

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**A INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES: ESTRATÉGIAS,  
INOVAÇÕES E TENSÕES GEOPOLÍTICAS NA ERA DIGITAL**

**JOÃO PEDRO PINTO DIAS**

**São Carlos - São Paulo  
2025**

**JOÃO PEDRO PINTO DIAS**

**A INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES: ESTRATÉGIAS, INOVAÇÕES E  
TENSÕES GEOPOLÍTICAS NA ERA DIGITAL**

Dissertação apresentada junto ao programa de **Graduação em Engenharia Física** da **Universidade Federal de São Carlos**, como requisito parcial à obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Física**.

**Orientador:**

Prof.Dr Adenilson José Chiquito.

**São Carlos - São Paulo**

**2025**

**JOÃO PEDRO PINTO DIAS**

**A INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES: ESTRATÉGIAS, INOVAÇÕES E  
TENSÕES GEOPOLÍTICAS NA ERA DIGITAL**

Monografia apresentada ao programa de **Graduação em Engenharia Física** da **Universidade Federal de São Carlos**, como requisito à obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Física**.

**Data de aprovação:**

11/07/2025

**Banca Examinadora:**

---

**Prof.Dr Adenilson José Chiquito.**

Universidade Federal de São Carlos

---

**Prof.Dr Claudio Antonio Cardoso**

Universidade Federal de São Carlos

---

**Prof.Dr Maycon Motta**

Universidade Federal de São Carlos

Isso vai ser feito pela biblioteca depois da apresentação final

*A meu pai, mesmo não estando mais aqui, por ensinar-me na infância que os livros valem mais do que o peso dos homens.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Adenilson José Chiquito pela valiosa orientação e apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa. Aos professores do Departamento de Física da UFSCar pelos ensinamentos fundamentais para a minha formação acadêmica. Deixo uma calorosa saudação para todos os meus amigos e família, tanto os que se foram quanto os que ainda estão, que me apoiaram nesse caminho tão tortuoso da universidade, e em especial à Ingrid, por me escutar a falar tanto de microchip quanto qualquer pessoa jamais deveria ouvir.

*"Qualquer tecnologia suficientemente avançada é equivalente à mágica."*

**Arthur C. Clarke**

## RESUMO

A indústria de semicondutores, desde a invenção do transistor nos Estados Unidos em 1947, evoluiu para se tornar um dos pilares centrais da economia e da geopolítica global contemporânea. Este estudo analisa como fatores históricos, como a Guerra Fria e a corrida espacial, impulsionaram o avanço tecnológico e a produção em massa de semicondutores, destacando o papel do Vale do Silício e de empresas pioneiras como Fairchild, Texas Instruments e Intel, bem como a evolução da litografia. O trabalho explora a ascensão asiática, iniciada pelo Japão e consolidada por políticas estratégicas na Coreia do Sul e em Taiwan, culminando na liderança global da TSMC, que, sob a visão de Morris Chang e o modelo “pure-play foundry”, transformou Taiwan em epicentro da fabricação de chips avançados, responsável por mais de 60% da produção mundial e 90% dos semicondutores de ponta. A análise detalha a complexa cadeia de suprimentos, marcada pela liderança dos EUA em design, domínio asiático na manufatura e fornecimento europeu de máquinas de EUV, equipamentos críticos para gerações mais modernas de chips, e discute como essa interdependência sustenta o “Escudo de Silício” de Taiwan, conferindo-lhe papel estratégico na geopolítica global. Por fim, o estudo aborda as vulnerabilidades e tensões decorrentes da concentração produtiva em Taiwan, especialmente frente à rivalidade sino-americana, evidenciando que o controle sobre os semicondutores é hoje determinante para o equilíbrio de poder no século XXI.

**Palavras-chave:** Semicondutores; Taiwan; TSMC; Geopolítica; Vale do Silício; Transistor; Escudo de Silício.

## ABSTRACT

The semiconductor industry, since the invention of the transistor in the United States in 1947, has evolved to become one of the central pillars of the contemporary global economy and geopolitics. This study analyzes how historical factors such as the Cold War and the space race drove technological advancement and the mass production of semiconductors, highlighting the role of Silicon Valley and pioneering companies like Fairchild, Texas Instruments, and Intel, as well as the evolution of lithography. The work explores the Asian ascent, initiated by Japan and consolidated through strategic policies in South Korea and Taiwan, culminating in the global leadership of TSMC, which, under the vision of Morris Chang and the “pure-play foundry” model, transformed Taiwan into the epicenter of advanced chip manufacturing, responsible for over 60% of global production and 90% of cutting-edge semiconductors. The analysis details the complex supply chain, marked by U.S. leadership in design, Asian dominance in manufacturing, and European supply of EUV machines—critical equipment for the most modern chip generations—and discusses how this interdependence underpins Taiwan’s “Silicon Shield”, granting it a strategic role in global geopolitics. Finally, the study addresses the vulnerabilities and tensions arising from the concentration of production in Taiwan, especially in the face of U.S.-China rivalry, demonstrating that control over semiconductors is now a determining factor for the balance of power in the 21st century.

**Keywords:** Semiconductors; Taiwan; TSMC; Geopolitics; Silicon Valley; Transistor; Silicon Shield.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema da patente da válvula termoiônica. . . . .	19
Figura 2.2 – Dispositivo que utilizava o retificador do tipo bigode de gato. . . . .	20
Figura 2.3 – Esquema de um Audion, válvula termoiônica precursora dos transistores. Os componentes indicados na figura são: <b>F</b> ) cátodo, um filamento de platina aquecido; <b>G</b> ) grade de controle em formato zigue-zague; <b>P</b> ) placa (ânodo); <b>E</b> ) envelope de vidro evacuado; e <b>T</b> ) pinos terminais para conexão externa. Fonte: Adaptado de (ARMY, 1952). . . . .	21
Figura 2.4 – Primeiro computador reprogramável: ENIAC(ARMY, 1952). . . . .	23
Figura 3.1 – Primeiro transistor criado (ARMY, 1952) . . . . .	25
Figura 3.2 – Evolução dos chips e a Lei de Moore.(ROSER; RITCHIE, 2019) . . . . .	27
Figura 4.1 – Gráfico acerca da condutividade e dos tipos de material (BRUM, 2012) . . . . .	34
Figura 4.2 – Gráfico que mostra diferentes condutividades elétricas obtidas por diferentes autores para $Cu_2O$ (GUDDEN, 1924) . . . . .	35
Figura 4.3 – Particularidade das bandas em diferentes tipos de materiais. Adaptado de (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2009) . . . . .	37
Figura 4.4 – Esquema de dopagem em uma rede cristalina. (INFOESCOLA, 2025) . . . . .	38
Figura 4.5 – Resistividade em função inverso da temperatura em Ge dopado com Sb, para várias concentrações de impureza. (ASHCROFT; MERMIN, 1976) . . . . .	39
Figura 4.6 – Esquema da estrutura atômica de um semiconductor do tipo P e de suas bandas (UFPR, 2025) . . . . .	40
Figura 4.7 – Esquema da estrutura atômica de um semiconductor do tipo N e de suas bandas (UFPR, 2025) . . . . .	40
Figura 4.8 – Esquema de funcionamento da Junção PN (UNIFAI, 2025) . . . . .	40
Figura 4.9 – Curvas características I-V para diodos de germânio e silício (UNIFAI, 2025) . . . . .	41
Figura 4.10–Esquema dos transistores de junção PNP e NPN (UNIFAI, 2025) . . . . .	42
Figura 4.11–Esquema de um FET tipo N (BRAGA, 2025) . . . . .	42
Figura 4.12–Evolução dos FETs (SUN; OUTROS, 2021) . . . . .	43
Figura 4.13–Evolução da litografia nos chips ao longo do tempo. (9METERS, 2024) . . . . .	44
Figura 4.14–Esquema do tamanho de um transistor. (TRANSISTOR. . . , 2023) . . . . .	45
Figura 5.1 – Cadeia produtiva da Microeletrônica.(GUTIERREZ; LEAL, 2004) . . . . .	48
Figura 5.2 – Esquema de uma máquina de EUV.(ASML, 2025) . . . . .	53
Figura 5.3 – Mapa de Taiwan.(ISTOCK, 2025) . . . . .	53
Figura 5.4 – Estimativa do impacto mundial de uma guerra em Taiwan.(XTB, 2025) . . . . .	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TSMC	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company
DRAM	Dynamic Random Access Memory
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
EUV	Extreme Ultraviolet Lithography
LED	Light Emitting Diode
GPU	Graphics Processing Unit
CPU	Central Processing Unit
BJT	Bipolar Junction Transistor
FET	Field Effect Transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
VLSI	Very Large Scale Integration
MIT	Massachusetts Institute of Technology
ITRI	Industrial Technology Research Institute
PQDE	Planos Quinquenais de Desenvolvimento Econômico e Social

# SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	14
2	<b>ANTECEDENTE AO TRANSISTOR</b> . . . . .	17
2.1	A válvula termoiônica e o rádio . . . . .	17
2.2	O começo da computação eletrônica . . . . .	21
3	<b>ESTRATÉGIAS PIONEIRAS NO VALE DO SILÍCIO: INOVAÇÃO, PRODUÇÃO EM MASSA E CONSOLIDAÇÃO</b> . . . . .	24
3.1	O desenvolvimento inicial nos Estados Unidos: Bell Labs, Fairchild e Intel . . . . .	24
3.2	Adesão ao transistor e sua industrialização . . . . .	26
3.3	NASA e o pontapé da indústria . . . . .	28
3.4	Produção em Massa . . . . .	29
3.5	O fracasso Russo e a dominância ocidental . . . . .	31
4	<b>FUNDAMENTOS DOS SEMICONDUTORES E DA MICRO-ELETRÔNICA</b> . . . . .	33
4.1	Breve história dos semicondutores . . . . .	33
4.2	A Teoria de Bandas . . . . .	35
4.3	Dopagem . . . . .	37
4.4	Microeletônica . . . . .	39
4.4.1	A junção PN . . . . .	39
4.4.2	Transistor . . . . .	41
4.4.3	Chips: Estrutura e nomenclatura . . . . .	43
5	<b>EXPANSÃO DA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES PARA A ÁSIA</b> . . . . .	46
5.1	<b>O contexto asiático: Japão, Coreia do Sul e Taiwan</b> . . . . .	46
5.1.1	Começo pelo Japão e a importância da Sony . . . . .	46
5.1.2	O empurrão governamental na Coreia do Sul e em Taiwan . . . . .	47

<b>5.2</b>	<b>Fundação da TSMC</b> . . . . .	<b>50</b>
5.2.1	A visão de Morris Chang e a transformação da indústria local em global	51
<b>5.3</b>	<b>Relações entre Taiwan, China, Estados Unidos e Europa</b> . . . . .	<b>52</b>
5.3.1	Dependência global de semicondutores e vulnerabilidades nas cadeias de suprimento . . . . .	54
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>59</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Durante a história humana, a posse de tecnologia sempre foi a questão principal que geriu a relação de poder entre comunidades, Estados e civilizações. O matemático e teórico político inglês Thomas Hobbes, desenvolveu em *Leviatã* a tese de que embora os homens nasçam naturalmente iguais, é através do conhecimento e da organização política que os Estados se diferenciam em poder e capacidade ([HOBBS, 1651](#)). A tecnologia adquirida e utilizada era a raiz da diferença em seu tempo, forjando impérios e destruindo outros, algo que perdura até hoje.

A tecnologia e o domínio sobre ela podem ser vistos como o principal ponto de entendimento de por que civilizações foram subjugadas e dominadas por outras. Essa ideia pode ser extraída do premiado livro *Armas, Germes e Aço*, no qual o antropólogo americano Jared Diamond cita vários exemplos em que a superioridade tecnológica de um povo forneceu vantagem militar crucial em conflitos entre sociedades com graus desiguais de desenvolvimento tecnológico ([DIAMOND, 1997](#)).

Esse pensamento é sintetizado no capítulo “O poder letal do aço”, onde se demonstra como o aço foi crucial para a conquista espanhola do Império Asteca, além da importância das armas de fogo e até dos cavalos para o sucesso espanhol. Em suma, uma teia de diferentes formas de domínio tecnológico, da manufatura metalúrgica ao adestramento de equinos, foi determinante para o resultado final: a aniquilação e submissão de um povo por outro.

Nos tempos modernos, as formas de subjugação foram atualizadas. Não se concentram mais exclusivamente em guerras desenfreadas por conquistas imperiais visando território geográfico, mas no controle da tecnologia que rege nosso cotidiano. Desde a Segunda Guerra Mundial, com ápice na Guerra Fria, a competição tecnológica e a consequente corrida armamentista intensificaram-se a patamares inéditos. Dois Estados se enfrentavam em diferentes frentes e aspectos: do micro, atômico, ao macro, espacial. Embora a Guerra Fria tenha terminado, iniciou-se uma era em que a dissuasão deixou de ser apenas bélica, tornando-se predominantemente tecnológica, definindo as disputas entre potências atualmente.

Os semicondutores estão presentes em praticamente todas as máquinas eletrônicas produzidas nos últimos 40 anos, sendo diretamente proporcional o número e a complexidade dos microchips à sofisticação do produto. Um único carro moderno elétrico pode conter milhares de microprocessadores em sua constituição. Carros elétricos, celulares, mísseis

termo nucleares, aparelhos médicos, todos esses dispositivos dependem de microprocessadores à base de silício, a invenção mais importante da modernidade, que vem mudando a vida humana de forma exponencial nas últimas décadas.

Para uma entidade tecnológica tão primordial nos dias de hoje, entender não apenas seu funcionamento, mas também sua origem, modo de fabricação e as circunstâncias envolvidas, não é mais uma curiosidade banal, mas uma necessidade. Afinal, conforme argumenta Jared Diamond, as ferramentas tecnológicas não só revolucionam o cotidiano como também determinam as trajetórias de conquista e influência nas civilizações humanas (DIAMOND, 1997). Quem decifra a tecnologia que remodela o presente detém, assim, uma chave para compreender a direção das mudanças que virão.

Serão abordadas as pessoas, empresas e centros de pesquisa que mudaram a concepção de mundo a partir da criação do transistor, seguido de sua lapidação para uso comercial e militar, até a criação de um mercado civil então inexistente. Nomes como Bell Labs, Fairchild e Texas Instruments, pouco conhecidos atualmente, mas outrora pilares de mudanças monumentais na tecnologia eletrônica, até os atuais gigantes industriais como Intel, Qualcomm, NVIDIA, IBM, entre outros.

A criação dessas empresas seguiu uma dança industrial e política tecida em um mesmo contexto, visando diferentes visões e pragmatismos, que acabaram por definir seu sucesso ou fracasso, expandindo seus mercados e levando seus nomes aos mais diversos cantos do planeta, iniciando um movimento globalista do mercado que levaria décadas para se consolidar e ser assim denominado.

A partir da necessidade de estudar os meandros que formam a cadeia de produção de microchips, é necessário olhar atentamente para um contexto geopolítico que emerge há 50 anos, convergindo em muitas decisões políticas e mercadológicas para a criação do cenário atual. Nesse contexto, uma pequena ilha de 23 milhões de habitantes, a apenas 180 quilômetros da China continental, emerge em silencioso e cauteloso esplendor.

Craig Addison, em seu livro *Silicon Shield: Taiwan's Protection Against Chinese Attack*, cunhou o termo “Escudo de Silício”, referindo-se ao fato de Taiwan deter 64% da produção global de semicondutores, com a Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) controlando 92% dos chips mais avançados (ADDISON, 2001).

Tal condição fornece uma proteção invisível, não baseada em poder bélico direto, mas em sua capacidade dissuasiva de deter um recurso tão importante que o menor distúrbio, seja um problema logístico, desastre natural, conflito bélico ou questões de saúde pública, causaria não apenas perturbações nos países envolvidos, mas também um

desastre econômico global, afetando todas as economias do mundo indistintamente. Do maior ao menor, do desenvolvido ao subdesenvolvido, do chinês ao americano, toda a rede industrial global, construída ao longo dos últimos 50 anos, poderia ruir, causando prejuízos estimados em 10 trilhões de dólares, cerca de cinco vezes o PIB brasileiro.

Este trabalho tem como objetivo ser uma fonte de informação concisa e objetiva, contextualizando o surgimento do transistor e do microchip e como uma ilha que não participou dos inventos ocorridos nos Estados Unidos, corroboraram para a invenção do transistor e, conseqüentemente, dos microchips, sem recursos naturais e em meio a uma instabilidade política regional, tornou-se não apenas uma potência, mas a controladora da indústria mundial de microchips.

Será adotada uma metodologia baseada em revisões bibliográficas e análise de dados históricos e econômicos, em uma estrutura dividida em três principais áreas: a histórica, com as estratégias das mais diferentes frentes que formaram a indústria atual; a técnica, com uma breve explicação sobre os microchips, seu funcionamento, fabricação e aplicações; e a geopolítica, com os conflitos em seus variados âmbitos, do econômico ao bélico.

Por conseguinte, busca-se esclarecer e desvendar os elementos históricos, técnicos e geopolíticos que moldaram Taiwan como uma superpotência na indústria mundial de semicondutores, destacando sua importância para a estruturação econômica e tecnológica mundial, tanto atual quanto futura.

## 2 ANTECEDENTE AO TRANSISTOR

A indústria de semicondutores atual é ampla e tecnologicamente avançada, sendo considerada a mais vital e produtiva para o funcionamento do mundo hiperconectado, baseado em eletrônicos e suas inúmeras aplicações. A produção anual de chips é estimada em cerca de um sextilhão de transistores, ou seja, 1 seguido por 21 zeros, unidade mínima de cada chip. Para ilustrar, o chip mais avançado da NVIDIA, empresa americana especializada em GPUs (graphics processing units), o Nvidia Blackwell B200 GPU, inclui 208 bilhões de transistores.

O desenvolvimento e o estabelecimento de uma indústria tão tecnológica e avançada dependeram de uma série de acontecimentos e transformações, cujos primeiros passos remontam ao século XIX.

### 2.1 A VÁLVULA TERMOIÔNICA E O RÁDIO

Antes da invenção dos microchips e do próprio transistor, utilizava-se um dispositivo que, embora hoje seja considerado rudimentar, foi o pilar da fundação tanto da eletrônica quanto da computação: o tubo de vácuo. O início da trajetória da tecnologia dos semicondutores ocorreu em um ramo que, apesar de estar caindo em desuso pelo público em geral, foi essencial para seu desenvolvimento: o rádio. Esta tecnologia agregou diversos avanços realizados entre o final do século XIX e o início do século XX, impulsionando descobertas que impactaram muitos ramos da ciência, como a eletrônica e, crucialmente, a própria tecnologia de semicondutores.

