



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
LICENCIATURA EM FÍSICA

LUIZA FERNANDA DE PAFFER SENCADAS

FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS MICROELETROMECÂNICOS QUÂNTICOS

RECIFE - PE  
2025

LUIZA FERNANDA DE PAFFER SENCADAS

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em  
Licenciatura em Física da Universidade Federal Ru-  
ral de Pernambuco (UFRPE).

Área de Concentração: Física

Orientador: Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior

Recife - PE  
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S474f Sencadas, Luiza Fernanda de Paffer  
Fundamentos dos sistemas microeletromecânicos quânticos /  
Luiza Fernanda de Paffer Sencadas. – 2025.  
63 f.: il.

Orientador(a): José Holanda da Silva Júnior.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) –  
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de  
Física, Recife, BR-PE, 2025.  
Inclui referências e anexos.

1. QMEMS 2. Eletrodeposição 3. Filmes finos I. Silva Júnior,  
José Holanda da, orient. II. Título

CDD 530

LUIZA FERNANDA DE PAFFER SENCADAS

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em licenciatura em Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Aprovado em: 22/07/2025.

Banca examinadora

---

Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior, UFRPE  
Orientador

---

Prof. Dr. José Ferraz de Moura Nunes Filho, UFRPE  
Examinador

---

Prof. Dr. Sérgio Vladimir Barreiro Degiorgi, UFRPE  
Examinador

## AGRADECIMENTOS

*Mais importante do que a chegada, é o caminho percorrido até ela.*

Dedico cada segundo da escrita desse trabalho a todos que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, em especial:

A minha mãe que lutou com todas as forças para que eu sempre tivesse uma educação básica de qualidade, ato que me encaminhou à universidade.

Agradeço a Breno Alves por ser um companheiro dedicado e sempre me apoiar nas minhas decisões e sempre me dar forças e suporte para que eu possa executar com dedicação todos os meus projetos.

Agradeço a Laura Paffer, minha filha, que é a razão disso tudo ser tão almejado. Tudo sempre será por você e para você!

Aos meus amigos Illan Antônio, Giovanna Lira, Larissa Faneco e Lucas Santana por serem minha fortaleza, meus companheiros de disciplina, que sempre ficaram ao meu lado e somaram para toda bagagem de conhecimento que adquiri.

Ao professor Hector Raúl Montagne Dugrós por ter enxergado em mim a capacidade que muitas vezes não enxerguei, por ter sido um dos fatores decisivos para que eu nunca desistisse. Raúl, se hoje estão lendo minha dissertação, saiba que é porque você me encorajou a persistir, obrigada por tudo!

Ao professor José Holanda da Silva Júnior por ter aceitado me orientar e por ter somado bastante bagagem nessa reta final, sempre presente e dedicado aos seus orientandos.

Agradeço ao secretário Janderson por ser sempre solícito quanto a resolução de burocracias e por facilitar o processo de andamento de tudo.

Agradeço também a diversos colegas de curso que enriqueceram minhas experiências dentro da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar os fundamentos dos sistemas microeletromecânicos quânticos (QMEMS), explorando seus princípios de funcionamento, processos de fabricação e aplicações emergentes. Inicialmente, é realizada uma abordagem teórica sobre os sistemas microeletromecânicos (MEMS), destacando sua importância no desenvolvimento de dispositivos miniaturizados para as mais diversas áreas da indústria e da ciência. Em seguida, são discutidas as principais tecnologias associadas à fabricação de MEMS, com ênfase no processo de eletrodeposição de filmes finos, que permite a construção de microestruturas com elevada precisão e propriedades funcionais ajustáveis. O trabalho também aborda a evolução dos MEMS para os QMEMS, dispositivos capazes de operar em regimes quânticos, explorando fenômenos como superposição e entrelaçamento, com aplicações diretas em sensores quânticos, transdutores, navegação inercial autônoma e comunicação quântica. Além disso, são discutidas as perspectivas inovadoras para a produção de QMEMS, incluindo o uso de substratos híbridos, como duróid e silício, e técnicas avançadas de microfabricação. Este estudo visa contribuir para a compreensão dos desafios e das oportunidades que essa tecnologia emergente oferece, consolidando sua relevância no cenário atual da engenharia e das ciências aplicadas.

**Palavras-chave:** MEMS. QMEMS. Eletrodeposição. Filmes finos. Microfabricação quântica.

## **ABSTRACT**

This work aims to present the fundamentals of quantum microelectromechanical systems (QMEMS), exploring their operating principles, manufacturing processes, and emerging applications. Initially, a theoretical approach is conducted regarding microelectromechanical systems (MEMS), highlighting their importance in the development of miniaturized devices for various sectors of industry and science. Subsequently, the main technologies associated with MEMS manufacturing are discussed, with emphasis on the electrodeposition process of thin films, which enables the construction of microstructures with high precision and tunable functional properties. The study also addresses the evolution from MEMS to QMEMS, devices capable of operating in quantum regimes, exploiting phenomena such as superposition and entanglement, with direct applications in quantum sensors, transducers, autonomous inertial navigation, and quantum communication. Additionally, innovative perspectives for the production of QMEMS are discussed, including the use of hybrid substrates, such as duróid and silicon, and advanced microfabrication techniques. This research aims to contribute to the understanding of the challenges and opportunities that this emerging technology offers, consolidating its relevance in the current landscape of engineering and applied sciences.

**Keywords:** MEMS. QMEMS. Electrodeposition. Thin films. Quantum microfabrication.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microfone MEMS digital de alto desempenho. . . . .	13
Figura 2 – Sensor de pressão MEMS da Bosch. O componente do sensor tem tamanho inferior a 1 mm x 1 mm. . . . .	14
Figura 3 – Um gráfico semi-log das contagens de transistores para microprocessadores em relação às datas de introdução, quase dobrando a cada dois anos. . . . .	16
Figura 4 – Primeiro transistor de contato pontual e aparelho de teste . . . . .	17
Figura 5 – Sensor de pressão que utiliza o efeito piezoresistivo de um metal (ouro). . .	18
Figura 6 – O primeiro circuito integrado da Texas Instrument . . . . .	19
Figura 7 – Sensor de pressão piezoresistivo. . . . .	23
Figura 8 – Sensor de pressão piezoresistivo. . . . .	24
Figura 9 – Atuadores térmicos. . . . .	24
Figura 10 – Atuadores elétricos. . . . .	25
Figura 11 – O pacote preto e quadrado contém seis chaves RF MEMS, da Menlo Micro. Cada uma controla a conexão entre um par de portas RF ao redor da borda do octógono. . . . .	26
Figura 12 – Dispositivos RF MEMS. . . . .	26
Figura 13 – Chip optofluídico em vidro. . . . .	27
Figura 14 – Montagem de pacote de laser de alta potência. . . . .	28
Figura 15 – Dispositivos microfluídicos. . . . .	28
Figura 16 – Sistemas microfluídicos que pode separar diferentes tipos de células dentro de uma gotícula minúscula. . . . .	29
Figura 17 – Bomba de insulina fabricada pela Debiotech SA. . . . .	29
Figura 18 – Acelerômetro MEMS. . . . .	32
Figura 19 – Módulo “breakout” contendo o giroscópio MEMS dual-axis IDG-300, capaz de medir taxas de rotação em dois eixos ortogonais. . . . .	33
Figura 20 – Microestrutura de filme fino piezoelétrico BCZT . . . . .	43
Figura 21 – Microestruturas MEMS em silício. . . . .	46
Figura 22 – Microscópio eletrônico de um giroscópio MEMS em chip, com estrutura vibratória tridimensional para medições de rotação e aceleração. . . . .	53
Figura 23 – MEMS Fotônicos para Routers . . . . .	54
Figura 24 – HOMMEMS aplicado em sensores biomédicos para medições ultra precisas de deslocamentos e deformações. . . . .	55
Figura 25 – Dispositivos de navegação inercial para aplicações aeroespaciais e militares. . . . .	56

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Comparação entre técnicas de deposição de filmes finos. . . . .	45
--	----

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Revisão Teórica</b>	<b>12</b>
2.1	O que são MEMS? . . . . .	13
2.1.1	There's Plenty of Room at the Bottom . . . . .	14
2.1.2	Lei de Moore . . . . .	15
2.1.3	Transistor . . . . .	16
2.1.4	Piezoresistividade . . . . .	17
2.1.5	Processo LIGA . . . . .	19
2.2	Principais tipos de MEMS . . . . .	21
2.2.1	Classificação quanto aos tipos de MEMS . . . . .	23
2.3	Aplicações dos MEMS . . . . .	30
2.3.1	Eletrônicos de consumo . . . . .	31
2.3.2	Indústria automotiva . . . . .	33
2.3.3	Aplicações Médicas e Biomédicas . . . . .	35
2.3.4	Aplicações dos MEMS em Defesa e Setor Aeroespacial . . . . .	37
2.3.5	O Futuro dos MEMS: Tendências, Avanços Tecnológicos e Novas Fronteiras de Aplicação . . . . .	39
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>42</b>
3.1	MEMS de filmes finos . . . . .	42
3.2	MEMS quânticos . . . . .	45
3.2.1	Equação de Damon-Eshbach . . . . .	47
3.3	Aplicações dos MEMS quânticos . . . . .	51
3.3.1	<b>QMEMS em sistemas de defesa</b> . . . . .	52
3.3.2	<b>QMEMS em sistemas de telecomunicação</b> . . . . .	53
3.3.3	<b>QMEMS em sistemas de saúde</b> . . . . .	54
3.3.4	<b>QMEMS em sistemas de indústria aeroespacial</b> . . . . .	55
3.4	Perspectivas inovadoras para produzir MEMS quânticos . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>Referências</b>	<b>60</b>

## 1 Introdução

Os avanços tecnológicos desempenham um papel essencial na miniaturização e na otimização de dispositivos eletromecânicos. Nesse cenário, os sistemas microeletromecânicos (MEMS) emergem como uma tecnologia inovadora, capaz de integrar componentes mecânicos e eletrônicos em escala microscópica, resultando em dispositivos altamente eficientes e compactos (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002). Esses sistemas são amplamente utilizados em diversas áreas, incluindo biomedicina, telecomunicações, automação industrial e até mesmo na indústria militar, devido à sua versatilidade e desempenho aprimorado.

A microusinagem é um processo fundamental para a fabricação de microestruturas avançadas, possibilitando a construção de dispositivos de alta precisão em escala micrométrica. Com essa técnica, é viável a produção de sensores de pressão, acelerômetros, giroscópios e ressonadores, além do desenvolvimento de sistemas ópticos e microbombas voltadas para aplicações biomédicas. A capacidade de integrar diferentes funcionalidades em um único chip proporciona vantagens significativas, como redução de consumo de energia, maior eficiência e menores custos de produção, tornando os MEMS uma alternativa promissora para diversas aplicações tecnológicas (ALGAMILI et al., 2021).

A possibilidade de construir dispositivos de dimensões microscópicas foi inicialmente discutida pelo físico Richard Feynman em sua palestra 'There's Plenty of Room at the Bottom', em 1959 (FEYNMAN, 1961). No final da década de 1940, com a invenção do transistor, tornou-se possível imaginar circuitos eletrônicos cada vez menores. Avanços na fabricação de semicondutores possibilitaram a criação dos primeiros circuitos integrados, culminando na Lei de Moore, proposta em 1965, que previa a duplicação do número de transistores nos chips a cada dois anos.

Nos anos 1980, o desenvolvimento de técnicas como o processo LIGA permitiu a fabricação de microestruturas complexas com alta precisão (CHAUDHARY et al., 2017). Em paralelo, a descoberta do efeito piezoresistivo em semicondutores, aprofundado por Charles Smith em 1954, contribuiu para o avanço dos sensores MEMS (SMITH, 1954). O silício mostrou-se um material extremamente vantajoso devido às suas propriedades mecânicas e elétricas.

Os MEMS possuem uma ampla gama de aplicações. Na indústria automotiva, sensores MEMS são fundamentais em sistemas de segurança, como airbags e controle de estabilidade. Na medicina, são usados em microagulhas, sensores implantáveis e sistemas de diagnóstico de alta precisão. Na eletrônica de consumo, estão presentes em smartphones e wearables, permitindo funcionalidades como estabilização de imagens e reconhecimento de gestos (INFINEON TECHNOLOGIES, 2023; POCKETLAB, 2023). Além disso, são usados na indústria aeroespacial e no setor de energia, onde contribuem para maior eficiência e confiabilidade.

A fabricação dos MEMS envolve desafios como o controle preciso da deposição de materiais, alta resistência mecânica e compatibilidade com microfabricação (MALUF; WILLIAMS, 2004). Questões como comportamento em escala reduzida e efeitos quânticos tornam o desenvolvimento ainda mais desafiador (SUN et al., 2023; SŁOWIK et al., 2016). No entanto, avanços em nanotecnologia e micromanufatura têm permitido superar essas barreiras.

Outro aspecto fundamental é a busca por novos materiais e técnicas. O uso do silício permitiu avanços significativos, mas há interesse crescente em polímeros condutores e ligas metálicas avançadas (KHAN et al., 2017). Técnicas como impressão 3D micrométrica e litografia por feixe de elétrons também vêm sendo exploradas.

O objetivo deste trabalho é explorar os fundamentos dos MEMS, suas principais classifica-

ções e aplicações, bem como discutir os desafios e limitações tecnológicas. Para isso, foi adotada uma revisão bibliográfica detalhada com base em livros, artigos e relatórios técnicos. Por fim, serão discutidos os impactos da miniaturização na sociedade moderna e as perspectivas futuras. Com a tendência crescente à nanotecnologia, os sistemas nanoeletromecânicos (NEMS) surgem como a próxima fronteira, abrindo caminho para dispositivos ainda menores e mais eficientes (EZAWA et al., 2023; SUN et al., 2023). Assim, o estudo dos MEMS se torna cada vez mais relevante, impulsionando a inovação e a evolução tecnológica global.

## 2 Revisão Teórica

A presente sessão tem como objetivo apresentar uma revisão teórica aprofundada sobre os sistemas microeletromecânicos (MEMS) e sua evolução para os sistemas microeletromecânicos quânticos (QMEMS). Esta abordagem teórica busca fornecer os fundamentos científicos, tecnológicos e físicos que embasam a operação, a fabricação e as aplicações desses dispositivos, que representam atualmente uma das fronteiras mais avançadas da engenharia moderna (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021).

O conceito de miniaturização de dispositivos, que deu origem aos MEMS, foi formalmente introduzido por Richard Feynman em sua histórica palestra de 1959, intitulada “There’s Plenty of Room at the Bottom” (FEYNMAN, 1961). Nela, Feynman destacou as infinitas possibilidades de manipular a matéria em escala atômica e molecular, antecipando uma revolução tecnológica que se concretizaria décadas depois, com o avanço das técnicas de microfabricação e nanotecnologia. Paralelamente, a evolução da microeletrônica, impulsionada pela Lei de Moore — que previa a duplicação periódica do número de transistores nos circuitos integrados —, foi fundamental para viabilizar a adaptação dos processos de fabricação de chips semicondutores para a criação de sistemas micromecânicos integrados.

Os MEMS são dispositivos que integram, em uma única plataforma, componentes mecânicos, elétricos, eletrônicos e, em alguns casos, ópticos e fluídicos, geralmente construídos em substratos de silício. Esses sistemas são capazes de realizar funções como detecção, atuação, controle e processamento de sinais físicos, sendo aplicados de forma massiva nas indústrias automotiva, biomédica, aeroespacial, de telecomunicações e eletrônica de consumo (ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019).

O funcionamento dos MEMS baseia-se na transdução de sinais físicos em sinais elétricos, ou vice-versa, e está fundamentado em diversos fenômenos físicos. Entre eles, destaca-se o efeito piezoresistivo, essencial para o desenvolvimento dos primeiros sensores de pressão em silício (SMITH, 1954). Outros princípios fundamentais incluem o efeito piezoelétrico, a variação de capacitância e a força eletrostática. Além disso, em aplicações específicas, são explorados fenômenos térmicos, magnéticos e ópticos (KHAN et al., 2017).

A fabricação dos MEMS é realizada por meio de processos derivados da indústria de semicondutores, combinando deposição de filmes finos, litografia, gravação química e microusinagem. Técnicas como o processo LIGA também são aplicadas para microestruturas complexas, especialmente quando são necessários componentes metálicos com alta resistência (CHAUDHARY et al., 2017). A eletrodeposição se destaca como processo essencial para filmes finos condutores e sensoriais (SWAIN et al., 2022).

A escolha dos materiais é determinante para o desempenho dos MEMS. O silício é amplamente utilizado devido às suas excelentes propriedades mecânicas e elétricas (MALUF; WILLIAMS, 2004). Outros materiais empregados incluem óxidos, nitretos, metais como ouro e níquel, e materiais poliméricos como parylene e PDMS (BEACH et al., 1989; MONK et al., 1996).

À medida que os MEMS foram reduzidos para o regime nanométrico, surgiram os sistemas microeletromecânicos quânticos (QMEMS), que operam em regimes onde efeitos como superposição de estados e quantização de energia se tornam dominantes (SŁOWIK et al., 2016; EZAWA et al., 2023).

Nos QMEMS, ressonadores podem ser levados ao estado fundamental, permitindo observação direta de fenômenos quânticos (SUN et al., 2023). Eles são fundamentais para tecnologias

emergentes como computação quântica, comunicação ultra segura e sensores gravitacionais de precisão (EZAWA et al., 2023). Além disso, são empregados em sistemas de navegação inercial quântica, oferecendo vantagens estratégicas em defesa, exploração espacial e tecnologias aeroespaciais (BRADLEY et al., 2024). A transição dos MEMS para os QMEMS impôs novos desafios, como controle de decoerência, minimização de perdas e isolamento térmico (SŁOWIK et al., 2016; SUN et al., 2023). Novos materiais, como grafeno e nanodiamantes com centros NV, vêm sendo incorporados (TANAKA, 2024). Portanto, os MEMS e QMEMS configuram uma das áreas mais promissoras da engenharia e da física aplicada, unindo conceitos clássicos e quânticos na vanguarda da inovação científica. Esta sessão fornece a base teórica essencial para as análises e discussões nas seções seguintes.

## 2.1 O que são MEMS?

Sistemas microeletromecânicos (MEMS), ou tecnologia de microssistemas (MST), são termos designados para a aplicação de tecnologias de sistemas complexos em dispositivos eletromecânicos em miniaturas (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002). No entanto, não podemos limitar seu conceito apenas a esta definição, pois há uma ampla gama de aplicações que esses equipamentos são capazes de realizar (ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019). A partir dessas funcionalidades, os MEMS também podem ser vistos como um conjunto de técnicas e metodologias para a criação de sistemas microeletrônicos, ou até mesmo, considerado um tipo de tecnologia que integra elementos mecânicos e eletrônicos a nível microscópico.

Os MEMS possuem estruturas micro-mecanizadas, que são incorporadas em miniaturas, e possibilitam uma utilização de altos níveis de componentes que fazem parte daquele sistema (MALUF; WILLIAMS, 2004). Podem também trazer benefícios em questão de custo-benefício, pois possuem baixo preço, reduzindo custos voltados à manutenção dos equipamentos. A tecnologia implementada pelos MEMS permite a integração de múltiplas funcionalidades em espaços reduzidos, resultando em dispositivos mais eficientes quanto à velocidade de processamento e ao consumo de energia.

Na Figura 1 (Adaptado de Infineon Technologies.), apresentamos um microfone MEMS digital de alto desempenho, utilizado em aplicações de áudio, smartphones e dispositivos de captação de voz. Já na Figura 2 (FONTE: Adaptado de Bosch Sensortec.), observa-se um sensor de pressão MEMS da Bosch, com dimensões extremamente reduzidas, exemplificando a miniaturização alcançada por essa tecnologia.

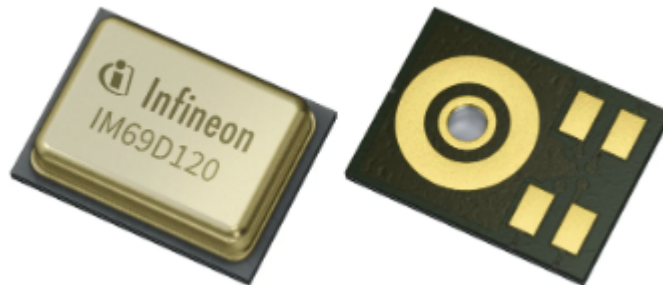


Figura 1 – Microfone MEMS digital de alto desempenho.

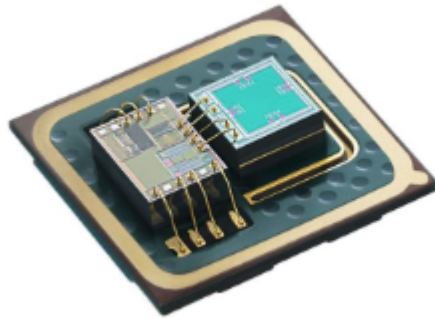


Figura 2 – Sensor de pressão MEMS da Bosch. O componente do sensor tem tamanho inferior a 1 mm x 1 mm.

