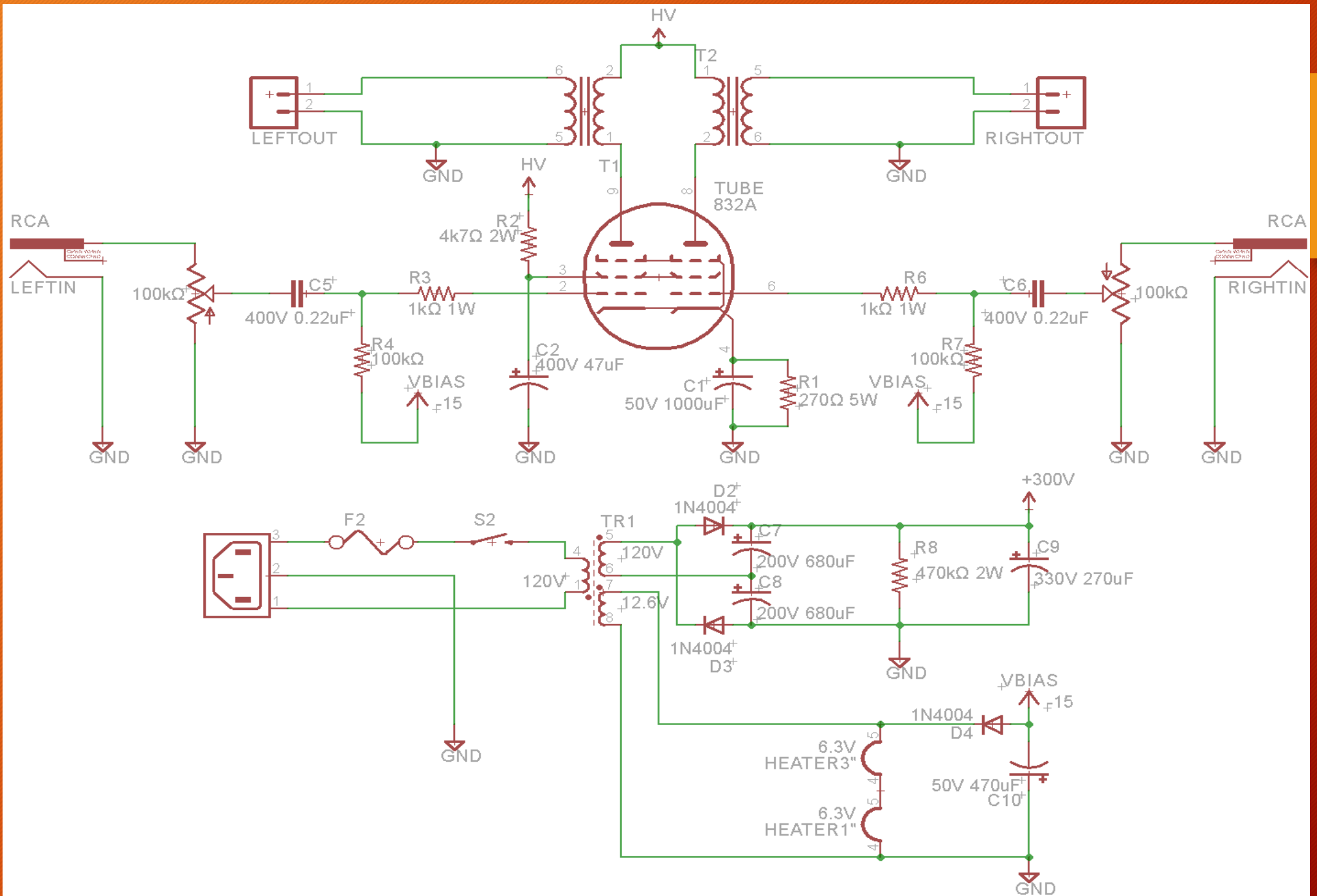
# Exemplo aplicação da válvula

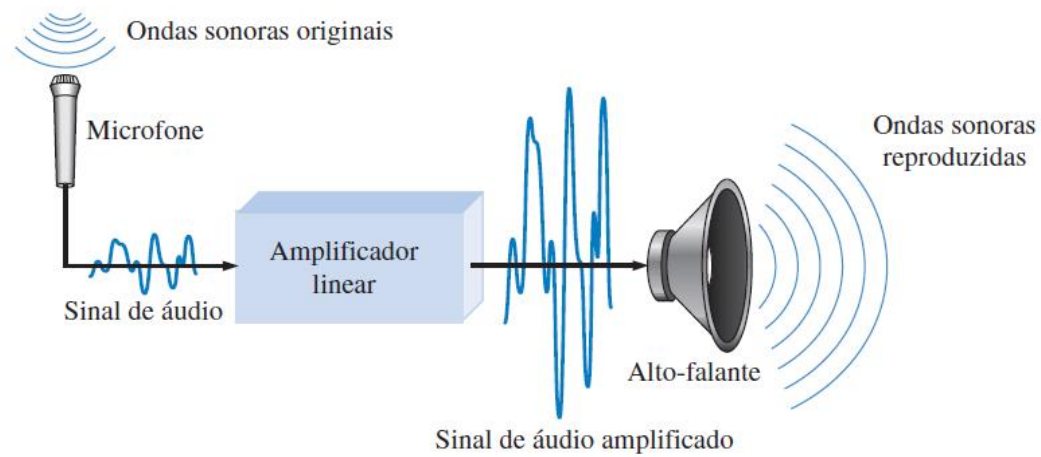


# Exemplo aplicação da válvula



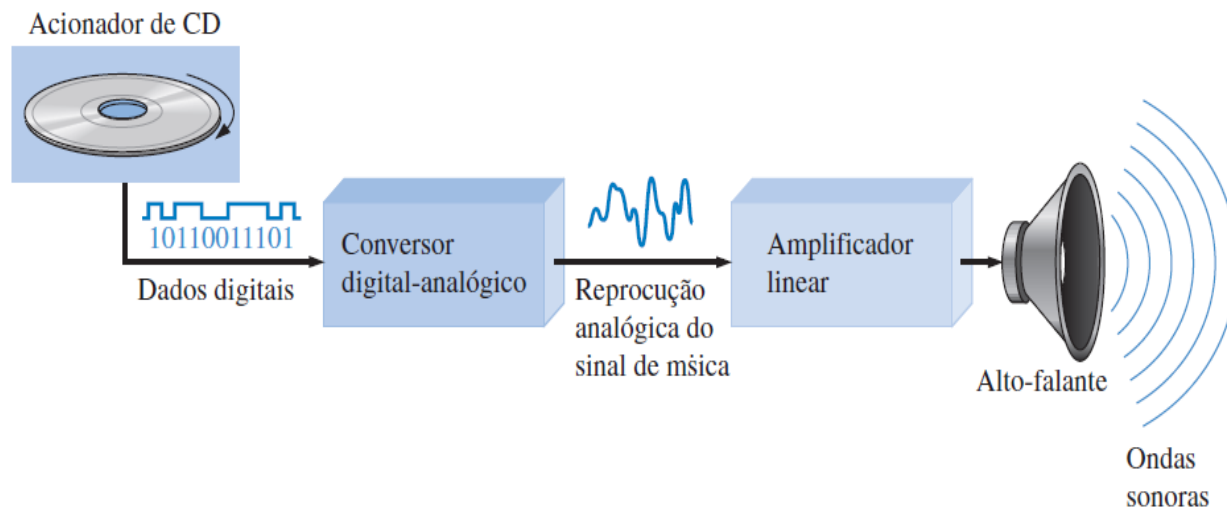






◀ **FIGURA I-3**

Um sistema básico de amplificação de áudio.

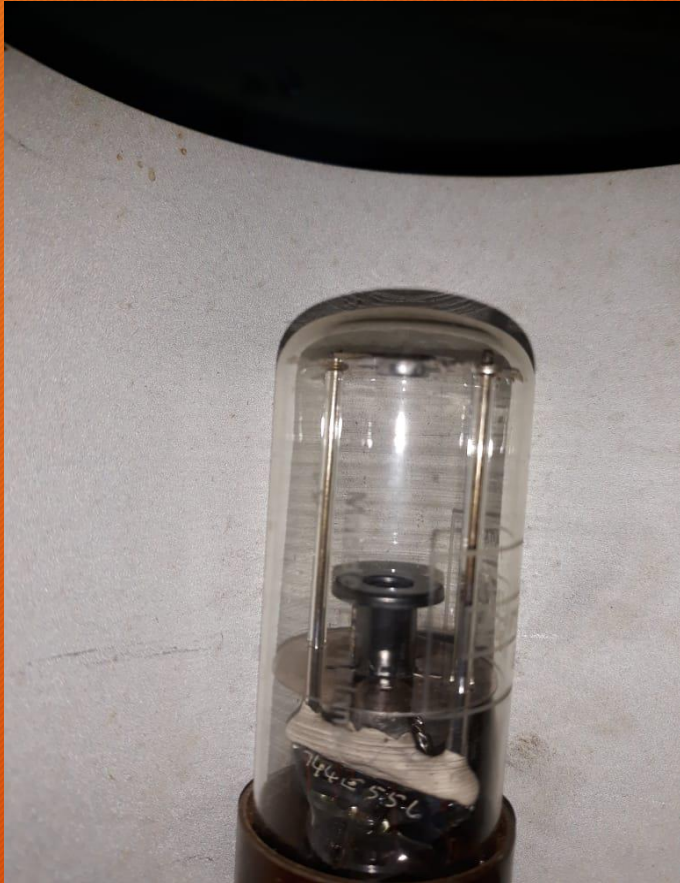


◀ **FIGURA I-4**

Diagrama em bloco básico de um aparelho de CD. Apenas um canal é mostrado.



# Exemplo aplicação da válvula



# História: Desvantagens das válvulas

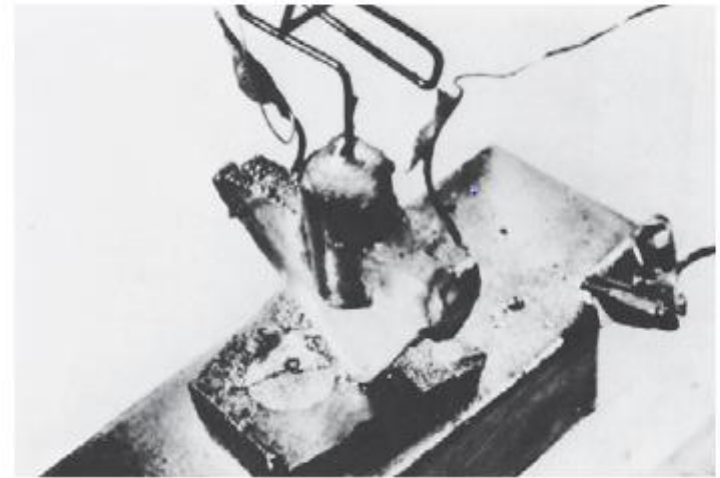
- Necessidade de operar com altas tensões;
- Necessidade de usar transformadores pesados;
- As válvulas próprias para estes equipamentos são muito caras;
- A válvula trabalha quente e uma boa parte da energia consumida pelo equipamento é para aquecê-la. Uma parte menor apenas é convertida em som;
- As válvulas são sensíveis a vibrações;
- Combinação de fatores que a tornam extremamente frágil.