A válvula termoiônica é um dispositivo eletrônico patenteado pelo físico britânico John Ambrose Fleming (1849–1945). O aparelho baseia-se no efeito termiônico, também conhecido como efeito Edison, no qual se observa um aumento substancial do fluxo de elétrons de um metal devido ao aumento da temperatura.

O efeito termiônico, fundamenta-se na mecânica quântica e na teoria da função trabalho dos materiais. Quando um material condutor é aquecido, a energia térmica fornecida aos elétrons livres pode superar a barreira de potencial na superfície do material, conhecida como função trabalho ( $\phi$ ), permitindo que esses elétrons escapem para o vácuo.

Do ponto de vista da mecânica quântica, a emissão termiônica pode ser compreendida através do modelo de elétrons livres em um metal. Os elétrons de condução ocupam estados energéticos até o nível de Fermi ( $E_F$ ) a temperaturas próximas ao zero absoluto. Com o aquecimento, alguns elétrons adquirem energia suficiente para superar a barreira

de potencial na superfície.

A probabilidade de um elétron com energia  $E$  superar a barreira é dada pela função de distribuição de Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/k_B T}} \quad (1)$$

A integração desta função sobre todos os estados energéticos disponíveis fornece a base teórica para a equação de Richardson-Dushman, a qual descreve a densidade de corrente termiônica: (RICHARDSON, 1916)

$$J = A_G T^2 e^{-\phi/k_B T} \quad (2)$$

onde:

- $J$  é a densidade de corrente termiônica ( $\text{A}/\text{m}^2$ )
- $A_G$  é a constante de Richardson-Dushman (aproximadamente  $1,2 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ )
- $T$  é a temperatura absoluta (K)
- $\phi$  é a função trabalho do material (eV)
- $k_B$  é a constante de Boltzmann ( $8,617 \times 10^{-5} \text{ eV}/\text{K}$ )
- $e$  é a base do logaritmo natural

Para temperaturas típicas de operação das válvulas termiônicas (aproximadamente 2500-3000 K), a função trabalho do tungstênio ( $\phi \approx 4,5 \text{ eV}$ ) permite uma emissão significativa de elétrons. A dependência exponencial da temperatura explica por que pequenas variações na temperatura do filamento resultam em grandes mudanças na corrente termiônica.

Foi primeiramente observado em 1880 pelo empresário americano Thomas Edison (1841–1931), que testou vários bulbos com dois filamentos de carbono. Ele percebeu que, ao aquecer um filamento, o outro recebia corrente. No entanto, Edison não demonstrou grande interesse pelo fenômeno; caso contrário, talvez fosse lembrado como o pai da eletrônica (GUARNIERI, 2012a). O termo “elétron” foi posteriormente atribuído por J. J. Thomson, que, em 1887, descobriu a existência de partículas menores que os átomos, nomeadas assim pelo físico irlandês George Johnstone Stoney (1826–1911).

Após estudar com J.C. Maxwell na Universidade de Cambridge, Fleming trabalhou na Edison Electric Light Company of London em 1882 e, em 1884, assumiu a cadeira de tecnologia eletrônica na University College of London. Colaborou com Guglielmo Marconi no desenvolvimento da infraestrutura técnica necessária para a histórica transmissão transatlântica de 12 de dezembro de 1901, contribuindo significativamente para o projeto das torres de recepção e transmissão que viabilizaram a primeira comunicação sem fio através do Atlântico (GUARNIERI, 2012a).

Em 1904, Fleming fez sua contribuição fundamental para a eletrônica ao patentear o diodo, a primeira válvula termoiônica (veja Figura 2.1), ou tubo de vácuo, como é chamado nos Estados Unidos. Ele o utilizou como retificador para converter código sem fio em uma voltagem que acionava um galvanômetro, permitindo a indicação visual de mensagens (FOREST, 2011).

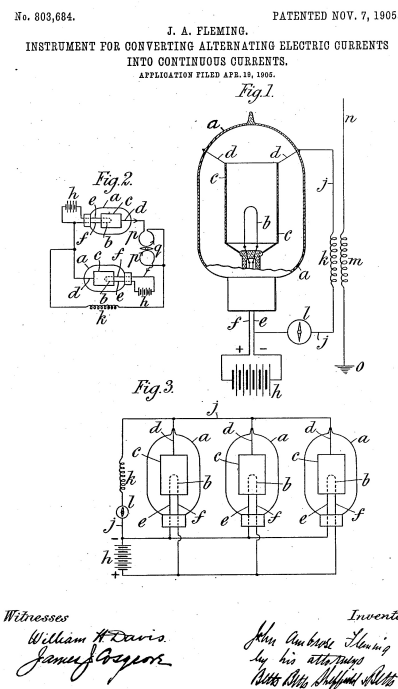


Figura 2.1 – Esquema da patente da válvula termoiônica.

O ponto fundamental foi a percepção de Fleming de que a válvula apresentava melhor detecção do que os retificadores de cristal do tipo “bigode de gato” (*cat’s whisker detector*), que consistiam em uma peça cristalina de um mineral, geralmente galena (sulfeto de chumbo, PbS), juntamente com um fio fino tocando sua superfície, como apresenta a Figura 2.2 (BRAUN et al., 1982).

É interessante notar que a galena é um semicondutor natural, assim como o silício e o germânio, utilizados nos dispositivos atuais. Embora o mecanismo de funcionamento não fosse totalmente compreendido na época, a galena criava uma barreira de potencial na



**Figura 2.2 – Dispositivo que utilizava o retificador do tipo bigode de gato.**

interface metal-semicondutor, funcionando basicamente como um diodo, permitindo que a corrente fluísse em apenas uma direção. Pesquisas posteriores sobre esses dispositivos foram essenciais para o desenvolvimento da área moderna dos semicondutores (BRAUN et al., 1982).

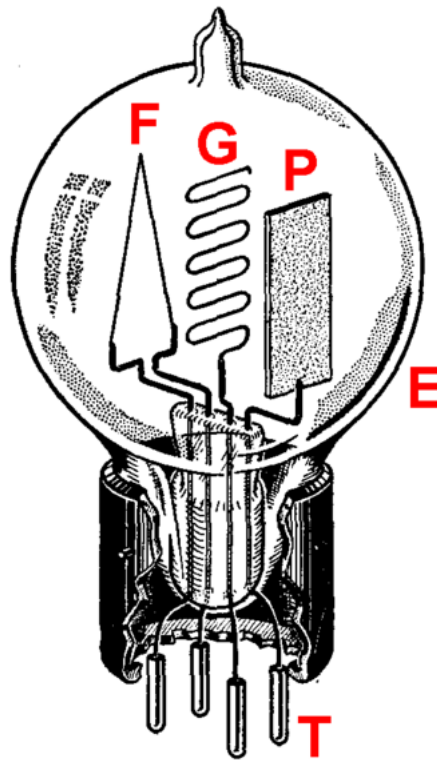
Lee de Forest (1873–1961), físico americano formado em Yale, obteve o Ph.D. com uma dissertação sobre o rádio. Em 1906, ele patenteou uma válvula com três eletrodos, o tríodo, denominado Audion, criada ao adicionar ao diodo um eletrodo de controle, a grade, cujo objetivo era controlar o fluxo de elétrons entre o cátodo e o ânodo (ou placa). A Figura 2.3 mostra o dispositivo utilizado para detectar mensagens de código e voz. Em 1910, realizou a primeira transmissão pública de rádio, um concerto de ópera em Nova York, e foi também quem introduziu o termo rádio (FOREST, 2011).

O filamento dos tubos de vácuo eventualmente queimava, sendo necessário substituí-los periodicamente (ARMY, 1952).

As primeiras válvulas termoiônicas apresentavam o problema de vácuo imperfeito, o que resultava na presença de traços de vapor de mercúrio e poderia comprometer seu funcionamento. Ainda assim, Fleming, De Forest e outros revolucionaram os meios de comunicação. Nos anos seguintes, lançaram as bases para a eletrônica moderna e digital, possibilitando a amplificação de sinais fracos, modulação de sinais e geração de ondas de rádio.

No final da década de 1930, com o início da Segunda Guerra Mundial, cerca de 30 anos após sua concepção, as válvulas termoiônicas haviam se tornado peças fundamentais da eletrônica. Foram aperfeiçoadas em uma grande variedade de aparelhos de aplicações analógicas, permitindo que a comunicação sem fio se disseminasse globalmente. Rádio, radar, televisão e equipamentos médicos tornaram-se mercados promissores e atraíram grande atenção.

As válvulas estavam prontas para um salto adiante, impulsionadas por um conflito bélico marcado por avanços e uma corrida tecnológica intensa. As inovações deixaram de



**Figura 2.3** – Esquema de um Audion, válvula termoiônica precursora dos transistores. Os componentes indicados na figura são: F) cátodo, um filamento de platina aquecido; G) grade de controle em formato zigue-zague; P) placa (ânodo); E) envelope de vidro evacuado; e T) pinos terminais para conexão externa. Fonte: Adaptado de (ARMY, 1952).

ser apenas um nicho científico e passaram a ser determinantes para o futuro de nações e do mundo. O domínio da válvula se estendeu a uma área fundamental para o desfecho da guerra e para o mundo pós-guerra. A computação binária surgiu com as válvulas, abrindo caminho para as tecnologias emergentes dos semicondutores (GUARNIERI, 2012c).

## 2.2 O COMEÇO DA COMPUTAÇÃO ELETRÔNICA

A Segunda Guerra Mundial impulsionou enormemente a demanda por tubos de vácuo, aumentando o interesse por tecnologias associadas e suas aplicações civis e, especialmente, militares. Um exemplo marcante surgiu logo no início da guerra: em 1940, foi criado o magnétron, um tubo de vácuo de alta potência, por John Randall (1905–1984) e Henry Boot (1917–1983), na Universidade de Birmingham, Reino Unido. O magnétron foi amplamente utilizado nos primeiros radares e, após a guerra, inaugurou uma nova área científica, possibilitando a existência de radares que tornaram mais seguros os transportes marítimos e aéreos. O dispositivo também foi incorporado em fornos de micro-ondas e aceleradores de partículas lineares (GUARNIERI, 2012b).

Os tubos de vácuo eram excepcionais em aplicações analógicas, mas uma nova

vertente surgiria na eletrônica, provocando uma ruptura nos sistemas de informação: a invenção das tecnologias digitais. A diferença básica reside no fato de que a eletrônica analógica utiliza sinais contínuos e variáveis para transmitir informações, enquanto a digital utiliza dígitos constantes e discretos.

Desde o século XVII, havia tentativas de criar máquinas capazes de calcular mais rapidamente que seres humanos, geralmente por meio de engrenagens mecânicas. No início do século XX, foram inventadas as primeiras calculadoras mecânicas capazes de realizar as quatro operações aritméticas. O cenário começou a mudar a partir da década de 1930, quando o engenheiro George R. Stibitz (1904–1995), da Bell Labs — laboratório responsável por grandes invenções do século XX —, desenvolveu o “Model K”, um computador básico criado em sua cozinha com alguns relés obtidos do laboratório.

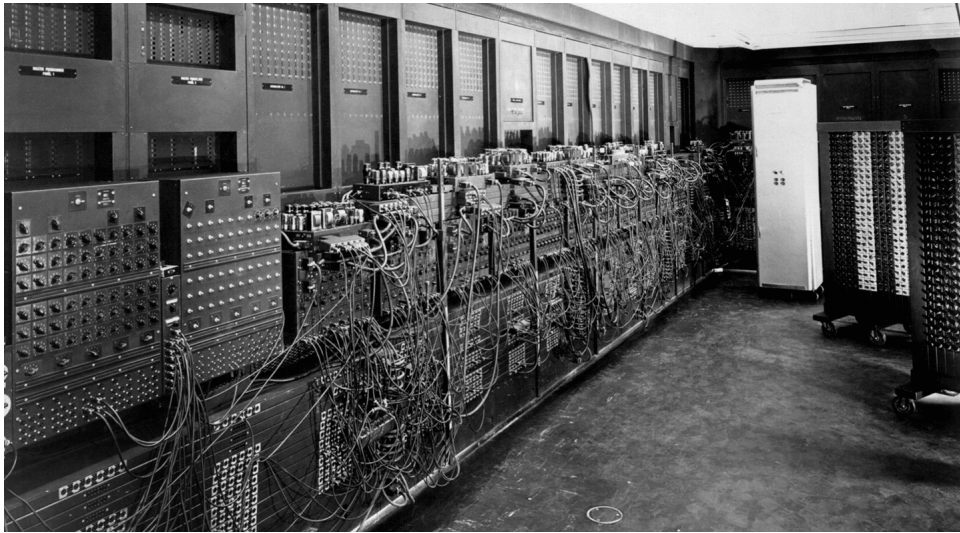
Com o sucesso do experimento, a Bell Labs financiou o “Model 1 Relay Calculator”, que utilizava 3.000 relés e 800 quilômetros de fios, sendo capaz de realizar operações algébricas complexas — um grande avanço para a computação da época. Em 1941, o equipamento foi controlado remotamente por um telégrafo, a 330 km de distância, marcando a primeira conexão à distância([GUARNIERI, 2012b](#)).

A computação eletromecânica foi amplamente desenvolvida nesse período, com exemplos notáveis como o “Heath Robinson Code Breaker”, utilizado pelo governo britânico na escola de códigos e criptografia para tentar decifrar mensagens alemãs. O primeiro uso totalmente eletrônico ocorreu no Reino Unido, em 1934, quando o engenheiro Tommy Flowers (1905–1998) utilizou 3.000 tubos de vácuo para realizar uma ligação, tornando o procedimento muito mais rápido que os equivalentes eletromecânicos. Flowers também demonstrou que os tubos, considerados frágeis e propensos a falhas devido ao calor, eram, na verdade, facilmente substituíveis.

Durante a Segunda Guerra, Flowers juntou-se à escola de códigos e criptografia, ao lado do matemático Max Herman Alexander Newman (1897–1984), baseando-se nas ideias do matemático Alan Mathison Turing (1912–1954). Em dezembro de 1943, construíram o Colossus, o primeiro computador completamente eletrônico da história, projetado com 1.500 tubos de vácuo e programado para decifrar códigos secretos alemães. O Colossus consumia 15 kW e foi essencial para fornecer informações aos aliados, especialmente ao comandante supremo dos EUA, o futuro presidente Eisenhower, durante a invasão da Normandia (Dia D)([GUARNIERI, 2012b](#)).

O primeiro computador nos moldes atuais — reprogramável e de função generalista, não restrito a uma única tarefa — entrou em operação em 1946, fruto de uma parceria entre o Exército Americano e a Universidade da Pensilvânia. Contava com 17 mil tubos de

vácuo (sofrendo falhas a cada dois dias), 7.200 diodos, media 30 metros de comprimento, pesava 27 toneladas e consumia 174 kW. O famoso Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC) representou um salto tecnológico significativo, com capacidade de processamento aproximadamente mil vezes superior aos computadores eletromecânicos da época, reduzindo drasticamente o tempo necessário para cálculos balísticos complexos, realizando cálculos balísticos em 30 segundos, tarefa que antes levava 20 horas.



**Figura 2.4 – Primeiro computador reprogramável: ENIAC(ARMY, 1952).**

Ao longo desses acontecimentos históricos, é possível perceber a importância colossal dos tubos de vácuo no início da eletrônica e, especialmente, no surgimento da computação digital. Eles abriram caminho para uma nova era de comunicação e modernidade, uma era que vivemos até hoje. No entanto, como pioneiros, apresentavam limitações que dificultavam seu avanço, principalmente na computação: calor, fragilidade e tamanho eram características que impactavam diretamente o funcionamento dos dispositivos. Um tubo de vidro que aquecia era extremamente delicado, ocasionando diversas falhas. Curiosamente, traças eram um dos maiores empecilhos, pois a luz emitida pelos tubos atraía insetos, dando origem ao termo *bug*, hoje usado para designar erros em sistemas ou programas.

Enquanto isso, na Bell Labs, um grupo de engenheiros e físicos trabalhava no que viria a ser a invenção mais importante do século XX: o transistor. Com sua praticidade, o transistor moldou o restante do século, abrindo as portas para a segunda geração da eletrônica, a do estado sólido, superando os tubos de vácuo e levando a tecnologia ao patamar que conhecemos atualmente.

### 3 ESTRATÉGIAS PIONEIRAS NO VALE DO SILÍCIO: INOVAÇÃO, PRODUÇÃO EM MASSA E CONSOLIDAÇÃO

Com o início da computação, os Estados Unidos passaram a enxergar o potencial que ela oferecia. As demonstrações da Segunda Guerra Mundial mostraram que o avanço tecnológico e científico era essencial para vencer, seja no campo atômico ou nuclear; a ciência era fundamental. Assim, o exército americano, em conjunto com universidades e centros de pesquisa, saiu extremamente fortalecido, iniciando um movimento de investimento em eletrônica. Um centro de pesquisa, em especial, ganhou destaque e talvez seja um dos mais importantes para as tecnologias que usamos atualmente.

#### 3.1 O DESENVOLVIMENTO INICIAL NOS ESTADOS UNIDOS: BELL LABS, FAIRCHILD E INTEL

O Bell Labs, atualmente Nokia Bell Labs, mas originalmente Bell Telephone Laboratories, é um centro de pesquisa e desenvolvimento localizado em Nova Jersey. Altamente proeminente durante o século XX, foi responsável pela criação e patenteamento de muitas tecnologias modernas, como transistores, LEDs, lasers, a linguagem de programação C e o sistema operacional Unix.