### 2.1.1 There's Plenty of Room at the Bottom

A primeira ideia do que se tornaria futuramente os MEMS surgiu durante a palestra 'There's Plenty of Room at the Bottom', ministrada em 26 de dezembro de 1959, por Richard Feynman, renomado físico teórico e um dos mais influentes cientistas do século XX, que foi um dos pioneiros na área da nanotecnologia, durante a reunião anual da American Physical Society no Caltech. Neste evento Feynman explorou as possibilidades da construção de computadores muito pequenos, com fios contendo 10 ou 100 átomos de diâmetro, o que nos traz a ideia de componentes de MEMS (FEYNMAN, 1961). Feynman (1959) destacou a complexidade dos processos cognitivos humanos em comparação com os computadores:

"Se eu olhar para seu rosto, imediatamente reconhecerei que já o vi antes. (Na verdade, meus amigos dirão que escolhi um exemplo infeliz para o tema desta ilustração. Pelo menos reconheço que se trata de um homem e não de uma maçã). No entanto, não há máquina que, com essa velocidade, possa tirar uma foto de um rosto e dizer que é um homem; e muito menos que é o mesmo homem que você mostrou antes - a menos que seja exatamente a mesma foto. Se o rosto mudar; se eu estiver mais perto do rosto; se eu estiver mais longe do rosto; se a luz mudar - eu o reconheço de qualquer forma. Esse pequeno computador que carrego em minha cabeça é capaz de fazer isso facilmente. Os computadores que construímos não são capazes de fazer isso. O número de elementos nessa minha caixa de ossos é muito maior do que o número de elementos em nossos maravilhosos computadores. Mas nossos computadores mecânicos são muito grandes; os elementos desta caixa são microscópicos. Quero fazer alguns que sejam suficientemente microscópicos. (FEYNMAN, 1961)."

– (Journal of Vacuum Science Technology Vol. B5, No. 1, pp. 88- 91).

A partir deste evento, temos a idealização do que hoje conhecemos como o "Face ID", presente em dispositivos eletrônicos como, por exemplo, os smartphones (INFINEON TECHNOLOGIES, 2023). As possibilidades da existência de máquinas muito menores, como sugeriu Feynman, era algo que, se observadas as leis da física, era possível e, possivelmente, vantajoso (FEYNMAN, 1961). As dúvidas que o cercavam de tal fabricação eram de como poderia ser feito e quais limitações eles encontrariam para tal produção. A ideia era das possibilidades de máquinas pequenas, mas móveis. A fabricação desses dispositivos foi pensada inicialmente no rearranjo dos átomos

presentes, em seguida, evaporando o material e o isolante próximo a ele. Para a próxima camada, evaporar outra posição de um fio, mais um isolante e seguir até evaporar o bastante para obter um bloco de material, a fim de obter bobinas, condensadores, transistores e outros, que tenham dimensões extremamente finas (FEYNMAN, 1961). Entretanto, foram considerados os problemas que poderiam existir acerca de máquinas tão pequenas, como por exemplo, o comportamento dos materiais em escala reduzida e a relação entre força, área e resistência do material. Em escalas microscópicas, o peso e a inércia dos materiais se tornam significativamente irrelevantes, pois a força aplicada neles se distribui em sua superfície, que estará muito menor, tornando maior a resistência do material (MALUF; WILLIAMS, 2004). Em tal escala, os materiais se comportam de forma diferente, pois os efeitos quânticos começam a influenciar o material. Outro fator estava associado a questões magnéticas, como o domínio magnético, que para a escala dos MEMS, podem perder sua capacidade de gerar um campo magnético utilizável.

### 2.1.2 Lei de Moore

Gordon Moore, químico e engenheiro estadunidense, disse em 1965 que desde a invenção do transistor, no final da década de 1940, por William Shockley, John Bardeen e Walter Brattain, o número de transistores por polegada quadrada em circuitos integrados dobrava a cada 18 meses desde que o circuito integrado foi inventado no final da década de 1950 e início da década de 1960 (ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, 2023). Ou seja, Moore indicou que a tecnologia se concentraria cada vez mais em tamanhos menores. Com essa observação, temos o fundamento da “Lei de Moore”, que foi publicada no artigo “Cramming More Components onto Integrated Circuits”, que aborda tendências na indústria de microchips e processadores, ou seja, informa que o número de transistores dos chips teria um aumento de 100%, pelo mesmo custo, a cada dois anos.

Na Figura 3, observa-se um gráfico que ilustra a evolução do número de transistores nos microchips ao longo das últimas décadas, evidenciando o comportamento previsto pela chamada “Lei de Moore”. Essa tendência indica que a cada dois anos, o número de transistores nos chips dobra, mantendo um aumento de 100% no desempenho. (FONTE: Adaptado de Our World in Data (2023).)

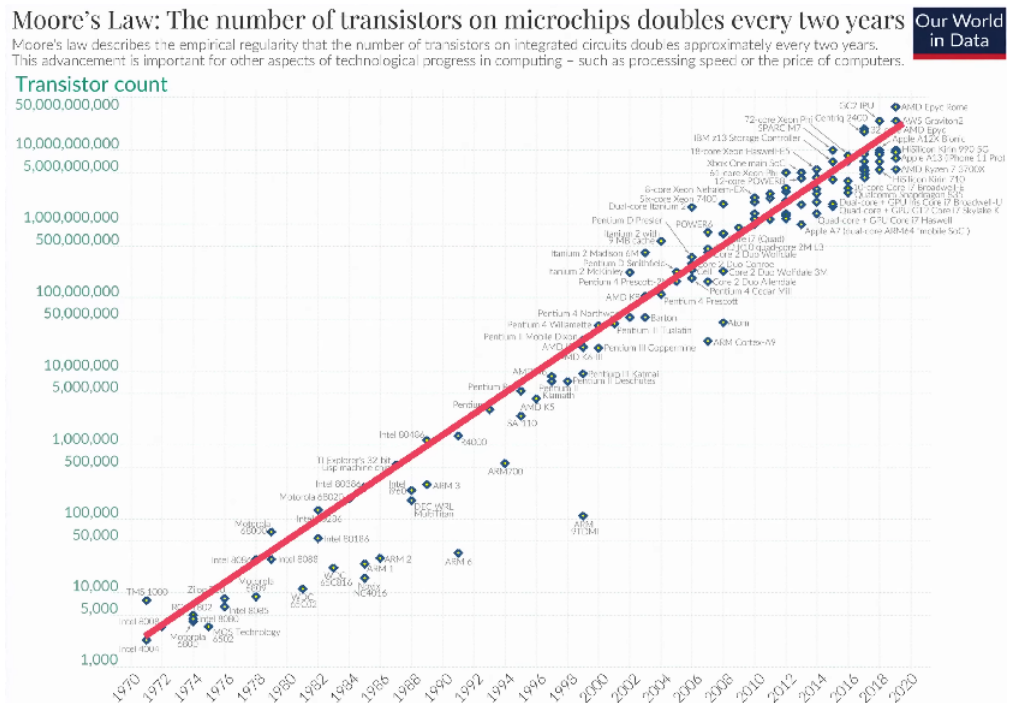


Figura 3 – Um gráfico semi-log das contagens de transistores para microprocessadores em relação às datas de introdução, quase dobrando a cada dois anos.

A lei de Moore é uma projeção, ela funciona e, como mostrado no gráfico acima, foi assim que a tecnologia se desenvolveu nas últimas décadas e, à medida que os transistores diminuem, eles vão se aproximar ainda mais do tamanho de um átomo. Apesar da lei de Moore não ser baseada em um fenômeno da natureza, ela é limitada por algo que é fundamentalmente físico: o tamanho de um átomo. Gordon Moore e Richard Feynman são apenas dois exemplos de cientistas que previram a tecnologia emergente de sistemas eletromecânicos cada vez menores.

### 2.1.3 Transistor

Em 1947, William Shockley, John Bardeen e Walter Brattain, dos Laboratórios Bell, conseguiram construir o primeiro transistor, de contato pontual, que utilizava germânio, e demonstrando a possibilidade da construção de transistores com materiais semicondutores, permitindo um melhor controle da tensão e da corrente (SMITH, 1954). Isto também abriu a porta para a construção de transistores cada vez menores, originando futuramente os MEMS (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002).

Na Figura 4, é possível observar o primeiro modelo de transistor de contato pontual criado na época, o qual marcou o início da era dos semicondutores e abriu caminho para o desenvolvimento dos MEMS. (FONTE: Adaptado de THE COMPUTER HISTORY MUSEUM, 2023.)

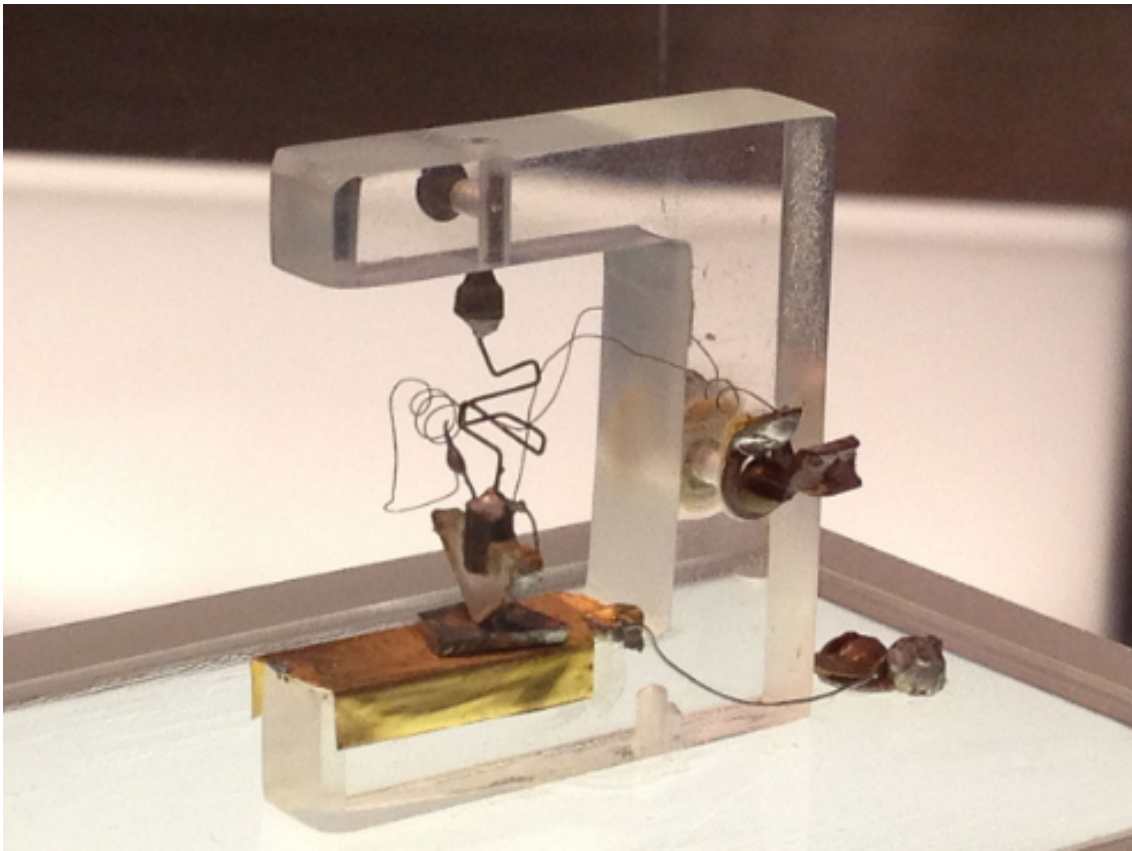


Figura 4 – Primeiro transistor de contato pontual e aparelho de teste

Esse primeiro transistor tinha aproximadamente meia polegada de altura, o que é enorme se comparado aos padrões atuais. Atualmente, os cientistas podem construir nanotransistores que medem aproximadamente 1 nm de diâmetro. Para referência, um átomo tem aproximadamente 0,1 nm, ou seja, um transistor atual mede o tamanho de aproximadamente dez átomos

Uma descoberta importante para os MEMS foi o efeito piezoresistivo, cujo nome deriva da palavra grega *piezein*, que significa aplicar pressão. Foi descoberto primeiramente por Lord Kelvin em 1856; o fenômeno mostra que uma resistência elétrica muda em resposta ao estresse mecânico em materiais semicondutores. Posteriormente, Charles S. Smith, físico estadunidense, em 1954, mostrou que o efeito piezoresistivo é muito maior quando observado em materiais como o *silício* e o *germânio* e demonstrou que a resistividade elétrica desses materiais varia significativamente quando submetidos a tensões mecânicas uniaxiais, ou seja, aplicadas em apenas uma direção, fenômeno que não podia ser explicado pelos mecanismos conhecidos na época. Essa descoberta possibilitou a criação de sensores de pressão e acelerômetros mais precisos, e mostrou que materiais como o *silício* e o *germânio* podiam detectar a pressão do ar ou da água melhor do que o metal. A maioria dos sensores de pressão disponíveis comercialmente hoje usa piezoresistores de silício (SMITH, 1954; MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002).

#### 2.1.4 Piezoresistividade

A piezoresistividade surge da deformação das bandas de energia como resultado de uma tensão aplicada. As bandas deformadas afetam a massa efetiva e a mobilidade de elétrons e bur-

cos, modificando, portanto, a resistividade. A alteração fracionária na resistividade,  $\Delta\rho/\rho$ , é, em primeira ordem, linearmente dependente de  $\sigma_{\parallel}$  e  $\sigma_{\perp}$ , os dois componentes de tensão paralelos e ortogonais para a direção do resistor, respectivamente (SMITH, 1954).

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \Pi_{\parallel}\sigma_{\parallel} + \Pi_{\perp}\sigma_{\perp} \quad (1)$$

Onde  $\Pi_{\parallel}$  e  $\Pi_{\perp}$  são as constantes de proporcionalidade chamadas de coeficientes piezoresistivos paralelos e perpendiculares, respectivamente, e estão relacionadas ao fator de calibre pelo módulo de Young, que estão relacionados ao comportamento mecânico e elétrico de materiais. Estes coeficientes dependem da orientação do cristal, do tipo de dopante (tipo n versus tipo p) e da concentração do material utilizado (SMITH, 1954).

O polissilício e o silício amorfo também apresentam um forte efeito piezoresistivo. Foi demonstrada uma grande variedade de sensores que utilizam elementos de detecção piezoresistivos de polissilício. Claramente, os coeficientes piezoresistivos perdem sua sensibilidade à direção cristalina e se tornam uma média de todas as orientações. Em vez disso, o fator de medição, K, que relaciona a mudança fracionária na resistência à tensão, é usado com frequência (SMITH, 1954; MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002).

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \epsilon \quad (2)$$

O fator de medição K é a constante de proporcionalidade que relaciona a alteração fracionária na resistência,  $\Delta R/R$ , à deformação aplicada,  $\epsilon$ .

Na Figura 5, é apresentado um sensor de pressão que utiliza o efeito piezoresistivo em um metal (ouro), ilustrando essa aplicação tecnológica. (FONTE: Adaptado de COELHO, 2023.)

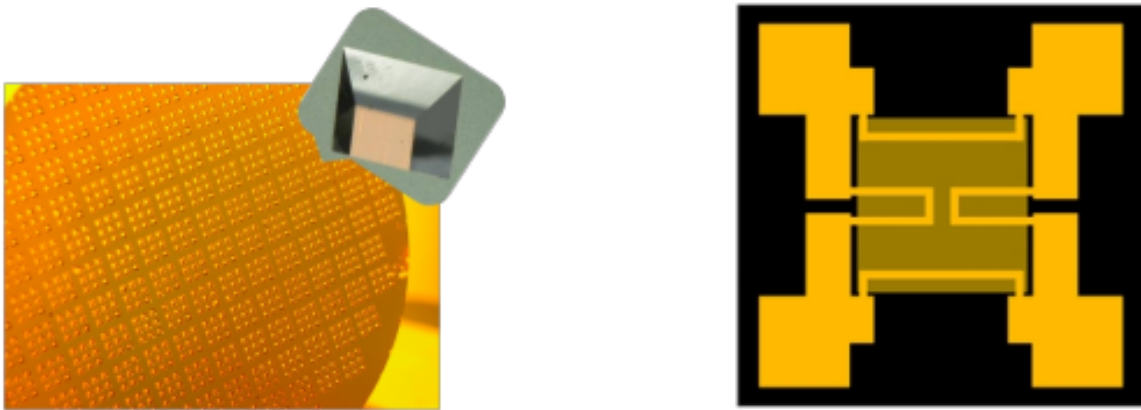


Figura 5 – Sensor de pressão que utiliza o efeito piezoresistivo de um metal (ouro).

Em 1958, houve a criação do primeiro circuito integrado [figura 6], que consistia na junção de um transistor, três resistores e um capacitor, todos em um chip de germânio, feito por Jack Kilby, que trabalhava para a Texas Instruments. Logo em seguida, no ano de 1961, Robert Noyce recebe a patente do seu “circuito unitário”, feito em um chip de silício (ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, 2023; MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002).

Na Figura 6, é possível observar o primeiro circuito integrado desenvolvido pela Texas Instruments em 1958, o qual foi pioneiro ao integrar em um único chip componentes fundamentais como transistores, resistores e capacitores, marcando um avanço decisivo na microeletrônica. (FONTE: Adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 2023.)

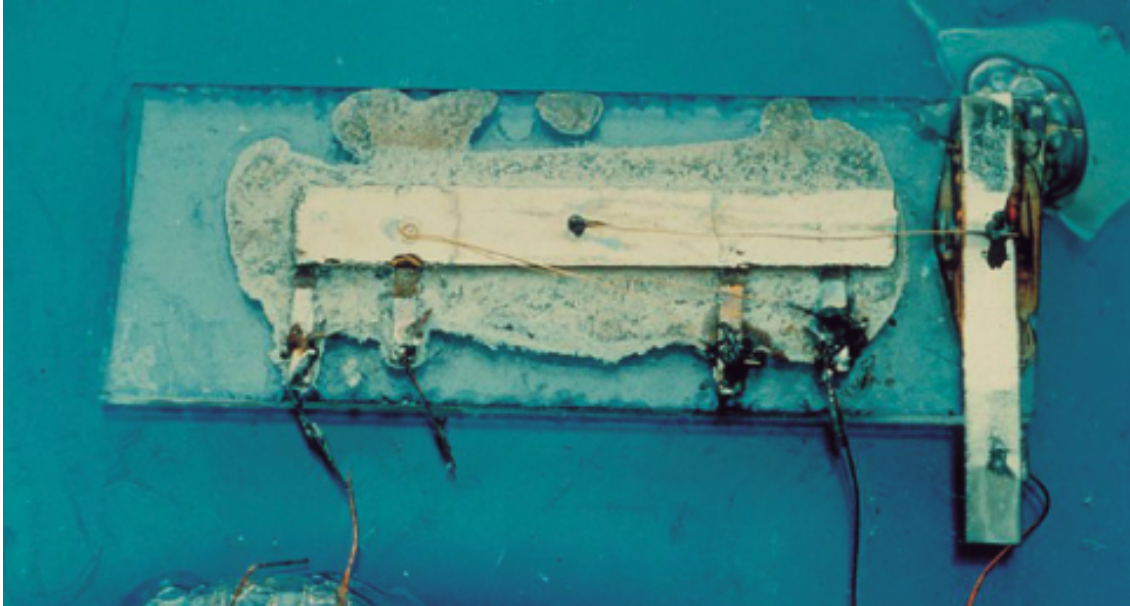


Figura 6 – O primeiro circuito integrado da Texas Instrument

### 2.1.5 Processo LIGA

Na década de 80, foi desenvolvido um novo processo chamado LIGA (*Lithographie, Galvanoformung, Abformung*), por uma equipe do Centro de Pesquisa Nuclear de Karlsruhe, na Alemanha. Esse processo permitiu a produção de componentes com alta precisão e complexidade. O LIGA é subdividido em etapas: a *Lithographie* (litografia), usa RAIO-X para criar padrões em um material que seja fotossensível, esse feixe de alta energia é usado para expor um material fotorresistente, como por exemplo, o polímero termoplástico, criando um padrão tridimensional no material. A *Galvanoformung* (galvanoplastia), utiliza um metal, como níquel, para depositar sobre uma superfície condutora, normalmente é usada para preencher padrões criados por litografia de raios-X, formando microestruturas metálicas altamente precisas. E a *Abformung* (molde), é a terceira etapa do processo de LIGA, que utiliza a peça criada na galvanoplastia como molde para a criação de cópias idênticas em materiais como, por exemplo, polímeros condutores (CHAUDHARY et al., 2017).