# História: O primeiro TBJ

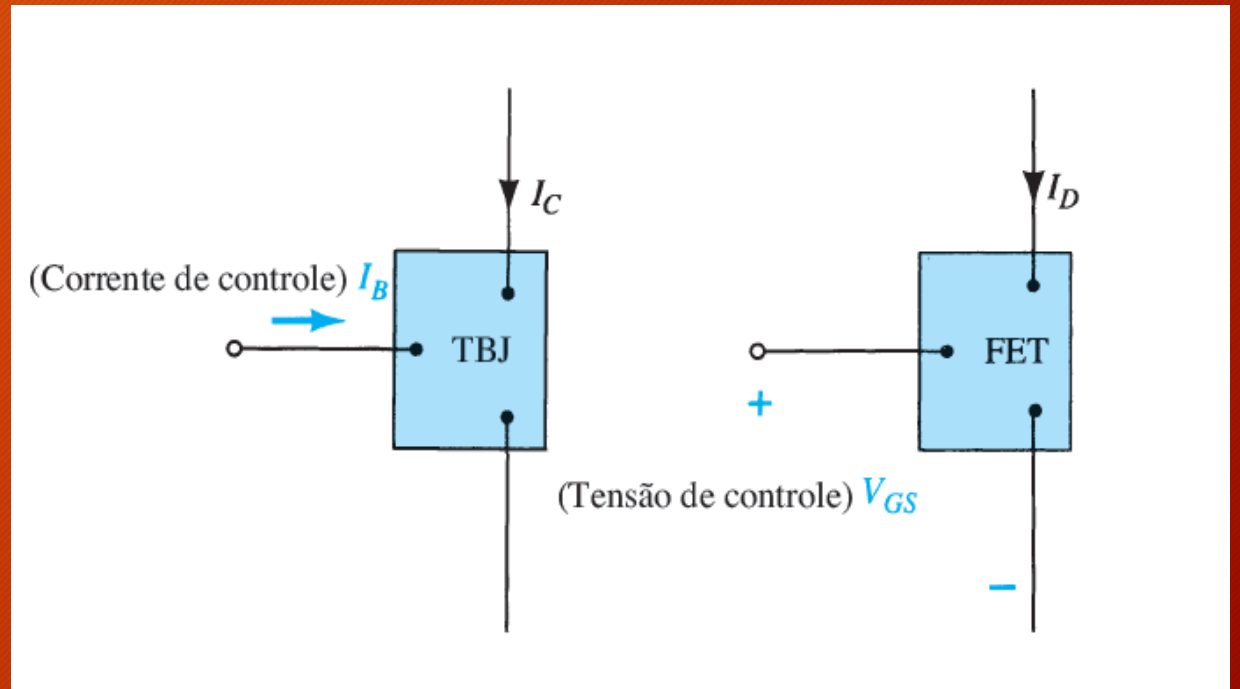
- Em 23 de dezembro de 1947, a indústria eletrônica estava prestes a experimentar um redirecionamento de interesse e desenvolvimento.
- William Shockley, Walter H. Brattain e John Bardeen demonstraram a função de amplificação do primeiro transistor na Bell Telephone Laboratories.



**Figura 3.2** O primeiro transistor. (Cortesia da AT&T Archives and History Center.)

# FET (*field-effect transistor*)

- TBJ é um dispositivo *bipolar* — o prefixo *bi* revela que o nível de condução é uma função de dois portadores de carga: elétrons e lacunas.
- O FET é um dispositivo *unipolar* que depende unicamente da condução de elétrons (canal *n*) ou de lacunas (canal *p*).





# FET (*field-effect transistor*)

- Alta impedância de entrada ( $>1\text{M}\Omega$ );
- *Os FETs são mais estáveis, em termos de temperatura, e normalmente são menores do que os TBJs, o que os torna particularmente úteis na construção de chips de circuitos integrados (CIs).*
- *Os ganhos de tensão CA dos amplificadores TBJ são geralmente muito maiores do que aqueles com FET.*

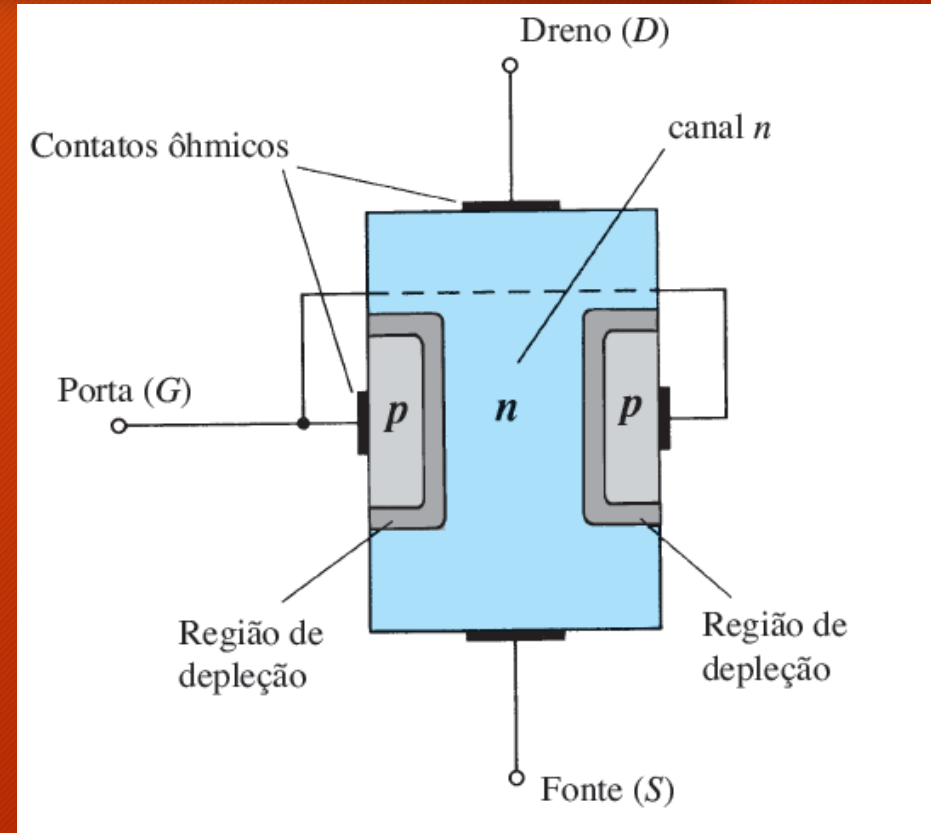
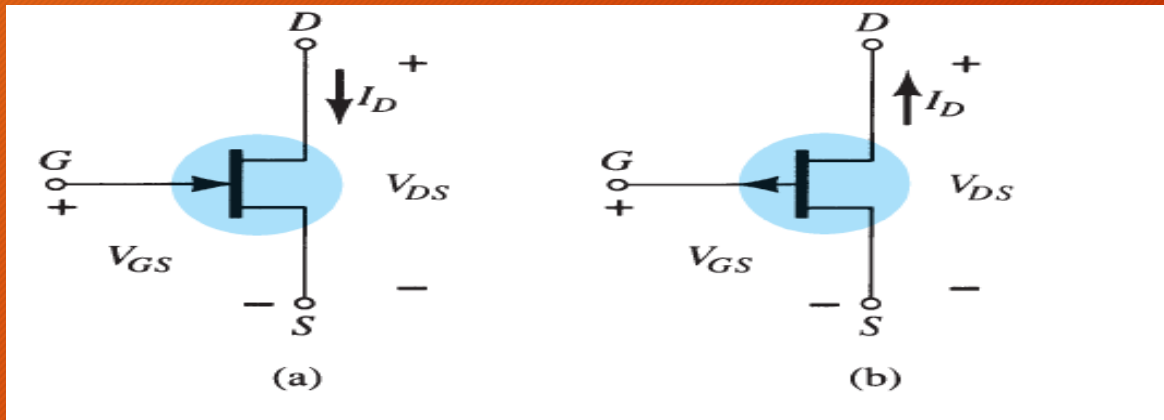


**Figura 6.2** Desenvolvimento inicial do transistor de efeito de campo. (Cortesia de AT&T Archives and History Center.)

Os doutores Ian Munro Ross (à frente) e G. C. Dacey desenvolveram juntos um procedimento experimental para medir as características de um transistor de efeito de campo em 1955.

# JFET: Transistor de efeito de campo de junção

- A região ativa de um JFET é entre  $V_P$  e  $V_{DS}(\text{máx})$ . A tensão mínima  $V_P$  é chamada de **tensão de estrangulamento (pinch-off)** ou **tensão de constrição** e a tensão máxima  $V_{DS}(\text{máx})$  é a *tensão de ruptura*. Entre o estrangulamento e a ruptura, o JFET funciona como uma fonte de corrente de aproximadamente  $I_{DSS}$  quando  $V_{GS} = 0$ .