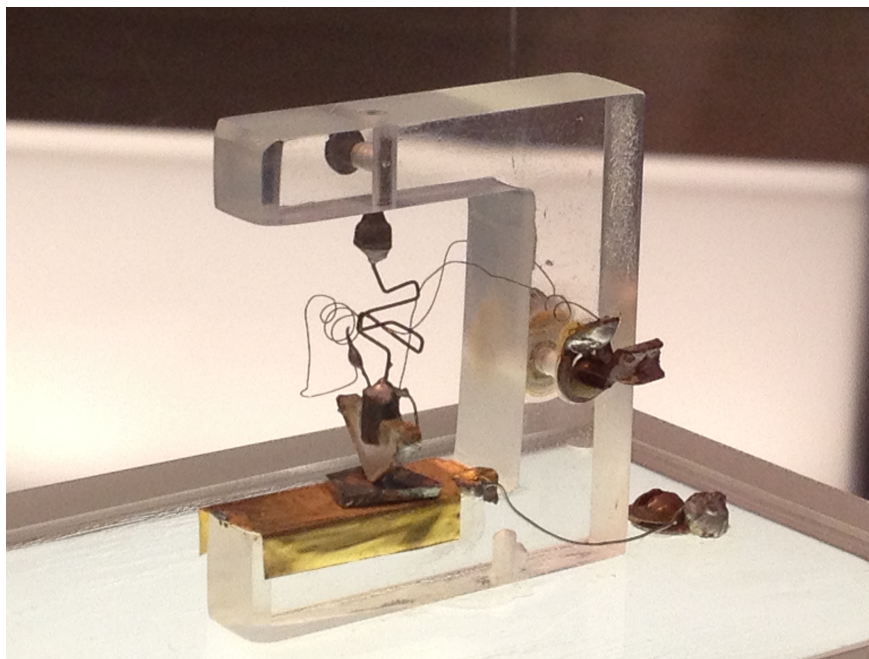
Mas foi justamente o transistor, que será extensivamente abordado neste trabalho, a tecnologia de maior impacto criada lá. Popularizada por uma série de ramificações de empresas e pessoas, a história começa com William Shockley, nascido em Londres, que passou a infância em Palo Alto, Califórnia, local que hoje faz parte do icônico Vale do Silício, região dominada por empresas cujas tecnologias derivam de semicondutores e que detêm boa parte do PIB mundial.

Shockley sempre soube que, se um “interruptor” eletrônico melhor que os existentes fosse projetado, seria a partir de um material chamado semicondutor (SHURKIN, 2006), sua área de especialização. Semicondutores são materiais de uma classe singular, como o silício e o germânio. A maioria dos materiais comuns ou conduz eletricidade, como o metal, ou é isolante, como a borracha. Já os semicondutores, quando puros, praticamente não conduzem eletricidade, mas, ao serem “dopados” com certos materiais e submetidos a um campo elétrico, podem permitir a passagem de corrente. Foi a “dopagem” dos semicondutores que possibilitou o controle de correntes; contudo, até o final da década de 1940, seu funcionamento era um mistério para a física.

Em 1945, Shockley previu teoricamente o que chamou de “válvula de estado sólido” ao desenhar em um caderno um pedaço de silício ligado a uma bateria de no-

venta volts(RIORDAN; HODDESON, 1997). Propôs que, ao aplicar um campo elétrico perpendicular à superfície em um semicondutor como germânio ou silício, seria possível modular a densidade dos portadores de carga próxima à superfície, criando um canal condutor controlável. Assim, um material semicondutor teria sua condutividade alterada eletricamente. Mesmo após construir o dispositivo, não obteve corrente, o que o deixou perplexo. Foi com Walter Brattain e John Bardeen, único a ganhar dois prêmios Nobel de Física, que um dispositivo semelhante ao de Shockley foi construído.

Ele era composto por dois filamentos de ouro ligados a uma fonte de alimentação e a um semicondutor, o germânio, formado contatos pontuais sobre a sua superfície. Em 16 de dezembro de 1947, o dispositivo foi ligado e conseguiram controlar a corrente através da modulação das barreiras de potencial nas junções metal-semicondutor, provando que a teoria de Shockley sobre semicondutores estava correta e criando efetivamente o primeiro transistor funcional.



**Figura 3.1 – Primeiro transistor criado (ARMY, 1952)**

Quando descobriu que seus colegas haviam conseguido criar o dispositivo, ficou furioso, importante notar que Shockley era conhecido por seu temperamento desagradável, irritadiço e prepotente. Isolando-se em um quarto de hotel por duas semanas, saiu e anunciou um novo tipo de transistor, composto por três pedaços de material semicondutor. Os dois pedaços externos tinham excesso de elétrons, enquanto o do meio tinha deficiência. Quando uma pequena corrente era aplicada à camada do meio, uma corrente muito maior era observada. Isso permitiu tanto a amplificação de corrente quanto o tão desejado interruptor teorizado por Shockley, pavimentando o caminho para a computação eletrônica digital como conhecemos hoje.

### 3.2 ADESÃO AO TRANSISTOR E SUA INDUSTRIALIZAÇÃO

O transistor foi visto como um claro substituto aos não confiáveis tubos a vácuo e suas limitações já conhecidas: alto consumo energético, produção de calor e fragilidade. No entanto, para substituir um dispositivo consolidado no mercado e com uma cadeia de produção eficiente, era necessário igualar essa produção, ou seja, produzir em massa. Para isso, era preciso simplificar o transistor, que, naquele momento, exigia milhares de conectores para funcionar, criando uma verdadeira selva de cabeamento.

A Texas Instruments, com sede em Dallas, havia sido fundada para produzir aparelhos que determinavam onde petroleiros deveriam perfurar, usando ondas sísmicas. Durante a Segunda Guerra, foi chamada para desenvolver sistemas de sonar para rastrear submarinos e inimigos no mar, um começo curioso para uma empresa que se tornaria fundamental em nosso contexto. Jack Kilby foi um dos primeiros de fora do Bell Labs a utilizar o transistor, expandindo o horizonte do transistor, que no momento era somente teórico, para algo mais comercial. Em 1958, começou na Texas e se dedicou a reduzir os fios dos transistores. Pensou que, em vez de usar várias peças de silício e germânio para construir o transistor, poderia montar diversos componentes em uma mesma peça, criando o “circuito integrado”, conhecido como “chip”, referência ao fato de cada circuito integrado ser um pedaço de um wafer de silício circular.

Shockley tinha ambições maiores do que o Nobel, recebido em 1956; queria ser rico e aparecer tanto no *Physical Review* quanto no *Wall Street Journal* (CHEUNG; BRACH, 2012). A AT&T, então dona do Bell Labs, era uma empresa de telefonia, não de informática, o que facilitou o licenciamento de suas patentes por apenas 25 mil dólares, valor irrisório para a utilização da tecnologia eletrônica mais moderna. Shockley era excelente em encontrar talentos, mas péssimo em gerenciá-los. Reuniu jovens brilhantes e fundou a Shockley Semiconductor, com o objetivo de massificar a produção do mercado emergente. O ambiente tóxico, com relatos de gravações de todas as ligações e falta de confiança nos empregados, incluindo a exigência de testes de detecção de mentiras, recusados por todos, levou à saída de oito membros (BROCK, 2010).

Esses oito desertores são hoje apontados como fundadores do Vale do Silício. Entre eles estavam Kleiner Perkins, fundador da famosa empresa de capital de risco, e Gordon Moore, referência para a criação da “Lei de Moore”, que prevê que o número de transistores em um chip dobraria a cada dois anos. Na época, parecia fantasioso, mas foi confirmado ao longo dos anos, pelo menos até a década passada, como pode ser visto na Figura 3.2.

O protagonista era Bob Noyce, líder do grupo; juntos fundaram a Fairchild, responsável por inúmeros avanços na indústria de semicondutores. Posteriormente, Noyce



de transistores na menor área possível, mais aplicações surgiam. Mercadologicamente, o produto não precisava ser o melhor em todas as áreas, mas precisava ter um valor agregado relativamente baixo para ser consumido em massa, o que não ocorria, pois o circuito inventado ainda era 50 vezes mais caro que os similares não unificados (BERLIN, 2005), tornando o mercado para esse produto genial ainda rudimentar.

### 3.3 NASA E O PONTAPÉ DA INDÚSTRIA

A década de 60 foi o auge da “Corrida Espacial”, termo usado para designar a disputa aeroespacial entre a União Soviética (URSS) e os Estados Unidos (EUA). Após o fim da Segunda Guerra Mundial, iniciou-se a Guerra Fria, com URSS e EUA representando, respectivamente, socialismo e capitalismo. O conflito ficou conhecido como “frio” porque não houve guerra direta entre as potências, em parte devido à política MAD (Mutual Assured Destruction), ou Destruição Mútua Assegurada: caso um país atacasse o outro, ambos estariam condenados. Isso se deu pela proliferação descontrolada de armas nucleares após a Segunda Guerra. Com a impossibilidade de combate direto, além de apoiar lados em conflitos como Vietnã e Afeganistão, as disputas migraram para o campo científico, incluindo a corrida espacial.

Em 4 de outubro de 1957, um objeto metálico russo sobrevoou pela primeira vez a Terra: o Sputnik, primeiro satélite não tripulado da história. Uma sensação de histeria tomou conta dos EUA diante da iminente derrota nessa corrida, refletida na manchete do jornal de São Francisco: “Russ ‘Moon’ Circling Globe”(San Francisco Chronicle, 1957). Esses temores foram reafirmados quando, quatro anos depois, a Rússia colocou o primeiro homem no espaço, com Yuri Gagarin retornando para dizer “A Terra é azul”.

Após esses feitos soviéticos e a crescente desconfiança americana, Kennedy prometeu que o homem iria à Lua e, para isso, destinou um gigantesco orçamento à NASA. Noyce duvidava quem teria dinheiro e necessidade de investir em massa nos transistores; agora tinha sua resposta. Já se delineava a superioridade dos transistores, com engenheiros cientes das vantagens em relação aos tubos a vácuo, mas ainda havia dúvidas se essas máquinas poderiam levar o homem à Lua.

O Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) ficou encarregado de produzir o computador, que se imaginava que teria o tamanho de uma geladeira e consumiria mais energia do que toda a nave(HALL, 1996; CERRUZI, 2018). Em 1962, o diretor do projeto, Charles Stark Draper, decidiu apostar nos chips da Fairchild e calculou que o computador seria um terço menor e mais leve do que um baseado em transistores discretos. Foi uma grande aposta, pois a Fairchild nunca havia liderado nenhum projeto e seus chips não eram conhecidos em nenhum ramo.

Ao final da construção, o computador que levou a nave Apollo à Lua pesava cerca de 30 kg e ocupava 0,3 metros cúbicos, espaço mil vezes menor que o ENIAC. O computador funcionou e a empreitada da Fairchild também; a confirmação de que um aparelho feito por eles foi à Lua, voltou e continuou funcionando era uma conquista incrível. A empresa cresceu rapidamente, passando de pouco mais de mil funcionários em dois anos (1958 a 1960) e vendo suas vendas saltarem de US\$ 500 mil para US\$ 21 milhões. Com o enorme marketing gerado pelo feito, a produção escalonou e o preço de fabricação caiu: um circuito integrado que custava US\$ 120 em 1961 passou a custar US\$ 15 no ano seguinte. Aproveitando o momento, a Texas Instruments também floresceu a partir de outro órgão do governo.

A corrida bélica estava intensa, pois em 29 de agosto de 1949 houve o primeiro teste nuclear russo. Após a crise dos mísseis de Cuba, em outubro de 1962, os EUA buscavam avanços em seus armamentos. O Minuteman II era o mais avançado, mas tão pesado, com seu computador de navegação baseado em transistores discretos, que mal conseguiria chegar a Moscou. O engenheiro da Texas, Pat Haggerty, prometeu o dobro de performance com metade do peso, oferta irrecusável para um projeto complicado. Projetaram um computador que utilizava 22 tipos de circuitos integrados, sendo responsável por 95% do processamento dos dados e pesando 62 gramas; os outros 5% ainda não eram possíveis de replicar computacionalmente e pesavam 16 kg.

O sucesso para a Texas foi imediato e, junto com a Fairchild, tornou-se uma das grandes do mercado. Naquele momento, 60% do dinheiro gasto em chips vinha da Força Aérea, preocupada em não perder a corrida armamentista. No final, apenas para o programa Minuteman II, foram fornecidos 100 mil desses circuitos. A aposta das empresas foi certa; uma demanda estava surgindo, agora era necessária a produção em massa.

### **3.4 PRODUÇÃO EM MASSA**

A indústria e o mercado de semicondutores caminhavam para a consolidação, com tecnologias cada vez mais avançadas e vendas crescentes ano após ano. O maior entrave para um desenvolvimento mais amplo era a produção em massa; todas as indústrias de tecnologia atuais se baseiam nisso, obtendo eficiência e padronização nas etapas, algo que ainda faltava à indústria inicial de microchips.

Jay Lathrop, físico americano, é creditado como inventor da fotolitografia, técnica fundamental para o aumento da eficiência produtiva. Jay trabalhava em um laboratório do governo em um projeto de fusível de aproximação para morteiros, mas percebeu que o tamanho dos transistores impedia o progresso. Na época, os transistores eram feitos inserindo cera em formas específicas nas partes necessárias do projeto; depois, as partes

descobertas eram lavadas com produtos químicos para remover o excesso. Para fazer transistores menores, era preciso pingos de cera menores e com formato específico, o que Lathrop viu como um grande problema.

Como cientista, passou boa parte da vida vendo materiais ao microscópio, ampliando partes pequenas. Teve a ideia de inverter o processo: será que uma parte maior poderia ser reduzida? Usando produtos químicos fotossensíveis da Kodak e invertendo o microscópio, cobriu a lente com um desenho específico. A luz, ao passar, assumiu o formato do desenho, entrou pela lente e foi projetada em um bloco de germânio, reduzida de tamanho, criando uma versão miniaturizada do desenho da máscara. Percebeu que era possível fazer isso de forma sistemática e mecanizada, muito melhor do que o método manual dos pingos de cera; conseguiu fazer transistores de até 0,01 milímetro, um grande avanço.

A Texas Instruments percebeu que esse poderia ser o caminho da padronização industrial, mas ainda havia problemas. Os produtos químicos da Kodak não eram puros o suficiente; os wafers de silício precisavam ser ultrapuros, e as máscaras também careciam de fontes de fabricação adequadas, pois eram pequenas e exigiam precisão que nenhuma empresa fornecia. A solução foi adquirir novas máquinas para verticalizar a produção e fabricar tudo internamente.

Assim, começou um trabalho intenso. Não havia como saber se todos os componentes estavam corretos, então o método era tentativa e erro, com variações de pressão, produtos químicos e métodos de produção diferentes. Morris Chang, fundador da TSMC, começou a trabalhar na Texas em 1958. Ficou responsável por uma linha de produção de chips para computadores da IBM, com rendimento próximo de zero devido a muitos defeitos e imperfeições. Em poucos meses de experimentos, o rendimento saltou para 25% (CHANG, 2007), tornando-o diretor de toda a produção de circuitos integrados da Texas, com executivos de outras empresas indo estudar seus métodos; isso seria fundamental para o sucesso futuro da TSMC.

Dessa forma, a produção em massa dos microchips foi-se consolidando. Noyce, da Fairchild, destacou a importância desse fato ao dizer: “Só teríamos uma empresa se conseguíssemos fazer aquilo funcionar” (LAWS, 2010). Após contratar Andy Grove, hoje considerado um dos nomes que levaram a indústria de semicondutores ao topo, as duas maiores empresas do setor embarcaram na produção em massa, mas agora era necessário um mercado de massa também.

O mercado de chips ainda era voltado aos militares. Em 1965, 72% dos circuitos integrados eram destinados a eles, mas isso mudaria quando, na década de 1960, o

Departamento de Defesa, sob comando do controverso ministro Robert McNamara, cortou gastos. A Fairchild viu a oportunidade e reduziu o preço de 20 para 2 dólares. Esse corte foi citado depois por Moore como fundamental para a implementação do mercado civil(MILLER, 2023).

### 3.5 O FRACASSO RUSSO E A DOMINÂNCIA OCIDENTAL

Após a produção em massa e a criação do mercado civil, ocorreram mudanças substanciais, levando a produção para o outro lado do mundo, com a Ásia tornando-se um expoente primordial na cadeia de produção, posição que mantém até hoje.

Um detalhe importante é a Rússia, que hoje não possui relevância no cenário de alta tecnologia em semicondutores. Como já mencionado, o embate entre russos e americanos estava no auge, com rivalidades em todos os âmbitos possíveis. Além da corrida armamentista nuclear, havia a corrida científica, com avanços em áreas como aviação, química e física sendo disputados conquista a conquista. Mas por que hoje a indústria de semicondutores está concentrada nos Estados Unidos e seus aliados?

Essa pergunta pode ser respondida ao se analisar uma notícia recente sobre semicondutores na Rússia, publicada em março de 2025 pelo site oficial do Centro de Nanotecnologia de Zelenograd (ZNTC), onde foi desenvolvida uma ferramenta para produção de chips em 350 nanômetros (nm)(ZNTC, 2025). O abismo tecnológico é enorme, considerando que a tecnologia de ponta hoje opera em nó de 3 nanômetros.

A resposta está na estratégia adotada pela Rússia no início do desenvolvimento de sua indústria de semicondutores. A União Soviética era conhecida por sua grande rede de espões, que contrabandeavam informações para um país extremamente fechado. Alguns casos ficaram famosos, como o do casal Rosenberg (RADOSH; MILTON, 1997), único caso de civis executados por traição, ainda controverso e usado como exemplo da histeria coletiva que permeou os EUA contra a URSS.

Joel Barr e Alfred Sarant, integrantes do círculo de espões dos Rosenberg, trabalhavam em empresas americanas de tecnologia e compartilhavam segredos com os soviéticos. Quando a rede foi desmantelada, fugiram com passaportes falsos para a União Soviética. Alexander Shokin, vice-presidente do Comitê de Radioeletrônica do Estado Soviético, ficou encantado com as possibilidades trazidas pelos espões e convenceu o líder Nikita Khrushchev a criar Zelenograd , “cidade verde” em Russo, planejada para ser um polo científico e tecnológico, um vale do silício antes mesmo da região de São Francisco ser conhecida assim(MELIKHOV, 2025). No mesmo ano da fundação da cidade, foi criada a “Diretoria T”, com o objetivo de adquirir equipamentos e tecnologia, ou seja, contrabandear

semicondutores.

A estratégia direta da URSS, que levou à decadência de sua indústria frente às ocidentais, foi resumida por Shokin: “Copiem-no, um por um, sem desvios. Vocês têm três meses”. Ele se referia ao circuito integrado SN-51, produzido pela Texas Instruments. Cientistas e engenheiros ficaram indignados, afinal, a ciência soviética era equivalente à americana; tanto que, quando Jack Kilby ganhou o Nobel de Física em 2000, compartilhou o prêmio com Zhores Alferov, russo que pesquisou semicondutores em 1960.