Um artigo escrito por Kurt Petersen, em 1982, intitulado “Silicon as a Mechanical Material”, demonstra que o silício, material amplamente utilizado na eletrônica devido às suas excelentes propriedades semicondutoras, pode ser tratado como um material estrutural, capaz de substituir elementos tradicionais, como metais e polímeros, na criação de microestruturas. Petersen discute também como esse material apresenta características mecânicas superiores, tornando-se ideal para a fabricação de dispositivos microeletromecânicos (MEMS) e sensores de alta precisão. Em uma análise de suas propriedades, nota-se que o silício apresenta alta resistência mecânica, comparável

ao aço inoxidável, sendo altamente resistente à deformação. A vasta quantidade de conhecimentos acumulados sobre o silício e seus compostos nas últimas décadas permitiu inovar e explorar novas aplicações que vão além da produção de circuitos eletrônicos integrados. Fica claro que o silício é um material versátil, capaz de integrar funções eletrônicas, mecânicas, térmicas, ópticas e até mesmo o controle de fluxo de fluidos. Podemos encontrar o silício em três microestruturas diferentes: cristalina, policristalina ou amorfa. Os filmes finos com espessuras abaixo de 5  $\mu\text{m}$  são feitos normalmente do silício policristalino e do amorfo. O polissilício é um material importante no setor de circuitos integrados e tem sido amplamente estudado (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002).

O polissilício é um material igualmente importante e atraente para MEMS. Ele tem sido bastante utilizado na fabricação de estruturas micromecânicas e para integrar interconexões elétricas, termopares, diodos de junção p-n e muitos outros dispositivos elétricos com estruturas micromecânicas. Um dos principais exemplos do seu uso para MEMS é o sensor de aceleração para sistemas de segurança de airbags automotivos, presentes na Analog Devices, Inc., de Norwood, Massachusetts. Além disso, o silício é um ótimo condutor térmico, com uma condutividade térmica maior do que a de muitos metais e aproximadamente 100 vezes maior do que a do vidro. Em sistemas integrados complexos, o substrato de silício pode ser usado como um eficiente dissipador de calor. As interações do silício com gases, produtos químicos, fluidos biológicos e enzimas continuam sendo objeto de muitos estudos de pesquisa, mas, em sua maior parte, o silício é considerado estável e resistente a muitos elementos e produtos químicos típicos do cotidiano. Outra característica determinante é o fato do silício ter um óxido estável, o que significa que não degrada facilmente, protegendo o material contra possíveis reações aleatórias. Isso faz do silício um material ideal para circuitos eletrônicos e microdispositivos, pois ele tem ótimas propriedades de isolamento térmico e elétrico. Ele contribuiu para o avanço da microeletrônica, tornando possível fabricar circuitos integrados miniaturizados, funcionando, por exemplo, como isolantes perfeitos para transistores, diferentemente do germânio, cujo óxido é solúvel em água. Em contrapartida, quando exposto a temperaturas elevadas, como 700°C, o óxido de silício começa a deformar, pois amolece, o que significa que ele perde sua rigidez e começa a fluir lentamente, podendo afetar estruturas MEMS que dependem de estabilidade mecânica. Outro problema que acomete o uso dos óxidos de silício são suas tensões intrínsecas relativamente grandes, o que limitou seu uso como materiais para grandes vigas ou membranas suspensas, pois se o óxido de silício estiver sob alta tensão interna, a estrutura pode se dobrar, rachar ou colapsar (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; PETERSEN, 1982).

A partir dos anos 90, na Universidade de Cornell, foi desenvolvido um processo de microusinagem em massa chamado Single Crystal Reactive Etching and Metallization (SCREAM). Ele foi desenvolvido para fabricar microestruturas liberadas de silício monocristalino e arseneto de gálio (GaAs) monocristalino. Esse processo utiliza microusinagem para fabricar estruturas MEMS a partir de silício monocristalino. O método consiste em criar estruturas suspensas com alta razão de aspecto, utilizando etapas de litografia e gravação iônica reativa (RIE). O processo SCREAM I, descrito por Shaw et al. (1994), utiliza uma única máscara de litografia para definir simultaneamente as estruturas mecânicas e as interconexões elétricas. As vantagens desse método consistem na sua utilização a baixas temperaturas (<300°C) e por ser compatível com processos convencionais de fabricação de circuitos integrados, permitindo a integração de dispositivos MEMS com circuitos eletrônicos existentes (CHAUDHARY et al., 2017).

Os dispositivos MEMS vêm sendo usados em muitos produtos comerciais. Todos os dias,

aplicativos e tecnologias melhores estão surgindo, os primeiros dispositivos MEMS mediam coisas como pressão em motores e movimento em carros. Atualmente, os elementos MEMS estão controlando nossas redes de comunicação. São colocados no corpo humano para monitorar a pressão sanguínea e usados para administrar medicamentos quando e diretamente onde eles são necessários. Os microsistemas continuam ficando menores, criando uma nova tecnologia chamada de sistemas nanoeletromecânicos (NEMS). As aplicações e o crescimento dos MEMS e dos NEMS são infinitos e a se inserir em muitos aspectos cotidianos (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; SŁOWIK et al., 2016; EZAWA et al., 2023).

## 2.2 Principais tipos de MEMS

Para compreender o processo de fabricação dos MEMS, precisamos detalhar e entender o processo de microusinagem [MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002]. De modo geral, a microusinagem e a usinagem convencional têm objetivos semelhantes, que é definir com precisão características em um bloco de material. As distinções entre ambas estão na dimensão da quantidade de produção de peças, no caso da microusinagem, temos a fabricação de dezenas de milhares de elementos idênticos sendo produzidos simultaneamente, além da dimensão mínima do recurso, da ordem de um micrômetro, que é uma ordem de magnitude menor do que a obtida com a usinagem convencional. Os processos podem ser divididos em três categorias principais: processos básicos, avançados e não litográficos [MALUF; WILLIAMS, 2004].

No processo básico, existem diversas técnicas que podem ser utilizadas na construção de MEMS, entre elas estão a **epitaxia**, que é o crescimento controlado de uma camada cristalina sobre um substrato cristalino, de modo que a camada cresça com a mesma orientação do substrato. A **pulverização catódica**, um processo físico no qual átomos de um alvo de um metal ou óxido são ejetados devido ao bombardeio com íons de um gás, como, por exemplo, o argônio, que se depositam sobre um substrato, formando uma fina camada. Na **evaporação**, os materiais são aquecidos a vácuo até evaporarem e condensarem sobre um substrato. Por **deposição de vapor químico**, os gases reagem na superfície do substrato, formando a camada desejada. A litografia é utilizada para a criação de protetores contra corrosão, utilizando uma camada de polímero fotossensível. Nesse processo, criam-se imagens em uma camada desse polímero. A gravação a úmido e a seco, incluindo a gravação com íons reativos profundos, formam a base essencial do processo para remover seletivamente o material. As seções a seguir descrevem os fundamentos das ferramentas básicas do processo [MALUF; WILLIAMS, 2004].

O processo de **Spin-on** é utilizado para a aplicação de camadas de materiais dielétricos isolantes e compostos orgânicos. Ao contrário de outros métodos mencionados anteriormente, ele requer um equipamento simples, composto por uma mesa giratória de velocidade ajustável e telas de segurança adequadas. Nesse processo, um bocal libera a solução líquida do material no centro do wafer. Em seguida, o substrato é girado em velocidades entre 500 e 5.000 rpm por um período de 30 a 60 segundos, garantindo a distribuição uniforme da camada sobre a superfície [MALUF; WILLIAMS, 2004].

No **processo avançado**, temos algumas ferramentas, como por exemplo, a **ligação anódica**, a colagem direta de silício, esmerilhamento, polimento e polimento químico-mecânico, métodos de deposição Sol-Gel, galvanoplastia e moldagem. Dentre esses métodos, a ligação anódica é um processo utilizado para unir vidro e silício por meio de uma alta voltagem aplicada entre os materiais sob alta temperatura. Isso faz com que íons de oxigênio no vidro se desloquem para o silício, pro-

movendo a fusão das superfícies. Esse método cria uma vedação hermética, essencial para sensores de pressão, por exemplo. Já a **colagem direta de silício** permite unir superfícies de silício sem o uso de intermediários adesivos. Isso ocorre por meio de forças intermoleculares e difusão atômica, geralmente após um tratamento de limpeza e ativação superficial. O processo pode ser realizado à temperatura ambiente ou sob tratamento térmico para melhorar a adesão. No **esmerilhamento** se utiliza uma técnica mecânica para reduzir a espessura de substratos de silício. Um disco abrasivo rotativo remove camadas finas do material para atingir a espessura desejada. Esse processo é comum onde componentes precisam ter espessuras muito reduzidas para otimizar seu funcionamento. O **polimento simples** melhora a suavidade da superfície removendo pequenas irregularidades, enquanto o **polimento químico-mecânico** combina ação mecânica e química para garantir superfícies extremamente planas e uniformes [MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002].

A técnica **Sol-Gel** é um método químico para a deposição de filmes finos e estruturas nanoporosas. Ela envolve a dissolução de um precursor em um solvente líquido, seguido pela evaporação do solvente e posterior consolidação do material. Esse método é útil para criar camadas dielétricas, revestimentos protetores e materiais com propriedades ópticas específicas. Na **galvanoplastia** há o depósito de camadas metálicas sobre um substrato condutor. Isso é feito submergindo o material em uma solução eletrolítica e aplicando uma corrente elétrica para que os íons metálicos se depositem na superfície. Essa técnica é usada para criar microestruturas metálicas e contatos elétricos. E a **moldagem** é uma técnica de fabricação que permite criar estruturas tridimensionais complexas em MEMS. Diferentes métodos podem ser usados, como a moldagem por injeção, onde polímeros são injetados em moldes, e a moldagem por eletroformação, que combina galvanoplastia e gravação para formar microestruturas metálicas. Essa técnica é essencial para a produção de componentes como engrenagens e microrreservatórios [MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; SWAIN et al., 2022].

Várias tecnologias convencionais não usam fotolitografia, mas também são capazes de formar recursos de dimensões relativamente pequenas. Entre elas estão a *usinagem mecânica*, a usinagem ultrassônica, a usinagem por eletroerosão e a usinagem a laser. A **usinagem mecânica** é um método tradicional que envolve o uso de ferramentas de corte, como fresas e tornos, para remover material de um substrato e criar estruturas com alta precisão. Para microfabricação, são utilizadas ferramentas de pequeno porte, muitas vezes em máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado), que permitem cortes controlados com alta exatidão. Apesar da precisão, esse processo pode gerar tensões mecânicas e rebarbas na peça final. Na **usinagem ultrassônica**, uma ferramenta vibrante de alta frequência, geralmente na faixa de 20 kHz, é usada junto com um abrasivo em um meio líquido para remover material de forma controlada. A vibração ultrassônica cria impactos repetidos entre o abrasivo e o substrato, desgastando gradualmente a superfície. Na **usinagem por eletroerosão** são utilizadas descargas elétricas controladas para remover material de um condutor elétrico. O processo ocorre em um fluido dielétrico, que previne curto-circuitos e remove resíduos. É altamente preciso e permite fabricar peças com geometrias complexas sem contato físico com a ferramenta. A **usinagem a laser** usa um feixe de laser de alta potência para vaporizar ou fundir seletivamente o material, permitindo cortes extremamente finos e precisos. É uma técnica sem contato, o que reduz desgastes e contaminações. Pode ser usada para materiais como metais, polímeros e cerâmicas [MALUF; WILLIAMS, 2004].

Como esses métodos de fabricação são utilizados há décadas, eles passaram por uma evolução significativa, resultando em custos reduzidos e maior precisão no controle dimensional. Em algumas aplicações, como bicos de impressoras a jato de tinta e bicos de injeção de combustível

para automóveis, a fabricação fotolitográfica foi empregada, porém revelou-se menos econômica em comparação com os métodos tradicionais já consolidados. Além de competir com as tecnologias litográficas, os processos de fabricação que não estão diretamente relacionados aos circuitos integrados (CIs) frequentemente são combinados a elas na criação de produtos finais. Um exemplo disso são os sensores de pressão micromecanizados em massa, que utilizam vidro perfurado por ultrassom colado na parte traseira, assim como cabeçotes de impressão. Os diversos processos de fabricação discutidos, desde os métodos avançados de ligação e deposição até as técnicas de usinagem e moldagem, demonstram a evolução contínua das tecnologias aplicadas à microfabricação, com escolhas baseadas em requisitos de precisão, custo e material envolvido, evidenciando a importância de métodos como ligação anódica, polimentos, Sol-Gel, galvanoplastia e moldagem [MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; SWAIN et al., 2022].

### 2.2.1 Classificação quanto aos tipos de MEMS

Quanto aos tipos, os MEMS podem ser classificados em seis tipos, são eles:

Os **sensores**, que são dispositivos que medem alterações no espaço, seja essa uma alteração térmica, de movimento, óptica ou química. São exemplos,

Na Figura 7, é apresentado um exemplo de sensor de pressão piezoresistivo em formato miniaturizado, ilustrando a aplicação da tecnologia MEMS em dispositivos compactos utilizados em diversas áreas, como automotiva e biomédica. (FONTE: Adaptado de MicroSensor, 2022)

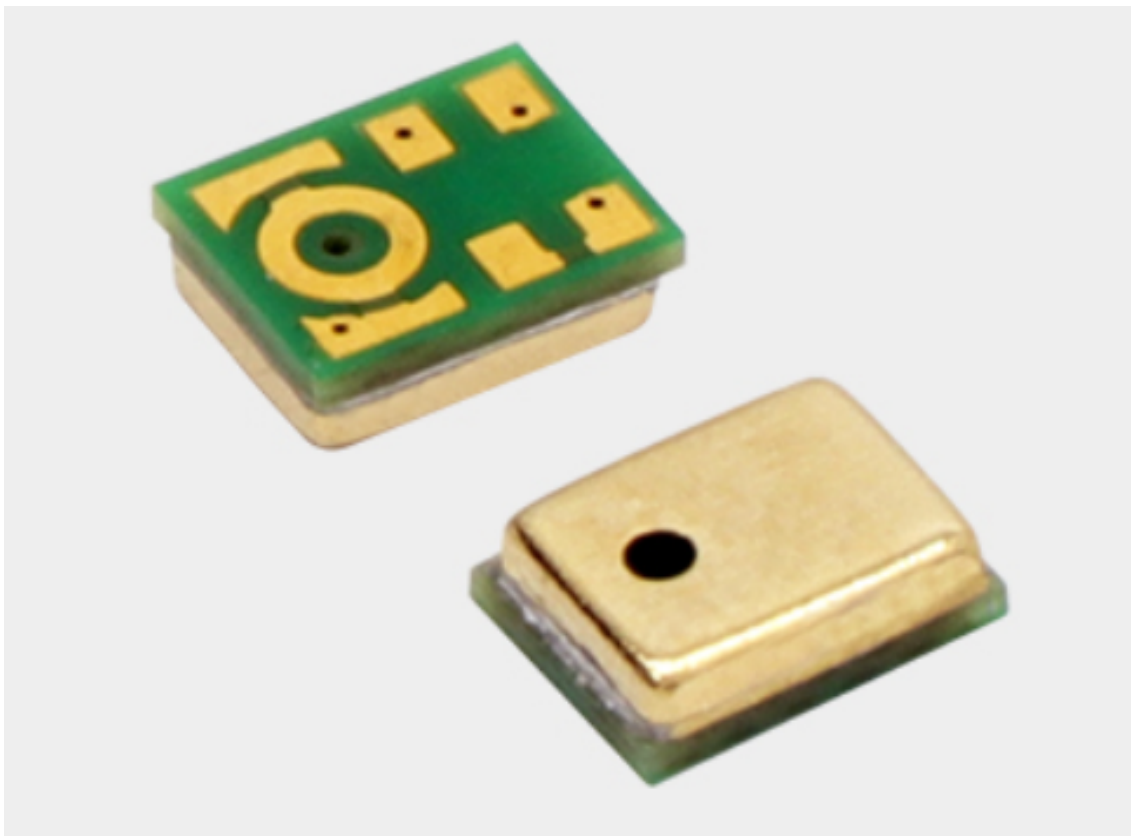


Figura 7 – Sensor de pressão piezoresistivo.

A Figura 8 mostra outro modelo de sensor de pressão piezoresistivo, com encapsulamento diferenciado, que facilita a integração em sistemas eletrônicos e permite medições precisas de pressão em ambientes controlados. (FONTE: Adaptado de MicroSensor, 2022)



Figura 8 – Sensor de pressão piezoresistivo.

**Atuadores**, que são dispositivos projetados para fornecer um estímulo a outros componentes ou dispositivos MEMS. Nos microssistemas, os atuadores são operados eletrostaticamente ou termicamente.

Na Figura 9, apresenta-se um exemplo de atuador térmico em MEMS, com configuração U-shaped (hot-and-cold arm), que converte corrente elétrica em variação térmica e deslocamento mecânico, típico de dispositivos de microatuações em aplicações como micro-grippers e micromotores. (FONTE: Adaptado de MEMS electrothermal actuator, 2024).



Figura 9 – Atuadores térmicos.

Na Figura 10, observa-se um modelo de atuadores elétricos MEMS baseados no princípio eletrostático, frequentemente utilizados em micro deslocadores e micromotores. Os atuadores comb-drive demonstram a conversão de tensão elétrica em movimento mecânico preciso, explorando a variação de capacitância entre superfícies interdigitadas. (FONTE: Adaptado de PHYSICS LIBRETEXTS, 2025)



Figura 10 – Atuadores elétricos.

**MEMS de RF**, que são uma classe de dispositivos usados para transmitir sinais de radio-frequência. Os dispositivos típicos incluem: interruptores, capacitores, antenas, etc.

Na Figura 11, observa-se um circuito com uma matriz de switches RF MEMS montado em placa de circuito impresso (PCB), com múltiplas conexões coaxiais, ilustrando claramente a integração e miniaturização da tecnologia RF MEMS usada para transmissão de sinais de radio-frequência em aplicações avançadas. (FONTE: Adaptado de IEEE Spectrum, “How RF MEMS Tech Finally Delivered the ‘Ideal Switch’”, 2025)

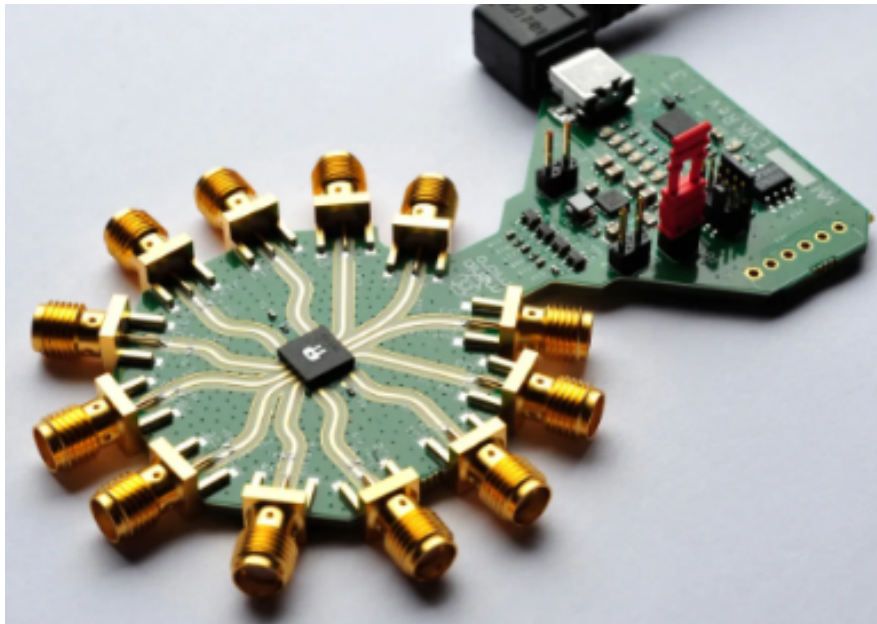


Figura 11 – O pacote preto e quadrado contém seis chaves RF MEMS, da Menlo Micro. Cada uma controla a conexão entre um par de portas RF ao redor da borda do octógono.

Na Figura 12, observa-se o discreto pacote preto quadrado contendo seis switches RF MEMS da Menlo Micro, cada um configurado para controlar a conexão entre um par de portas RF posicionadas ao redor da borda octogonal — evidenciando a densidade e integração de switches em aplicações de rádio-frequência. (Fonte: Adaptado de Glenn Zorpette, “Six Pack: The black, square package contains six RF MEMS switches...”)