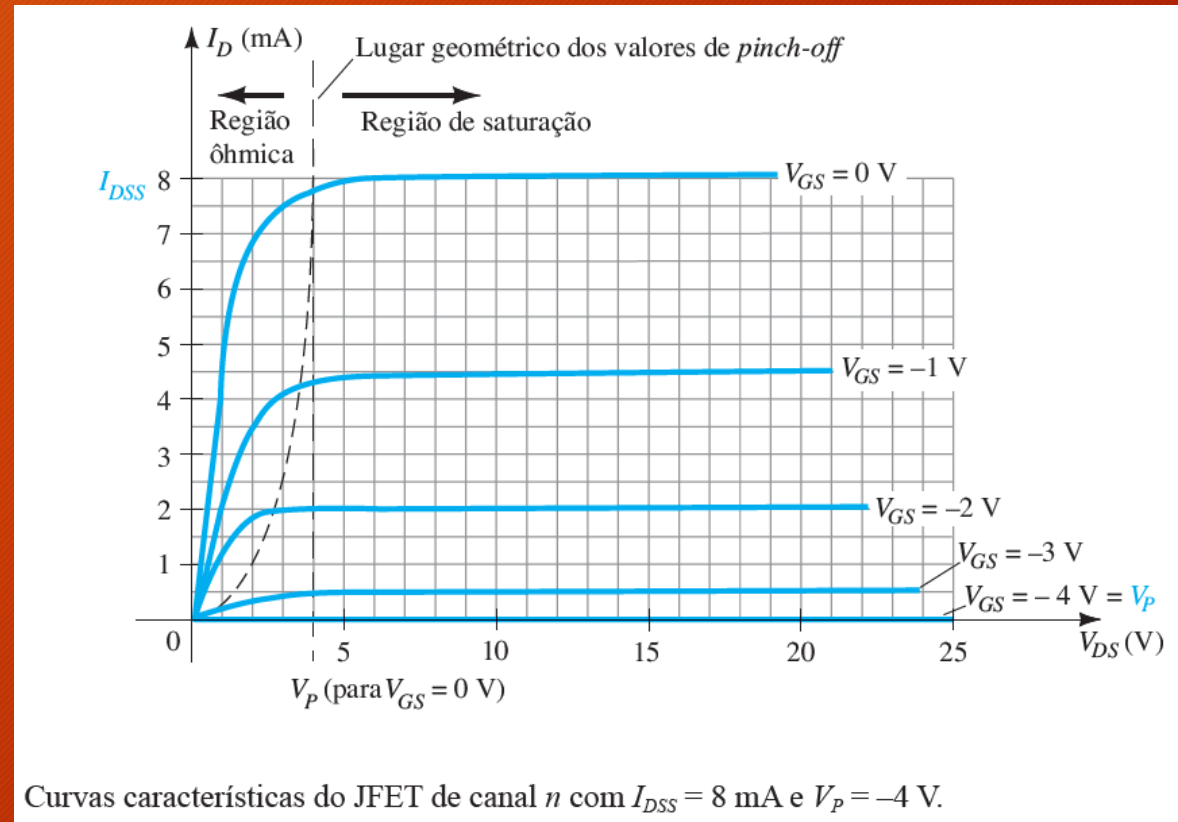




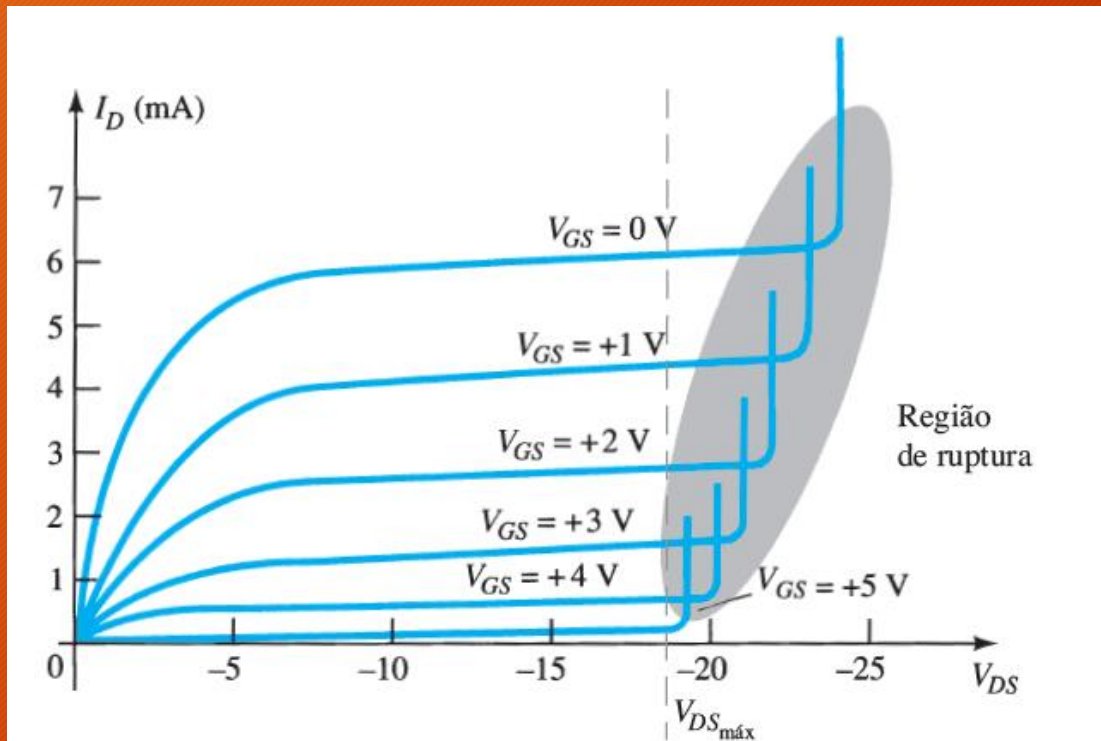
# JFET: Transistor de efeito de campo de junção

- A região quase horizontal é a região ativa. A parte quase vertical da curva de dreno abaixo do estrangulamento é chamada de **região ôhmica**. Quando operando na região ôhmica, um JFET é equivalente a um resistor com um valor aproximado de:

$$R_{DS} = \frac{V_P}{I_{DSS}}$$



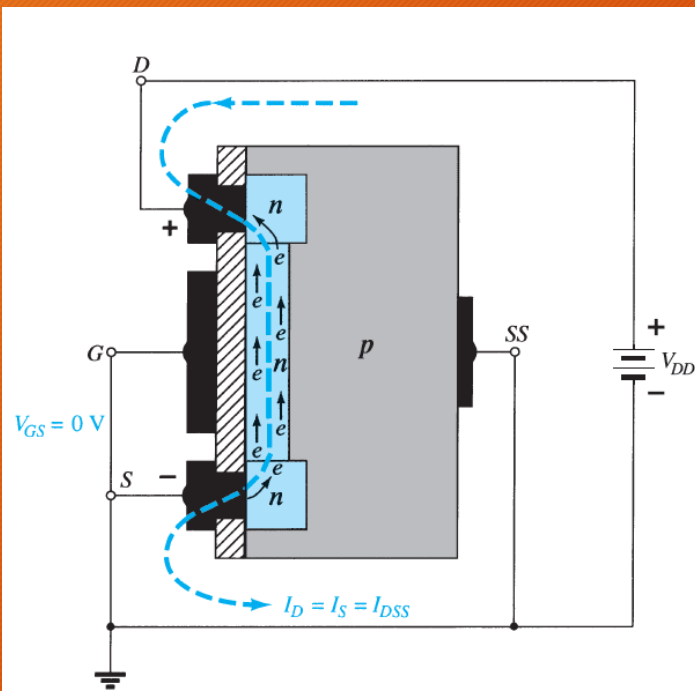
# JFET: Transistor de efeito de campo de junção



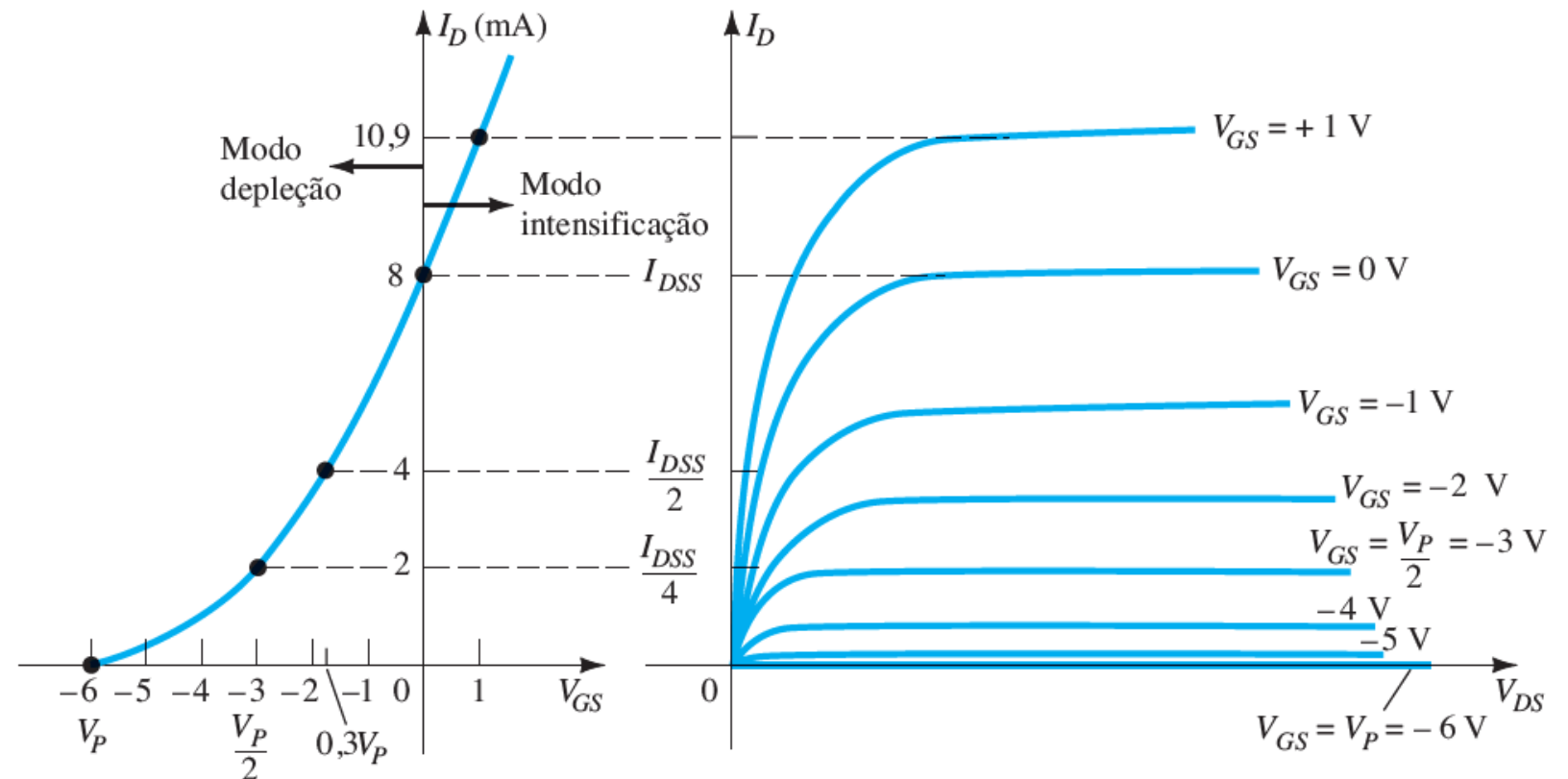
**Figura 6.13** Curvas características do JFET de canal  $p$  com  $I_{DSS} = 6$  mA e  $V_P = +6$  V.



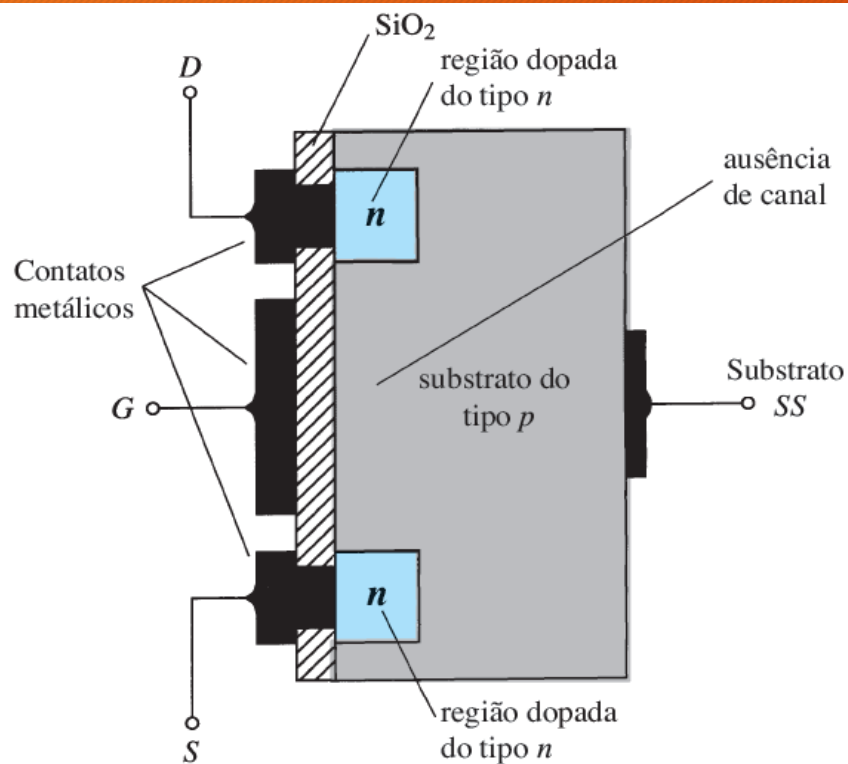
# MOSFET-D: *Transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor*