Como já mencionado, os engenheiros americanos eram obcecados por rendimento e confiabilidade, com Morris Chang sendo peça-chave nesse quebra-cabeça da produção em massa. Os semicondutores foram tratados como segredos nucleares, mas havia uma diferença: armas nucleares são feitas em dezenas, não em milhares como os chips. A eficiência da operação não é uma grande questão, não há necessidade de melhorar a tecnologia imediatamente, apenas replicar diversas vezes. Os semicondutores eram uma “loucura tecnológica”, com a Lei de Moore prevendo que o número de transistores em um chip dobraria em dois anos, com custo mínimo.

O mundo entrava em um estado de desenvolvimento tecnológico acelerado, onde simplesmente copiar não era suficiente para manter o progresso industrial. Da mesma forma que roubar um bolo não ensina a receita, as etapas necessárias, o tempo de exposição e até os produtos químicos usados não estavam em manuais, mas eram descobertos por tentativa e erro no P&D das empresas. O erro crucial da URSS foi apostar apenas na cópia, levando à estagnação da indústria soviética de semicondutores.

Esse fator, somado a jogos políticos internos nas fábricas e ao cenário geopolítico, com escassez de conexões com países ocidentais produtores de peças essenciais, fez o setor definhar e nunca se recuperar, mostrando que os impulsores dessa indústria eram cultura de mercado, competição e fluxo de conhecimento. O poderio militar americano crescia proporcionalmente à sua capacidade tecnológica, e a nação antes avançada terminou com, no máximo, uma produção de chips simples para brinquedos do McDonald's nos anos 1990. A Guerra Fria havia terminado, e a indústria de chips russa também (MILLER, 2023).

## 4 FUNDAMENTOS DOS SEMICONDUTORES E DA MICROELETRÔNICA

Pode-se notar que, para que existam os chips atuais, um grande percurso foi percorrido, e a física sempre esteve presente nesse caminho, sendo que os pioneiros na criação dos transistores eram físicos, como Shockley. É fundamental entender não somente as utilidades dos chips, mas também os conceitos mais amplos que regem seu funcionamento a nível físico e eletrônico. A seguir, serão apresentadas as dificuldades inerentes que uma longa lista de pessoas enfrentou para desenvolver esse componente fundamental para o mundo de hoje.

### 4.1 BREVE HISTÓRIA DOS SEMICONDUTORES

A história dos semicondutores é fascinante em muitos aspectos, principalmente pelo mistério inicial que despertavam, já que suas propriedades eram quase fantasmagóricas. Cito o famoso ganhador do Nobel de Física, Wolfgang Pauli: “Não se deve trabalhar com semicondutores, isso é uma porcaria; quem pode dizer se eles realmente existem?”<sup>1</sup>, carta para Rudolf Peierls, NY, em 1931 (BOHR et al., 1985).

Semicondutor é um material que possui condutividade intermediária, ou seja, comporta-se tanto como condutor quanto como isolante, dependendo da situação e da sua composição. A Figura 4.1 exemplifica a escala e onde eles se encontram em relação à condutividade elétrica.

Como se observa, os semicondutores ocupam uma posição intermediária, e um detalhe importante é a flexibilidade para alterar sua condução em diferentes ordens de grandeza. Diferentemente dos metais, sua condutividade aumenta com a temperatura; fatores como dopagem com outros materiais e até iluminação também são relevantes.

Historicamente, a primeira pessoa a citar materiais semicondutores foi Alessandro Volta (1745–1827), químico italiano que declarou “materiais de natureza semicondutora” ao mencionar sua invenção mais emblemática, a pilha. Volta percebeu que metais descarregam-se instantaneamente, semicondutores lentamente e isolantes não se descarregam (BRUM, 2012).

Após o experimento de Volta, em 1840, o pai da eletroquímica, Humphry Davy, sintetizou o resultado de uma série de experimentos dizendo: “o poder de condutividade

<sup>1</sup> No original em Alemão "Über Halbleiter sollte man nicht arbeiten, das ist eine Schweinerei, wer weiss, ob es überhaupt Halbleiter gibt"

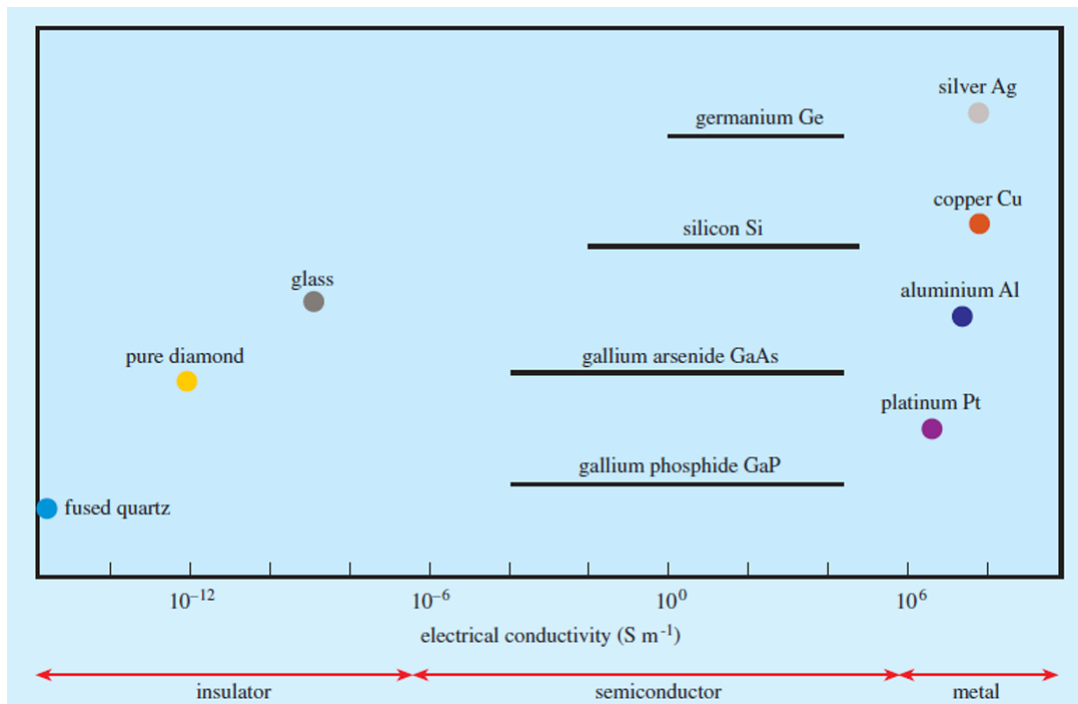


Figura 4.1 – Gráfico acerca da condutividade e dos tipos de material (BRUM, 2012)

dos corpos metálicos varia com a temperatura, e é mais baixo, em uma razão inversa, à medida que a temperatura sobe” (BRUM, 2012). Conforme demonstrado por ASHCROFT; MERMIN (1976, p. 567), o sulfeto de prata ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) apresenta uma condutividade que aumenta exponencialmente com a temperatura: em temperatura ambiente, esse composto é um material de baixa condutividade, mas por volta de  $175\text{ }^\circ\text{C}$  sua condutividade aumenta, chegando a níveis de metais.

A retificação, que é o ato de transformar uma corrente alternada (CA), que inverte periodicamente sua direção de fluxo, em uma corrente contínua (CC), que flui constantemente em uma única direção, foi fundamental tanto para o surgimento da eletrônica quanto para os semicondutores. Ela foi descoberta em 1874 por Karl Ferdinand Braun, ao estudar o fluxo de corrente em sulfetos como a galena. Em 1883, Braun descobriu que a retificação era ampliada quando o contato era pontual, originando o dispositivo da Figura 2.2. Em 1887, Hertz demonstrou a existência das ondas de rádio. Em 1901, o físico indiano Sir J.C. Bose fez a primeira patente de um retificador de semicondutores feito de galena, impulsionando os estudos desses materiais.

Uma grande dificuldade na ciência dos semicondutores no início do século XX, que atrasou o desenvolvimento, era a falta de reprodutibilidade dos resultados experimentais, pois já se sabia que dependiam fortemente das impurezas e imperfeições dos compostos, e as técnicas de padronização eram rudimentares, como pode ser notado na Figura 4.2. Isso gerou uma fama negativa na área, sintetizada pela fala de um artigo de Gudden:

“Semicondutores no sentido científico da palavra, se é que existem, são muito mais escassos do que se supunha originalmente”. Os semicondutores eram tão complicados de trabalhar que sua existência natural chegou a ser questionada, o que faz sentido, pois só têm validade real a física do estado sólido se houver certeza da composição e estrutura.

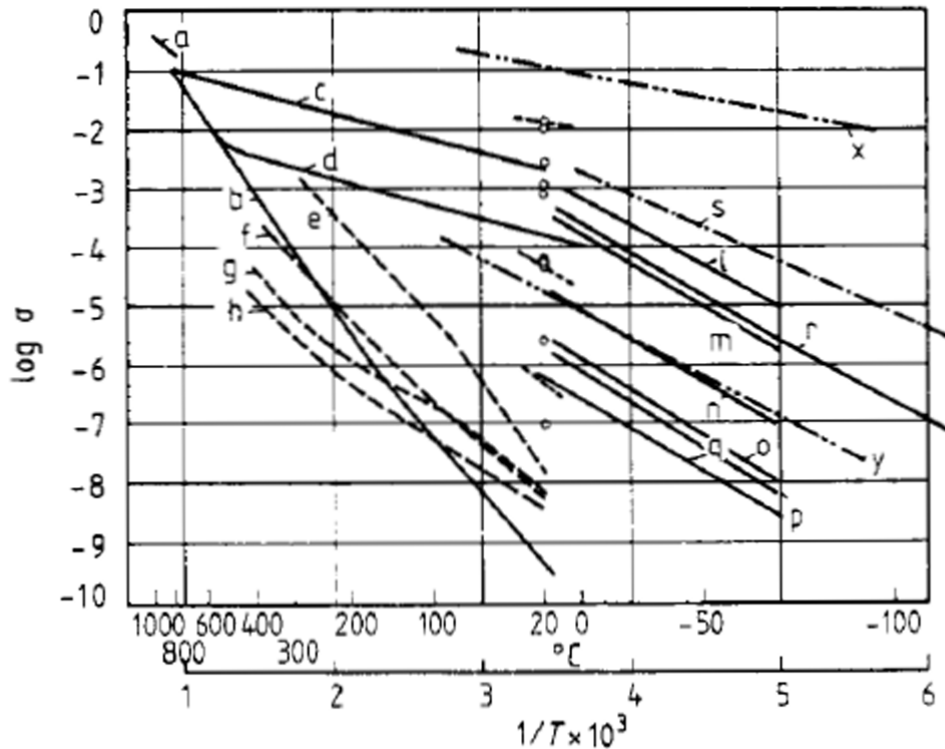


Figura 4.2 – Gráfico que mostra diferentes condutividades elétricas obtidas por diferentes autores para  $Cu_2O$  (GUDDEN, 1924)

## 4.2 A TEORIA DE BANDAS

O avanço real em ciência de materiais sólidos veio com a consolidação da mecânica quântica, com o desenvolvimento da equação de Schrödinger (1926), o teorema de Bloch (1928) e, crucialmente, a teoria de bandas eletrônicas nos cristais por Alan Wilson em 1931, pedra angular da teoria clássica de sólidos. A partir dessas ideias, definiu-se o que seria um semiconductor intrínseco (puro): a condutividade é determinada pela excitação térmica de elétrons através do gap. Já em um semiconductor extrínseco, a condutividade é controlada pela introdução de impurezas (dopagem), que criam níveis de energia próximos às bordas das bandas de valência ou condução, facilitando a geração de portadores de carga (elétrons ou lacunas) (BRUM, 2012).

Em redes cristalinas, encontramos átomos organizados em padrões que se repetem regularmente no espaço. Quando analisamos esse sistema pela mecânica quântica, aplicando a equação de Schrödinger considerando o potencial periódico do cristal, obtemos as funções

de Bloch. Essas funções mostram que os elétrons não ocupam níveis energéticos isolados, mas sim faixas contínuas de energia.

A equação de Schrödinger para um elétron em um potencial periódico  $V(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r} + \mathbf{R})$ , onde  $\mathbf{R}$  é um vetor da rede cristalina, é a seguinte (SCHRÖDINGER, 1926):

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r}) \quad (3)$$

O teorema de Bloch estabelece que as soluções desta equação podem ser escritas como (BLOCH, 1929):

$$\psi_{n,\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = u_{n,\mathbf{k}}(\mathbf{r})e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \quad (4)$$

onde  $u_{n,\mathbf{k}}(\mathbf{r})$  possui a mesma periodicidade da rede cristalina,  $\mathbf{k}$  é o vetor de onda (momento cristalino) e  $n$  é o índice da banda. Esta formulação matemática é fundamental para compreender como os níveis energéticos atômicos se transformam em bandas contínuas nos sólidos, formando as bandas de energia. (UNICAMP, 2025).

Identificamos a banda de valência como a região energética inferior, caracterizada por estar predominantemente ou completamente ocupada por elétrons. Particularmente em semicondutores intrínsecos no zero absoluto (0 K), essa banda está totalmente preenchida. Por outro lado, a banda de condução, situada em nível energético superior à banda de valência, permanece essencialmente desocupada na mesma condição térmica.

A região energética que separa essas duas bandas, denominada banda proibida ou gap de energia, possui importância fundamental para as propriedades eletrônicas do material. A dimensão desse intervalo energético determina diretamente a facilidade com que os elétrons podem migrar da banda de valência para a banda de condução, processo essencial para a condução elétrica em semicondutores e isolantes.

Na Figura 4.3, observam-se as diferenças entre os materiais. No isolante, nota-se um gap muito grande, superior a 5 eV, o que significa que a energia necessária para que um elétron salte é muito alta, impedindo que, em condições normais, esse material conduza eletricidade. Um exemplo é o dióxido de silício ( $SiO_2$ ), isolante comum que tem gap de 8,8 eV (TILLI et al., 2015). Já no condutor, não existe gap de energia, pois a banda de condução está parcialmente preenchida, de modo que há estados eletrônicos disponíveis imediatamente acima do nível de Fermi, resultando em alta condutividade, como nos metais.

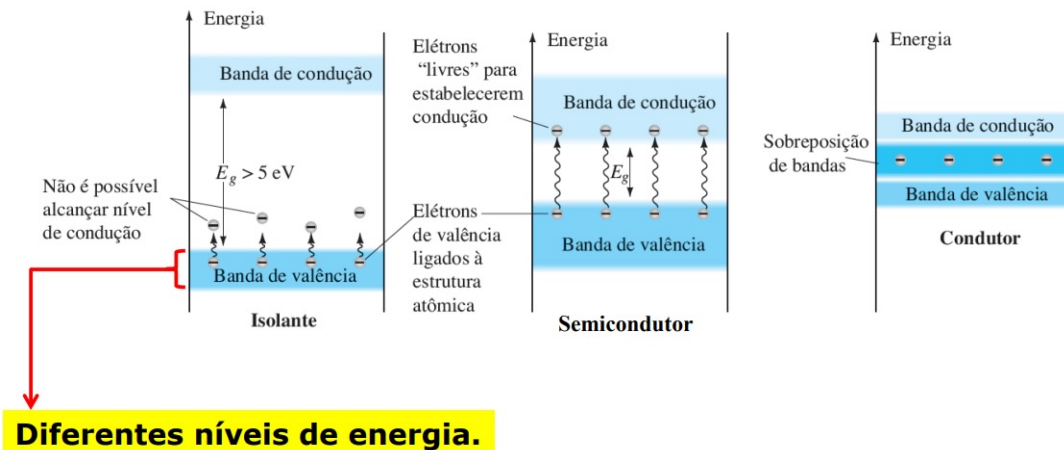


Figura 4.3 – Particularidade das bandas em diferentes tipos de materiais. Adaptado de (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2009)

Nos semicondutores, o gap tipicamente fica entre 0,5 e 3 eV (o silício tem 1,1 eV). Quando exposto a certas condições, alguns elétrons podem saltar da banda de valência para a banda de condução, especialmente se houver algum grau de energia térmica, como a temperatura ambiente. Se houver dopagem no material, a condutividade aumenta muito.

### 4.3 DOPAGEM

Uma característica que tornou os semicondutores tão interessantes para a ciência e importantes para a engenharia foi a capacidade de serem dopados, ou seja, impurezas controladas são aplicadas ao composto para alterar sua condutividade elétrica. O caso mais interessante ocorre quando o átomo inserido tem uma valência diferente, contendo assim um número diferente de elétrons de valência, pertencendo a outra coluna da tabela periódica (UNICAMP, 2025).

Para exemplificar o impacto da adição de dopantes nos semicondutores: se for adicionado um átomo de boro (B) para cada  $10^5$  átomos de silício (Si), em uma diminuta concentração atômica de 0,001%, é possível aumentar a condutividade em temperatura ambiente em um fator de 1000, como esquematizado na Figura 4.4. Na Figura 4.5, é visível a resistividade pela temperatura no germânio dopado com antimônio, com algumas impurezas. É importante destacar o quanto a resistividade pode variar dependendo das impurezas e de certas condições.