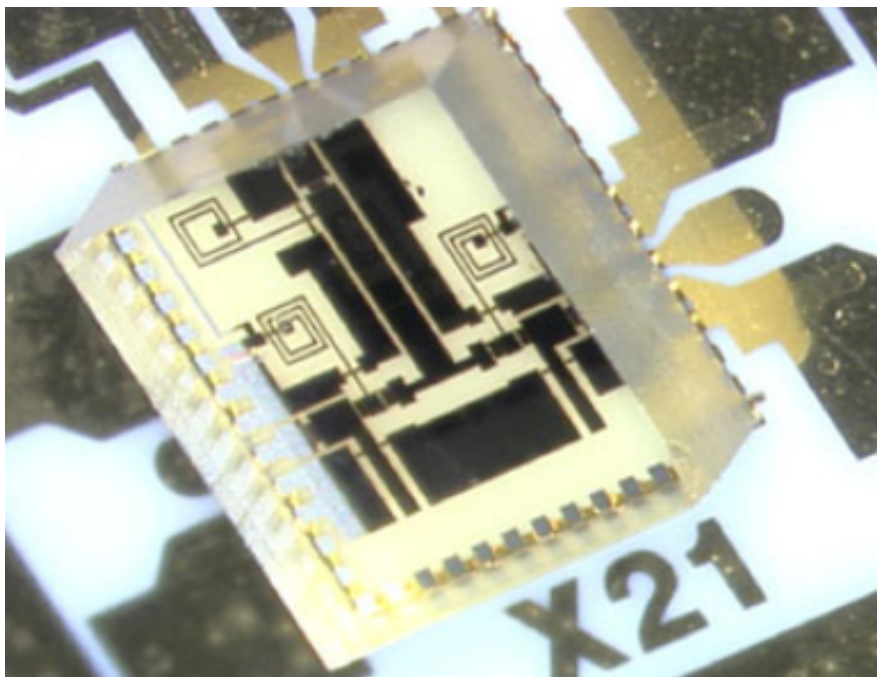


Figura 12 – Dispositivos RF MEMS.

Os **MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems)**, que são dispositivos projetados para direcionar, refletir, filtrar e/ou amplificar a luz. Esses componentes incluem interruptores e refletores ópticos.

Na Figura 13, é possível observar um chip optofluídico de MEMS iluminado por um feixe laser verde, ilustrando a integração de microcanais e guias ópticos em uma plataforma miniaturizada para aplicações como biossensores e sistemas lab-on-chip. (Fonte: Adaptado de LioniX International, 2020.)

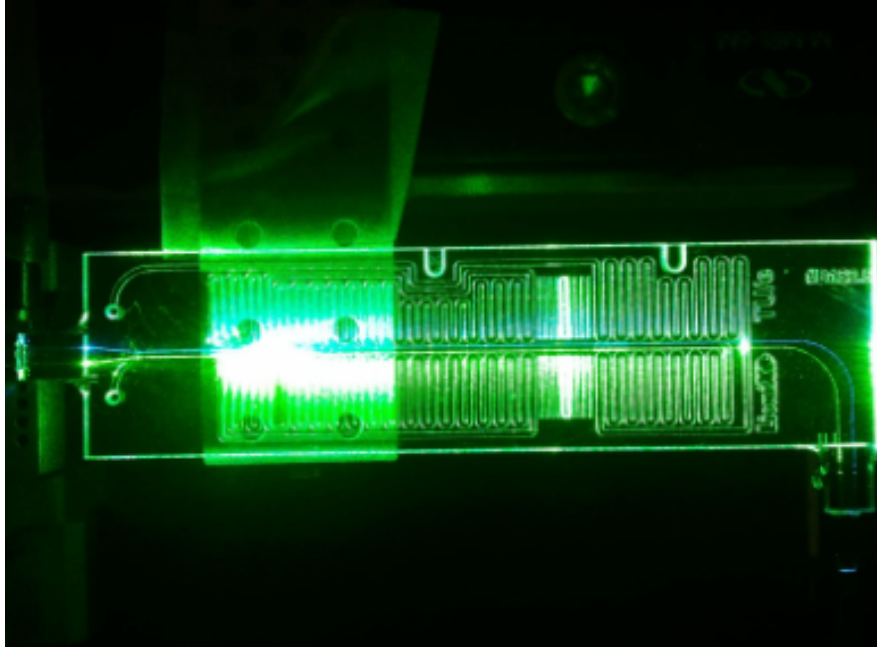


Figura 13 – Chip optofluídico em vidro.

Na Figura 14, observa-se a montagem de um pacote de laser de alta potência com módulo de varredura MEMS, evidenciando a combinação de um chip MEMS com um VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) e a estrutura mecânica que permite o ajuste de comprimento de cavidade para controle de frequência. (Fonte: Adaptado de Yokogawa, “Spectroscopic technology with a MEMS wavelength tunable laser light source”, 2018.)

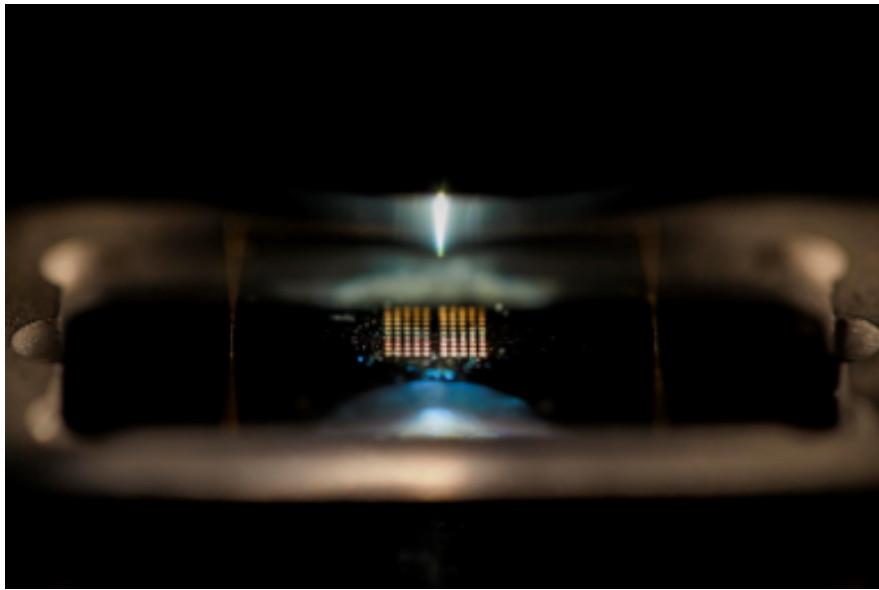


Figura 14 – Montagem de pacote de laser de alta potência.

Dispositivos **MEMS para microfluídica**, que são projetados para interagir e trabalhar com fluidos. Dispositivos como microbombas e microválvulas são criados para lidar com pequenos volumes de fluido.

Na Figura 15, observa-se um dispositivo microfluídico baseado em chip, no qual pontas de pipeta manipulam volumes microscópicos de fluido em microcanais, demonstrando a integração precisa de microestruturas para o controle de fluidos em escala micrométrica. (Fonte: Adaptado de Lap Man Lee e Allen P. Liu, “A microfluidic pipette array for mechanophenotyping of cancer cells”, *Lab on a Chip*, v.15, p.264-273, 2015.)

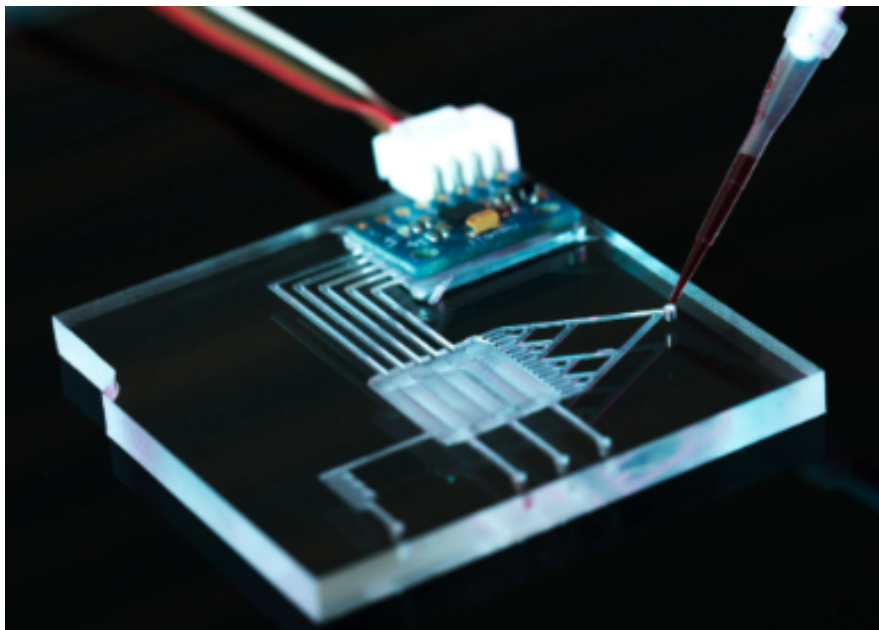


Figura 15 – Dispositivos microfluídicos.

Na Figura 16, é ilustrado um sistema microfluídico capaz de separar diferentes tipos de células dentro de uma grade microestruturada, exemplificando aplicações avançadas de análise e manipulação celular em dispositivos lab-on-a-chip. (Fonte: Adaptado de Lap Man Lee e Allen P. Liu, “A microfluidic pipette array for mechanophenotyping of cancer cells”, Lab on a Chip, v.15, p.264-273, 2015.)

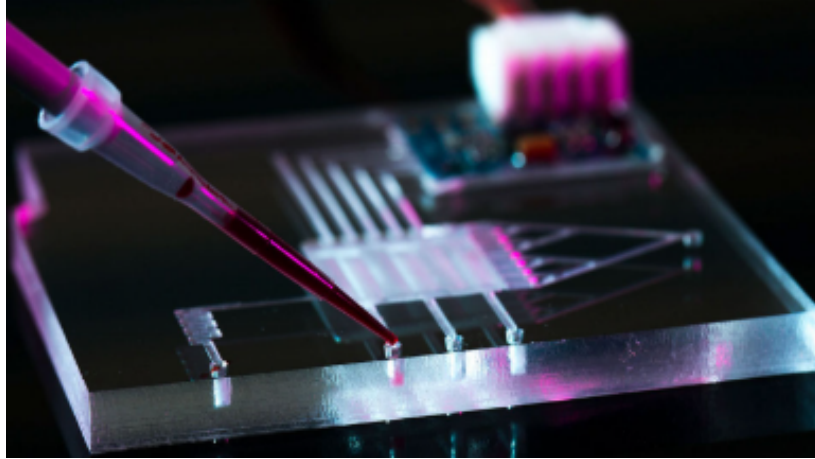


Figura 16 – Sistemas microfluídicos que pode separar diferentes tipos de células dentro de uma gotícula minúscula.

Os **MEMS biológicos**, que são dispositivos que, como muitos MEMS microfluídicos, são projetados para interagir especificamente com amostras biológicas. Dispositivos como esses são fabricados para interagir com proteínas, células biológicas, reagentes médicos etc. e podem ser usados para fornecer medicamentos ou outras análises médicas in situ.

Na Figura 17, observa-se um pequeno dispositivo microfluídico de liberação de insulina, desenvolvido pela Debiotech SA. O chip, posicionado sobre a ponta de um dedo, exemplifica um sistema compacto e implantável que permite a entrega contínua e precisa de insulina por meio de tecnologias MEMS integradas. (Fonte: Adaptado de Debiotech SA, “JewelPUMP™: continuous subcutaneous insulin infusion patch pump”, 2023.)

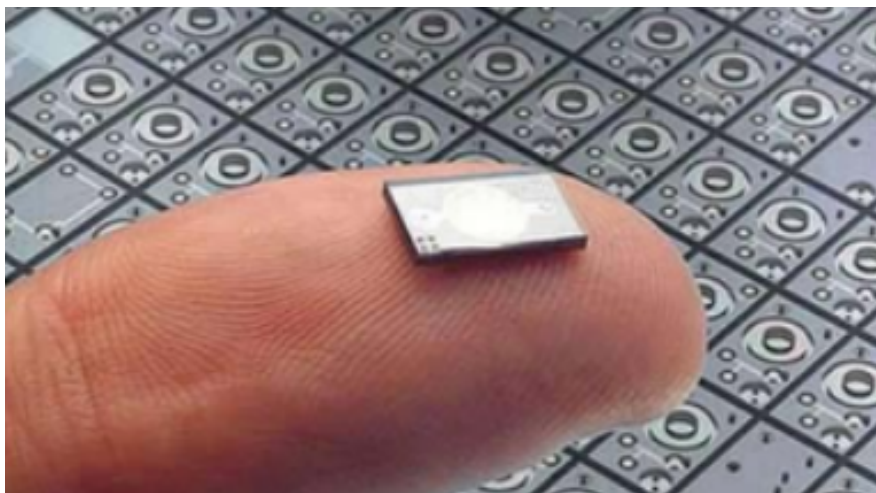


Figura 17 – Bomba de insulina fabricada pela Debiotech SA.

Diversos sensores específicos desempenham papéis essenciais em sistemas eletrônicos modernos, sendo peças-chave tanto em dispositivos do dia a dia quanto em aplicações tecnológicas mais avançadas, como na medicina e no setor automotivo (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; SWAIN et al., 2022). Entre esses sensores, destacam-se os sensores de pressão, que têm a função de detectar variações de pressão em um meio e convertê-las em sinais elétricos interpretáveis por sistemas eletrônicos. Esses sensores são largamente utilizados em automóveis, por exemplo, no monitoramento da pressão dos pneus, em equipamentos médicos para aferição da pressão arterial, e também em processos industriais, nos quais o controle preciso da pressão é fundamental. Outro sensor bastante relevante é o acelerômetro, cuja função é identificar acelerações. Isso pode incluir tanto forças constantes, como a gravidade, quanto movimentos rápidos ou vibrações. Esses sensores são vitais em mecanismos de segurança, como os airbags de veículos, pois detectam mudanças bruscas de movimento. Além disso, estão presentes em celulares para ajustar a orientação da tela conforme a posição do aparelho, e também em dispositivos vestíveis de monitoramento físico, registrando atividades como passos, corridas ou mudanças posturais. Os giroscópios também merecem destaque, pois permitem a medição de movimentos rotacionais ao redor de um eixo. Essa capacidade de detectar a rotação é amplamente explorada em sistemas de estabilização de câmeras e drones, em funções de navegação em smartphones e veículos, e até em controles de videogame que interpretam movimentos do usuário. Já os magnetômetros atuam na detecção de campos magnéticos, sendo particularmente úteis para identificar a orientação de um dispositivo em relação ao campo magnético terrestre. Com isso, contribuem para o funcionamento de bússolas digitais e auxiliam sistemas de geolocalização ao corrigirem a orientação de mapas em tempo real, garantindo uma navegação mais precisa. Os microfones em miniatura, frequentemente baseados em tecnologias microeletromecânicas, são projetados para captar ondas sonoras e transformá-las em sinais elétricos (GONZÁLEZ, 2021; SILVA et al., 2021). Além do tamanho reduzido, apresentam alta sensibilidade e baixo consumo de energia, características que os tornam ideais para uso em smartphones, aparelhos auditivos, assistentes virtuais e outros dispositivos com comandos de voz e recursos de cancelamento de ruído. Alguns sensores ópticos também se beneficiam dessas tecnologias em escala micrométrica. Eles podem ser aplicados na construção de interruptores ópticos usados em telecomunicações ou em sistemas que manipulam luz para formar imagens, realizar leituras, ou transmitir dados por meio de fibras ópticas. Por fim, os biossensores são dispositivos especialmente desenvolvidos para identificar substâncias biológicas, como enzimas, proteínas ou microorganismos. Têm grande importância na área médica, sendo usados em monitores de glicose para controle do diabetes, e também em análises ambientais, ajudando a detectar a presença de agentes contaminantes em água ou ar.

### 2.3 Aplicações dos MEMS

Quanto a suas aplicações, os MEMS são amplamente utilizados em diversas áreas, como por exemplo em eletrônicos de consumo, como celulares, smartwatches, fones de ouvido, na indústria automotiva, em aplicações médicas e biomédicas, em dispositivos aeroespaciais e até mesmo para uso militar em sistemas de comunicação.

### 2.3.1 Eletrônicos de consumo

A indústria dos eletrônicos de consumo foi revolucionada a partir da evolução dos MEMS, que proporcionaram sensores e dispositivos altamente compactos, eficientes e de baixo consumo energético. Esses sistemas combinam componentes mecânicos e eletrônicos em um único chip de silício, permitindo a criação de dispositivos inteligentes que podem interagir com o ambiente de forma precisa e responsiva. Atualmente, são amplamente utilizados em smartphones, smartwatches, fones de ouvido sem fio e diversos outros dispositivos eletrônicos modernos. No setor de eletrônicos de consumo, impulsionou o avanço significativo na forma como os dispositivos interagem com os usuários e com o ambiente ao redor. Devido à sua capacidade de integrar componentes mecânicos em escalas micrométricas com circuitos eletrônicos, os MEMS tornaram-se componentes indispensáveis, otimizando o funcionamento de dispositivos, como por exemplo, o smartphone. Sua miniaturização, baixo consumo de energia, custo reduzido e alta sensibilidade os tornam ideais para aplicações que exigem portabilidade, precisão e resposta rápida (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007).

Entre os exemplos mais populares de MEMS em eletrônicos de consumo estão os **acelerômetros e os giroscópios**, componentes fundamentais para a detecção de movimento e orientação espacial. Os acelerômetros são capazes de medir a aceleração linear em diferentes direções, permitindo que dispositivos móveis ajustem automaticamente a orientação da tela (modo retrato ou paisagem), reconheçam gestos, ou até mesmo contem passos em aplicativos de saúde e atividade física. Já os giroscópios complementam essa funcionalidade ao detectar rotações e inclinações do dispositivo, proporcionando maior precisão na medição de movimentos em três dimensões. A combinação desses dois sensores é conhecida como Unidade de Medição Inercial (IMU), e está presente em praticamente todos os smartphones modernos (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007).

Detalhando mais sobre o acelerômetro MEMS, esse dispositivo é um sensor de movimento que mede a aceleração linear de um objeto em uma ou mais direções. Sua principal função é detectar mudanças na velocidade ou na direção do movimento de um corpo, o que o torna fundamental para diversas aplicações, desde o ajuste da orientação de telas de dispositivos móveis até sistemas de monitoramento de saúde e segurança. A tecnologia MEMS permite a miniaturização dos acelerômetros, tornando-os compactos, de baixo custo e com baixo consumo de energia. Um acelerômetro MEMS é geralmente composto por uma massa suspensa sobre uma estrutura de microvias que reage a forças externas. Seu funcionamento baseia-se na interação entre uma massa de prova, geralmente feita de silício, e uma estrutura de suspensão, que permite que a massa se mova quando uma aceleração é aplicada. Quando o dispositivo é acelerado, a massa sofre deslocamento dentro da estrutura, e esse movimento é medido por variações na capacitância, resistência ou piezoelectricidade, dependendo do tipo de sensor. O valor resultante pode ser convertido em unidades de aceleração, geralmente expressas em metros por segundo ao quadrado ( $m/s^2$ ). Geralmente encontramos esses sensores em dispositivos móveis e wearables, como por exemplo, em smartphones e smartwatches. Os acelerômetros MEMS são utilizados para ajustar a orientação da tela, detectar movimento, rastrear atividades físicas e até mesmo monitorar a postura do usuário. Sensores de movimento também são essenciais para a funcionalidade de comandos por gestos, como virar a tela ou aceitar uma chamada com um simples movimento de mão (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al.,

Na Figura 18, observa-se um acelerômetro MEMS em pacote LCC quadrado com marcações típicas de identificação do componente, representando a miniaturização e robustez mecânica dos sensores de aceleração em aplicações industriais e automotivas. (Fonte: Adaptado de STMicroelectronics, “MEMS accelerometers”, 2025)



Figura 18 – Acelerômetro MEMS.

A principal vantagem dos acelerômetros MEMS é a sua miniaturização, que permite sua integração em dispositivos compactos. Além disso, sua precisão e sensibilidade são essenciais para garantir a detecção correta do movimento, além do baixo consumo de energia, o que os torna ideais para dispositivos móveis e de longa duração de bateria (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; KO, 2007; KHAN et al., 2017; MALCZEWSKI et al., 1999).

Também podemos detalhar sobre a utilização do giroscópio, que são componentes fundamentais em uma ampla gama de dispositivos modernos que exigem detecção de orientação, rotação e estabilidade. Assim como os acelerômetros, os giroscópios baseados em MEMS têm revolucionado a forma como os dispositivos eletrônicos percebem e respondem ao movimento no espaço tridimensional. Esse sensor mede a **velocidade angular**, ou seja, a taxa de rotação de um objeto ao redor de um ou mais eixos. Enquanto os acelerômetros detectam movimento linear, os giroscópios são responsáveis por registrar o movimento rotacional, sendo indispensáveis para uma análise completa do comportamento espacial de qualquer sistema móvel. Na prática, o giroscópio MEMS permite que um dispositivo saiba se está girando e em que direção, mesmo na ausência de referências externas. A maioria dos giroscópios MEMS operam com base no **efeito Coriolis**, um fenômeno físico que ocorre quando um objeto em movimento é submetido a uma rotação. O sensor possui uma microestrutura vibratória que, ao ser submetida à rotação, sofre uma força perpendicular ao seu movimento. Essa força é detectada por sensores capacitivos ou piezoelétricos, e convertida em sinais elétricos que representam a velocidade angular do corpo. Esse tipo de detecção requer altíssima precisão e estabilidade mecânica, características que a tecnologia MEMS consegue atingir por meio da fabricação de estruturas minúsculas de silício integradas a circuitos eletrônicos de leitura e controle (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; KO, 2007; KHAN et al., 2017; MALCZEWSKI et al., 1999; PILLANS et al., 2000; GOLDSMITH et al., 1998).