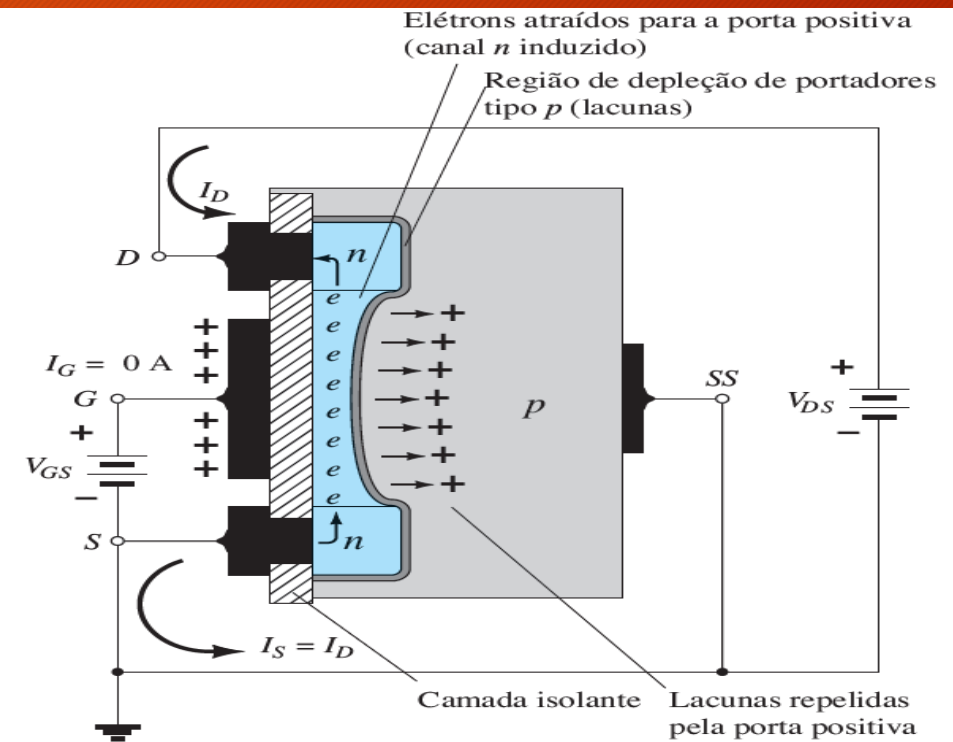
**Figura 6.25** MOSFET tipo depleção de canal  $n$  com  $V_{GS} = 0$  V e uma tensão  $V_{DD}$  aplicada.



# MOSFET-E: *Transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor*



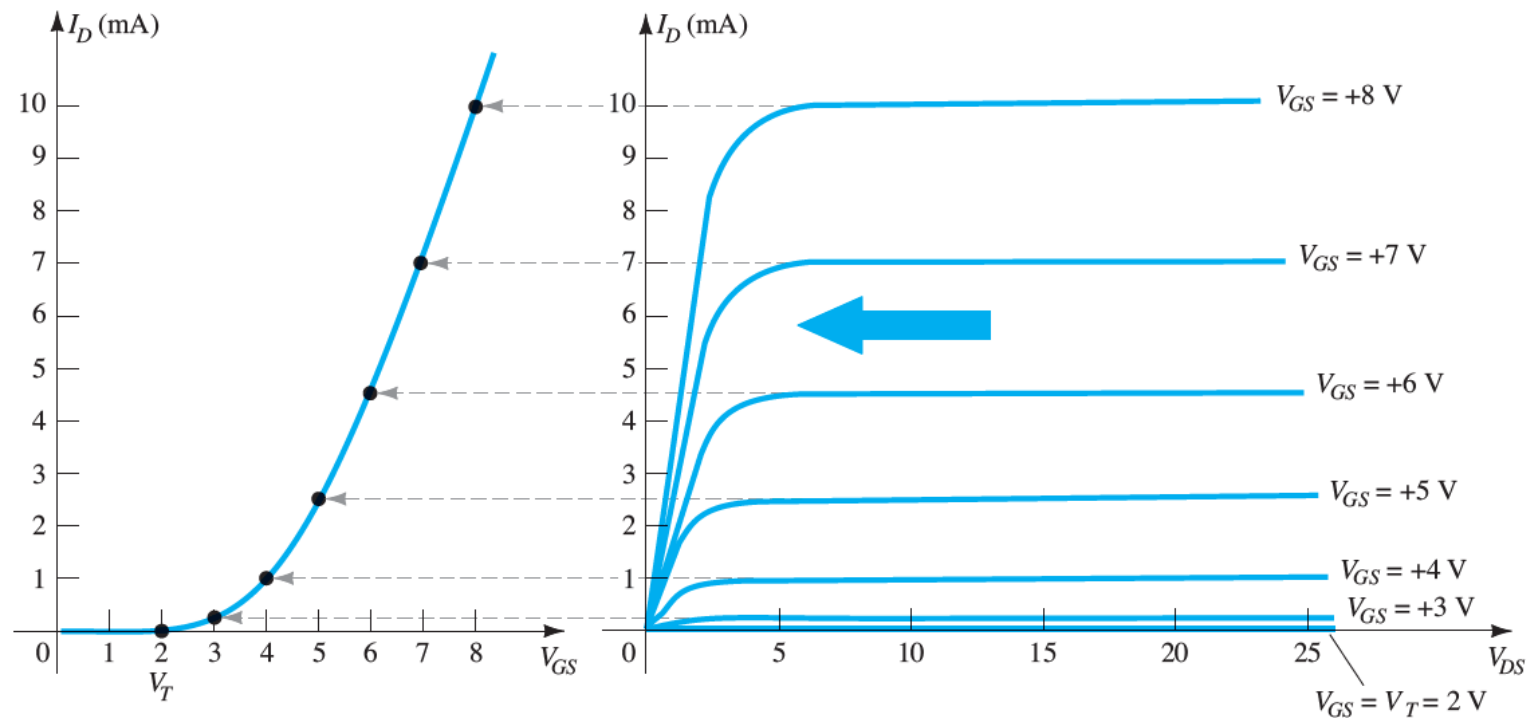
**Figura 6.32** MOSFET tipo intensificação de canal  $n$ .



**Figura 6.33** Formação do canal no MOSFET tipo intensificação de canal  $n$ .

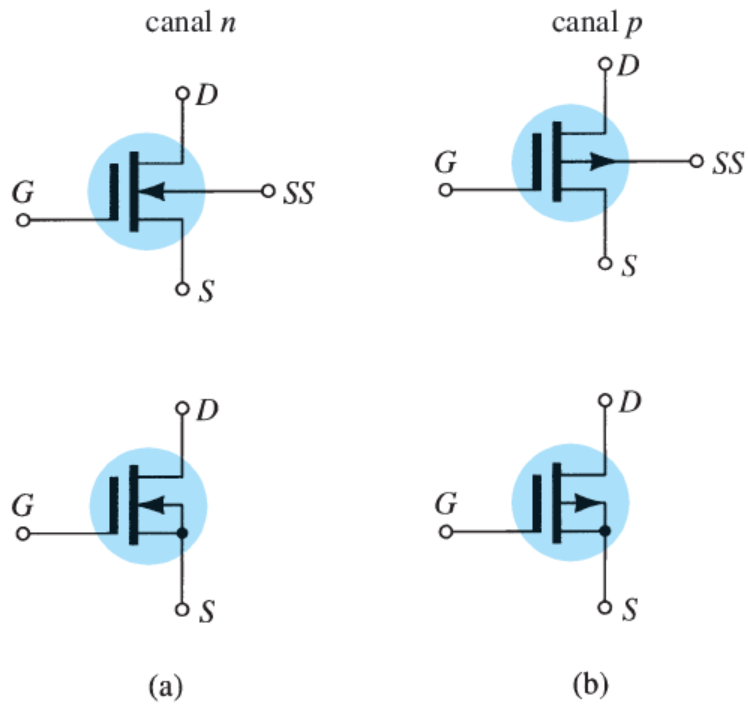


# MOSFET-E: *Transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor*

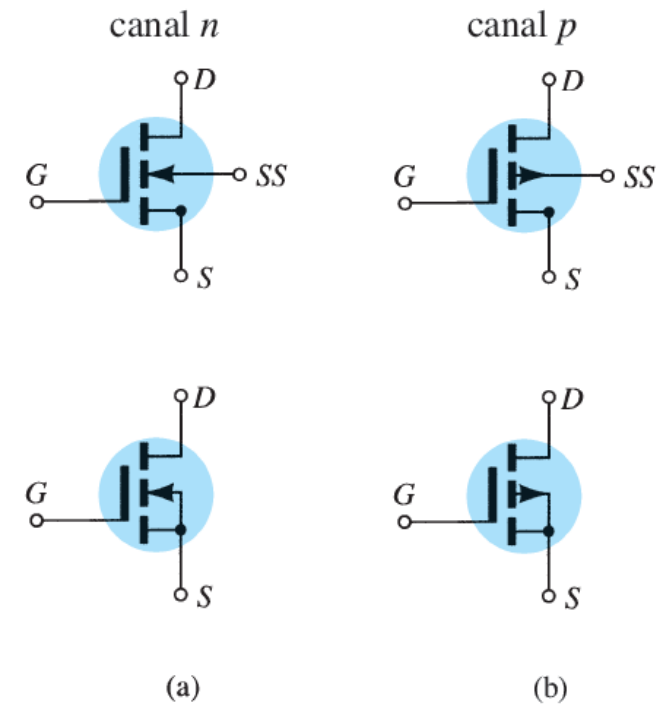


**Figura 6.36** Esboço da curva característica de transferência de um MOSFET tipo intensificação de canal  $n$  a partir das curvas características do dreno.

# Simbologia do MOSFET-D e MOSFED-E no circuito



**Figura 6.30** Símbolos gráficos para (a) MOSFETs tipo depleção de canal  $n$  e (b) MOSFETs tipo depleção de canal  $p$ .



**Figura 6.39** Símbolos para (a) MOSFET tipo intensificação de canal  $n$  e (b) MOSFET tipo intensificação de canal  $p$ .



# International IR Rectifier

- Advanced Process Technology
- Dynamic  $dv/dt$  Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements

## Description

Fifth Generation HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.

The D<sup>2</sup>Pak is a surface mount power package capable of accommodating die sizes up to HEX-4. It provides the highest power capability and the lowest possible on-resistance in any existing surface mount package. The D<sup>2</sup>Pak is suitable for high current applications because of its low internal connection resistance and can dissipate up to 2.0W in a typical surface mount application.

The through-hole version (IRF640NL) is available for low-profile application.