#### 4.3.0.1 Semicondutores do tipo N e P

Os tipos de semicondutores mais utilizados são os do tipo N e P, que servem de base para os transistores. O tipo P é conhecido como impureza aceitadora, pois é capaz de aceitar elétrons. Os elementos usados são boro, alumínio, índio e, às vezes, gálio, da família

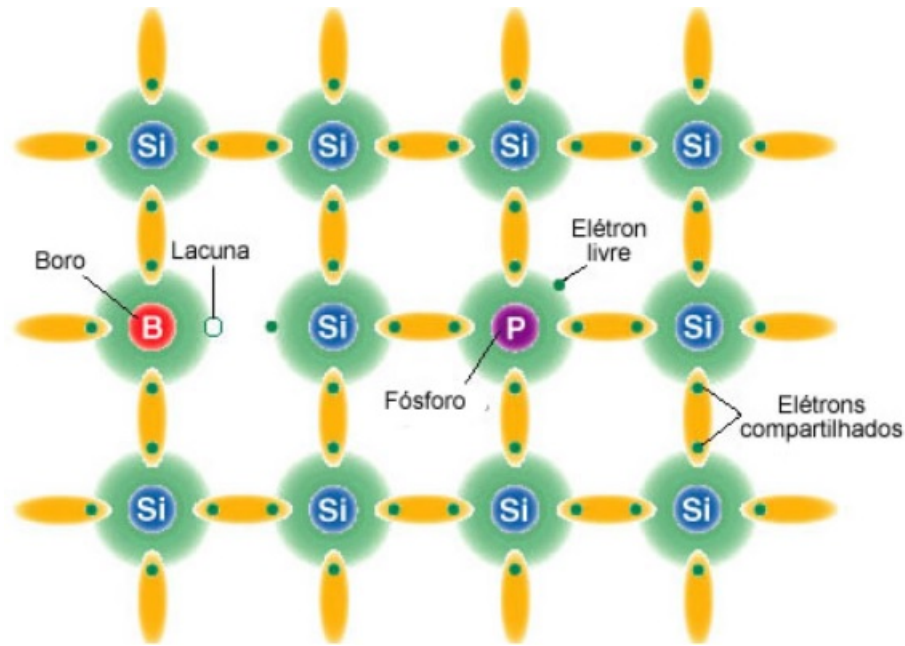


Figura 4.4 – Esquema de dopagem em uma rede cristalina. (INFOESCOLA, 2025)

III-A, que possuem três elétrons na camada de valência. O átomo dopante faz somente três ligações covalentes com os vizinhos, faltando um elétron, o que gera um buraco ou lacuna. Por isso, o semiconductor passa a ter um excesso de buracos em relação aos elétrons, fazendo com que essa lacuna se comporte como um portador de carga positiva, dando nome ao tipo (UFPR, 2025). É criado um nível extra de energia (“Níveis P”) próximo ao topo da banda de valência, como visto na Figura 4.6.

No tipo N, há aumento na concentração de elétrons livres na banda de condução, resultante da introdução de impurezas doadoras (átomos pentavalentes como fósforo, arsênio ou antimônio) que doam elétrons para a banda de condução, tornando os elétrons os portadores majoritários de carga. O elemento dopante pertencente a essa família tem um elétron a mais, que fica fracamente ligado e pode se mover livremente pela rede cristalina, resultando em excesso de elétrons. As impurezas doadoras criam um nível extra de energia (“Nível N”) próximo ao fundo da banda de condução.

A proximidade em energia entre esse nível da impureza e a banda de condução faz com que o elétron ligado à impureza tenha uma energia de ligação pequena. Mesmo à temperatura ambiente, a energia térmica é suficiente para “ionizar” a impureza e “doar” o elétron para a banda de condução, onde ele pode participar da condução elétrica, representado na Figura 4.7.

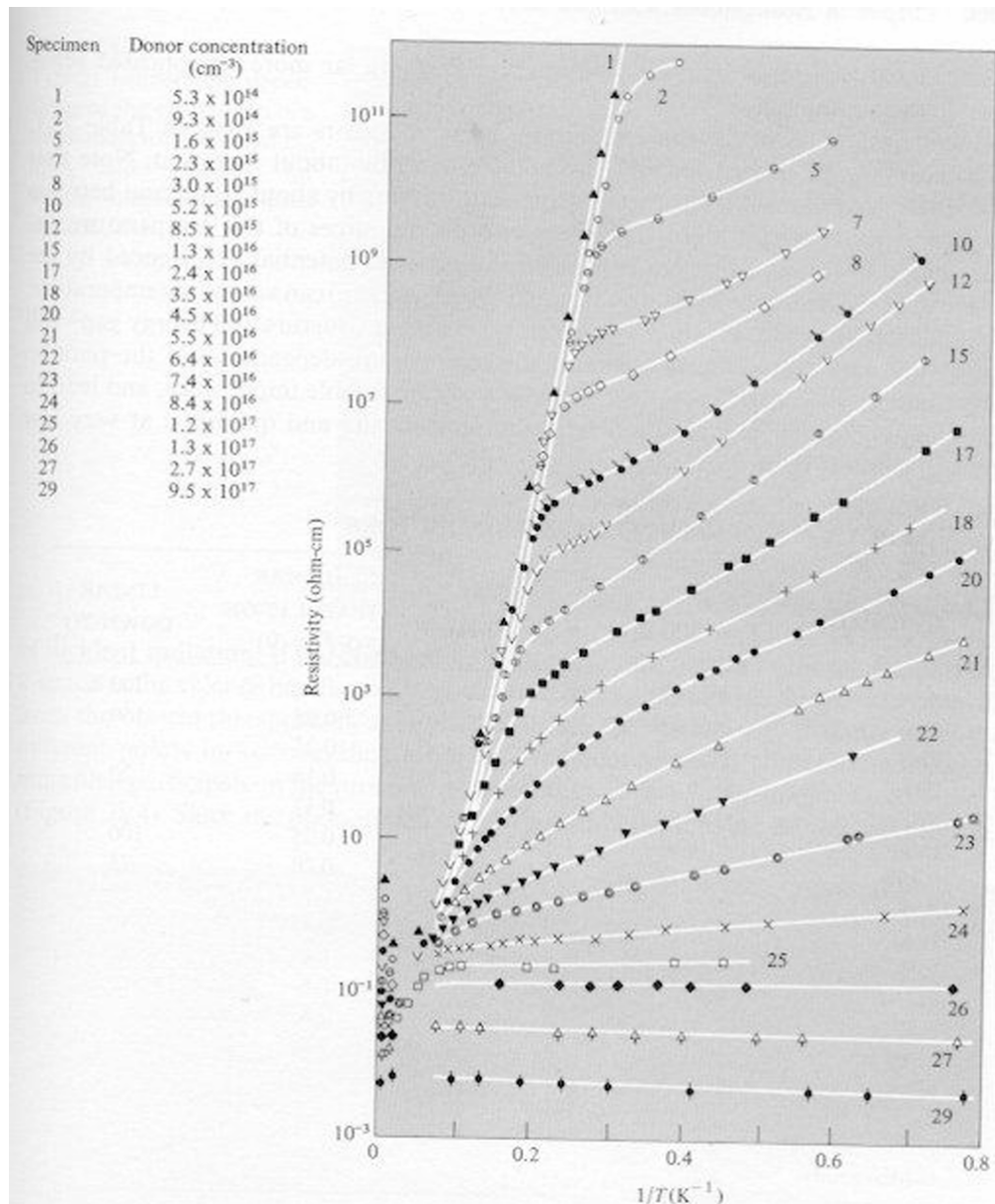


Figura 4.5 – Resistividade em função inverso da temperatura em Ge dopado com Sb, para várias concentrações de impureza. (ASHCROFT; MERMIN, 1976)

## 4.4 MICROELETÔNICA

### 4.4.1 A junção PN

Conhecendo os semicondutores do tipo P e do tipo N, nota-se que eles são antagonísticos, com o tipo N tendo excesso de elétrons e o tipo P tendo falta. Por conta dessas características, foi inventada a junção PN, estrutura básica em engenharia de semicondutores, como diodos e transistores. Pode-se observar na Figura 4.8 o funcionamento da junção. Quando colocados em contato, ocorre uma tendência de movimento dos elétrons para a região P, tornando-a negativa, e de buracos para a região N, tornando-a positiva. Essa difusão de cargas ocorre apenas em uma faixa estreita na interface entre

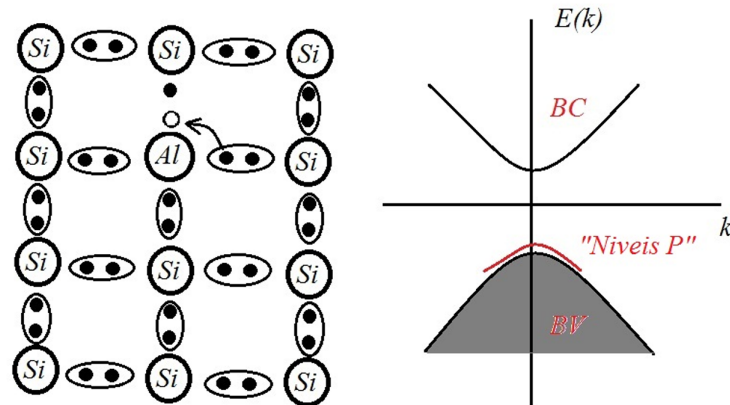


Figura 4.6 – Esquema da estrutura atômica de um semiconductor do tipo P e de suas bandas (UFPR, 2025)

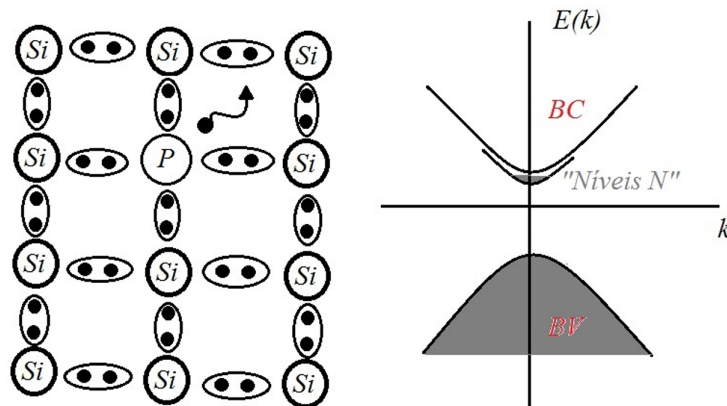


Figura 4.7 – Esquema da estrutura atômica de um semiconductor do tipo N e de suas bandas (UFPR, 2025)

os dois semicondutores, conhecida como região de depleção. Pode haver movimento de alguns elétrons, ocasionando a recombinação do par elétron-lacuna e criando uma região de neutralização das cargas. Essa região de depleção se comporta como um capacitor, impedindo a migração de novos elétrons livres pelo campo elétrico formado (UFRJ, 2025).

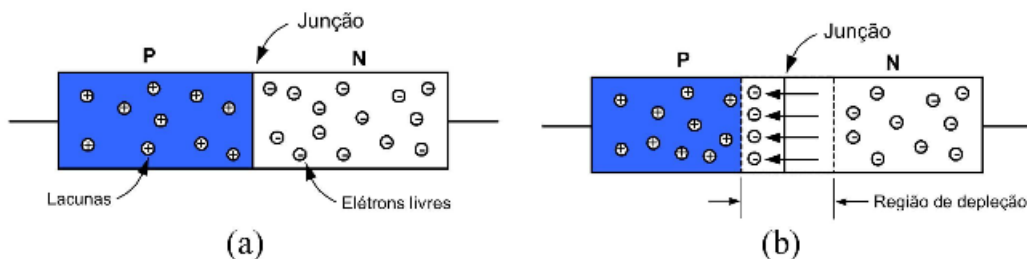


Figura 4.8 – Esquema de funcionamento da Junção PN (UNIFAI, 2025)

O semiconductor tipo P é usado como ânodo e o tipo N como cátodo. O ponto

fundamental para a eletrônica é a capacidade do diodo, dispositivo que possui a junção PN, de permitir corrente apenas em um sentido. A Figura 4.9 mostra o comportamento não linear no gráfico de corrente e tensão característico de um diodo de silício e germânio. Ao analisar a imagem, nota-se que, se uma tensão positiva é aplicada, uma corrente  $i_d$  surge, desde que ela seja maior que o valor  $V_d$ , que depende do tipo de material: germânio tem  $V_d = 0,3V$  e o silício,  $V_d = 0,6V$ , chamada tensão de polarização. A característica marcante dos diodos aparece ao se analisar que, em tensão negativa  $V_R$ , há uma resistência altíssima à passagem de corrente, até o ponto de ruptura reversa, quando há tanta energia que o diodo passa a conduzir. Esse ponto, no silício, depende do processo de fabricação e ocorre entre 50 e 1000 V.

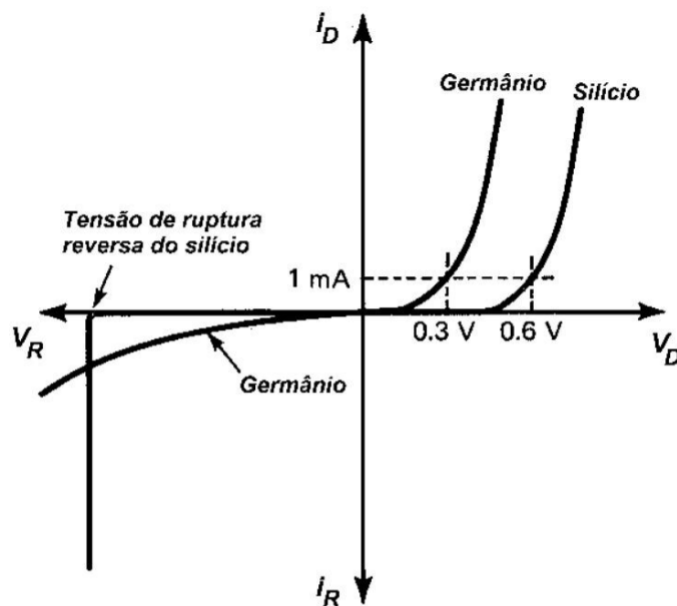


Figura 4.9 – Curvas características I-V para diodos de germânio e silício (UNIFAI, 2025)

#### 4.4.2 Transistor

O transistor é a unidade mínima de um microchip. Atualmente, um chip pode possuir bilhões de transistores em um espaço minúsculo, com as mais recentes tecnologias conseguindo miniaturizá-los e produzir em larga escala até os 3 nanômetros, bilhões de vezes menores que os 1,5 centímetros do primeiro transistor (Figura 3.1).

Os primeiros transistores foram os bipolares de junção (BJT), com as configurações NPN ou PNP. “É um dispositivo com três terminais. Num elemento com três terminais é possível usar a tensão entre dois dos terminais para controlar o fluxo de corrente no terceiro terminal, i.e., obter uma fonte controlável. O transistor permite a amplificação e comutação de sinais, tendo substituído as válvulas termo-iônicas na maior parte das aplicações” (ELECTRONICA-PT, 2025).

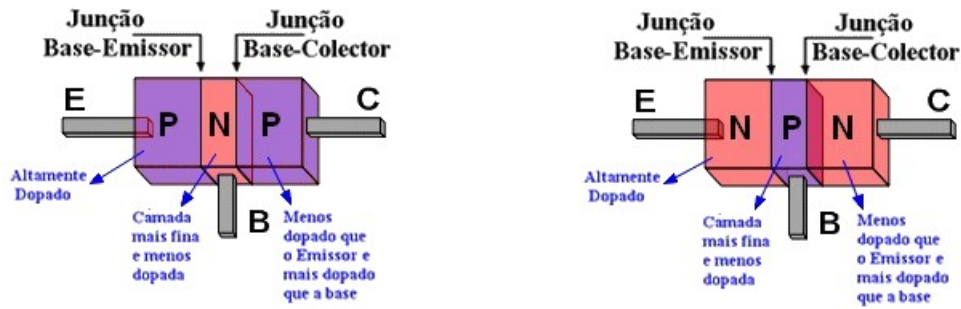


Figura 4.10 – Esquema dos transistores de junção PNP e NPN (UNIFAI, 2025)

A Figura 4.10 mostra o esquema de dois tipos de transistores de junção. Nela, observa-se a base (B), uma camada fina e levemente dopada, responsável pelo controle da corrente; o emissor (E), altamente dopado, que injeta portadores de carga (elétrons ou lacunas) na base; e o coletor (C), que coleta os portadores após a passagem pela base.

Esses dispositivos tiveram grande uso em amplificação de sinais e controle de circuitos, sendo revolucionários para a eletrônica, mas acabaram sendo substituídos pelos FETs (Field-Effect Transistor) e MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor). Os FETs foram importantes por controlarem a corrente elétrica por meio de um campo elétrico, diferente dos BJT, que precisam da corrente. Na Figura 4.11, vê-se a fonte (S), o dreno (D) e a comporta (G). O principal ponto é a capacidade de a corrente entre D e S ser regulada pela G, sem necessidade de corrente contínua no terminal de controle. No tipo N, o canal condutor é formado por elétrons, que são as partículas responsáveis pela condução.

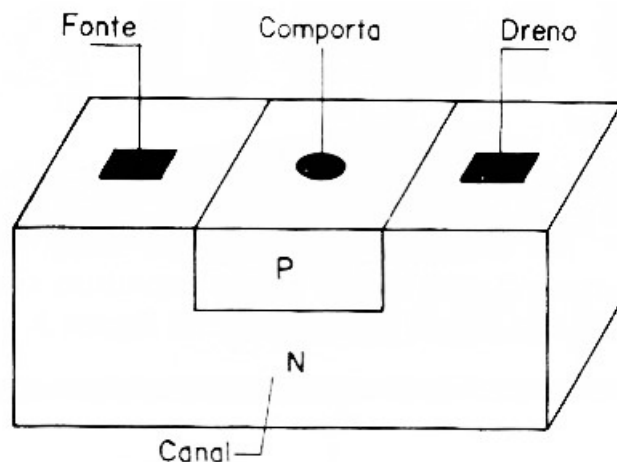


Figura 4.11 – Esquema de um FET tipo N (BRAGA, 2025)

O passo seguinte aos FETs foram os MOSFETs, onde existe uma camada isolante

de óxido entre G e o canal, aumentando substancialmente a impedância. A corrente entre source e drain ( $I_d$ ) depende da tensão aplicada no terminal gate em relação ao source ( $V_s$ ). O terminal gate cria um campo elétrico que ajusta a condutividade do canal: se  $V_{gs}$  for positivo (em MOSFET de enriquecimento), o campo atrai elétrons para formar ou ampliar o canal condutor. Se  $V_{gs}$  for negativo, em MOSFET de depleção ou JFET (Junction Field-Effect Transistor), o campo reduz o canal, podendo até fechá-lo.

A principal diferença está na estrutura: o MOSFET tem isolamento no gate, oferecendo maior eficiência energética e impedância mais alta, o que resulta em consumo desprezível quando estático. Por isso, foi largamente utilizado em aplicações modernas, como circuitos digitais e amplificadores.

#### 4.4.3 Chips: Estrutura e nomenclatura

Na Figura 4.12, pode-se ver a evolução dos FETs ao longo dos anos, as estruturas foram sendo adaptadas para habilitar as evoluções em desempenho e eficiência, sendo necessárias várias modificações para acompanhar a Lei de Moore e os avanços na indústria.