Na Figura 19, observa-se um módulo “breakout” com o giroscópio MEMS dual-axis IDG-300 da InvenSense, montado em placa PCB. Esse componente destaca a integração de sensor e circuito de controle em formato miniaturizado, facilitando medições de taxa de rotação em aplicações embarcadas e sistemas inerciais. (Figura 19 — Módulo “breakout” com giroscópio MEMS dual-axis IDG-300 montado em placa PCB. Fonte: Adaptado de SparkFun Electronics e Electrokit, 2006.)

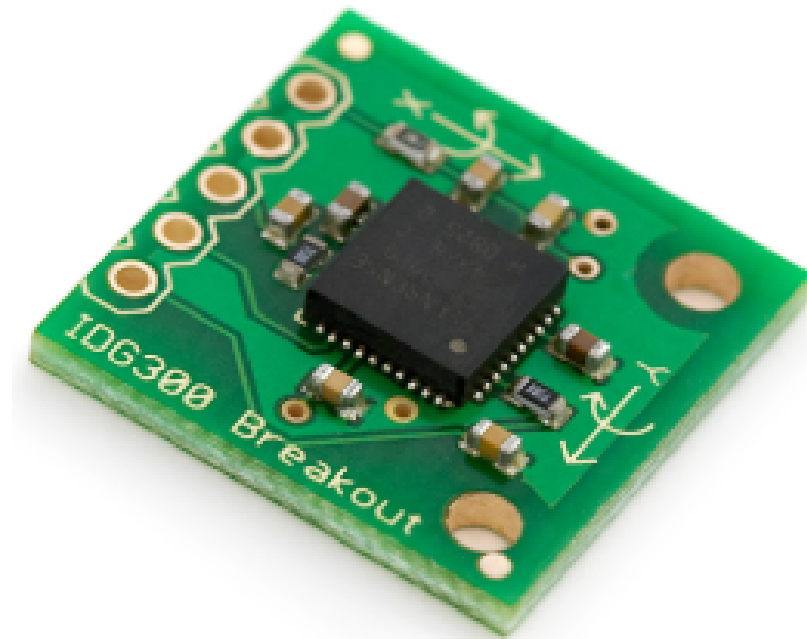


Figura 19 – Módulo “breakout” contendo o giroscópio MEMS dual-axis IDG-300, capaz de medir taxas de rotação em dois eixos ortogonais.

Uma das principais vantagens do giroscópio é a possibilidade de integração com outros sensores (como acelerômetros e magnetômetros), formando as chamadas IMUs – Unidades de Medição Inercial, que são capazes de fornecer dados tridimensionais completos de posição e orientação com alta fidelidade.

### 2.3.2 Indústria automotiva

A indústria automotiva é uma das áreas que mais se beneficiou da evolução dos sistemas microeletromecânicos (MEMS). Com a crescente demanda por veículos mais seguros, eficientes e inteligentes, os sensores MEMS passaram a desempenhar um papel central em diversas funcionalidades modernas, desde sistemas básicos de segurança até tecnologias avançadas de direção autônoma. Sua miniaturização, baixo custo, alta precisão e integração com sistemas embarcados os tornaram indispensáveis para a mobilidade do século XXI. Uma das primeiras e mais emblemáticas aplicações dos MEMS na indústria automotiva foi nos sistemas de airbags. Os acelerômetros MEMS instalados no veículo detectam rapidamente desacelerações bruscas (indicativas de colisões) e enviam sinais para que o airbag seja acionado em milissegundos, protegendo os ocupantes do veículo (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; KHAN et al., 2017; MALCZEWSKI et al., 1999; PILLANS et al., 2000).

Além disso, os MEMS são amplamente usados em sistemas como:

- **Controle eletrônico de estabilidade (ESC):** que utiliza giroscópios MEMS para detectar rotações não intencionais do veículo, como derrapagens, e acionar os freios automaticamente para manter a estabilidade.
- **Sistema de freios ABS (antitravamento):** sensores MEMS detectam a velocidade de rotação das rodas e ajudam a evitar que travem durante frenagens bruscas.
- **Monitoramento da pressão dos pneus (TPMS):** sensores de pressão MEMS verificam continuamente a pressão dos pneus, alertando o condutor em caso de perda de pressão, prevenindo acidentes e otimizando o consumo de combustível.

Os MEMS também contribuem para o aumento da eficiência energética e a redução de emissões de poluentes, o que é especialmente importante com o avanço dos carros híbridos e elétricos. Por exemplo:

- **Sensores de fluxo e pressão** são utilizados para monitorar o ar e o combustível no motor, ajustando automaticamente a mistura para otimizar a combustão.
- **Sensores de vibração e temperatura** permitem diagnosticar o funcionamento de peças como o motor, freios e suspensão, antecipando falhas e evitando manutenções corretivas dispendiosas.
- **Sensores de inclinação MEMS** são úteis para detectar a posição do veículo em rampas ou ladeiras, ativando freios de estacionamento automáticos ou assistentes de partida.

Com o avanço da tecnologia automotiva e a crescente busca por veículos mais seguros, confortáveis e inteligentes, a condução autônoma e os sistemas avançados de assistência ao motorista (ADAS – Advanced Driver Assistance Systems) vêm ganhando destaque no desenvolvimento de novos modelos de veículos. Esses sistemas representam um salto significativo na forma como os carros interagem com o ambiente ao seu redor, tomando decisões em tempo real para prevenir acidentes, melhorar o desempenho na direção e até mesmo realizar manobras de forma autônoma. Nesse contexto, os sensores MEMS desempenham um papel fundamental, fornecendo dados críticos sobre movimento, orientação e posição que são essenciais para o funcionamento eficaz dessas tecnologias (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; KHAN et al., 2017; MALCZEWSKI et al., 1999; PILLANS et al., 2000; GOLDSMITH et al., 1998).

A condução autônoma depende da integração de diversos sensores e sistemas computacionais que permitem ao veículo perceber o ambiente, processar informações e agir sem a intervenção humana. Os MEMS, em especial os **acelerômetros e giroscópios**, são componentes centrais das Unidades de Medição Inercial, que monitoram constantemente a aceleração e a rotação do veículo em tempo real. Com esses dados, é possível detectar mudanças de faixa, curvas, frenagens bruscas, inclinações e outros comportamentos dinâmicos do carro, o que permite que o sistema de direção autônoma responda com precisão às condições da via. Os **sistemas ADAS**, por sua vez, são um conjunto de tecnologias que atuam como “extensões sensoriais” do motorista, oferecendo suporte em diversas situações. Entre as funções mais comuns estão o controle de cruzeiro adaptativo, que

mantém a distância segura em relação ao veículo à frente; o sistema de frenagem de emergência automática, que detecta obstáculos e aplica os freios quando necessário; o assistente de permanência em faixa, que evita que o veículo saia da pista involuntariamente; e o sistema de reconhecimento de placas de trânsito, que identifica sinais e informa o condutor sobre os limites de velocidade e regras da via (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; KHAN et al., 2017; MALCZEWSKI et al., 1999; PILLANS et al., 2000; GOLDSMITH et al., 1998; HOIVIK et al., 2001).

Para que essas funções operem de forma precisa e segura, os sensores MEMS trabalham em conjunto com câmeras, radares e sensores ultrassônicos. Enquanto esses dispositivos mapeiam o ambiente externo, os MEMS fornecem informações internas sobre o comportamento físico do veículo, como sua rotação em torno dos eixos (pitch, roll e yaw), aceleração em diferentes direções e inclinação da carroceria. Isso permite, por exemplo, que o sistema detecte uma curva acentuada e ajuste automaticamente a velocidade ou o ângulo da direção para garantir a estabilidade. Além disso, os MEMS são essenciais para a navegação inercial, especialmente em situações onde o sinal de GPS é fraco ou inexistente, como túneis, garagens subterrâneas ou áreas urbanas densas. Nesse caso, os dados fornecidos pelas IMUs permitem estimar com alta precisão a posição e o movimento do veículo, mantendo a rota com segurança mesmo sem comunicação com satélites (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; KHAN et al., 2017; MALCZEWSKI et al., 1999; PILLANS et al., 2000; GOLDSMITH et al., 1998; HOIVIK et al., 2001).

Um das vantagens dos MEMS é a sua robustez e baixo consumo de energia, o que os torna ideais para aplicações embarcadas em veículos elétricos e híbridos, onde a eficiência energética é prioridade. Sua resistência a vibrações e variações de temperatura também os torna altamente confiáveis em ambientes automotivos exigentes. Com a evolução constante da eletrônica embarcada, espera-se que os sensores MEMS se tornem ainda mais integrados com sistemas baseados em inteligência artificial, aprendizado de máquina e comunicação veicular (V2X – vehicle to everything), permitindo que os carros se comuniquem entre si e com a infraestrutura ao redor. Isso abrirá caminho para uma condução verdadeiramente autônoma e colaborativa, com veículos capazes de prever o comportamento do tráfego e tomar decisões coletivas em benefício da segurança e da fluidez viária (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; KHAN et al., 2017; MALCZEWSKI et al., 1999; PILLANS et al., 2000; GOLDSMITH et al., 1998; HOIVIK et al., 2001; STRING, 1988).

### 2.3.3 Aplicações Médicas e Biomédicas

A integração da tecnologia dos MEMS ao setor médico e biomédico tem proporcionado avanços significativos no diagnóstico, monitoramento e tratamento de doenças. Por sua miniaturização, alta sensibilidade, baixo consumo de energia e capacidade de fabricação em larga escala, os MEMS vêm sendo amplamente utilizados em dispositivos médicos portáteis, sistemas implantáveis e instrumentos de precisão para procedimentos clínicos e cirúrgicos. Eles viabilizam soluções mais acessíveis, menos invasivas e com maior capacidade de coleta e análise de dados fisiológicos em tempo real (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; HWANG, 1997; STRING, 1988; BEACH et al., 1989; ALGAMILI et al., 2021).

#### *Monitoramento de Sinais Vitais*

Uma das principais aplicações dos MEMS na área da saúde está no desenvolvimento de sensores biomédicos portáteis capazes de monitorar sinais vitais continuamente. Esses sensores são comumente utilizados em wearables (dispositivos vestíveis), como pulseiras, relógios inteligentes e patches de pele, permitindo o acompanhamento remoto de pacientes e a detecção precoce de alterações fisiológicas (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; HWANG, 1997; STRING, 1988; BEACH et al., 1989; ALGAMILI et al., 2021).

- **Sensores de pressão MEMS para monitoramento da pressão arterial**, com tecnologia capaz de detectar variações mínimas no pulso e convertê-las em leituras digitais confiáveis.
- **Sensores de fluxo e microbombas MEMS** usados em medidores de glicose com sistemas de administração de insulina automatizados, permitindo o controle contínuo da glicemia em pacientes diabéticos.
- **Acelerômetros MEMS** aplicados na análise de atividade física e detecção de quedas em idosos ou pacientes em reabilitação, fornecendo dados para fisioterapeutas e cuidadores.

Além disso, muitos oxímetros de pulso, termômetros inteligentes e monitores respiratórios modernos também contam com sensores MEMS, que tornam esses dispositivos mais leves, precisos e energeticamente eficientes.

#### *Dispositivos Implantáveis*

A tecnologia MEMS também é utilizada em dispositivos médicos implantáveis, onde o tamanho reduzido, a biocompatibilidade e o consumo mínimo de energia são essenciais. Um exemplo importante são os marcapassos e desfibriladores implantáveis, que utilizam sensores MEMS para monitorar continuamente o ritmo cardíaco e adaptar o funcionamento do dispositivo às necessidades do paciente em tempo real (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; HWANG, 1997; STRING, 1988; BEACH et al., 1989; ALGAMILI et al., 2021).

Outros exemplos incluem:

- **Microválvulas e microssensores** em dispositivos de controle de pressão intracraniana para pacientes com hidrocefalia.
- **Sensores de pressão intraocular** implantáveis para monitoramento contínuo de pacientes com glaucoma.
- **Implantes cocleares com estruturas MEMS** que transformam sinais acústicos em estímulos elétricos de forma mais precisa e seletiva.

Esses sistemas oferecem vantagens significativas, como maior confiabilidade, respostas automáticas baseadas em algoritmos inteligentes, e a possibilidade de comunicação sem fio com dispositivos externos.

#### *Cirurgias Minimamente Invasivas*

Outro campo onde os MEMS vêm sendo amplamente aplicados é nas cirurgias minimamente invasivas, que exigem instrumentos de alta precisão e controle fino em espaços anatômicos restritos. Os MEMS permitem a construção de micropiças, microagulhas, microcâmeras e manipuladores robóticos que podem ser utilizados em procedimentos laparoscópicos, neurocirurgias e intervenções cardíacas. Por exemplo, cateteres inteligentes equipados com sensores MEMS são capazes de medir a pressão arterial em diferentes pontos do sistema cardiovascular, identificar obstruções e auxiliar na navegação interna durante procedimentos de cateterismo. Esses sistemas, além de reduzirem os riscos para o paciente, permitem um tempo de recuperação mais rápido e menor necessidade de internação. Além disso, robôs cirúrgicos de última geração, como o Da Vinci, utilizam sistemas baseados em MEMS para realizar cortes, suturas e movimentos precisos em microescala, possibilitando intervenções altamente controladas e com menor risco de complicações (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; HWANG, 1997; STRING, 1988; BEACH et al., 1989; ALGAMILI et al., 2021).

#### *Laboratórios em Chip (Lab-on-a-Chip)*

A tecnologia MEMS também impulsiona o desenvolvimento dos chamados lab-on-a-chip, dispositivos que integram em um único microchip diversas funções laboratoriais, como separação de amostras, reações químicas e análises bioquímicas. Esses sistemas permitem diagnósticos rápidos e portáteis a partir de pequenas quantidades de sangue, saliva ou urina, possibilitando testes de gravidez, detecção de doenças infecciosas (como HIV e COVID-19) e até biomarcadores para câncer (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; HWANG, 1997).

Por serem portáteis, baratos e de resposta rápida, os lab-on-a-chip baseados em MEMS têm sido fundamentais para o avanço da medicina personalizada e do monitoramento remoto, especialmente em regiões com acesso limitado a serviços de saúde (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021).

A principal vantagem dos MEMS no campo médico é a possibilidade de criar dispositivos mais acessíveis, compactos e de alto desempenho, que favorecem o diagnóstico precoce, o acompanhamento contínuo e tratamentos mais personalizados. Além disso, a capacidade de integração com plataformas digitais e inteligência artificial amplia a possibilidade de automação e interpretação preditiva dos dados coletados (MALUF; WILLIAMS, 2004).

#### 2.3.4 Aplicações dos MEMS em Defesa e Setor Aeroespacial

O setor de defesa e o segmento aeroespacial são campos de aplicação extremamente exigentes, que demandam tecnologias robustas, confiáveis e com capacidade de operação em ambientes hostis. Dentro desse contexto, os MEMS têm se consolidado como soluções fundamentais para diversas funções críticas, contribuindo significativamente para a evolução de armamentos, veículos autônomos, satélites, sensores e sistemas de navegação. A miniaturização promovida pelos MEMS não é apenas uma questão de design: trata-se de uma estratégia tecnológica para reduzir peso, consumo de energia, custos operacionais e, ao mesmo tempo, aumentar a precisão e a capacidade funcional de dispositivos militares e espaciais (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021).

#### *Navegação Inercial e Sistemas Autônomos*

Uma das aplicações mais importantes dos MEMS nesses setores está nos sistemas de navegação inercial (INS). Esses sistemas operam de forma autônoma, sem a necessidade de sinal de GPS, utilizando acelerômetros e giroscópios MEMS para detectar mudanças de posição e orientação. Tais sensores são integrados em Unidades de Medição Inercial (IMUs), que fazem parte da arquitetura de navegação de aeronaves, mísseis guiados, veículos terrestres autônomos e satélites. A vantagem dos MEMS nesse contexto reside na sua capacidade de oferecer medições precisas com consumo mínimo de energia e ocupando um espaço físico extremamente reduzido. Por exemplo, mísseis de pequeno porte ou drones de reconhecimento que operam em áreas sem acesso ao GPS, como subterrâneos, túneis ou ambientes altamente interferentes, dependem exclusivamente de IMUs baseadas em MEMS para manter sua trajetória com precisão. Esses sensores são capazes de detectar acelerações em múltiplos eixos e registrar variações angulares, permitindo a reconstrução da posição e orientação do objeto em movimento (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019).

#### *Sensoriamento em Campo e Combate*

Em operações de combate e patrulhamento, os MEMS também estão presentes em dispositivos de monitoramento ambiental e sensores de vigilância tática. Microacelerômetros, sensores de pressão e detectores de vibração são integrados a sistemas de alerta precoce que conseguem identificar disparos de armas, movimentação de veículos pesados ou aproximação de tropas. Em áreas urbanas, esses sensores podem ser acoplados a estruturas civis, como pontes, prédios e rodovias, para detecção de abalos, colapsos ou movimentações atípicas. Além disso, os MEMS são empregados na construção de equipamentos portáteis para soldados, como capacetes, coletes inteligentes e dispositivos vestíveis que monitoram em tempo real parâmetros fisiológicos (batimentos cardíacos, respiração, fadiga, temperatura corporal) e também detectam impactos, quedas e exposição a agentes químicos ou biológicos. Tais dados são transmitidos para centros de comando, que podem tomar decisões rápidas com base nas condições de saúde e desempenho dos combatentes (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019).

#### *Sistemas de Armas Inteligentes*

A crescente miniaturização dos componentes eletrônicos permitiu o desenvolvimento de armamentos inteligentes, como projéteis autoguiados e mísseis com ajuste de trajetória em tempo real. Nesse cenário, os MEMS são utilizados como elementos de controle de orientação, estabilização e correção de curso, oferecendo respostas rápidas a variações aerodinâmicas durante o voo. Eles também fazem parte de sistemas de detonação com temporização de alta precisão, aumentando a eficácia do armamento e reduzindo danos colaterais. Armas com esse nível de sofisticação exigem sensores robustos que operem sob aceleração extrema, calor intenso e vibrações constantes, condições ideais para a aplicação de sensores MEMS com encapsulamento reforçado e calibração de alta confiabilidade.

#### *Veículos Aeroespaciais e Satélites*

No setor aeroespacial, a economia de peso é vital para o sucesso de missões orbitais ou de exploração interplanetária. Cada grama economizada em uma missão representa economia de combustível, aumento da autonomia e maior capacidade de carga útil. Por isso, os MEMS são amplamente utilizados em satélites, sondas espaciais, foguetes e naves tripuladas.

Nesses veículos, sensores MEMS são utilizados para:

- Monitoramento da orientação (atitude control), garantindo que os satélites permaneçam alinhados corretamente com antenas ou painéis solares;
- Medição de pressão, fluxo e temperatura em sistemas de propulsão e controle térmico;
- Detecção de radiação e partículas carregadas, importantes em missões fora da órbita terrestre;
- Monitoramento de microgravidade, especialmente em experimentos científicos a bordo da Estação Espacial Internacional (ISS).

Sua resistência a variações extremas de temperatura, ao vácuo e à radiação cósmica os torna indispensáveis nas missões modernas e futuras.

### *Comunicações Seguras e Sistemas de Inteligência*

Os MEMS também aparecem nos bastidores da comunicação militar. Osciladores e filtros baseados em MEMS são utilizados em rádios criptografados e sistemas de comunicação segura, oferecendo estabilidade de frequência, baixo ruído de fase e resistência a interferências. Isso é especialmente importante em ambientes com grande quantidade de sinais simultâneos ou com possibilidade de guerra eletrônica. Além disso, sensores MEMS são incorporados a dispositivos de espionagem e coleta de dados em miniatura. Esses microdispositivos, muitas vezes camuflados em objetos do cotidiano, são capazes de captar som, vibração, movimento e até variações de campo magnético, sendo utilizados em operações de inteligência, vigilância e reconhecimento (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019).

Algumas das principais vantagens da utilização de MEMS para essas aplicações citadas estão na redução significativa de peso e volume, o que contribui para o aumento da eficiência e economia de combustível em aeronaves e satélites. Assim como a alta robustez e confiabilidade, mesmo em condições extremas de temperatura, pressão e vibração, também está na capacidade de produção em larga escala, com custo reduzido, permitindo a fabricação de equipamentos mais acessíveis e a integração com sistemas autônomos e inteligência artificial, possibilitando tomadas de decisão mais rápidas e baseadas em dados (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019).

#### 2.3.5 O Futuro dos MEMS: Tendências, Avanços Tecnológicos e Novas Fronteiras de Aplicação

À medida que a ciência dos materiais, a microfabricação e a nanotecnologia continuam evoluindo, os MEMS seguem uma trajetória de expansão exponencial, tanto em termos de desempenho quanto de aplicações. O futuro desses dispositivos é promissor e se desenha como um campo multidisciplinar em constante convergência com áreas como a bioengenharia, a inteligência artificial, a fotônica e a computação quântica. A tendência é que deixem de ser apenas sensores e atuadores passivos para se tornarem elementos inteligentes, capazes de processamento local de dados, adaptação ao ambiente e integração direta com redes neurais físicas e digitais (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; KO, 2007; SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021).