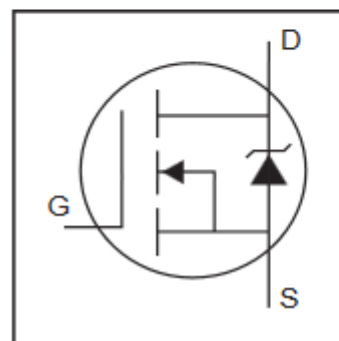
PD - 94006A

IRF640N

IRF640NS

IRF640NL

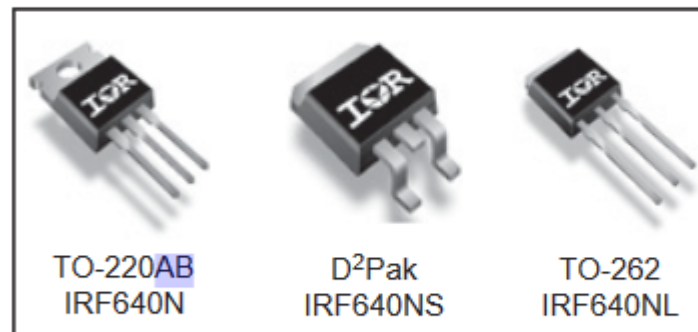
HEXFET® Power MOSFET



$$V_{DS} = 200V$$

$$R_{DS(on)} = 0.15\Omega$$

$$I_D = 18A$$



TO-220AB  
IRF640N

D<sup>2</sup>Pak  
IRF640NS

TO-262  
IRF640NL

## Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	18	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	13	
$I_{DM}$	Pulsed Drain Current ①	72	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	150	W
	Linear Derating Factor	1.0	W/°C
$V_{GS}$	Gate-to-Source Voltage	$\pm 20$	V
$E_{AS}$	Single Pulse Avalanche Energy②	247	mJ
$I_{AR}$	Avalanche Current③	18	A
$E_{AR}$	Repetitive Avalanche Energy①	15	mJ
$dv/dt$	Peak Diode Recovery $dv/dt$ ⑥	8.1	V/ns
$T_J$	Operating Junction and	-55 to +175	°C
$T_{STG}$	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds		
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw④	300 (1.6mm from case ) 10 lbf·in (1.1N·m)	

www.irf.com

1

10/08/04

## TIP120, TIP121, TIP122 (NPN); TIP125, TIP126, TIP127 (PNP)

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	TIP120, TIP125	TIP121, TIP126	TIP122, TIP127	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	60	80	100	Vdc
Collector-Base Voltage	$V_{CB}$	60	80	100	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EB}$	5.0			Vdc
Collector Current - Continuous - Peak	$I_C$	5.0 8.0			Adc
Base Current	$I_B$	120			mAdc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	65 0.52			W W/°C
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	2.0 0.016			W W/°C
Unclamped Inductive Load Energy (Note 1)	E	50			mJ
Operating and Storage Junction, Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to +150			°C



# Exemplo aplicação





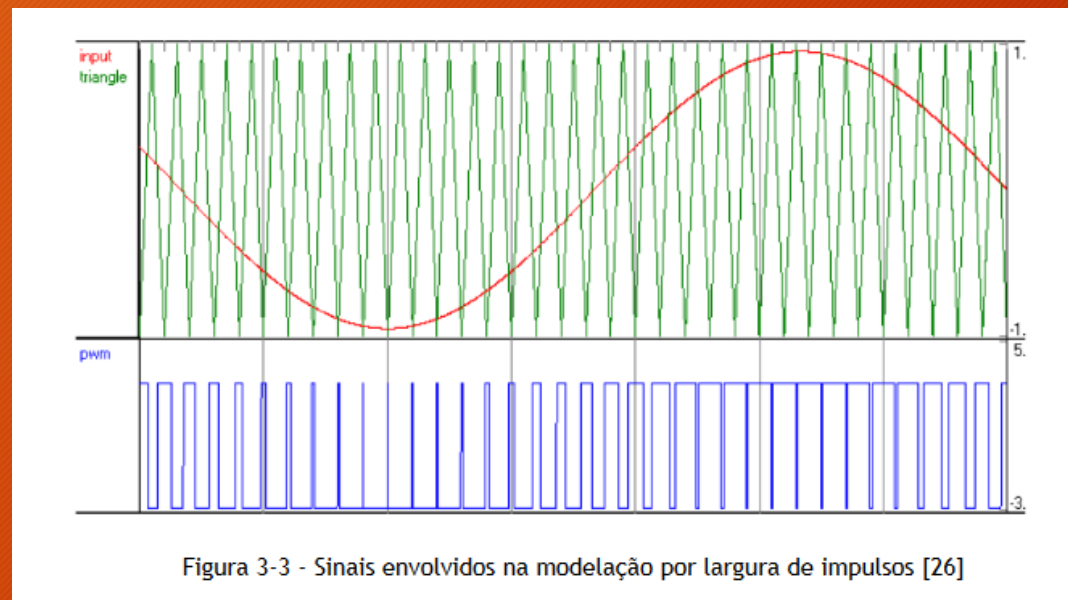
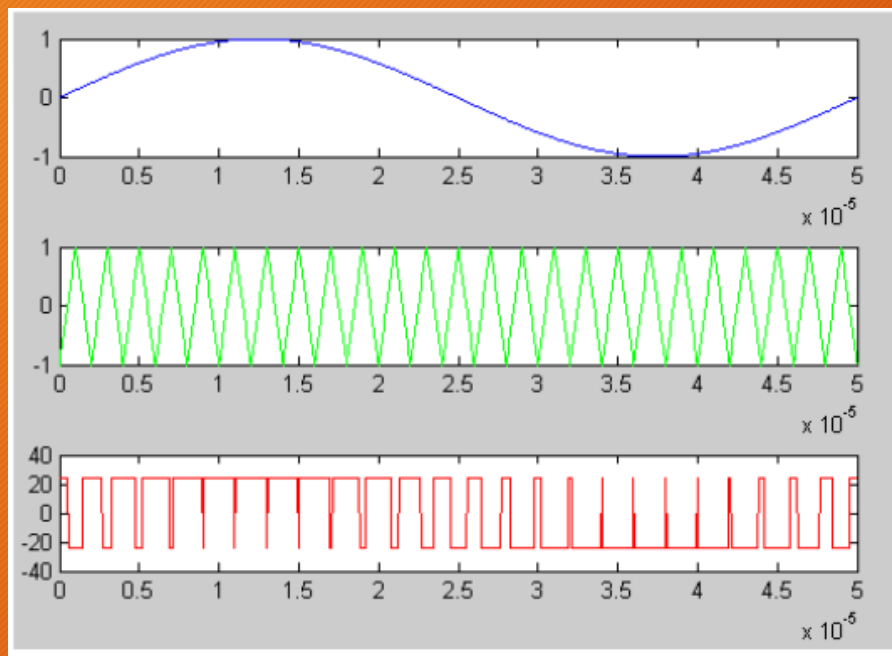
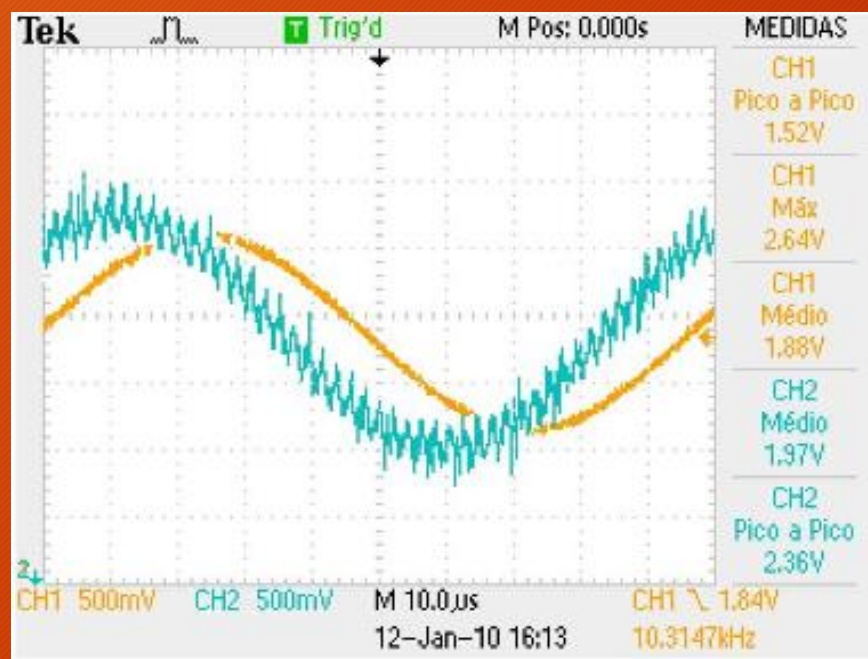
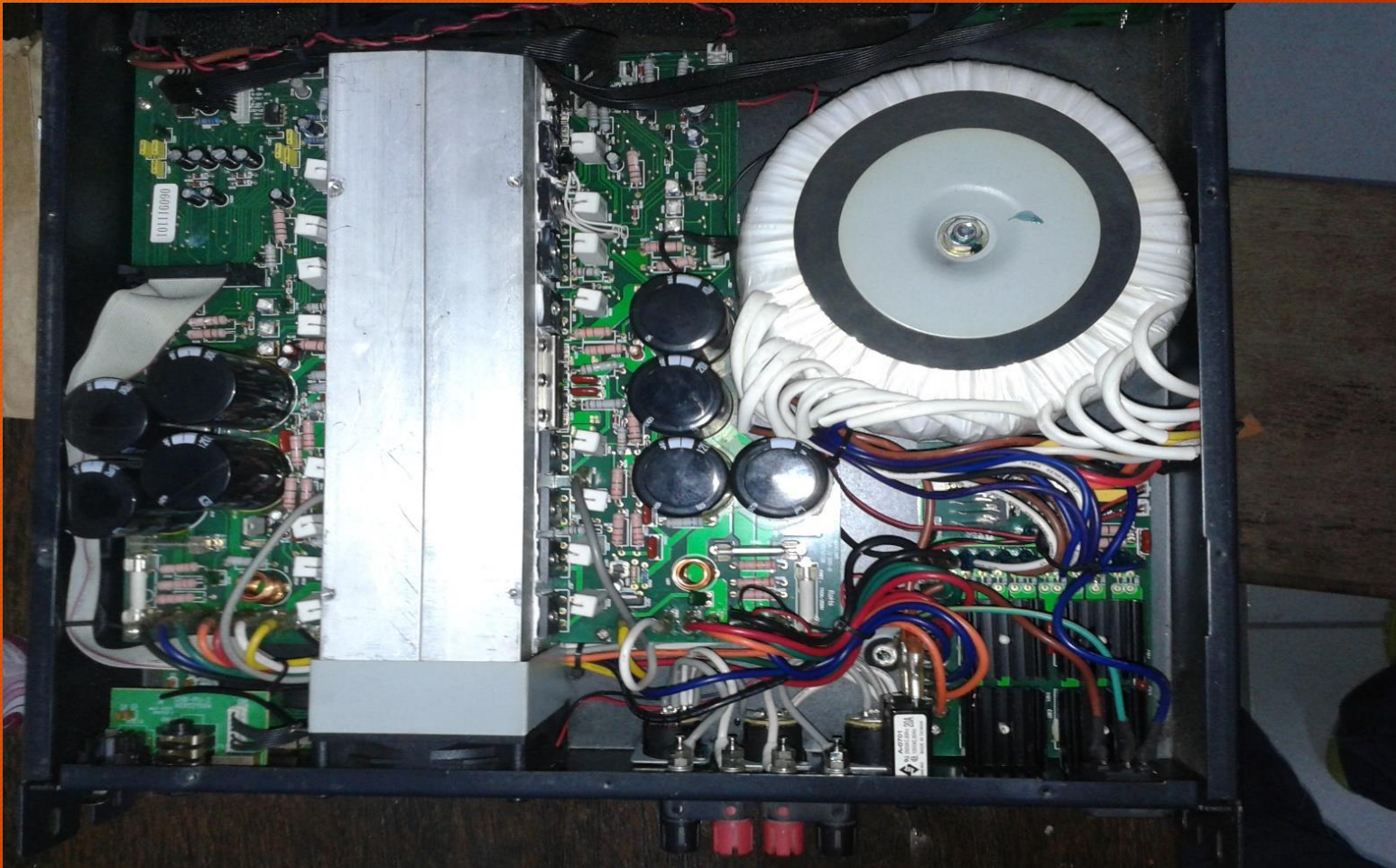