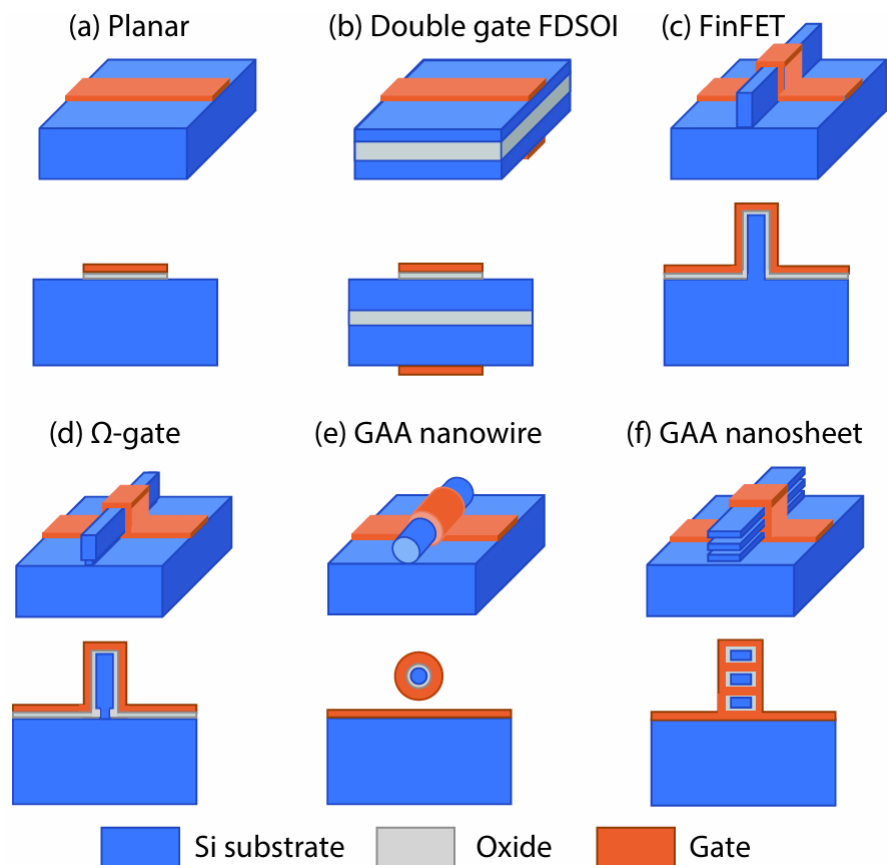
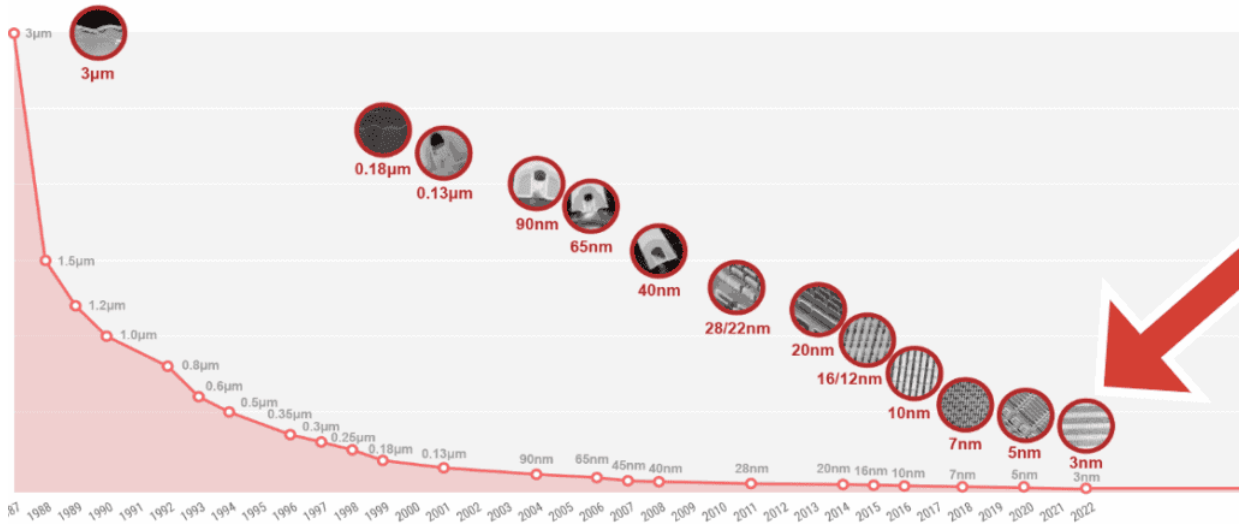


Figura 4.12 – Evolução dos FETs (SUN; OUTROS, 2021)

Uma métrica extremamente importante na classificação na indústria de microchips é a litográfica, como já explicado anteriormente, trata-se do processo onde são criados os

padrões microscópicos que formam os transistores e circuitos integrados. Esses processos foram evoluindo ao longo do tempo, onde a litografia foi se especializando e diminuindo o tamanho que conseguiria manufaturar os componentes do chip. Em inglês temos a nomenclatura "node", traduzida como nó, que representa a litografia do transistor.



**Figura 4.13 – Evolução da litografia nos chips ao longo do tempo. (9METERS, 2024)**

Atualmente, como visto na Figura 4.13, a litografia, ou nó, está por volta dos 3 nanômetros, um nanômetro (nm) equivalente a um bilionésimo de metro ( $10^{-9}$  metros), ou seja, um milionésimo de milímetro; entretanto, é de importância notável notar que essas, de fato, não são as medidas físicas dos projetos de chip em nenhuma escala.

Medidas fundamentais são Gate Pitch (GP), que é a distância entre o centro de um gate de transistor até o centro do gate adjacente. Metal Pitch (MP), espaçamento entre as trilhas metálicas que conectam os transistores. Na Figura 4.14 é possível observar os reais tamanhos que os nós mais modernos possuem.

A partir de 1997, iniciou-se um movimento na indústria que alterou fundamentalmente a pragmaticidade das nomenclaturas. O “nó de 0,25 micrôn/250 nm” apresentava um tamanho real de 200 nm GP, representando uma melhoria de 20% em relação ao que o nome sugeria, marcando o início da distorção dos padrões de nomenclatura (MORRIS, 2020).

Antes de 2011, o projeto dos transistores era essencialmente planar, conforme ilustrado na Figura 4.12b, tornando a medição do tamanho dos transistores relativamente direta e intuitiva. Contudo, a partir do nó de 22nm, tornou-se necessário migrar para a estrutura **FinFET** (Figura 4.12c), transformando os transistores em projetos fundamentalmente tridimensionais. Esta transição revolucionou a abordagem de design, pois múltiplas tecnologias de empilhamento passaram a surgir, permitindo melhorias de de-

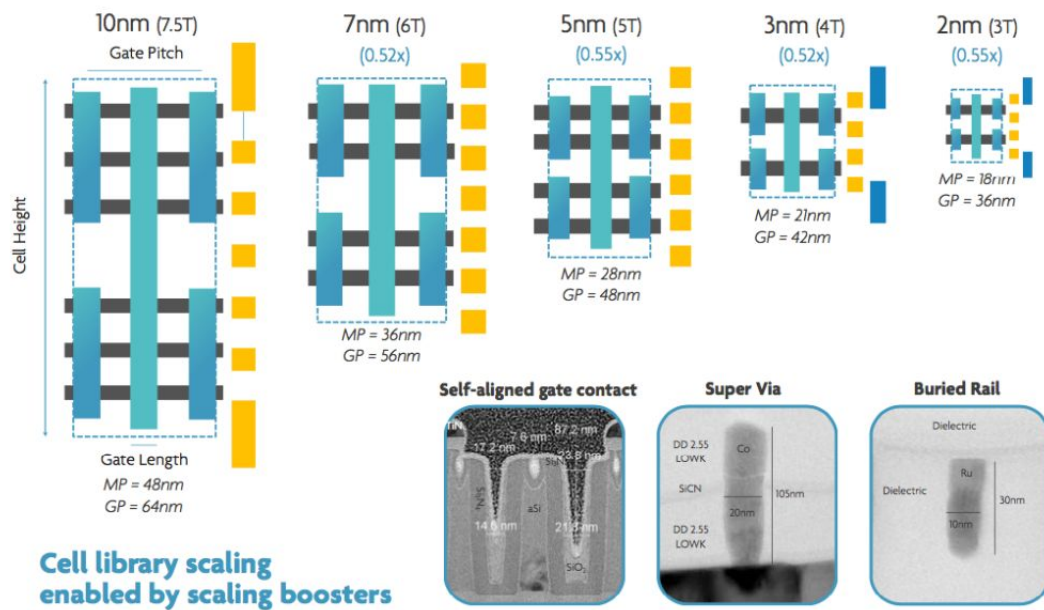


Figura 4.14 – Esquema do tamanho de um transistor. (TRANSISTOR..., 2023)

sempenho e eficiência não apenas através da redução dimensional, mas também mediante o empilhamento de mais transistores no mesmo volume ou em configurações espaciais otimizadas.

Essa evolução tecnológica ocasionou uma “guerra de nomenclaturas” entre as empresas fabricantes, visando obter vantagem competitiva no mercado. Desde 2017, a partir dos nós de 10 nm, as denominações como 10nm, 5nm e 3nm perderam completamente qualquer correlação com parâmetros físicos reais, transformando-se puramente em estratégias de marketing que confundem consumidores não especializados tecnicamente.

Conforme destacado no artigo (LIU et al., 2020), os avanços contemporâneos em desempenho e eficiência provêm de uma combinação de fatores que incluem melhorias em empacotamento, integração tridimensional, novos materiais, arquiteturas inovadoras e otimizações em diversos aspectos do design e fabricação dos chips, não mais exclusivamente uma sequência de miniaturização, conforme diz a Lei de Moore.

Reconhecendo essa problemática, a TSMC e outras fabricantes têm adotado uma nova abordagem de nomenclatura para seus nós de processo mais recentes. A TSMC, por exemplo, implementou um sistema de nomenclatura mais específico para sua família de processos de 3nm, utilizando códigos alfanuméricos que refletem as características específicas de cada variante: N3B (N3 Base), N3E (N3 Enhanced), N3P (N3 Performance) e N3X (N3 eXtreme). Esta abordagem visa resolver as confusões criadas pelas denominações tradicionais baseadas apenas em nanômetros, oferecendo clareza técnica sobre as capacidades reais de cada processo (MORRIS, 2020).

## 5 EXPANSÃO DA INDÚSTRIA DE SEMICONDUTORES PARA A ÁSIA

Sobre os semicondutores e sua produção concentrada na Ásia, a conceituada revista norte-americana *The Economist* afirmou: “São os chips que alimentam tudo, de celulares a carros elétricos, e representam 15% do PIB de Taiwan. Taiwan produz mais de 60% dos semicondutores do mundo e mais de 90% dos mais avançados. A maioria é fabricada por uma única empresa, a Taiwan Semiconductor Manufacturing Corporation (TSMC)” (*ECONOMIST*, 2023). Fica clara, assim, a dominância absoluta de um pequeno país insular, que há poucas décadas era majoritariamente agrário, mas hoje possui uma das indústrias mais sofisticadas do mundo. Surge, então, a indagação: como esse país, tão distante do local de criação dos chips, tornou-se seu principal fabricante?

### 5.1 O CONTEXTO ASIÁTICO: JAPÃO, COREIA DO SUL E TAIWAN

Atualmente, poucos países controlam boa parte da fabricação e manufatura da cadeia de semicondutores. Destacam-se Taiwan, Coreia do Sul e Japão na Ásia, enquanto Estados Unidos e Europa desempenham papel fundamental em pesquisa e desenvolvimento. A origem da futura dominância asiática remonta à década de 1960, no contexto pós-guerra. O Japão foi um dos primeiros a receber incentivos para desenvolver sua indústria de semicondutores.

#### 5.1.1 Começo pelo Japão e a importância da Sony

De 1942 até 1952, os Estados Unidos ocuparam o Japão. Um dos objetivos era desenvolver uma democracia capitalista, vendo o Japão como pilar da política dos EUA para o Pacífico e acreditando que o país precisava de relações comerciais saudáveis para não buscar apoio econômico em outro lugar, como a China comunista ou a União Soviética, com quem compartilha fronteira. Por isso, foi facilitado o acesso a informações que, de outra forma, seriam difíceis de obter, como periódicos que publicavam as principais novidades em eletrônica, especialmente sobre o transistor. Jornais como *Bell System Technical Journal*, *Journal of Applied Physics* e *Physical Review* foram distribuídos para físicos e engenheiros japoneses, chegando até Akio Morita, empresário fundamental para a inserção do Japão na indústria de semicondutores e um dos fundadores da Sony.

O Japão passou a ter um mercado agitado com a reconstrução pós-Segunda Guerra, e o governo queria urgentemente desenvolver sua capacidade de telecomunicação. Os japoneses tinham forte resistência a produtos estrangeiros, resultado do isolacionismo de mais de dois séculos, preferindo fabricar localmente aparelhos considerados impor-

tantes(MILLER, 2023). Não por acaso, a Sony, cujo nome deriva do latim *sonus* (som), foi pioneira ao fabricar e comercializar aparelhos de rádio com patentes concedidas por empresas americanas.

Akio Morita negociou, em 1953, o licenciamento da tecnologia do transistor. O valor da licença foi de US\$ 25.000, uma soma considerável para a Sony na época, representando cerca de 10% de seus ativos totais. Morita também foi fundamental para a chegada de empresas americanas com fábricas de semicondutores, ajudando a Texas Instruments a lidar com a burocracia japonesa em troca de uma porcentagem dos lucros. A diferença notável foi a estratégia de licenciar, em vez de copiar, já comprovada como fracassada em outros contextos.

A Sony se destacou ao identificar mercados e lançar produtos revolucionários; segundo Morita, o público não sabia o que era possível, mas eles sabiam. Em uma indústria ainda recente, era difícil imaginar a gama de produtos possíveis, e esse pensamento levou ao lançamento do Walkman, tocador portátil de músicas que levou a Sony ao estrelato mundial.

### 5.1.2 O empurrão governamental na Coreia do Sul e em Taiwan

Outros dois países notáveis são a Coreia do Sul e Taiwan, onde, diferente do Japão, a indústria de semicondutores foi fortemente apoiada pelo governo, com uma série de incentivos para a implementação local. A chegada aconteceu por volta da década de 1960; ambos eram países agrários e sem uma indústria sólida. Aproveitando a necessidade geopolítica dos Estados Unidos na Ásia e no Pacífico, inseriram-se na indústria de semicondutores.

Na Coreia do Sul, o desenvolvimento industrial foi impulsionado após o golpe militar de Chung-Hee Park, em 1961, quando o governo assumiu o controle da indústria com os Planos Quinquenais de Desenvolvimento Econômico e Social (PQDE), que tinham métodos rígidos para direcionar a economia. Esses planos deram ao governo forte influência sobre os conglomerados empresariais, chamados *chaebol*, semelhantes aos *zaibatsu* japoneses. Os *chaebol* têm estrutura interna essencialmente familiar, com executivos e cargos importantes nomeados dentro da mesma família proprietária e forte cooperação com o governo. As mais importantes são Samsung, Hyundai e LG, megacorporações que remontam a essa época e se mantêm influentes no cenário tecnológico atual (IBRAHIM, 2019).

Na década de 1960, a indústria era fundamentalmente utilizada como suporte, sendo voltada para montagem (*assembly*) e encapsulamento (*back-end*) de peças importadas, aproveitando o desejo de crescimento desses países, refletido em incentivos fiscais

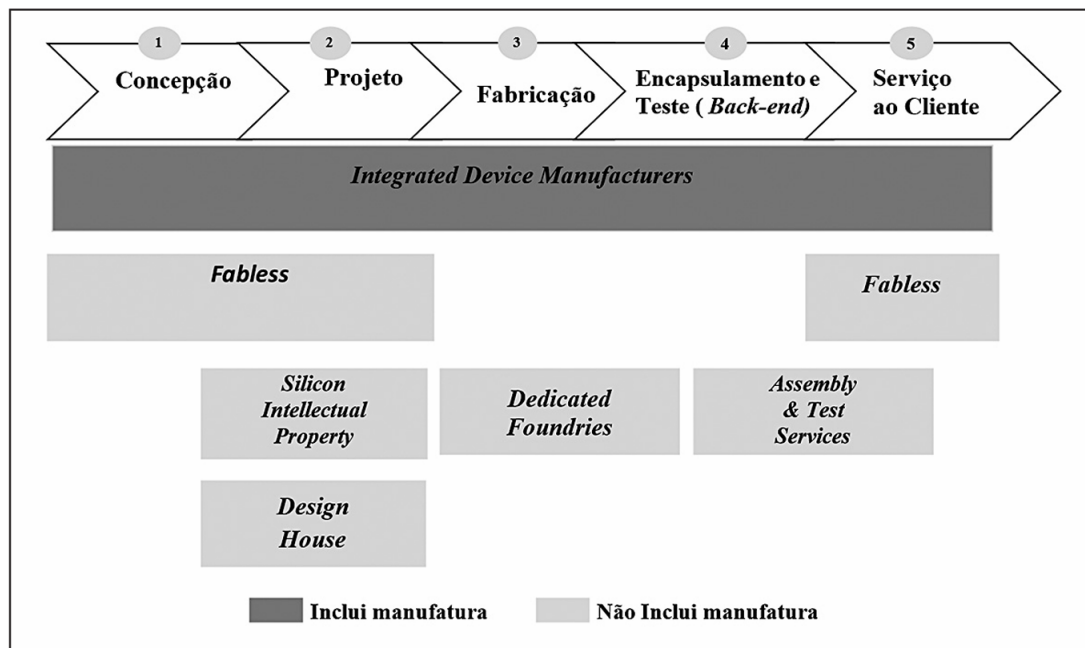


Figura 5.1 – Cadeia produtiva da Microeletrônica. (GUTIERREZ; LEAL, 2004)

e, principalmente, na mão de obra extremamente barata em comparação com países desenvolvidos da época. A Figura 5.1 mostra que apenas as etapas menos especializadas ficavam a cargo das unidades asiáticas, deixando lucros menos substanciais, enquanto pesquisa e desenvolvimento permaneciam nos países de origem das empresas.

A partir de 1970, o governo, junto aos *chaebols*, iniciou um processo de estruturação de conhecimento, criando e reformulando centros de pesquisa de semicondutores para viabilizar a fabricação doméstica. Muitas corporações utilizaram *joint ventures* e compra de licenças com multinacionais estrangeiras para evitar os custos proibitivos de desenvolver todos os processos por conta própria. Um exemplo do progresso obtido foi a Samsung, que comercializou, em 1984, o 64K DRAM (Dynamic Random Access Memory) cerca de 40 meses após os EUA e 18 meses após o Japão.