### *Miniaturização Avançada e a Transição para NEMS*

A evolução tecnológica dos MEMS tem como um de seus caminhos naturais a migração para os **Sistemas Nanoeletromecânicos (NEMS)**, que operam na escala nanométrica e prometem funcionalidades ainda mais precisas, rápidas e eficientes. Enquanto os MEMS trabalham na ordem de micrômetros ( $10^{-6}$  m), os NEMS atuam na faixa dos nanômetros ( $10^{-9}$  m), o que permite maior densidade de sensores por área, menor consumo de energia e sensibilidade extremamente elevada a variações físicas e químicas. Segundo Roukes (2001), os NEMS podem atingir níveis de sensibilidade que permitem a detecção de moléculas individuais, abrindo caminho para aplicações em diagnóstico molecular precoce, biossensores de altíssima resolução, e interfaces cérebro-máquina. Em muitos laboratórios ao redor do mundo, os NEMS já estão sendo testados para uso em análise de DNA, detecção de agentes patogênicos e mesmo como transdutores em sistemas de computação quântica (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002; ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019; SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021).

### *Integração com Inteligência Artificial e Computação de Borda*

Uma das maiores tendências para os próximos anos é a integração de sensores MEMS com algoritmos de inteligência artificial (IA) embarcada. Isso significa que os sensores não apenas coletarão dados, mas também terão capacidade para processamento local (edge computing), aprendizado de máquina (machine learning) e tomada de decisão autônoma, sem necessidade de enviar informações para um servidor remoto. Essa mudança já começa a ser implementada em sistemas ciberfísicos, como veículos autônomos, drones e wearables médicos, onde a latência precisa ser mínima. Em um estudo recente publicado por Zhang (ZHANG et al., 2021), os autores demonstraram que sensores MEMS acoplados a redes neurais convolucionais podem identificar falhas estruturais em pontes com mais precisão do que sistemas tradicionais baseados em análise de vibração bruta. Além disso, MEMS com IA embarcada tendem a ser mais eficientes energeticamente, já que evitam o tráfego constante de dados, e mais seguros, pois operam em circuitos fechados, protegendo informações sensíveis.

### *BioMEMS, Medicina Personalizada e Dispositivos Implantáveis*

O ramo dos BioMEMS também promete um crescimento vertiginoso. Esses dispositivos combinam a tecnologia MEMS com materiais biocompatíveis e são projetados para interagir com sistemas biológicos. O futuro aponta para sensores implantáveis que monitoram continuamente biomarcadores, como níveis de glicose, hormônios, gases ou proteínas inflamatórias, e ajustam automaticamente o tratamento de acordo com os dados captados. Estudos como os de (Ho et al., 2020) indicam que os BioMEMS terão papel fundamental na chamada medicina personalizada, permitindo diagnósticos em tempo real, terapias ajustadas à resposta individual de cada paciente e até liberação inteligente de medicamentos, em que microbombas MEMS atuam de forma precisa em tecidos-alvo. Outra vertente em crescimento é o uso de MEMS biodegradáveis, feitos com materiais como polímeros orgânicos ou óxidos solúveis (MALUF; WILLIAMS, 2004; ALGAMILI et al., 2021). Esses dispositivos podem ser absorvidos pelo organismo após cumprirem sua função, eliminando a necessidade de remoção cirúrgica.

### *Sensores Autossuficientes: Energia de Fontes Ambientais*

No futuro, os MEMS tendem a ser autossuficientes energeticamente, alimentando-se de fontes do próprio ambiente por meio de técnicas de harvesting de energia, como vibrações, luz, calor ou até sinais eletromagnéticos. Isso é especialmente promissor para aplicações em áreas remotas ou em dispositivos implantáveis que precisam operar por longos períodos sem manutenção. Pesquisas conduzidas por (Beeby et al., 2006) demonstraram que sensores MEMS acoplados a microgeradores piezelétricos conseguem alimentar-se de vibrações naturais em estruturas como motores e turbinas, viabilizando sistemas de monitoramento contínuo em ambientes industriais e aeroespaciais.

#### *Aplicações Emergentes: Quântica, Espacial e Ambiental*

À medida que os MEMS se tornam mais sensíveis e versáteis, novas fronteiras tecnológicas se abrem. Uma área emergente é o desenvolvimento de MEMS para sistemas quânticos (QMEMS), que servirão como elementos de acoplamento entre bits quânticos (qubits) e sistemas clássicos (SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021). Esses dispositivos prometem desempenhar papel central na construção de computadores quânticos híbridos, com maior estabilidade e controle térmico. No setor aeroespacial, os MEMS já estão sendo adaptados para missões de longa duração, onde serão utilizados em sondas robóticas, sistemas de coleta de amostras planetárias e habitats autossustentáveis em ambientes hostis, como Lua e Marte. A NASA e a ESA (Agência Espacial Europeia) já realizam testes com MEMS de alta resistência à radiação cósmica e a temperaturas extremas (MALUF; WILLIAMS, 2004; ALGAMILI et al., 2021).

Por fim, os MEMS terão papel essencial no combate às mudanças climáticas e na preservação ambiental. Sensores ultracompactos e de baixo custo serão utilizados para monitorar qualidade do ar, água e solo, identificando poluentes, gases tóxicos e partículas com resolução temporal e espacial sem precedentes. Essa tecnologia poderá ser aplicada em escala urbana, agrícola e industrial, contribuindo para políticas públicas mais eficazes (ALGAMILI et al., 2021; ZHU et al., 2019).

### 3 Resultados

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados da pesquisa teórica realizada sobre os sistemas microeletromecânicos (MEMS) e sua evolução para os sistemas microeletromecânicos quânticos (QMEMS), com foco nos processos de fabricação, especialmente no uso de filmes finos via eletrodeposição, e nas aplicações emergentes dessas tecnologias.

Inicialmente, serão discutidos os MEMS baseados em filmes finos, cuja fabricação depende fortemente de técnicas que permitam o controle da espessura, da morfologia e da composição dos materiais depositados. Dentre as técnicas analisadas, a eletrodeposição destacou-se por sua versatilidade, baixo custo e compatibilidade com substratos condutores como o silício e o duróid. Este processo permite criar filmes metálicos, óxidos e polímeros condutores, fundamentais para a construção de sensores, atuadores, microcircuitos e dispositivos de alta precisão.

A comparação entre as diferentes técnicas de deposição — eletrodeposição, sputtering, PVD e CVD — revelou que, embora as técnicas baseadas em vácuo ofereçam filmes de altíssima qualidade, a eletrodeposição se destaca pela simplicidade, pelo baixo custo energético e pela capacidade de produzir filmes funcionais em ambientes de pressão ambiente. Essa característica torna o processo altamente atrativo para a fabricação de MEMS em larga escala.

Na sequência, o estudo foi direcionado para os MEMS quânticos (QMEMS), que representam a integração dos fundamentos da mecânica quântica aos dispositivos microeletromecânicos (SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021). A análise revelou que, ao atingir dimensões nanométricas, efeitos como quantização de energia vibracional (fônons), superposição de estados e emaranhamento quântico passam a dominar o comportamento dos dispositivos (EZAWA et al., 2023). A compreensão da equação de Damon-Eshbach, que descreve os modos magnetostáticos em filmes ferromagnéticos, foi essencial para entender como as ondas de spin podem ser utilizadas para acoplamento quântico em QMEMS, viabilizando sensores e transdutores de altíssima precisão (DAMON; ESHBACH, 1961; HOLANDA, 2021).

Foram identificadas diversas aplicações práticas dos QMEMS em setores estratégicos, como defesa — com sensores inerciais quânticos e sistemas de navegação autônoma sem GPS —, telecomunicações — através de repetidores quânticos e transdutores optomecânicos —, saúde — com sensores biomédicos de precisão molecular — e na indústria aeroespacial, onde são utilizados em sensores gravitacionais, giroscópios de altíssima precisão e sistemas embarcados de comunicação quântica ultra segura (SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021; EZAWA et al., 2023).

Além disso, o trabalho demonstrou que a fabricação de QMEMS pode ser viabilizada através da combinação de substratos híbridos de duróid e silício com filmes finos produzidos por eletrodeposição, proporcionando uma solução tecnicamente robusta, escalável e de baixo custo para atender às demandas dos dispositivos quânticos modernos (SWAIN et al., 2022).

Portanto, os resultados deste estudo não apenas reforçam a importância dos MEMS e QMEMS como tecnologias-chave da atualidade, mas também demonstram que sua contínua evolução impulsionará uma série de inovações em áreas críticas da ciência, da indústria e da sociedade, consolidando esses dispositivos como pilares centrais da revolução tecnológica quântica.

#### 3.1 MEMS de filmes finos

Filmes finos são estruturas sólidas formadas por camadas de material com espessura reduzida, geralmente variando entre alguns nanômetros e poucos micrômetros (SWAIN et al., 2022;

FLANNERY et al., 1997). Essas camadas são aplicadas sobre um substrato com o objetivo de modificar ou potencializar propriedades elétricas, ópticas, térmicas, mecânicas ou químicas do sistema (MALUF; WILLIAMS, 2004; ALGAMILI et al., 2021). Sua presença é fundamental em componentes miniaturizados, especialmente nos sistemas microeletromecânicos (MEMS), que exigem controle dimensional preciso e funcionalidade integrada em pequena escala. A principal característica dos filmes finos está relacionada à sua espessura, que interfere diretamente nas propriedades do material em relação ao seu estado massivo. Em dimensões nanométricas, efeitos de superfície passam a dominar o comportamento físico do filme, possibilitando, por exemplo, condutividades elétricas diferenciadas, fenômenos de interferência óptica ou alteração na tensão superficial (FLANNERY et al., 1997; SWAIN et al., 2022). Esses efeitos tornam os filmes finos elementos-chave para a funcionalização de superfícies e a inovação tecnológica em dispositivos avançados.

Na Figura 20, observa-se uma microestrutura de filme fino piezoelétrico de BCZT, mostrando padrões depositados e liberados, típicos de elementos piezoelétricos microfabricados em MEMS. (Fonte: Adaptado de Xin Jianget al., Microstructure and electric properties of BCZT thin films with seed layers, RSC Advances, v.7, p.49962-49968, 2017.)

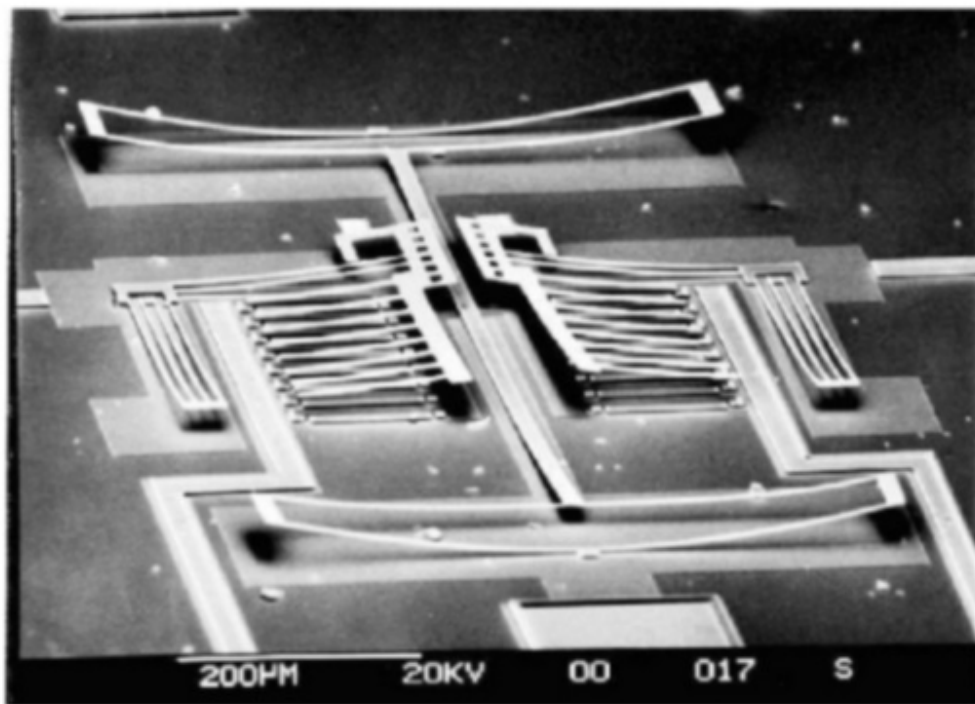


Figura 20 – Microestrutura de filme fino piezoelétrico BCZT

A formação de filmes finos pode ser realizada por diversas técnicas, tanto físicas quanto químicas. Entre as principais, destacam-se a evaporação térmica, sputtering, deposição química de vapor (CVD), deposição física de vapor (PVD) e eletrodeposição (FLANNERY et al., 1997; SWAIN et al., 2022). A escolha do método adequado depende do material desejado, da aplicação final e das condições de produção disponíveis. Nos MEMS, os filmes finos têm aplicação decisiva, pois permitem a criação de elementos sensoriais, atuadores e sistemas de interconexão em escalas microscópicas (MALUF; WILLIAMS, 2004; ALGAMILI et al., 2021). A capacidade de formar camadas finas com uniformidade, reprodutibilidade e seletividade permite que esses dispositivos

operem com alta sensibilidade e baixo consumo energético. Além disso, a integração de filmes condutores, dielétricos ou piezoelétricos viabiliza o funcionamento de circuitos multifuncionais dentro de um mesmo chip. Do ponto de vista tecnológico, a utilização de filmes finos possibilita a fabricação de estruturas tridimensionais, multicamadas e com padrões complexos, essenciais para o desempenho de MEMS em aplicações biomédicas, aeroespaciais, automotivas e de comunicação. A possibilidade de controlar espessura, composição e morfologia com precisão é uma das razões pelas quais os filmes finos são amplamente utilizados na engenharia de superfícies e na fabricação de sensores e dispositivos vestíveis (SWAIN et al., 2022). Vale ressaltar que os filmes finos não se limitam apenas à função estrutural ou funcional em MEMS. Eles também atuam como camadas de proteção contra oxidação, difusão, abrasão ou contaminação, prolongando a vida útil dos dispositivos e melhorando sua confiabilidade (FLANNERY et al., 1997). A contínua evolução das técnicas de deposição e caracterização tem expandido ainda mais as possibilidades de aplicação dos filmes finos, consolidando-os como um elemento estratégico no avanço da nanotecnologia e da eletrônica moderna.

A técnica que darei ênfase será a de eletrodeposição, que é uma técnica de revestimento in situ amplamente utilizada, baseada na aplicação de corrente ou tensão elétrica para promover a deposição de materiais ativos sobre a superfície de um eletrodo condutor (SWAIN et al., 2022). O processo ocorre por meio da redução eletroquímica de íons presentes na solução eletrolítica, promovendo o crescimento de filmes finos sobre o substrato. Essa abordagem é reconhecida por sua simplicidade, baixo custo e capacidade de produzir materiais com diversas morfologias, sendo altamente eficaz para aplicações em dispositivos microeletromecânicos. Além da escolha adequada da solução eletrolítica, diversos fatores influenciam a eficiência do processo de eletrodeposição. Em muitos casos, são empregados sistemas de dois eletrodos, com um ânodo e um cátodo. A deposição pode ocorrer em ambos os eletrodos, dependendo das condições experimentais. Alternativamente, utiliza-se uma configuração com três eletrodos, onde o eletrodo de trabalho é acompanhado por um eletrodo de referência — como Ag/AgCl, Hg/HgO ou SCE (eletrodo de calomelano saturado), que fornece um potencial de referência estável e bem conhecido contra o qual se pode medir o potencial de outros eletrodos (SWAIN et al., 2022). — e um contraeletrodo, geralmente de platina ou grafite. Essa configuração oferece maior controle sobre o potencial aplicado e, portanto, sobre as características do filme depositado. Um exemplo prático do uso dessa técnica foi apresentado por Xie et al. (2022), que desenvolveram um filme de grafeno poroso tridimensional e, em seguida, realizaram a eletrodeposição de polianilina (PANI) a uma densidade de corrente de  $2 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ . O dispositivo resultante, composto por PANI/grafeno, apresentou excelente estabilidade eletroquímica, mantendo 97% da sua capacitância inicial após 100 ciclos de flexão. Além disso, o desempenho foi preservado mesmo sob 30% de deformação, o que demonstra o potencial da eletrodeposição para aplicações em dispositivos flexíveis e vestíveis.

Dentre as diferentes técnicas utilizadas para a deposição de filmes finos, cada uma oferece vantagens e limitações. A eletrodeposição se destaca pelo seu baixo custo, simplicidade operacional e capacidade de controle fino da espessura e morfologia (SWAIN et al., 2022). Em contraste, a deposição física de vapor (PVD) e o sputtering exigem câmaras de alto vácuo e infraestrutura sofisticada, embora produzam filmes com excelente pureza e aderência (FLANNERY et al., 1997). Já a deposição química de vapor (CVD) permite a cobertura de superfícies complexas com excelente conformidade, mas requer gases tóxicos e altas temperaturas. A tabela a seguir resume essas comparações.

Tabela 1 – Comparação entre técnicas de deposição de filmes finos.

Técnica	Custo	Temperatura	Atmosfera	Substrato	Espessura Típica	Complexidade
Eletrodeposição	Baixo	Ambiente	Aquosa	Condutor	50 nm – 10 $\mu$ m	Baixa
PVD / Sputtering	Alto	Alta	Vácuo	Variado	10 nm – 1 $\mu$ m	Alta
CVD	Médio	Alta	Gases	Variado	10 nm – 5 $\mu$ m	Alta

Como podemos observar na Tabela 1, cada método apresenta características operacionais específicas que impactam diretamente na escolha do processo, dependendo da aplicação desejada. A eletrodeposição se destaca como a alternativa de menor custo, operando em temperatura ambiente e em uma atmosfera aquosa, o que a torna extremamente acessível e energeticamente eficiente. Ainda de acordo com a tabela, nota-se que as técnicas baseadas em vácuo, como PVD/Sputtering, apresentam uma faixa de espessura menor, variando de 10 nm a 1  $\mu$ m, e estão associadas a um alto custo e alta complexidade operacional. Isso se deve à necessidade de câmaras de vácuo, controle rigoroso de parâmetros e maior consumo energético, o que pode tornar a técnica menos atrativa.

A técnica de CVD (Chemical Vapor Deposition), por sua vez, também, como podemos observar na tabela, exige altas temperaturas e uma atmosfera controlada composta por gases precursores (FLANNERY et al., 1997). Portanto, a análise da Tabela X deixa claro que a escolha do método de deposição não depende apenas da espessura desejada, mas também de fatores como custo, tipo de substrato, ambiente de processamento e nível de complexidade operacional aceitável. No contexto dos MEMS, especialmente quando se busca escalabilidade, baixo custo e compatibilidade com substratos condutores, a eletrodeposição surge como uma das técnicas mais adequadas (SWAIN et al., 2022). Já as tecnologias baseadas em vácuo são preferíveis quando há exigência de filmes com altíssimo controle estrutural e pureza (FLANNERY et al., 1997).

### 3.2 MEMS quânticos

Os sistemas microeletromecânicos quânticos, conhecidos pela sigla QMEMS (Quantum Microelectromechanical Systems), configuram uma classe emergente e altamente promissora de dispositivos que integram as funcionalidades dos sistemas microeletromecânicos convencionais (MEMS) aos princípios fundamentais da mecânica quântica (SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021). Na prática, os QMEMS são compostos por estruturas de dimensões micro ou nanométricas, capazes de operar em regimes onde os efeitos quânticos não podem mais ser negligenciados, passando a desempenhar um papel determinante no comportamento físico do sistema. A incorporação desses efeitos permite não apenas a exploração de fenômenos como superposição, entrelaçamento e quantização de energia, mas também o desenvolvimento de dispositivos com níveis de sensibilidade, precisão e desempenho significativamente superiores aos seus equivalentes clássicos (EZAWA et al., 2023).

Na Figura 21, observa-se microestrutura MEMS composta por engrenagens interligadas, reveladas em imagem de varredura eletrônica (SEM), demonstrando mecanismos de translação e rotação em microescala, típicos de aplicações em micromotores e microtransmissores. (Fonte: Adaptado de Mel Siegel, “Smart Sensors and Small Robots”, smart sensors and small robots, conferência, 2001.)