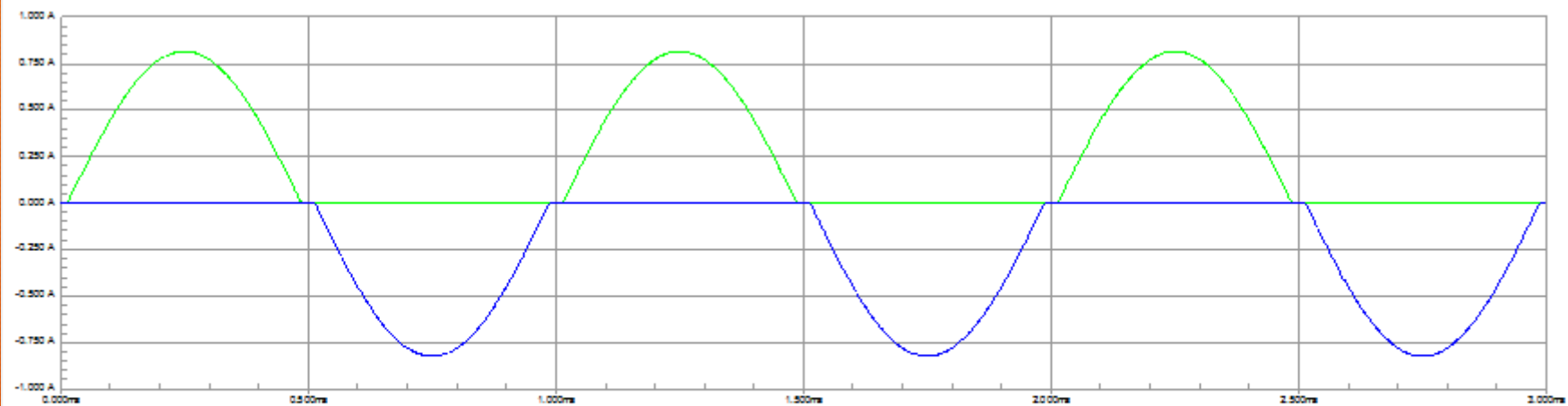
Figura 3-3 - Sinais envolvidos na modelação por largura de impulsos [26]





# Exemplo aplicação: Comparação TBJ

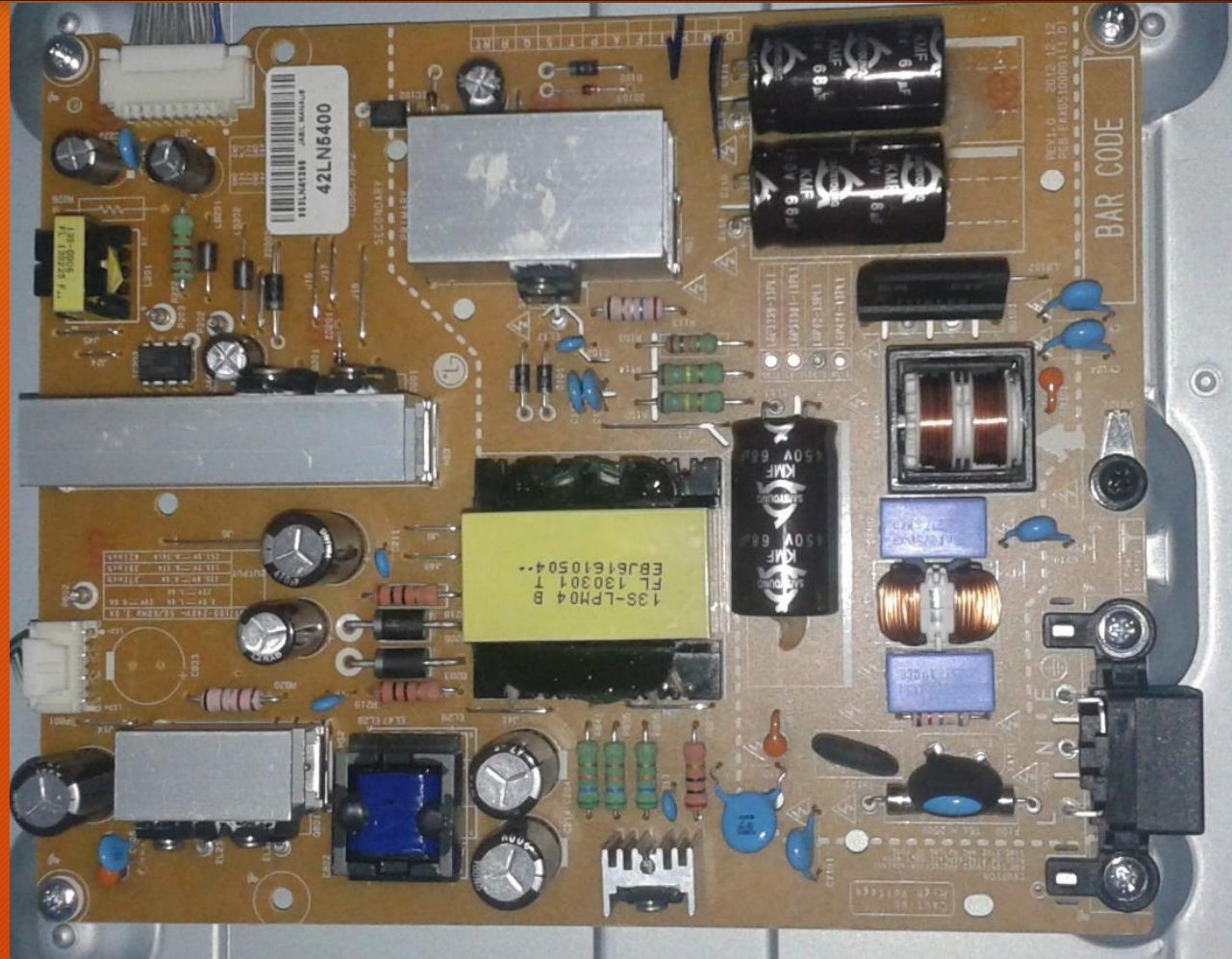




*Figura 3 – as correntes em Classe B para um sinal senoidal - em verde  $I_{s+}$  e em azul  $I_{s-}$ . Repare que as ondas são meia senóides, levemente descontinuas na passagem por zero*

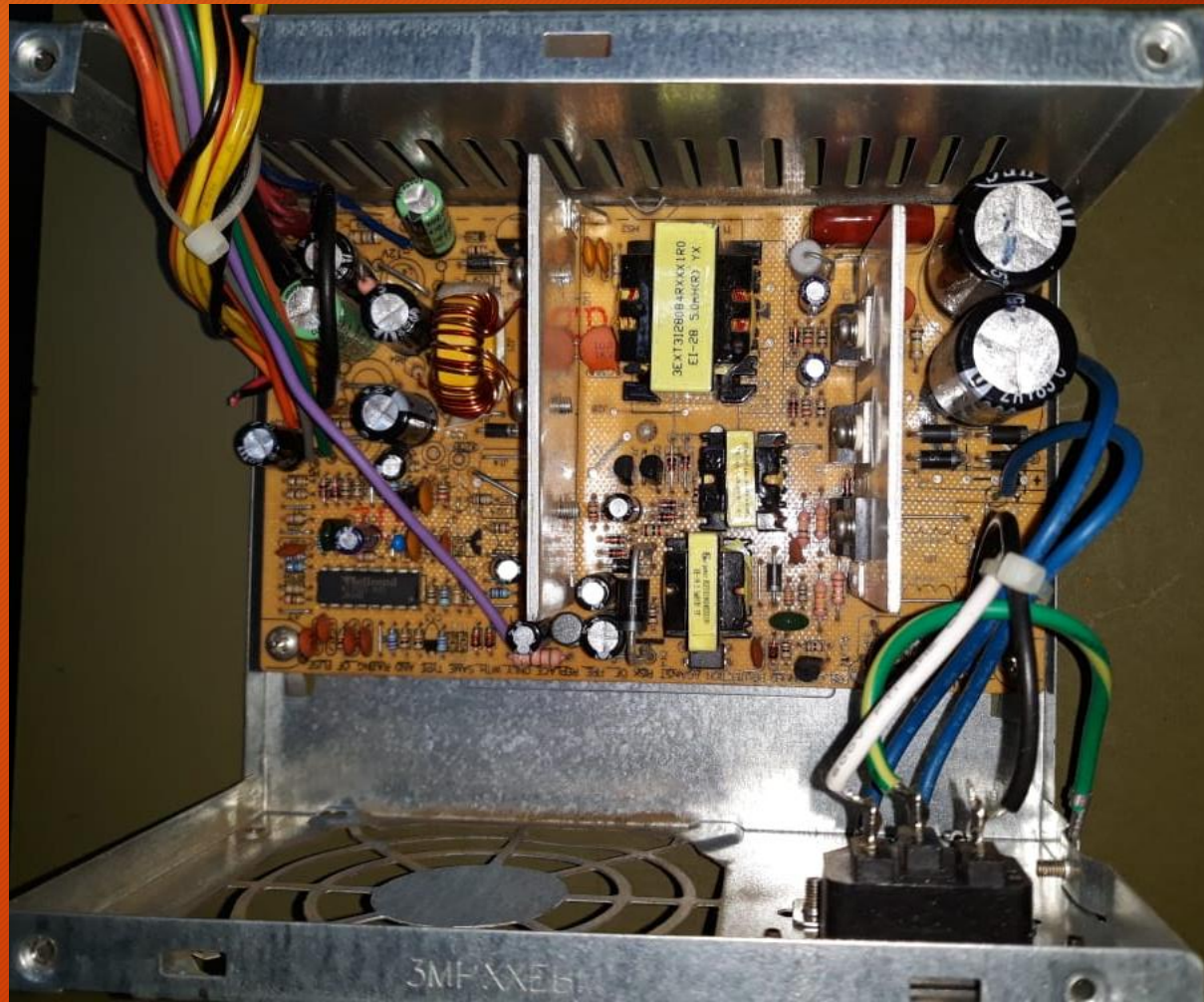


# Exemplo aplicação





# Exemplo aplicação





# Exemplo aplicação



**Advanced Power  
Electronics Corp.**

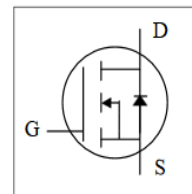
**AP85T03GH/J**

**RoHS-compliant Product**

*N-CHANNEL ENHANCEMENT MODE*

*POWER MOSFET*

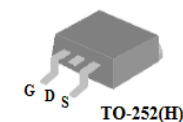
- ▼ Low Gate Charge
- ▼ Simple Drive Requirement
- ▼ Fast Switching



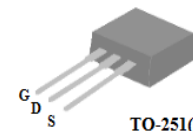
$BV_{DSS}$	30V
$R_{DS(ON)}$	6m $\Omega$
$I_D$	75A

## Description

The TO-252 package is widely preferred for all commercial-industrial surface mount applications and suited for low voltage applications such as DC/DC converters. The through-hole version (AP85T03GJ) is available for low-profile applications.



TO-252(H)



TO-251(J)



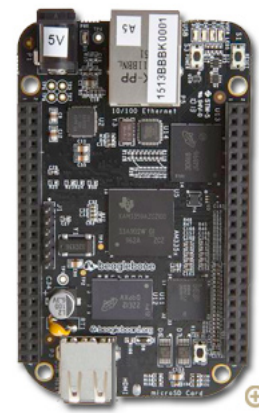


# Exemplo aplicação



## RASPBERRY PI 3 MODEL B+

1.4GHz 64-bit quad-core processor, dual-band wireless LAN, Bluetooth 4.2/BLE, faster Ethernet, and Power-over-Ethernet support (with separate PoE HAT)



## What is BeagleBone Black?

BeagleBone Black is a low-cost, community-supported development platform for developers and hobbyists. Boot Linux in under 10 seconds and get started on development in less than 5 minutes with just a single USB cable.