A DRAM é um tipo de memória volátil que armazena dados temporariamente enquanto o computador está em funcionamento, sendo fundamental para o desempenho de sistemas computacionais. Cada célula de DRAM consiste em um transistor e um capacitor, onde o capacitor armazena a informação em forma de carga elétrica. O termo “dinâmica” refere-se ao fato de que os dados armazenados precisam ser constantemente atualizados devido ao vazamento natural da carga elétrica dos capacitores. A capacidade da DRAM é medida em bits, onde 64K DRAM significa 64.000 bits de capacidade de armazenamento, representando uma tecnologia avançada para a época. Atualmente, as memórias mais avançadas podem possuir até 64 gigabits de armazenamento, que é na ordem de 1 milhão de vezes mais potente que há 40 anos.

Em 1988, a Samsung produziu o 4M DRAM seis meses após o Japão, seguida pela LG após seis meses. Essa evolução demonstra a força das políticas governamentais e empresariais para diminuir o abismo tecnológico em relação ao Japão e aos Estados Unidos.

É importante frisar que as escolhas governamentais por exportações e as características dos conglomerados fizeram com que o principal setor de semicondutores da Coreia fosse o segmento de memórias, como a DRAM, caracterizado por alto nível de padronização e escala. Os *chaebols* historicamente se concentraram na produção em massa de produtos padronizados para o mercado mundial, alinhando-se ao mercado de DRAM e permitindo que aplicassem seu foco em produção em larga escala e alcançassem economias de escala (IBRAHIM, 2019).

O movimento da Coreia do Sul e das empresas envolvidas foi bem-sucedido, como podemos observar pelos dados disponíveis atualmente. Em 2025, duas empresas sul-coreanas detêm a liderança mundial na fabricação de memória DRAM. Juntas, essas duas empresas, Samsung e SK Hynix, controlam 70% da fabricação mundial de memória DRAM, demonstrando o extraordinário sucesso da estratégia de desenvolvimento tecnológico implementada décadas atrás pelos *chaebols* e pelo governo sul-coreano (RESEARCH, 2025).

Taiwan, um conjunto de ilhas com histórico geopolítico conturbado e sem grandes riquezas naturais, conseguiu a proeza de se tornar peça fundamental para todas as indústrias de alta tecnologia do mundo. Seu início foi parecido com o da Coreia do Sul, aproveitando políticas externas dos EUA e oferecendo facilidades fiscais e políticas, além da mão de obra barata.

Assim como a Coreia, percebeu a necessidade de especializar sua indústria para torná-la competitiva. O responsável por essas decisões foi o ministro da economia K.T. Li, físico nuclear, que liderou as políticas de semicondutores. Li sabia que os EUA estavam inseguros em manter presença na Ásia após a derrota na Guerra do Vietnã e buscou criar laços rapidamente, pois quanto mais fábricas tivessem, mais seguros estariam. Assim, começou o delineamento do protótipo da política do “escudo de silício”(GALA, 2025).

Morris Chang entra na história ainda trabalhando para a Texas Instruments (TI). Dois colegas de doutorado em Stanford o convenceram de que Taiwan tinha clima empresarial favorável e salários baixos, atraindo qualquer capitalista americano. Após suavizar as relações com o governo de Taiwan, a TI aprovou a construção de novas instalações na ilha em julho de 1968. Em agosto de 1969, essa fábrica já montava seus primeiros dispositivos e, em 1980, fabricou sua bilionésima unidade.

Na década de 1980, Taiwan já era potência na montagem de microprocessadores, nos moldes da Coreia, mas ainda sem produção local de alta tecnologia. Sun Yun-suan, ministro de assuntos econômicos, e Wu Ta-You, diretor do Conselho Nacional de Ciência, eram as principais vozes a favor da nacionalização das tecnologias. Isso começou em 1973, com a inauguração do Instituto de Pesquisa Industrial e Tecnológica (ITRI), um laboratório com maciço apoio estatal, focado em condensar, direcionar e produzir conhecimento sobre fabricação de semicondutores([BREZNITZ, 2007](#)).

O ITRI foi essencial para difundir o conhecimento obtido nas potências ocidentais, com o famoso acordo de transferência de tecnologia gerido pela americana RCA, que convidou 40 engenheiros de Taiwan não só para aprender a ciência dos semicondutores, mas também técnicas de gerenciamento e conhecimento industrial, fundamentais para o sucesso americano. Embora as tecnologias transferidas já fossem ultrapassadas, o ponto-chave foi que, após alguns anos, a RCA saiu do mercado de semicondutores, mas deixou Taiwan com licença para todas as suas tecnologias. Taiwan focou então no desenvolvimento do CMOS, semicondutores de óxido de metal complementar, que se tornaria a principal tecnologia de chips.

O primeiro fruto do ITRI não foi a TSMC, mas a United Microelectronics Corporation (UMC), fundada por ex-funcionários do instituto. O governo de Taiwan deu amplo suporte à UMC, com financiamento, talentos e intermediação de contratos, tornando-se uma das fábricas mais lucrativas. Porém, a UMC falhou no principal objetivo do governo: expandir suas capacidades para competir mundialmente, limitando-se a chips de baixa complexidade para setores modestos. Taiwan percebeu que precisava mudar e, por isso, Morris Chang volta à história, agora com envolvimento mais direto e revolucionário.

## 5.2 FUNDAÇÃO DA TSMC

Taiwan buscava potencializar sua indústria e, nesse contexto, conforme ([MILLER, 2023](#)), o governo taiwanês, sob liderança do ministro K.T. Li, recrutou Morris Chang em 1985 devido à sua vasta experiência na Texas Instruments, visando transformar Taiwan em um polo global de semicondutores. Chang aceitou o desafio de internacionalizar a produção de semicondutores de Taiwan.

A Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) foi fundada em 1987, quando Morris tinha 56 anos. O apoio estatal era evidente: 48% da empresa pertenciam à China Development Corporation, do partido Kuomintang, e o restante vinha de capital privado, com o governo obrigando magnatas locais a investir na nova empresa. Os laços com os EUA se mantiveram, como quando Don Broks, ex-executivo da TI, foi presidente da TSMC de 1991 a 1997. A Philips, produtora europeia de semicondutores, também

entrou como sócia, detendo 27,5% da TSMC e transferindo tecnologia de 1,5 micron, o que foi fundamental para o início da empresa.

O contraste estratégico entre Taiwan e Coreia do Sul ajuda a explicar a diferença estrutural e de dominância no mercado. Diferente do governo sul-coreano, Taiwan criou várias pequenas empresas para competir na cadeia de suprimentos e fabricação, estimulando a competitividade sem inflar ativos monetários nem criar protecionismo interno. Isso resultou em uma máquina administrativa robusta nas empresas sobreviventes, focadas em P&D, muito semelhante à cultura japonesa.

### 5.2.1 A visão de Morris Chang e a transformação da indústria local em global

No contexto da fundação da TSMC, todas as produtoras como AMD, Intel e TI possuíam suas próprias fábricas, tornando o investimento necessário para novas empresas entrarem no mercado extremamente alto. A TSMC inovou ao ser a primeira a adotar o modelo *pure-play foundry*, focando em fabricar chips para outras empresas, sem competir diretamente com elas. Morris Chang já havia apresentado essa ideia à TI em 1976, mas ela foi descartada. Agora, com carta branca, pôde implementar o modelo, que se provou a base do sucesso.

Chang percebeu que os gastos com P&D para estar na vanguarda seriam sempre crescentes e que só seria possível ganhar com economia de escala, atendendo a muitos clientes. Um movimento começou no Vale do Silício com pequenas empresas projetando seus próprios chips. A revolução veio com Lynn Conway e Carver Mead, criadores do Very-Large-Scale Integration (VLSI), sistema de fabricação de chips com milhões ou bilhões de transistores em uma única pastilha, remodelando o design de chips e permitindo a separação entre projeto e fabricação. Assim, empresas podiam projetar chips sem precisar investir bilhões em fábricas, e a TSMC conseguiu o chamado “catching-up”.<sup>1</sup>

Nesse contexto, as indústrias do Vale do Silício e de Taiwan se entrelaçaram, com inúmeras empresas surgindo entre 1980 e 1990. Empresas como Qualcomm (chips para celulares), NVIDIA (computação gráfica e inteligência artificial) e Apple são parceiras de longa data da TSMC. Muitas, como Qualcomm e NVIDIA, desde a fundação adotaram o conceito de *fabless*, focando em concepção, projeto e serviço ao cliente, enquanto as *foundries* ficaram responsáveis pela fabricação dos chips.

Em síntese, a TSMC tornou-se dominante ao ser pioneira e líder no modelo *pure-play foundry*, combinando investimento massivo em tecnologia de ponta, foco estratégico no mercado global e colaboração com os principais designers de chips do mundo. O apoio

<sup>1</sup> Vale notar que Lynn Conway foi uma das pioneiras em transição de gênero nos EUA, superando muitos obstáculos na carreira e tornando-se referência mundial em eletrônica.

governamental inicial, a criação de um ecossistema favorável no Hsinchu Science Park e a atração de talentos e tecnologia estrangeira foram fundamentais para o sucesso.

### 5.3 RELAÇÕES ENTRE TAIWAN, CHINA, ESTADOS UNIDOS E EUROPA

Já ficou evidente que a geopolítica foi fundamental para consolidar muitas das indústrias atuais, especialmente as de alta tecnologia como a Coreia do Sul, Japão e Taiwan, todos parceiros dos EUA no pós-guerra e sob sua influência.

A produção, embora concentrada, resulta da confluência de várias entidades, como países e empresas privadas. Os Estados Unidos lideram em concepção e projeto, com empresas como NVIDIA e Apple, que em 2025 valem acima de US\$ 3 trilhões cada. A Ásia se especializou em fabricação, enquanto a Europa fornece o maquinário mais avançado, como as máquinas de litografia ultravioleta extrema (EUV) da holandesa ASML, essenciais para romper a barreira dos 5 nanômetros. A ASML surgiu de um desmembramento da Philips, a mesma empresa que ajudou na fundação da TSMC.

Para demonstrar a complexidade do sistema, pode-se citar o processo de geração de luz EUV. Engenheiros desenvolveram uma estratégia que consiste em impulsionar uma pequena esfera de estanho, com diâmetro na ordem de micrômetros, através de um ambiente de vácuo a alta velocidade. Em seguida, essa esfera é atingida por um pulso duplo de laser: o primeiro disparo serve para aquecer e vaporizar o material, enquanto o segundo tem como objetivo transformá-lo em plasma, atingindo temperaturas de centenas de milhares de graus Celsius. Esse procedimento é repetido cerca de 50 mil vezes por segundo para gerar a quantidade de luz necessária para a fabricação dos chips (ASML, 2025). O sistema é ilustrado na Figura 5.2.

A empresa Trumpf levou uma década para criar o laser necessário, com 457.329 componentes. Depois, foi preciso recorrer à alemã Zeiss, fabricante dos sistemas ópticos mais precisos do mundo, para focalizar o laser, desenvolvendo espelhos com suavidade sem precedentes e impurezas praticamente inexistentes. Para se ter uma ideia da precisão, a empresa afirmou que, se esses espelhos tivessem as dimensões da Alemanha, suas maiores imperfeições não ultrapassariam um décimo de milímetro. Para garantir que a luz seja direcionada com extrema exatidão, é fundamental que esses espelhos permaneçam absolutamente estáticos, exigindo sistemas mecânicos e sensores de altíssima precisão. Segundo a Zeiss, seus equipamentos seriam capazes de apontar um laser e atingir uma bola de golfe posicionada à distância da Lua.

Ressaltar a complexidade da fabricação e dos equipamentos e os países envolvidos

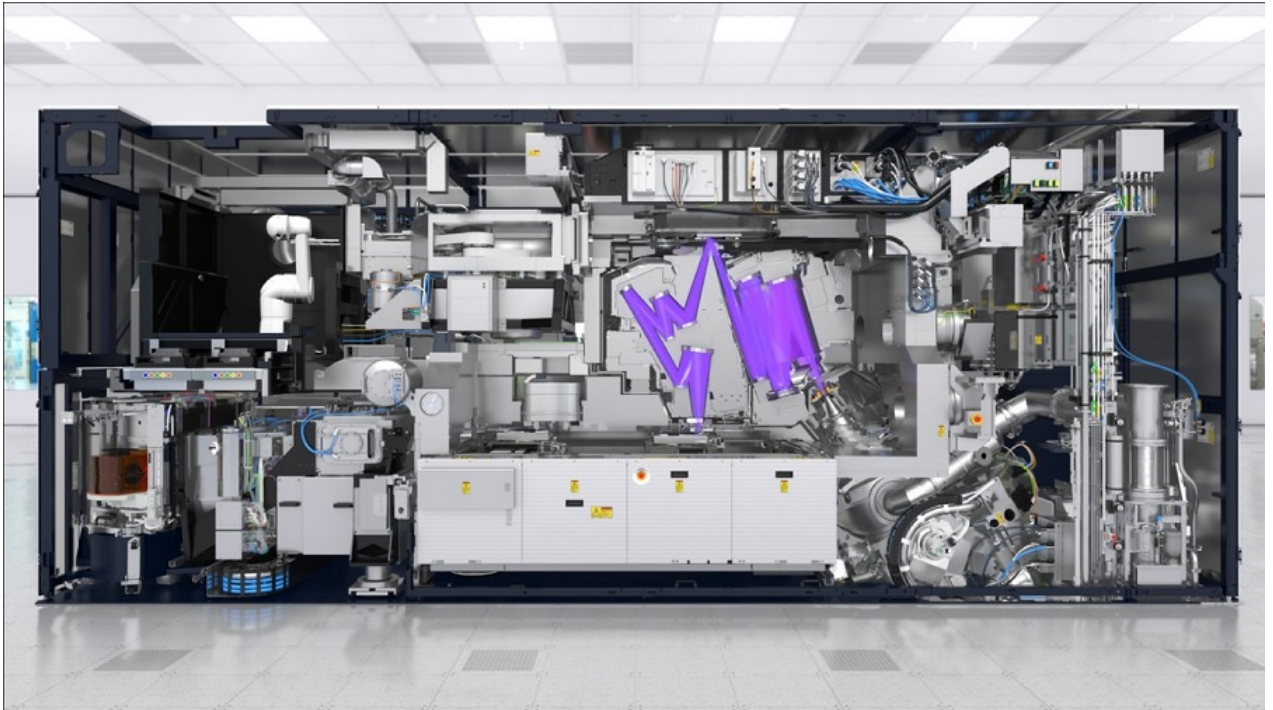


Figura 5.2 – Esquema de uma máquina de EUV.(ASML, 2025)

é importante, pois nenhum deles mantém uma relação geopolítica de confiança para transferência de conhecimento com a China. Em especial, Taiwan tem um longo histórico de rivalidade com a China, sendo considerada pelo governo chinês como parte de seu território.



Figura 5.3 – Mapa de Taiwan.(ISTOCK, 2025)

Ao observar a Figura 5.3, nota-se a proximidade geográfica. Limitando-se ao século XX, a China foi domínio japonês até 1945. Após a Segunda Guerra Mundial, voltou ao território chinês, mas, em 1949, a guerra civil chinesa foi vencida pelos comunistas e o governo republicano exilou-se em Taiwan, fundando a República da China. Até 1970, os EUA consideravam Taiwan o legítimo governo chinês, mas, no início da década, a China assumiu o comando da cadeira permanente no Conselho de Segurança da ONU e foi reconhecida por muitos países. Em 10 de abril de 1979, o Congresso americano aprovou a Lei de Relações com Taiwan, confirmando o apoio militar à ilha, transformando-a, na prática, em um protetorado americano. As tensões aumentaram em 2005, quando a China aprovou a Lei Anti-Secessão, considerando Taiwan parte da China continental e autorizando o uso de força militar em caso de declaração de independência. Como esse contexto geopolítico coloca os semicondutores no centro das tensões entre China e Taiwan?

### **5.3.1 Dependência global de semicondutores e vulnerabilidades nas cadeias de suprimento**

O mundo moderno, eletrônico e digital, tornou-se completamente dependente dos microchips fabricados a partir dos semicondutores, o que fica evidente ao observar a valorização das ações das big techs e a concentração de poder econômico em um mundo cada vez mais polarizado e desigual.

Durante boa parte do século XX, a China não teve boa relação com o Ocidente. Após a guerra civil, passou por turbulências internas e ficou isolada, com poucas relações com outros países. Até a morte de Mao Tse Tung e a abertura econômica, estava estagnada industrialmente, o que sufocou sua indústria de semicondutores. Havia apenas 1.500 computadores em todo o país, mostrando sua irrelevância no cenário mundial.

Esse cenário mudou um pouco com a fundação da SMIC, produtora chinesa de semicondutores, em 2000. Ela prosperou por um tempo, mas não conseguiu acompanhar a evolução da indústria global, principalmente por não se integrar às companhias ocidentais e buscar independência do Vale do Silício. Isso, somado às sanções unilaterais impostas pelos EUA desde o governo Trump (2017-2021) e mantidas por Biden (2021-2025), impediu a China de obter máquinas avançadas da ASML, sob o pretexto de proteger a economia americana e a segurança nacional. Empresas chinesas, como a Huawei, foram proibidas de obter licenças intelectuais ou negociar com empresas americanas, estrangulando sua divisão de eletrônica e microchips. A Huawei, por exemplo, ficou impedida de usar até mesmo o sistema operacional Android, sendo forçada a desenvolver seus próprios produtos.

Essas ações resultaram em estagnação tecnológica, com a capacidade de produção chinesa limitada a 7 nm, patamar em que as máquinas da ASML não são necessárias. Isso

gerou grande pressão sobre a indústria chinesa, especialmente política, acirrando ainda mais a polarização entre China e EUA.