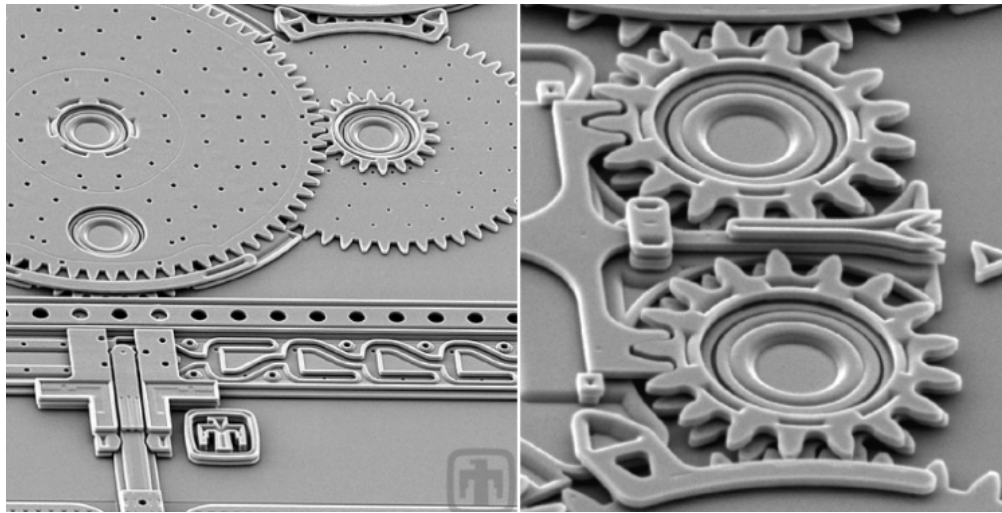


Figura 21 – Microestruturas MEMS em silício.

O desenvolvimento dos QMEMS surge como uma extensão natural da evolução tecnológica dos MEMS clássicos, que revolucionaram diversas áreas ao possibilitar a fabricação de sensores e atuadores em escala micrométrica, com ampla aplicação nos setores industrial, biomédico, aeroespacial, automotivo e eletrônico. Entretanto, à medida que as dimensões dos dispositivos foram sendo reduzidas para a faixa de nanômetros e as exigências por sensibilidade e precisão se tornaram cada vez maiores, os limites impostos pela física clássica passaram a se tornar evidentes. Nesse contexto, tornou-se essencial incorporar princípios da mecânica quântica aos processos de projeto e operação desses dispositivos, dando origem aos QMEMS.

Esses dispositivos geralmente integram:

- Estruturas mecânicas em escala micrométrica/nanométrica (como cantilevers, membranas ou feixes vibrantes).
- Componentes quânticos (pontos quânticos, spins individuais, defeitos cristalinos como centros NV em diamante, ou qubits supercondutores).
- Acoplamento entre graus de liberdade mecânicos e quânticos (ex.: interação entre vibrações mecânicas e estados de spin).

A operação de MEMS quânticos baseia-se em dois princípios principais:

- Quantização de Estados Mecânicos: Em escalas nanométricas, as vibrações mecânicas podem ser quantizadas em fônons, permitindo o controle de energia em níveis discretos.
- Acoplamento Híbrido:
  1. Magneto-mecânico: Modos magnetostáticos em filmes finos (como os descritos por Damon e Eshbach, 1961) podem interagir com ressonadores MEMS, convertendo excitações magnéticas em movimento mecânico e vice-versa.
  2. Opto-mecânico: Cavidades ópticas acopladas a estruturas MEMS permitem a conversão entre fótons e fônons, útil para transdução de sinais quânticos.

Sobre os efeitos quânticos, precisamos entender mais como funcionam em sistemas de QMEMS, afim de facilitar sua utilização. Em sistemas MEMS quânticos, a superposição de estados ocorre quando um ressonador mecânico (como um cantilever ou membrana) vibra em dois ou mais estados de deslocamento simultaneamente. Isso é análogo ao famoso "gato de Schrödinger", onde um objeto macroscópico exibe propriedades quânticas. Esse fenômeno se manifesta da seguinte forma: Um cantilever nanométrico pode ser preparado em um estado de superposição espacial, oscilando em duas amplitudes distintas ao mesmo tempo. Isso é alcançado através do resfriamento criogênico (para reduzir decoerência) e acoplamento a um qubit supercondutor ou spin individual, que atua como controlador quântico

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (3)$$

onde  $|0\rangle$  e  $|1\rangle$  representam estados mecânicos distintos (ex.: posições diferentes do cantilever).

O emaranhamento quântico ocorre quando dois ou mais componentes (ex.: dois cantilevers ou um cantilever e um spin) tornam-se correlacionados de modo que o estado de um define instantaneamente o estado do outro, independentemente da distância. Um exemplo prático disso ocorre quando dois ressonadores mecânicos acoplados a um mesmo qubit supercondutor podem ser emaranhados via interação mediada por fótons em uma cavidade óptica. Aplicamos este efeito em sensores de força ultra-precisos, onde a medição de um ressonador revela informações sobre o outro instantaneamente. Em escalas nanométricas, a energia de vibração de um ressonador MEMS não é contínua, mas quantizada em pacotes discretos chamados fônons. Uma forma de observar isso é em processos como:

- Resfriamento ao estado fundamental: O cantilever é resfriado até que seu número médio de fônons  $\langle n \rangle \approx 0$
- Excitação seletiva: Pulsos de laser ou campos elétricos excitam estados vibracionais específicos (ex.: transição de  $|0\rangle$  para  $|1\rangle$ ).
- Leitura óptica/eletrônica: A energia quantizada é detectada via desvio de frequência em cavidades ópticas ou mudança na capacitância. Uma equação relevante que demonstra isso é:

$$E_n = \left( n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega_0 \quad (4)$$

onde  $n$  é o número quântico vibracional e  $\omega_0$  a frequência natural do ressonador.

### 3.2.1 Equação de Damon-Eshbach

O trabalho seminal de (DAMON; ESHBACH, 1961) sobre modos magnetostáticos em filmes ferromagnéticos finos estabelece as bases teóricas para entender como excitações magnéticas podem ser acopladas a sistemas mecânicos em escala micrométrica — uma conexão fundamental para o desenvolvimento de MEMS quânticos.

A teoria de excitação de modos magnetostáticos para filmes finos ferromagnéticos foi primeiramente desenvolvida por Damon e Eshbach. Aqui descreveremos a teoria de Damon e Eshbach e faremos algumas análises. Para estudar este formalismo consideraremos três fatores: as equações de Maxwell aplicáveis ao problema, as devidas condições de contorno e a equação de

Landau-Lifshitz (HOLANDA, 2021). Vamos estudar como as ondas de spin se propagam em filmes magnéticos finos. Essas ondas, chamadas de ondas magnetostáticas, surgem da interação entre o campo magnético e a magnetização do material.

Começamos simplificando as equações de Maxwell para o caso onde podemos desprezar efeitos elétricos rápidos:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{O campo magnético não tem fontes}) \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (\text{Sem correntes elétricas variantes no tempo}) \quad (6)$$

Essas simplificações nos permitem focar apenas nos efeitos magnéticos que nos interessam, tornando o problema tratável matematicamente. Em seguida vamos definir equações para a magnetização e para o campo magnético:

Descrivemos a magnetização total como:

$$\vec{M} = M_0 \hat{z} + \vec{m} e^{i\omega t} \quad (7)$$

onde:

- $M_0$  é a magnetização estática (ao longo do eixo z)
- $\vec{m}$  é uma pequena perturbação oscilante

O campo magnético total fica:

$$\vec{H} = H_0 \hat{z} + \vec{h} e^{i\omega t} \quad (8)$$

A equação de Landau-Lifshitz é a equação que governa como a magnetização muda com o tempo e é representada por:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma (\vec{M} \times \vec{H}) \quad (9)$$

Para pequenas oscilações, linearizamos a equação obtendo:

$$i\omega m_x = \gamma (H_0 m_y - M_0 h_y) \quad (10)$$

$$i\omega m_y = \gamma (M_0 h_x - H_0 m_x) \quad (11)$$

Estas equações mostram como as componentes x e y da magnetização oscilante estão acopladas entre si e com o campo magnético oscilante. Na superfície do filme magnético (nas interfaces), os campos devem se comportar de maneira específica para satisfazer as leis físicas.

Na interface filme/vácuo, os campos devem satisfazer duas condições de contorno:

### 1. Componente normal de B deve ser contínua:

$$B_1^\perp = B_2^\perp \quad (12)$$

## 2. Componente tangencial de $\mathbf{H}$ deve ser contínua:

$$H_1^{\parallel} = H_2^{\parallel} \quad (13)$$

Estas condições garantem conservação do fluxo magnético, ausência de correntes superficiais não-físicas e acoplamento adequado entre os campos interno e externo.

A formulação matemática então resulta dos seguintes passos:

Definimos  $\vec{h} = \nabla\phi$ , levando à equação de Walker para o interior do filme:

$$(1 + \kappa)\nabla_{\parallel}^2\phi + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (14)$$

onde  $\nabla_{\parallel}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  e os coeficientes materiais são:

$$\kappa = \frac{\omega_H\omega_M}{\omega_H^2 - \omega^2}, \quad \omega_H = \gamma H_0, \quad \omega_M = 4\pi\gamma M_0 \quad (15)$$

Assumimos solução na forma:

$$\phi(x, y, z) = X(x)e^{ik_y y} \cos(k_z z) \quad (16)$$

Na interface  $x = \pm t/2$ , aplicamos as condições de contorno, que garantem tanto a continuidade do potencial quanto a continuidade das derivadas do potencial magnético escalar. Estas condições são fundamentais para assegurar que não haja descontinuidades físicas no campo ao atravessar a interface do material.

### 1. Continuidade do potencial:

$$\phi^{int}(\pm t/2) = \phi^{ext}(\pm t/2) \quad (17)$$

Esta equação assegura que o potencial magnético seja contínuo na interface, ou seja, não existe salto no valor do potencial ao passar do meio interno para o meio externo do filme.

### 2. Continuidade das derivadas:

$$(1 + \kappa) \left. \frac{\partial\phi^{int}}{\partial x} \right|_{x=\pm t/2} = \left. \frac{\partial\phi^{ext}}{\partial x} \right|_{x=\pm t/2} \quad (18)$$

Essa equação impõe que o fluxo do campo tangencial (relacionado à derivada do potencial) deve ser conservado na interface. O fator  $(1 + \kappa)$  reflete as propriedades materiais do meio interno, enquanto no meio externo não há essa contribuição, justificando a ausência desse fator no lado direito da equação.

A aplicação rigorosa das condições de contorno leva à equação característica que descreve os modos de propagação no interior do filme magnético. Esta equação relaciona os parâmetros geométricos, os vetores de onda e as propriedades do material:

$$q^2 - (1 + \kappa)^2 k_x^2 - \kappa^2 k_y^2 + 2(1 + \kappa)qk_x \cot(k_x t) = 0 \quad (19)$$

onde o termo  $q = \sqrt{k_y^2 + k_z^2}$  representa a componente do vetor de onda na direção paralela ao plano do filme. Esta equação é fundamental para determinar os modos permitidos no sistema, considerando as restrições impostas pelas condições de contorno.

### 3. Solução para Modos de Superfície

Considerando o caso particular em que  $k_z = 0$ , correspondente à propagação puramente superficial (sem variação na direção perpendicular ao plano do filme), obtemos uma solução específica para os modos de superfície. Neste regime, a relação de dispersão, conhecida como **dispersão de Damon-Eshbach**, assume a forma:

$$\omega^2 = \gamma^2 [H_0(H_0 + 4\pi M_0) + (2\pi M_0)^2 (1 - e^{-2|k_y|t})] \quad (20)$$

Esta expressão descreve a dependência da frequência  $\omega$  em função do campo externo  $H_0$ , da magnetização  $M_0$  e do vetor de onda  $k_y$  associado à propagação ao longo da superfície do filme. O termo exponencial reflete o confinamento do modo na interface, sendo característico dos modos de superfície.

A equação de dispersão dos modos de Damon-Eshbach não possui relevância apenas no estudo clássico dos modos magnéticos de superfície, mas também apresenta grande importância no desenvolvimento de sistemas microeletromecânicos quânticos (QMEMS). Esses modos representam excitações coletivas de spin, conhecidas como magnons, que podem ser utilizados como portadores de informação em dispositivos quânticos.

No contexto dos QMEMS, a compreensão da relação de dispersão dos modos magnônicos permite o projeto de sistemas híbridos, nos quais existe acoplamento entre excitações magnônicas e ressonadores mecânicos, sistemas ópticos ou dispositivos eletrônicos. Esse acoplamento é fundamental para o desenvolvimento de transdutores quânticos, sensores de altíssima sensibilidade, dispositivos de armazenamento de informação quântica e tecnologias emergentes baseadas em informação de spin.

O termo  $(1 - e^{-2|k_y|t})$  presente na equação de Damon-Eshbach descreve o caráter de confinamento dos modos magnônicos. Quando esse termo se aproxima de 1, o modo é fortemente superficial, com a energia magnética concentrada nas interfaces do filme. Isso é extremamente vantajoso para o desenvolvimento de QMEMS, pois o confinamento de energia próximo à superfície favorece o acoplamento eficiente entre os modos magnônicos e outros sistemas quânticos, como cavidades ópticas e modos vibracionais mecânicos. Por outro lado, quando esse termo se aproxima de zero, como no caso de filmes extremamente finos, o modo se distribui de forma mais uniforme no volume, o que altera as características de acoplamento e armazenamento de energia no dispositivo.

Além disso, a equação evidencia que a frequência dos modos depende não apenas do campo externo aplicado ( $H_0$ ) e da magnetização do material ( $M_0$ ), mas também da geometria do sistema, especialmente da espessura do filme ( $t$ ) e do vetor de onda ( $k_y$ ) associado à propagação superficial. Essa dependência geométrica permite um controle fino sobre as propriedades dos modos magnônicos, viabilizando o desenvolvimento de QMEMS altamente customizados para aplicações específicas no domínio quântico.

A compreensão detalhada da relação de dispersão de Damon-Eshbach não só contribui para o entendimento dos fenômenos magnéticos em nanoestruturas, como também é essencial

para o projeto e a otimização de sistemas microeletromecânicos quânticos. Esses dispositivos representam uma fronteira tecnológica que combina elementos magnéticos, mecânicos e quânticos, oferecendo soluções inovadoras para computação, sensoriamento e comunicação quântica.

### 3.3 Aplicações dos MEMS quânticos

Os QMEMS operam a partir da manipulação controlada de graus de liberdade mecânicos que podem ser acoplados a sistemas quânticos, tais como qubits supercondutores, cavidades ópticas, modos de campo eletromagnético ou até mesmo estados quânticos de luz (SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021; EZAWA et al., 2023). Por exemplo, um ressonador mecânico, quando adequadamente isolado e resfriado a temperaturas próximas ao zero absoluto, pode ser levado ao seu estado fundamental de vibração, no qual os efeitos quânticos são dominantes. A partir desse ponto, torna-se possível explorar a interação desse ressonador com outros sistemas quânticos, viabilizando operações como armazenamento, processamento e transdução de informação quântica entre diferentes domínios físicos — óptico, elétrico e mecânico (EZAWA et al., 2023).

Uma das características mais notáveis dos QMEMS é sua capacidade de atuar como transdutores quânticos. Esses dispositivos desempenham um papel crucial na interconexão de diferentes plataformas tecnológicas dentro do ecossistema da computação e da comunicação quântica (SŁOWIK et al., 2016; EZAWA et al., 2023). A conversão eficiente de estados quânticos entre fótons, elétrons e fônons é fundamental para viabilizar redes quânticas distribuídas, computadores quânticos híbridos e sistemas de comunicação absolutamente seguros, baseados em princípios como a distribuição quântica de chaves (QKD — Quantum Key Distribution).

Além do papel essencial como transdutores, os QMEMS são protagonistas no desenvolvimento de sensores quânticos de altíssima precisão. Sensores baseados em princípios quânticos possuem uma capacidade de detecção que ultrapassa os limites estabelecidos pela física clássica, chegando a detectar variações extremamente sutis de grandezas físicas como força, aceleração, campos magnéticos, campos elétricos, pressão e até mesmo variações no campo gravitacional (WEI et al., 2021; EZAWA et al., 2023). Esse nível de sensibilidade é particularmente relevante em aplicações de fronteira, como geofísica, exploração espacial, monitoramento biomédico em escala molecular, detecção de ondas gravitacionais e sistemas de navegação inercial sem necessidade de GPS.

Do ponto de vista científico, os QMEMS também se estabelecem como plataformas experimentais fundamentais para investigar os limites da mecânica quântica aplicada a sistemas macroscópicos. Eles possibilitam o estudo da coerência quântica, da decoerência e dos mecanismos de transição entre os regimes clássico e quântico em sistemas mesoscópicos (SŁOWIK et al., 2016; EZAWA et al., 2023). Esse tipo de pesquisa não apenas contribui para o avanço da física fundamental, mas também fornece subsídios tecnológicos essenciais para tornar a computação quântica mais robusta, escalável e confiável.

Outro aspecto de grande importância é que os QMEMS oferecem uma solução prática para superar alguns dos maiores desafios enfrentados pelas tecnologias quânticas contemporâneas, tais como a integração em larga escala, a estabilidade operacional e a interconectividade entre diferentes tipos de qubits. Ao incorporar componentes mecânicos que podem ser facilmente integrados com circuitos eletrônicos e ópticos, os QMEMS se destacam pela compatibilidade com processos de fabricação consolidados na indústria de semicondutores, o que facilita sua escalabilidade e viabiliza sua produção em volumes industriais (EZAWA et al., 2023).

Em termos aplicados, os QMEMS encontram espaço não apenas em laboratórios de pesquisa, mas também em setores estratégicos como defesa, telecomunicações, saúde e indústria aeroespacial (WEI et al., 2021; EZAWA et al., 2023). Por exemplo, sensores quânticos baseados em QMEMS podem ser utilizados para a detecção de anomalias geológicas com precisão sem precedentes, para o monitoramento de parâmetros biomédicos em nível molecular, ou ainda para a navegação autônoma de veículos em ambientes onde os sistemas convencionais de geolocalização não são viáveis.

Portanto, os sistemas microeletromecânicos quânticos representam uma convergência extraordinária entre a engenharia de micro e nanodispositivos e os fundamentos da mecânica quântica. Sua importância transcende as fronteiras da física aplicada, posicionando-se como uma das bases tecnológicas mais promissoras da chamada segunda revolução quântica (SŁOWIK et al., 2016; EZAWA et al., 2023). A expectativa é que, nos próximos anos, os QMEMS desempenhem um papel central no desenvolvimento de tecnologias quânticas robustas, escaláveis e acessíveis, capazes de transformar profundamente setores como computação, sensoriamento, comunicação e processamento de informação, impactando diretamente a sociedade e a indústria em nível global.

### 3.3.1 QMEMS em sistemas de defesa

No setor de defesa, os QMEMS são amplamente empregados na construção de sensores inerciais quânticos, giroscópios e acelerômetros de altíssima precisão, utilizados em sistemas de navegação autônoma para submarinos, aeronaves, mísseis e veículos não tripulados (WEI et al., 2021; EZAWA et al., 2023). Esses dispositivos são fundamentais para garantir operações em ambientes onde não há disponibilidade de GPS, oferecendo resistência a interferências, bloqueios e ataques cibernéticos. Além disso, sensores magnômicos e gravimétricos baseados em QMEMS são utilizados para detecção de movimentos subterrâneos, variações anômalas de campos gravitacionais e magnéticos, além da identificação de objetos ocultos, contribuindo para operações de vigilância, reconhecimento, mapeamento geológico e segurança de fronteiras (SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021).

Na Figura 22, observa-se a microestrutura de um giroscópio MEMS em chip, com geometria octogonal e eletrodos interdigitados visíveis, evidenciando o uso de estrutura vibratória tridimensional para medições de rotação e aceleração. (Fonte: Adaptado de “Gyroscopes and Accelerometers on a Chip”, Geek Mom Projects, 2013.)

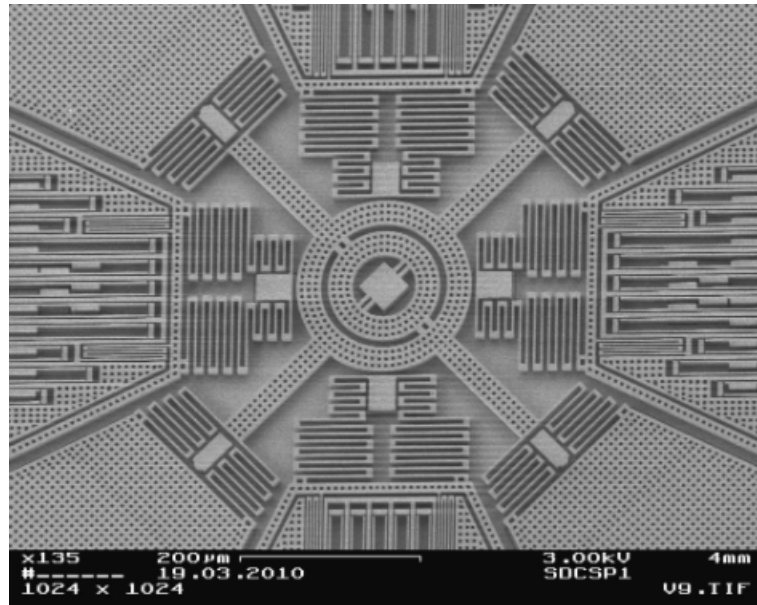


Figura 22 – Microscópio eletrônico de um giroscópio MEMS em chip, com estrutura vibratória tridimensional para medições de rotação e aceleração.