Processor: **AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8**

- 512MB DDR3 RAM
- 4GB 8-bit eMMC on-board flash storage
- 3D graphics accelerator
- NEON floating-point accelerator
- 2x PRU 32-bit microcontrollers

## Software Compatibility

- Debian
- Android
- Ubuntu
- Cloud9 IDE on Node.js w/ BoneScript library
- plus much more

## Connectivity

- USB client for power & communications
- USB host
- Ethernet
- HDMI
- 2x 46 pin headers

Other BeagleBone derivatives »

Purchase

Select a distributor to buy

Fork me on Uperter



Processor ↕	Transistor count ↕	Date of introduction ↕	Designer ↕	Process ↕	Area ↕
TMS 1000	8,000	1974 <sup>[3]</sup>	Texas Instruments	8,000 nm	11 mm <sup>2</sup>
Intel 4004	2,300	1971	Intel	10,000 nm	12 mm <sup>2</sup>
Intel 8008	3,500	1972	Intel	10,000 nm	14 mm <sup>2</sup>
MOS Technology 6502	3,510 <sup>[4]</sup>	1975	MOS Technology	8,000 nm	21 mm <sup>2</sup>
Motorola 6800	4,100	1974	Motorola	6,000 nm	16 mm <sup>2</sup>
Intel 8080	4,500	1974	Intel	6,000 nm	20 mm <sup>2</sup>
RCA 1802	5,000	1974	RCA	5,000 nm	27 mm <sup>2</sup>
Intel 8085	6,500	1976	Intel	3,000 nm	20 mm <sup>2</sup>
Zilog Z80	8,500	1976	Zilog	4,000 nm	18 mm <sup>2</sup>
Motorola 6809	9,000	1978	Motorola	5,000 nm	21 mm <sup>2</sup>
Intel 8086	29,000	1978	Intel	3,000 nm	33 mm <sup>2</sup>
Intel 8088	29,000	1979	Intel	3,000 nm	33 mm <sup>2</sup>
WDC 65C02	11,500 <sup>[5]</sup>	1981	WDC	3,000 nm	6 mm <sup>2</sup>
Intel 80186	55,000	1982	Intel	3,000 nm	60 mm <sup>2</sup>
Motorola 68000	68,000	1979	Motorola	3,500 nm	44 mm <sup>2</sup>
Intel 80286	134,000	1982	Intel	1,500 nm	49 mm <sup>2</sup>
WDC 65C816	22,000 <sup>[6]</sup>	1983	WDC	3000 nm <sup>[7]</sup>	9 mm <sup>2</sup>
Motorola 68020	190,000 <sup>[8]</sup>	1984	Motorola	2,000 nm	85 mm <sup>2</sup>
Intel 80386	275,000	1985	Intel	1,500 nm	104 mm <sup>2</sup>

8-core <a href="#">Xeon Nehalem-EX</a>	2,300,000,000 <sup>[29]</sup>	2010	Intel	45 nm	684 mm²
8-core <a href="#">Core i7 Haswell-E</a>	2,600,000,000 <sup>[30]</sup>	2014	Intel	22 nm	355 mm²
10-core <a href="#">Xeon Westmere-EX</a>	2,600,000,000	2011	Intel	32 nm	512 mm²
Six-core <a href="#">zEC12</a>	2,750,000,000	2012	IBM	32 nm	597 mm²
<a href="#">Apple A8X</a> (tri-core ARM64 "mobile SoC")	3,000,000,000 <sup>[31]</sup>	2014	Apple	20 nm	128 mm²
<a href="#">Qualcomm Snapdragon 835</a> (octa-core ARM64 "mobile SoC")	3,000,000,000 <sup>[32][33]</sup>	2016	<a href="#">Qualcomm</a>	10 nm	
8-core <a href="#">Itanium Poulson</a>	3,100,000,000	2012	Intel	32 nm	544 mm²
10-core <a href="#">Core i7 Broadwell-E</a>	3,200,000,000 <sup>[34]</sup>	2016	Intel	14 nm	246 mm² <sup>[35]</sup>
<a href="#">Apple A10 Fusion</a> (quad-core ARM64 "mobile SoC")	3,300,000,000	2016	Apple	16 nm	125 mm²
<a href="#">IBM z13</a>	3,990,000,000	2015	IBM	22 nm	678 mm²
12-core <a href="#">POWER8</a>	4,200,000,000	2013	IBM	22 nm	650 mm²
<a href="#">Apple A11 Bionic</a> (hexa-core ARM64 "mobile SoC")	4,300,000,000	2017	Apple	10 nm	89 mm²
15-core <a href="#">Xeon Ivy Bridge-EX</a>	4,310,000,000 <sup>[36]</sup>	2014	Intel	22 nm	541 mm²
8-core <a href="#">Ryzen</a>	4,800,000,000 <sup>[37]</sup>	2017	AMD	14 nm	192 mm²
61-core <a href="#">Xeon Phi</a>	5,000,000,000 <sup>[38]</sup>	2012	Intel	22 nm	720 mm²
<a href="#">Xbox One</a> main SoC	5,000,000,000	2013	<a href="#">Microsoft/AMD</a>	28 nm	363 mm²
18-core <a href="#">Xeon Haswell-E5</a>	5,560,000,000 <sup>[39]</sup>	2014	Intel	22 nm	661 mm²
<a href="#">IBM z14</a>	6,100,000,000	2017	IBM	14 nm	696 mm²
<a href="#">Apple A12</a> (hexa-core ARM64 "mobile SoC")	6,900,000,000 <sup>[citation needed]</sup>	2018	Apple	7 nm	
<a href="#">Xbox One X (Project Scorpio)</a> main SoC	7,000,000,000 <sup>[40]</sup>	2017	Microsoft/AMD	16 nm	360 mm² <sup>[40]</sup>
<a href="#">IBM z13 Storage Controller</a>	7,100,000,000	2015	IBM	22 nm	678 mm²
22-core <a href="#">Xeon Broadwell-E5</a>	7,200,000,000 <sup>[41]</sup>	2016	Intel	14 nm	456 mm²
<a href="#">POWER9</a>	8,000,000,000	2017	IBM	14 nm	695 mm²
72-core <a href="#">Xeon Phi</a>	8,000,000,000	2016	Intel	14 nm	683 mm²
<a href="#">IBM z14 Storage Controller</a>	9,700,000,000	2017	IBM	14 nm	696 mm²
32-core <a href="#">SPARC M7</a>	10,000,000,000 <sup>[42]</sup>	2015	Oracle	20 nm	
<a href="#">Centriq 2400</a>	18,000,000,000 <sup>[43]</sup>	2017	Qualcomm	10 nm	398 mm²
32-core <a href="#">AMD Epyc</a>	19,200,000,000	2017	AMD	14 nm	768 mm² (4 x 192 mm²)

## FPGA [\[ edit \]](#)

A **field-programmable gate array** (FPGA) is an integrated circuit designed to be configured by a customer or a designer after manufacturing.

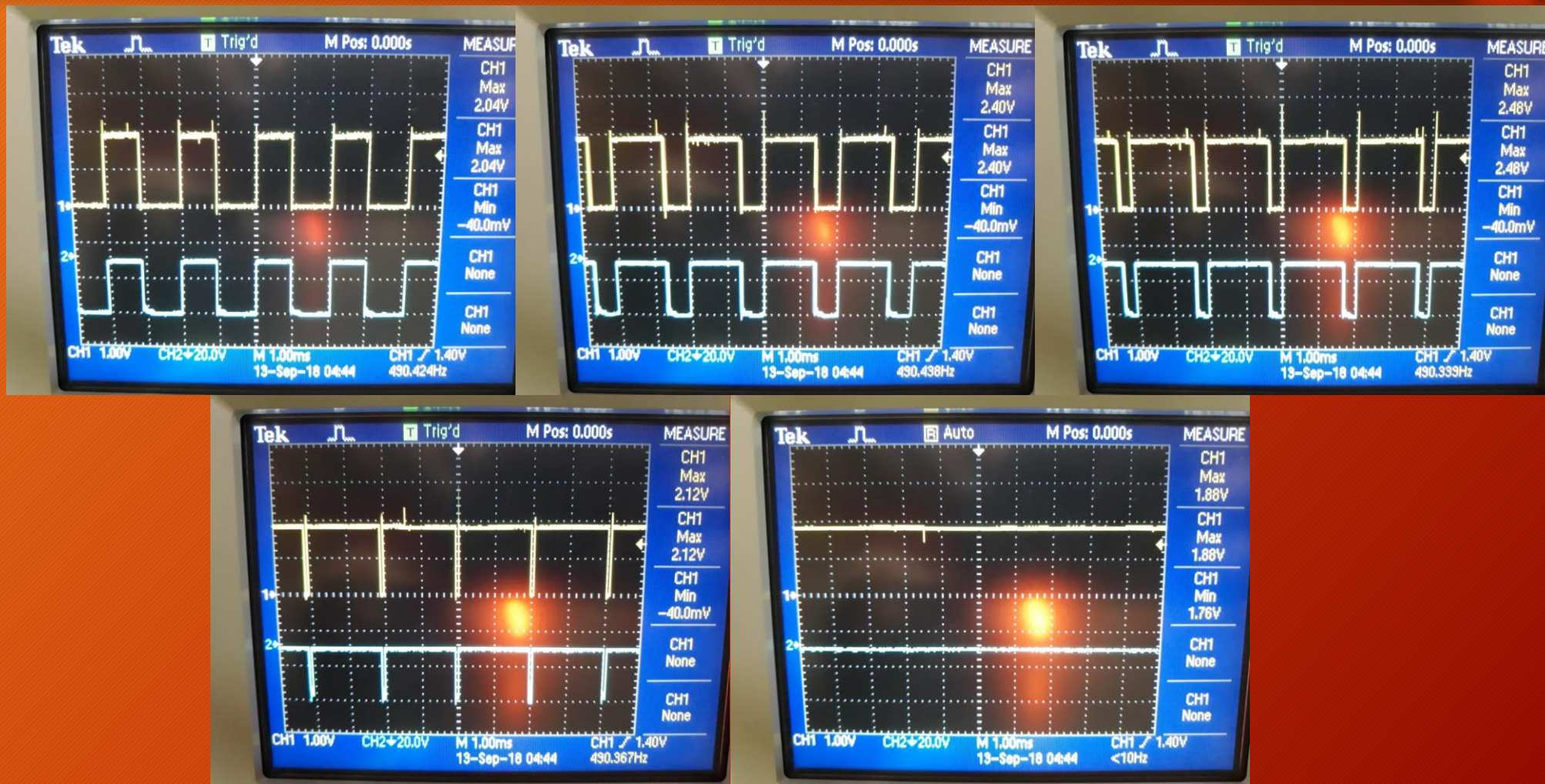
FPGA	Transistor count	Date of introduction	Manufacturer	Process	Area	Ref
Virtex	~70,000,000	1997	Xilinx			
Virtex-E	~200,000,000	1998	Xilinx			
Virtex-II	~350,000,000	2000	Xilinx	130 nm		
Virtex-II PRO	~430,000,000	2002	Xilinx			
Virtex-4	1,000,000,000	2004	Xilinx	90 nm		
Virtex-5	1,100,000,000	2006	Xilinx	65 nm		[57]
Stratix IV	2,500,000,000	2008	Altera	40 nm		[58]
Stratix V	3,800,000,000	2011	Altera	28 nm		[59]
Arria 10	5,300,000,000	2014	Altera	20 nm		[60]
Virtex-7	6,800,000,000	2011	Xilinx	28 nm		[61]
Stratix 10 Family device, 10GX5500/10SX5500	17,000,000,000	2017	Intel (formally Altera)	14 nm	560 mm²	[62]
Virtex-Ultrascale XCVU440	20,000,000,000+	2014	Xilinx	20 nm		[63]
Everest	50,000,000,000	2018	Xilinx	7 nm		[64] [65]