A localização da TSMC, a pouco mais de uma centena de quilômetros da costa chinesa, concentra as máquinas mais importantes e valiosas do mundo, tornando o cenário ainda mais tenso. O Mar do Sul da China, que inclui Taiwan, possui uma das maiores presenças militares do planeta e é considerado por alguns o local mais militarizado do mundo (FERREIRA, 2025). Estados Unidos, Japão, China e Taiwan mantêm presença naval constante no Estreito de Taiwan, com os EUA deixando claro seu compromisso com a defesa da ilha. Uma guerra entre Taiwan e China teria consequências catastróficas para toda a economia mundial, com especialistas da Bloomberg Intelligence estimando um impacto de 10% do PIB global, cerca de US\$ 10 trilhões, valor superior ao da COVID-19 e à crise financeira de 2008 (BLOOMBERG, 2024).

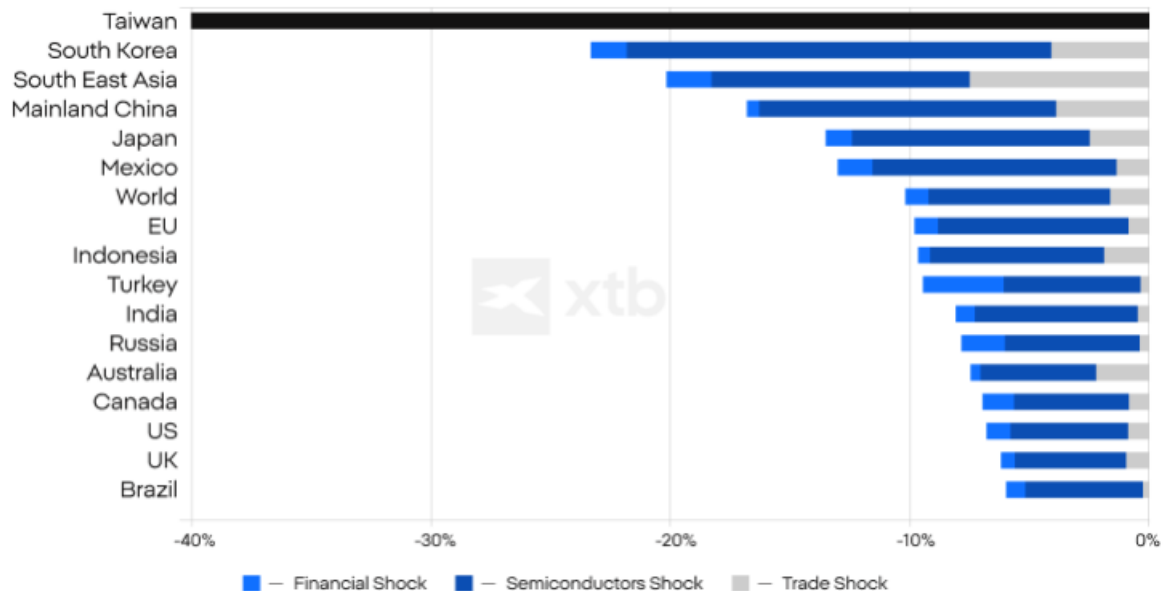


Figura 5.4 – Estimativa do impacto mundial de uma guerra em Taiwan.(XTB, 2025)

A Figura 5.4 demonstra claramente o impacto gigantesco, até mesmo no Brasil, que depende totalmente de Taiwan para semicondutores avançados e veria sua economia recuar em média 5% no primeiro ano. Todo esse cenário é fundamental para entender o conceito do “Escudo de Silício”, termo usado para designar a proteção especial existente em Taiwan devido à concentração da produção mundial.

Embora não haja sinais imediatos de guerra, há motivos para preocupação. A constante movimentação militar chinesa, com exercícios cada vez mais frequentes ao redor de Taiwan, gera apreensão. Em dezembro de 2024, a China realizou o maior exercício militar no estreito de Taiwan em mais de três décadas(VEJA, 2025), e há projeções do governo americano de que a China planeja uma ação militar, seja invasão ou bloqueio

naval, em 2027, mantendo os governos em alerta máximo([INDIA, 2025](#)).

## 6 CONCLUSÃO

A indústria de semicondutores foi uma das precursoras do fenômeno da globalização, com seu mercado de massa sendo criado e se expandindo globalmente, enquanto o transistor promoveu a revolução que levou a eletrônica para cada aspecto da vida cotidiana humana na contemporaneidade. Com sua invenção nos Estados Unidos, uma sequência de evoluções industriais e inovações técnicas propiciou o surgimento de uma produção em massa que foi suportada pelo fomento de um mercado para a recém-criada tecnologia, impulsionado pelo livre mercado capitalista americano e pelas competições acirradas surgidas no recém-criado Vale do Silício.

No desenrolar da Guerra Fria e das consequências da Segunda Guerra Mundial, o jogo geopolítico foi se intensificando. Com o lado americano saindo vencedor, as indústrias do Japão, Coreia do Sul e Taiwan foram impulsionadas por interesses de domínio geopolítico mundial, com governos e empresários corroborando para que esse cenário se consolidasse. O Japão iniciou esse movimento através de empresas como a Sony, que licenciou a tecnologia do transistor em 1953, enquanto a Coreia do Sul e Taiwan desenvolveram estratégias governamentais específicas para inserção na cadeia global de semicondutores.

Embora a crescente globalização tenha levado a cadeia da indústria a se diversificar pelo mundo - como a produção de silício sendo dominada pela China, com o Brasil estando em terceiro lugar, e a montagem dos produtos sendo feita em lugares como a Zona Franca de Manaus -, a fabricação de microchips avançados ficou extremamente restrita a poucos países. Esta concentração absoluta de patentes e know-how criou uma dependência tecnológica sem precedentes, onde Taiwan produz mais de 60% dos semicondutores mundiais e mais de 90% dos mais avançados.

A complexidade dessa cadeia produtiva é evidenciada pela interdependência entre diferentes regiões: os Estados Unidos lideram em concepção e projeto com empresas como NVIDIA e Apple; a Ásia especializou-se em fabricação; e a Europa fornece o maquinário mais avançado, como as máquinas de litografia ultravioleta extrema (EUV) da holandesa ASML, essenciais para romper a barreira dos 5 nanômetros. Nenhum país consegue produzir chips avançados de forma completamente independente.

Essa concentração levou a uma corrida liderada pela China, segunda maior economia mundial e única nação com poder suficiente para alterar o jogo geopolítico atual. As tensões sino-americanas resultaram em sanções que impedem a China de obter tecnologias avançadas, limitando sua capacidade produtiva a 7 nanômetros e criando pressões cres-

centes sobre Taiwan. A localização estratégica de Taiwan, a pouco mais de uma centena de quilômetros da costa chinesa, concentra as máquinas mais importantes e valiosas do mundo, tornando o cenário ainda mais tenso.

A fundação e consolidação da TSMC representou o surgimento do “Escudo de Silício” que, pelo menos por enquanto, impede uma invasão chinesa na ilha. Morris Chang, ao criar o modelo pure-play foundry, transformou Taiwan no centro nervoso da economia digital global. Especialistas estimam que uma guerra entre Taiwan e China teria consequências catastróficas para toda a economia mundial, com impacto de aproximadamente 10% do PIB global, cerca de US\$ 10 trilhões.

Este cenário demonstra como a indústria de semicondutores transcendeu sua dimensão puramente tecnológica para se tornar um elemento central da geopolítica contemporânea. A dependência global dessa tecnologia criou uma nova forma de dissuasão, onde o controle sobre a produção de chips tornou-se tão estratégico quanto o domínio de recursos energéticos ou militares. Taiwan, uma pequena ilha sem recursos naturais significativos, conseguiu a proeza de se posicionar como peça fundamental no tabuleiro geopolítico mundial, provando que, na era da informação, o conhecimento tecnológico e a capacidade produtiva podem ser mais poderosos que exércitos convencionais.

## REFERÊNCIAS

- 9METERS. *3nm Chip Manufacturing Semiconductor Technology*. 2024. Acesso em: 15 jun. 2025. Disponível em: <<https://9meters.com/technology/pc/3nm-chip-manufacturing>>.
- ADDISON, C. **Silicon Shield: Taiwan's Protection Against Chinese Attack**. [S.l.]: iUniverse, 2001.
- ARMY, U. D. of the. **Basic Theory and Application of Electron Tubes**. [S.l.], 1952. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<http://www.schematicsforfree.com/files/Theory,%20Education%20&%20Reference/Components/Basic%20Theory%20and%20Application%20of%20Vacuum%20Tubes.pdf>>.
- ASHCROFT, N. W.; MERMIN, N. D. **Solid State Physics**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976. ISBN 0030839939.
- ASML. **EUV lithography systems**. 2025. Acesso em 15 de junho de 2025. Disponível em: <<https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems>>.
- BERLIN, L. **The Man Behind the Microchip**. [S.l.]: Oxford University Press, 2005. 112 p.
- BLOCH, F. Über die quantenmechanik der elektronen in kristallgittern. **Zeitschrift für Physik**, Springer, v. 52, n. 7-8, p. 555–600, 1929.
- BLOOMBERG. **If China Invades Taiwan, It Would Cost World Economy \$10 Trillion**. 2024. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/features/2024-01-09/if-china-invades-taiwan-it-would-cost-world-economy-10-trillion>>.
- BOHR, N.; EINSTEIN, A.; HEISENBERG, W. et al. **Scientific Correspondence with Bohr, Einstein, Heisenberg and others, vol II**. [S.l.]: Springer, 1985. 94 p.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos**. 10. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2009. ISBN 978-607-442-292-4.
- BRAGA, N. C. **Conheça o FET**. 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://www.newtoncbraga.com.br/como-funciona/19651-conheca-o-fet-art4453.html>>.
- BRAUN, A.; BRAUN, E.; MACDONALD, S. **Revolution in Miniature: The History and Impact of Semiconductor Electronics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1982. 11–12 p. ISBN 978-0521289030.
- BREZNITZ, D. **Innovation and the State: Political Choice and Strategies for Growth in Israel, Taiwan, and Ireland**. New Haven: Yale University Press, 2007. 89–112 p. ISBN 978-0-300-11331-0.
- BROCK, D. **Makers of the Microchip: A Documentary History of Fairchild Semiconductor**. [S.l.]: MIT Press, 2010.
- BRUM, J. A. **Física de Semicondutores**. 2012. Acesso em: 24 abr. 2025. Disponível em: <<https://sites.ifi.unicamp.br/brum/files/2014/01/FIJAB1s2012P1Ch2Historia.pdf>>.

CERRUZI, P. The other side of moore's law: The apollo guidance computer, the integrated circuit, and the microelectronics revolution, 1962-1975. In: LANIUS, R.; MCCURDY, H. (Ed.). **Nasa Spaceflight**. [S.l.]: Palgrave Macmillan, 2018.

CHANG, M. **História oral de Morris Chang, entrevista do Computer History Museum**. 2007. Entrevista por Alan Patterson, 24 de agosto de 2007.

CHEUNG, P. R.; BRACH, B. B. **Conquering the Electron**. [S.l.]: Rowman & Littlefield, 2012. 228 p.

DIAMOND, J. **Armas, Germes e Aço: Os Destinos das Sociedades Humanas**. [S.l.]: Editora Record, 1997.

ECONOMIST, T. **Taiwan's dominance of the chip industry makes it more important**. 2023. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://www.economist.com/special-report/2023/03/06/taiwans-dominance-of-the-chip-industry-makes-it-more-important>>.

ELECTRONICA-PT. **Transistor: tipos**. 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://www.electronica-pt.com/componentes-eletronicos/transistor-tipos>>.

FERREIRA, K. de S. **Conflito do mar do sul da china e a unclos**. 2025.

FOREST, L. de. **The Audion**. 2011. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <[https://www.leedeforest.org/The\\_Audion.html](https://www.leedeforest.org/The_Audion.html)>.

GALA, P. **Como o Estado criou a TSMC, maior fabricante de semicondutores do mundo**. 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://www.paulogala.com.br/como-o-estado-criou-a-tsmc-maior-fabricante-de-semicondutores-do-mundo/>>.

GUARNIERI, M. The age of vacuum tubes: Early devices and the rise of radio communications. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, p. 41–43, March 2012.

GUARNIERI, M. The age of vacuum tubes: Merging with digital computing. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, p. 52–55, September 2012.

GUARNIERI, M. The age of vacuum tubes: The conquest of analog communications. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, p. 52–54, June 2012.

GUDDEN, B. Elektrizitätsleitung in kristallisierten stoffen unter ausschluss der metalle. **Ergebnisse der Exakten Naturwissenschaften**, v. 3, p. 116, 1924.

GUTIERREZ, R. M. V.; LEAL, C. F. C. Estratégias para uma indústria de circuitos integrados no brasil. **BNDES Setorial**, n. 19, p. 3–22, mar. 2004. ISSN 1413-1801.

HALL, E. C. **Journey to the Moon: The History of the Apollo Guidance Computer**. [S.l.]: American Institute of Aeronautics, 1996.

HOBBS, T. **Leviatã**. [S.l.]: Oxford University Press, 1651. Tradução e edição variam conforme o idioma.

IBRAHIM, H. C. A política industrial na coreia do sul e no brasil durante o paradigma tecnológico da microeletrônica. **Rev. Cadernos de Campo**, v. 27, n. 1, 2019.

INDIA, E. T. **China-Taiwan 2027 deadline: How China could crush Taiwan without firing a shot.** 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://economictimes.indiatimes.com/news/defence/china-taiwan-2027-deadline-how-china-could-crush-taiwan-without-firing-a-shot/articleshow/119429188.cms?from=mdr>>.

INFOESCOLA. **Condutores e isolantes.** 2025. Acesso em: 26 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/quimica/dopagem-eletronica/>>.

ISTOCK. **Área de Taiwan, mapa político, Área Livre da República da China - Ilustração em Alta Resolução.** 2025. Acesso em 15 de junho de 2025. Disponível em: <<https://www.istockphoto.com/br/vetor/%C3%A1rea-de-taiwan-mapa-pol%C3%ADtico-%C3%A1rea-livre-da-rep%C3%ABlica-da-china-gm1387802350-445634453>>.

LAWS, D. A company of legend: The legacy of fairchild semiconductor. **IEEE Annals of the History of Computing**, v. 32, n. 1, 2010.

LIU, C.; LEE, Y.; CHANG, Y.; CHEN, K.; WU, W. Challenges and opportunities for advanced semiconductor manufacturing. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**, v. 33, n. 2, p. 143–151, 2020. Acesso em 15 de junho de 2025. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9063714>>.

MELIKHOV, E. **Oral History of Alexander Shokin.** 2025. Acesso em: 14 abr. 2025. Disponível em: <<https://archive.computerhistory.org/resources/access/text/2013/10/102746435-05-01-acc.pdf>>.

MILLER, C. **A Guerra dos Chips.** [S.l.]: Leya, 2023.

MORRIS, K. No more nanometers. **EE Journal**, 2020. Accessed: 2025-06-15. Disponível em: <<https://www.eejournal.com/article/no-more-nanometers/>>.

RADOSH, R.; MILTON, J. **The Rosenberg File: A Search for the Truth.** 2. ed. New Haven: Yale University Press, 1997. Acesso em: 17 jun. 2025. ISBN 978-0300072051. Disponível em: <<https://yalebooks.yale.edu/book/9780300072051/the-rosenberg-file/>>.

RESEARCH, C. **SK Hynix Takes Top Spot For First Time on Continued HBM Demand.** 2025. Acesso em 15 de junho de 2025. Disponível em: <<https://www.counterpointresearch.com/insight/post-insight-research-notes-blogs-sk-hynix-takes-top-spot-for-first-time-on-continued-hbm-demand/>>.

RICHARDSON, O. W. **The Emission of Electricity from Hot Bodies.** London: Longmans, Green and Co., 1916.

RIORDAN, M.; HODDESON, L. **Crystal Fire: The Birth of the Information Age.** [S.l.]: W. W. Norton & Company, 1997. 112–114 p.

ROSER, M.; RITCHIE, H. **Moore's Law.** 2019. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/moores-law>>.

San Francisco Chronicle. **Satellite Reported Seen over S.F.** 1957. 1 p.

SCHRÖDINGER, E. An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. **Physical Review**, APS, v. 28, n. 6, p. 1049–1070, 1926.

SHURKIN, J. **Broken Genius: The Rise and Fall of William Shockley, Creator of the Electronic Age**. [S.l.]: Palgrave Macmillan US, 2006. ISBN 9780230551923.

SUN, Y.; OUTROS. The past and future of multi-gate field-effect transistors: Process challenges and reliability issues. **Journal of Semiconductors**, v. 42, n. 2, p. 023102, 2021.

TILLI, M.; MOTOOKA, T.; AIRAKSINEN, V.-M.; FRANSSILA, S.; PAULASTO-KRÖCKEL, M.; LINDROOS, V. Chapter 6 - thin films on silicon. In: **Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (Second Edition)**. William Andrew Publishing, 2015. p. 124–205. ISBN 9780323299657. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323299657000063>>.

TRANSISTOR Options Beyond 3nm. **Semiconductor Engineering**, 2023. Accessed: 2025-06-15. Disponível em: <<https://semiengineering.com/transistor-options-beyond-3nm/>>.

UFPR. **Física dos Semicondutores**. 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <[https://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE069/5-Fis\\_Semic.pdf](https://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE069/5-Fis_Semic.pdf)>.

UFRJ. **Semicondutores**. 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://www.if.ufrj.br/~capaz/fmc/cap8-semicondutores.pdf>>.

UNICAMP. **Capítulo 3 - Materiais semicondutores**. 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap03.pdf>>.

UNIFAI. **Dispositivos semicondutores: diodos**. 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/read/16506529/dispositivos-semicondutores-diodos-demar>>.

VEJA. **China fez maior exercício militar em décadas ao redor de Taiwan, acusa Taipei**. 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/mundo/china-fez-maior-exercicio-militar-em-decadas-ao-redor-de-taiwan-acusa-taipei/>>.

XTB. **Riscos potenciais e implicações da crise de Taiwan**. 2025. Acesso em 15 de junho de 2025. Disponível em: <<https://www.xtb.com/pt/educacao/riscos-potenciais-e-implicacoes-da-crise-de-taiwan>>.

ZNTC. **V ZNTTs zaversheny raboty po sozdaniyu pervogo otechestvennogo litografa**. 2025. Acesso em: 19 maio 2025. Disponível em: <[https://zntc.ru/media-center/news/v\\_zntts\\_zaversheny\\_raboty\\_po\\_sozdaniyu\\_pervogo\\_otchestvennogo\\_litografa/](https://zntc.ru/media-center/news/v_zntts_zaversheny_raboty_po_sozdaniyu_pervogo_otchestvennogo_litografa/)>.