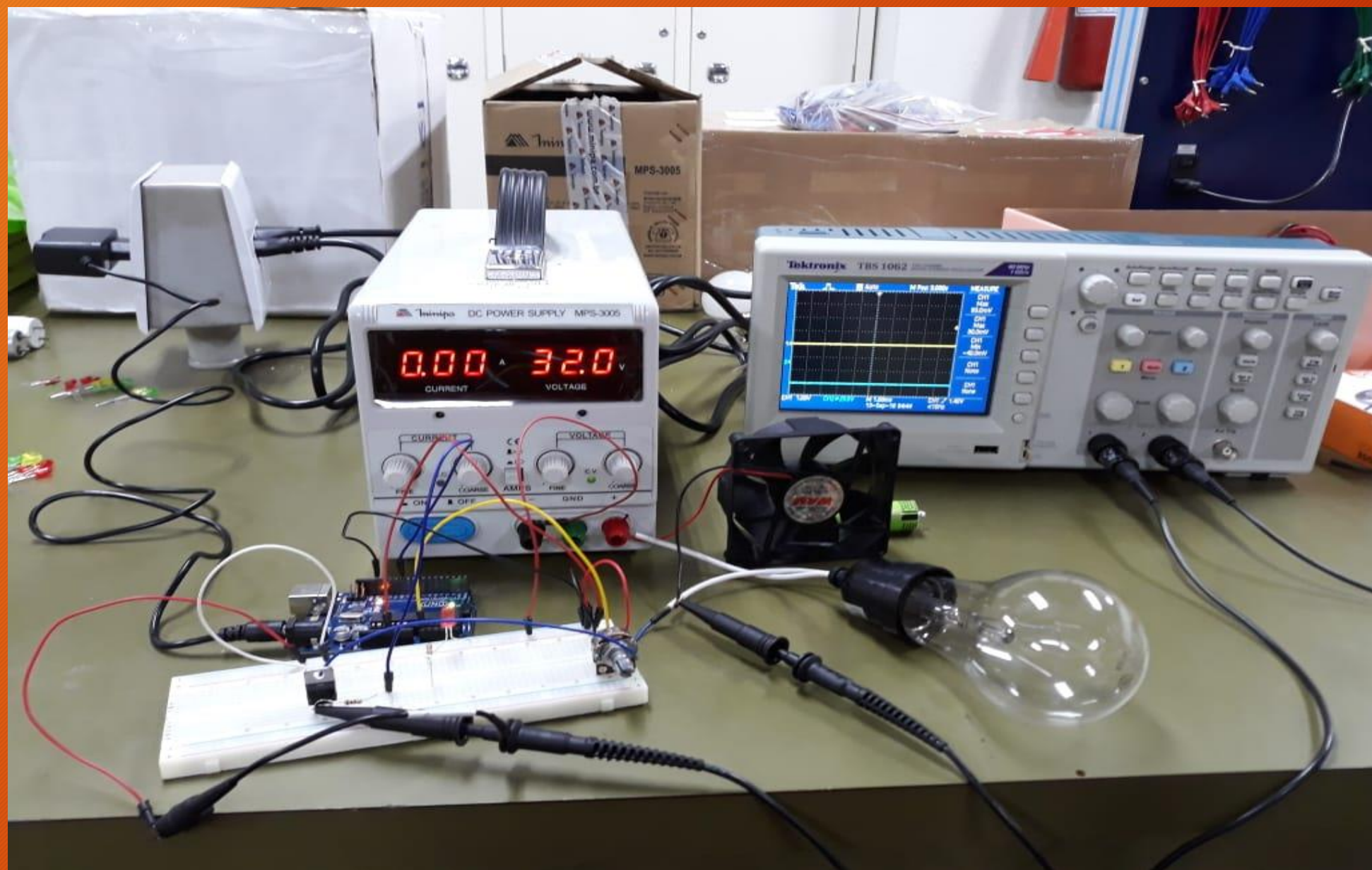
# Comparação em utilização como chave de potência

	MOSFET	IGBT	BJT
Tipo de comando	Tensão	Tensão	Corrente
Potência do comando	Mínima	Mínima	Grande
Complexidade do comando	Simples	Simples	Média
Densidade de corrente	Elevada em BT e baixa em AT	Muito elevada	Média
Perdas de comutação	Muito baixa	Baixa para média	Média para alta

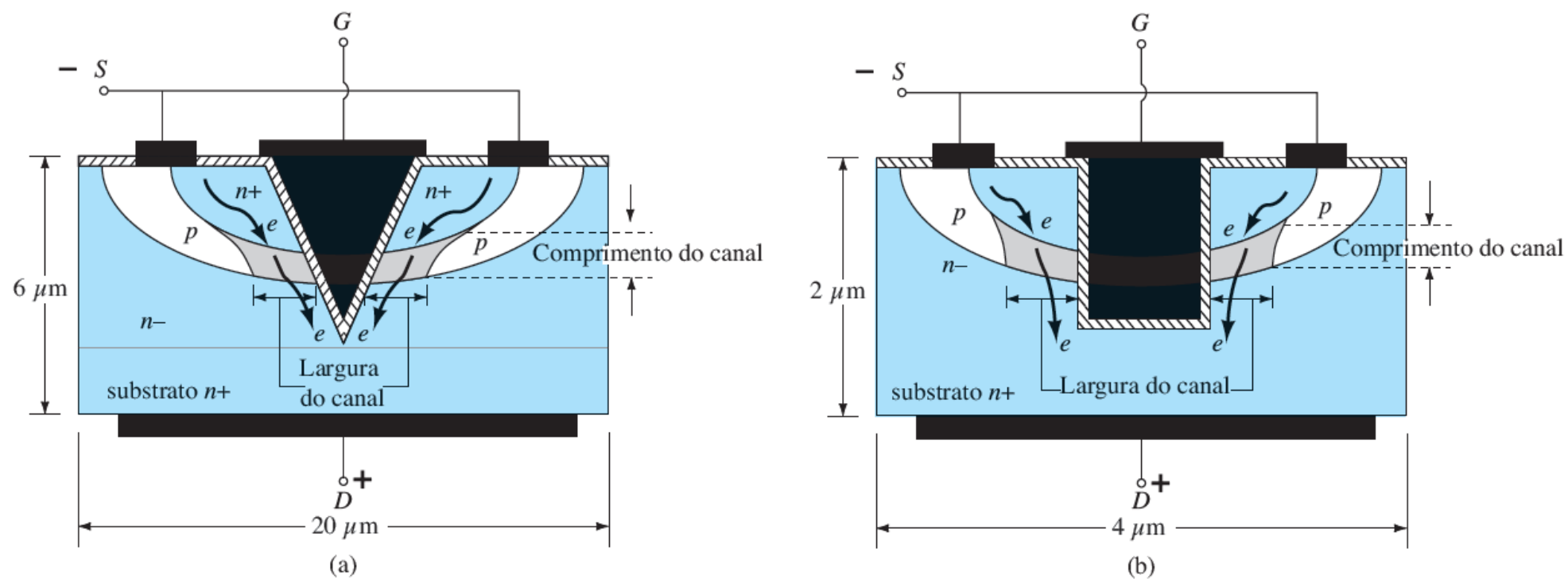
# Experimento práctico







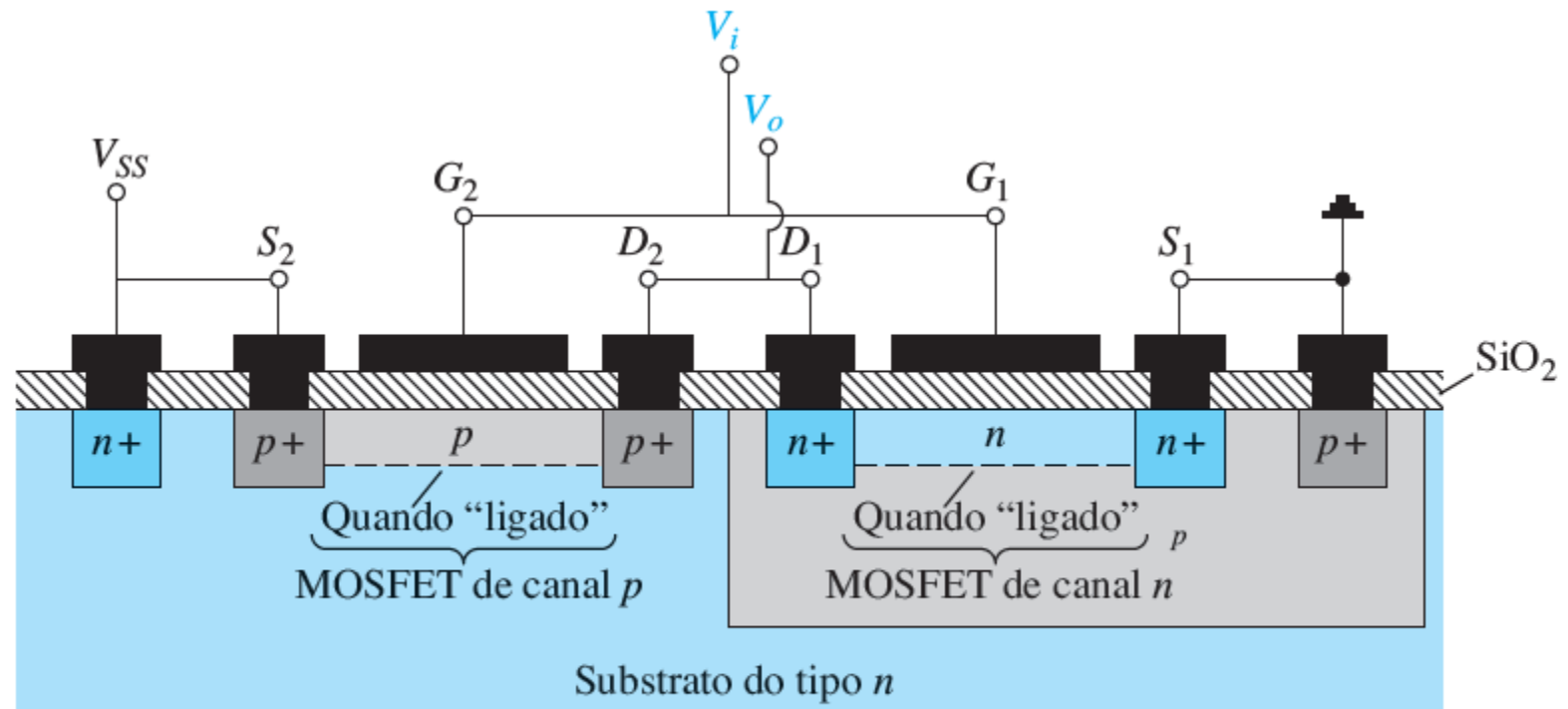
# Curiosidades: VMOS e UMOS



**Figura 6.43** (a) MOSFET VMOS; (b) MOSFET UMOS.



# Curiosidades: CMOS (MOSFET Complementar)



**Figura 6.44** CMOS com as conexões indicadas na Figura 6.45.

# Referência Bibliográfica

- MALVINO, A.; BATES, D. Eletrônica. 8ª edição.
- BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. Dispositivos eletrônicos e teorias de circuitos. 11ª edição.



# Dúvidas