A imagem acima mostra a microestrutura de um giroscópio MEMS tradicional, onde componentes vibratórios suspensos dentro de um chip detectam rotações por meio do efeito Coriolis. Essa arquitetura é a base dos sistemas de navegação inercial clássicos.

Quando essa estrutura é integrada a uma unidade de navegação quântica, ela se torna um protótipo de QMEMS:

- **Miniaturização quântica:** ao incorporar ressonadores mecanicamente resfriados até seu estado fundamental (Efeito de quantização), o giroscópio passa a operar em regime quântico.
- **Precisão e estabilidade superior:** técnicas de interferometria atômica (por exemplo, usando nuvens ultrafrias de Rb ou Cs em grades MEMS) permitem medições de rotação e aceleração com precisão ordens de magnitude superiores à dos dispositivos clássicos.
- **Imunidade a ataques e interferências:** tecnologias quânticas evitam drift, ruído ou spoofing do sistema, garantindo navegação precisa em ambientes militares sem acesso a GPS.

### 3.3.2 QMEMS em sistemas de telecomunicação

Na área de telecomunicações, os QMEMS são peças essenciais na construção de transdutores quânticos, moduladores, filtros de alta precisão e repetidores quânticos (SŁOWIK et al., 2016; EZAWA et al., 2023). Esses dispositivos desempenham papel fundamental na viabilização de redes de comunicação quântica, permitindo a conversão eficiente de informações quânticas entre diferentes domínios físicos, como sinais ópticos, elétricos e mecânicos. Tal funcionalidade é indispensável para a construção de redes seguras baseadas em protocolos de criptografia quântica, como a distribuição quântica de chaves (QKD). Além disso, ressonadores mecânicos quânticos são utilizados como elementos de estabilização de frequência, filtros ultra precisos e fontes de referência temporal, fundamentais para o sincronismo de redes de alta velocidade (WEI et al., 2021).

Na Figura 23, observa-se um filtro MEMS híbrido fabricado para uma aplicação de redes ópticas de alta velocidade, apresentando uma matriz de micro-resonadores integrados em um substrato de circuito impresso, destacando a aplicação de componentes MEMS na filtragem sintonizável de frequência. (Fonte: Adaptado de Anming Gao et al., “AlN MEMS filters with extremely high bandwidth widening capability”, *Microsystems e Nanoengineering*, volume 6, artigo 74, 2020.)

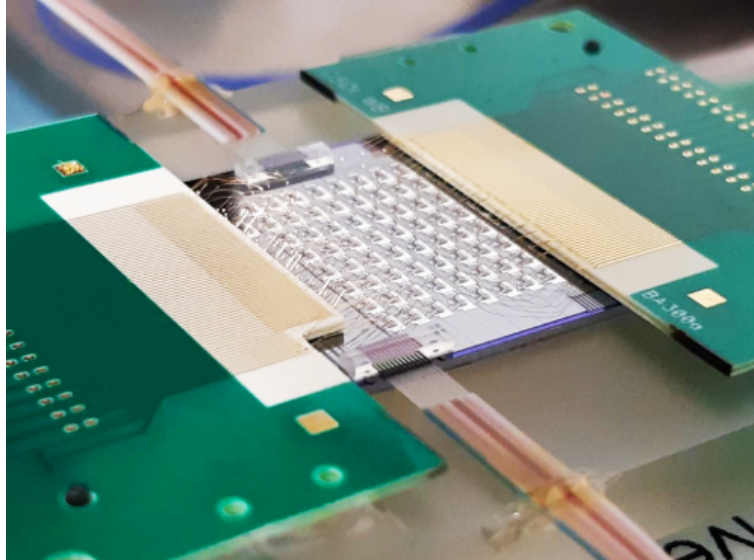


Figura 23 – MEMS Fotônicos para Routers

Dispositivos como este desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de redes de comunicação quântica. Sua principal função está relacionada ao controle de caminhos ópticos, chaveamento de sinais e ajuste dinâmico de comprimentos de onda, que são essenciais para viabilizar a comunicação segura baseada em protocolos quânticos, como a distribuição quântica de chaves (QKD).

### 3.3.3 QMEMS em sistemas de saúde

Na área da saúde, os QMEMS são empregados no desenvolvimento de sensores biomédicos quânticos de altíssima sensibilidade, capazes de realizar detecção de biomarcadores em nível molecular, permitindo diagnósticos precoces e precisos de doenças como câncer, Alzheimer, Parkinson e outras patologias neurodegenerativas (WEI et al., 2021; EZAWA et al., 2023). Esses sensores são aplicados em dispositivos de imageamento biomagnético, como magnetoencefalografia (MEG) e magnetocardiografia (MCG), que permitem o mapeamento não invasivo da atividade neural e cardíaca com resolução sem precedentes. Além disso, atuadores e microresonadores quânticos são empregados no desenvolvimento de dispositivos de manipulação celular, nanotecnologia aplicada à engenharia de tecidos e controle de sistemas biológicos em nível molecular.

Na Figura 24, observa-se um chip microfluídico dentro de um invólucro transparente, demonstrando a capacidade de integrar micromecanismos e microcanais em um sistema selado para manipulação precisa de fluidos ou partículas em aplicações como biossensores ou ensaios em microescala. (Fonte: Adaptado de LioniX International, “Optofluidic MEMS platform”, 2020.)

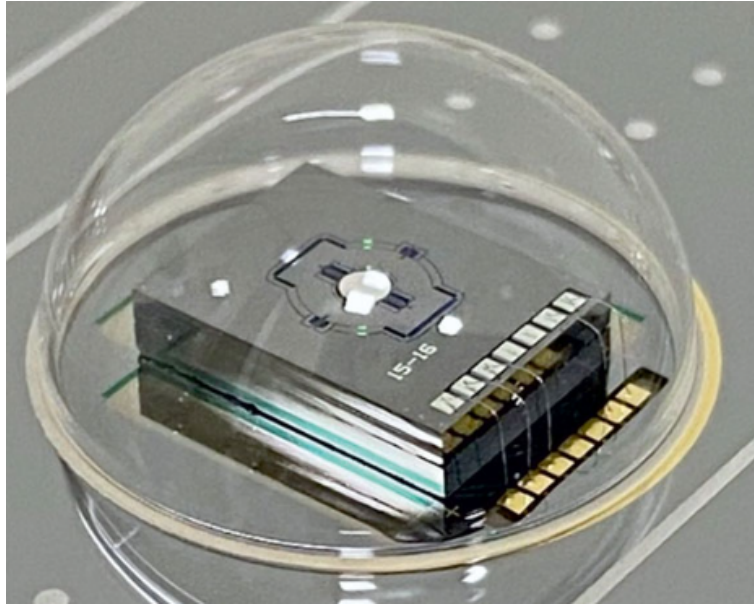


Figura 24 – HOMMEMS aplicado em sensores biomédicos para medições ultra precisas de deslocamentos e deformações.

O dispositivo ilustrado na imagem representa uma estrutura HOMMEMS (Hong-Ou-Mandel Microelectromechanical System), uma configuração que integra elementos mecânicos microfabricados com técnicas de interferometria quântica, especificamente baseadas no efeito de Hong-Ou-Mandel (SŁOWIK et al., 2016; EZAWA et al., 2023). Esse tipo de arquitetura permite realizar medições de deslocamentos, variações de pressão e deformações com precisão na ordem de subnanômetros, sendo, portanto, altamente sensível a interações em nível molecular ou até mesmo atômico.

No contexto QMEMS, dispositivos como esse são de extrema relevância, uma vez que operam no limite entre a mecânica clássica e a quântica, incorporando diretamente princípios de interferência e coerência quântica em sua operação. A utilização de interferometria quântica acoplada a estruturas mecânicas miniaturizadas permite a construção de sensores biomédicos quânticos, capazes de detectar variações mínimas em tecidos biológicos, movimentos celulares e alterações moleculares, com sensibilidade muito superior aos sensores baseados em física clássica.

Além disso, a arquitetura HOMMEMS ilustra como os QMEMS transcendem as limitações tradicionais dos MEMS, permitindo não apenas medições mais precisas, mas também a integração de sensores e atuadores em plataformas quânticas híbridas. Esses dispositivos são fundamentais para o desenvolvimento de tecnologias biomédicas de nova geração, como sistemas de imageamento biomagnético, detecção precoce de doenças, monitoramento de processos bioquímicos em tempo real e até mesmo na engenharia de tecidos e manipulação celular com resolução quântica.

### 3.3.4 QMEMS em sistemas de indústria aeroespacial

Na indústria aeroespacial, os QMEMS são fundamentais na construção de sistemas de navegação inercial de altíssima precisão, relógios atômicos baseados em ressonadores mecânicos quânticos e sensores gravitacionais ultra sensíveis (WEI et al., 2021; EZAWA et al., 2023). Esses dispositivos são empregados em satélites, sondas espaciais, veículos lançadores e missões de

exploração planetária, onde a necessidade de precisão e confiabilidade é extrema. Sensores gravimétricos baseados em QMEMS são utilizados para mapeamento detalhado da gravidade de corpos celestes, monitoramento de mudanças geofísicas e detecção de anomalias na estrutura interna de planetas e luas (SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021). Além disso, transdutores quânticos são empregados na construção de sistemas de comunicação ultra seguros para missões espaciais, viabilizando a troca de informações entre satélites e bases terrestres com proteção contra interceptações (EZAWA et al., 2023).

Na Figura 25, observa-se um dispositivo MEMS de navegação inercial, com estrutura em pacote metálico que integra giroscópio e acelerômetro, destacando sua robustez e miniaturização para aplicações aeroespaciais e militares de alta precisão. (Fonte: Adaptado de Silicon Sensing / UST, “Silicon Sensing Presents Smallest MEMS Gyro at IEEE Inertial 2023”, 2023.)



Figura 25 – Dispositivos de navegação inercial para aplicações aeroespaciais e militares.

A imagem apresenta um dispositivo do tipo MEMS, mais especificamente um giroscópio ou acelerômetro de alta precisão, amplamente utilizado em aplicações aeroespaciais, militares, de navegação e, potencialmente, em desenvolvimentos de QMEMS. O componente visível é um microchip encapsulado, no qual se observa claramente uma estrutura central suspensa, conectada por finos filamentos metálicos que atuam como elementos de interconexão elétrica e mecânica. A peça circular no centro corresponde ao ressonador mecânico, que pode oscilar ou vibrar em resposta a forças externas ou acelerações. Esse tipo de estrutura permite medir parâmetros como movimento angular, aceleração, vibração e orientação espacial.

No contexto dos QMEMS, dispositivos como este são a base para o desenvolvimento de sensores quânticos avançados. Quando operados em condições extremas, como temperaturas criogênicas, e combinados com técnicas de controle quântico, esses ressonadores podem entrar em regimes onde a quantização da energia mecânica se torna observável, possibilitando aplicações em navegação quântica, transdutores quânticos e sensores de altíssima precisão.

Os QMEMS são responsáveis pela construção de peças críticas como sensores inerciais quânticos, acelerômetros, giroscópios, ressonadores mecânicos quânticos, transdutores quânticos,

filtros de frequência ultra precisos, sensores biomagnéticos, relógios atômicos miniaturizados e detectores gravitacionais. Cada um desses dispositivos desempenha funções indispensáveis para garantir a precisão, a segurança, a eficiência e a robustez operacional nos setores de defesa, telecomunicações, saúde e indústria aeroespacial, consolidando os QMEMS como uma tecnologia transversal e de caráter estratégico para a ciência e a engenharia contemporânea.

### 3.4 Perspectivas inovadoras para produzir MEMS quânticos

O desenvolvimento de sistemas microeletromecânicos quânticos (QMEMS) demanda uma abordagem altamente criteriosa na escolha dos materiais e processos de fabricação, uma vez que a operação em regime quântico impõe requisitos rigorosos quanto à estabilidade estrutural, controle dimensional, propriedades elétricas e compatibilidade com ambientes de ultra baixo ruído e, em muitos casos, temperaturas criogênicas (SŁOWIK et al., 2016; WEI et al., 2021; EZAWA et al., 2023). Nesse contexto, a combinação de substratos de duróid e silício, associada ao processo de eletrodeposição de filmes finos, tem se consolidado como uma solução altamente versátil e tecnicamente eficiente para a fabricação de dispositivos microestruturados destinados a aplicações quânticas (SWAIN et al., 2022).

O duróid é um material laminado industrial, composto por papel kraft ou tecido impregnado com resina fenólica, amplamente utilizado na fabricação de placas de circuito impresso (PCI) devido às suas excelentes propriedades dielétricas, resistência térmica moderada (até cerca de 130 °C), baixo custo e facilidade de usinagem (FLANNERY et al., 1997). Suas propriedades mecânicas proporcionam alta rigidez relativa, baixa densidade e estabilidade dimensional suficiente para suportar processos de fabricação em microescala, especialmente quando são utilizados em componentes estruturais, suportes ou frames. No entanto, o duróid apresenta limitações quanto à sua resistência à umidade, à fadiga térmica e à resistência química quando comparado a materiais semicondutores como o silício, o que restringe seu uso a aplicações específicas dentro do sistema QMEMS, geralmente como elementos de suporte ou de encapsulamento.

Por outro lado, o silício permanece o material dominante na indústria de microfabricação, não apenas pela sua abundância e baixo custo relativo, mas também por suas propriedades físico-químicas excepcionais. Com módulo de elasticidade elevado (130–185 GPa, dependendo da orientação cristalina), alta resistência à fratura e coeficiente de expansão térmica bem caracterizado, o silício permite a fabricação de microestruturas mecânicas altamente precisas, como ressonadores, pontes, cantilevers e cavidades optomecânicas (MALUF; WILLIAMS, 2004; DE LOS SANTOS, 2002). Além disso, sua compatibilidade com processos CMOS permite a integração direta com circuitos eletrônicos, fotônicos e ópticos, característica fundamental na construção de QMEMS híbridos (WEI et al., 2021).

A eletrodeposição de filmes finos sobre esses substratos desempenha um papel central na funcionalização dos dispositivos microeletromecânicos. Trata-se de um processo eletroquímico onde uma corrente elétrica induz a redução de íons metálicos ou de compostos presentes em uma solução eletrolítica, promovendo a deposição controlada de materiais como níquel, cobre, ouro, platina, óxidos metálicos (como  $MnO_2$ , NiO, ZnO) ou polímeros condutores (como polianilina ou PEDOT:PSS) (SWAIN et al., 2022). Este método se destaca por sua capacidade de produzir filmes com elevada pureza, baixa rugosidade, excelente aderência e controle preciso da espessura, com taxas de deposição que podem ser ajustadas por parâmetros como densidade de corrente, pH, temperatura e agitação da solução.

A preparação dos substratos de duróid para eletrodeposição exige etapas adicionais, uma vez que se trata de um material isolante. Inicialmente, a superfície do duróid é submetida a processos de limpeza química e ativação superficial, seguidos pela aplicação de uma camada condutora por métodos físicos (como sputtering ou evaporação térmica de cobre ou ouro) ou químicos (imersão em soluções autocatalíticas) (FLANNERY et al., 1997). Este recobrimento metálico inicial é indispensável, pois permite que o substrato atue como cátodo no processo eletroquímico subsequente. No caso do silício, quando não dopado ou quando protegido por óxido ( $\text{SiO}_2$ ), também se faz necessária uma etapa de metalização para viabilizar a condução elétrica (MALUF; WILLIAMS, 2004).

A combinação de filmes finos eletrodepositados com substratos de silício e duróid permite a fabricação de uma ampla gama de componentes essenciais para QMEMS, incluindo:

- **Ressonadores mecânicos:** estruturas que operam em regimes de ultra baixa perda, permitindo a observação de quantização de energia vibracional (fônons) e acoplamento com qubits supercondutores ou cavidades ópticas.
- **Eletrodos e interfaces condutoras:** essenciais para controle eletrostático, excitação piezoeétrica, detecção capacitiva e acoplamento eletromecânico.
- **Camadas funcionais:** filmes de materiais magnéticos, piezoeletricos ou piezorresistivos utilizados em sensores de campo magnético, pressão, aceleração ou temperatura, operando com sensibilidade quântica.
- **Espelhos e cavidades ópticas:** superfícies metalizadas com rugosidade inferior a nanômetros, aplicadas em dispositivos optomecânicos, lasers e moduladores quânticos.

Adicionalmente, a arquitetura híbrida composta por duróid e silício oferece vantagens significativas em termos de engenharia de dispositivos. O silício fornece a plataforma funcional, capaz de suportar integração eletrônica, óptica e mecânica, enquanto o duróid atua como suporte estrutural leve, dielétrico e economicamente viável, ideal para prototipagem, encapsulamento e suporte de estruturas microfabricadas.

No desenvolvimento de QMEMS, a eletrodeposição não apenas oferece uma rota de fabricação eficiente e de baixo custo, mas também permite a produção de filmes com morfologias e composições que seriam difíceis ou economicamente inviáveis de obter por técnicas físicas como PVD ou CVD. Isso inclui a deposição de filmes porosos, nanoestruturados ou multicamadas, que são cruciais para aplicações em detecção quântica, transdução de sinais e armazenamento de energia em microcapacitores.

Por fim, a utilização conjunta de substratos de duróid e silício, combinada com a flexibilidade do processo de eletrodeposição, representa uma solução inovadora, escalável e tecnologicamente madura para a produção de sistemas microeletromecânicos quânticos. Essa abordagem atende aos desafios contemporâneos da indústria de tecnologias quânticas, que demandam dispositivos cada vez menores, mais estáveis, energeticamente eficientes e capazes de operar em regimes de altíssima precisão e coerência quântica.

## 4 Conclusão

O presente trabalho proporcionou uma análise ampla, aprofundada e sistemática sobre os fundamentos dos sistemas microeletromecânicos (MEMS) e sua evolução para os sistemas microeletromecânicos quânticos (QMEMS), destacando suas características estruturais, processos de fabricação, aplicações e desafios tecnológicos contemporâneos.

Inicialmente, foi possível compreender que os MEMS representam uma tecnologia disruptiva e essencial para a modernização de dispositivos em escala micrométrica, ao integrar elementos mecânicos e eletrônicos em uma mesma plataforma. A capacidade desses sistemas de operar com alta precisão, baixo consumo energético, custo reduzido e elevada confiabilidade explica sua ampla difusão em setores como indústria automotiva, aeroespacial, biomédica, telecomunicações e defesa.

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, ficou evidente que, à medida que as escalas de fabricação atingem dimensões nanométricas, os limites impostos pela física clássica começam a ser superados pela introdução de fenômenos da mecânica quântica. Nesse contexto, os QMEMS emergem como uma plataforma tecnológica inovadora, capaz de operar em regimes onde efeitos como superposição, entrelaçamento e quantização de energia são fundamentais para o funcionamento dos dispositivos. Esses sistemas representam uma convergência extraordinária entre engenharia de microdispositivos, física quântica e ciência dos materiais.

Foi possível demonstrar que a eletrodeposição de filmes finos desempenha um papel central na fabricação de MEMS e QMEMS, por sua capacidade de produzir microestruturas de alta precisão, com controle rigoroso da espessura, morfologia e propriedades funcionais. A combinação de substratos como duróid e silício, associada a esse processo, permite não apenas a redução de custos e a escalabilidade dos dispositivos, como também a integração eficiente de elementos mecânicos, elétricos e quânticos.

A análise das aplicações dos QMEMS em setores estratégicos, como defesa, telecomunicações, saúde e indústria aeroespacial, evidencia seu potencial transformador. Na defesa, sensores quânticos e unidades de navegação inercial baseadas em QMEMS oferecem robustez operacional e resistência a interferências. Na telecomunicação, esses sistemas viabilizam redes quânticas, repetidores e transdutores de altíssima segurança. No setor biomédico, sensores de altíssima precisão, baseados em princípios quânticos, permitem diagnósticos moleculares, monitoramento fisiológico avançado e imageamento biomagnético em escalas até então inalcançáveis. Já na indústria aeroespacial, QMEMS são fundamentais para navegação autônoma, sensoriamento gravitacional e sistemas embarcados de ultra-alta precisão.

Conclui-se que os sistemas microeletromecânicos quânticos representam não apenas uma evolução natural dos MEMS, mas uma mudança de paradigma tecnológico, que inaugura uma nova era na engenharia, na ciência e na indústria. O domínio dessa tecnologia tem potencial para impactar profundamente campos como sensoriamento quântico, comunicação segura, computação quântica, navegação autônoma e metrologia de precisão, consolidando os QMEMS como uma das bases tecnológicas centrais da chamada segunda revolução quântica.

Diante desse panorama, este trabalho busca contribuir não apenas para a compreensão dos fundamentos teóricos e práticos dos QMEMS, mas também para fomentar o debate acadêmico e tecnológico sobre os desafios, as oportunidades e as transformações que essa tecnologia é capaz de promover nas próximas décadas.

## 5 Referências

### Referências

ADAMS, T. M.; LAYTON, R. A. MEMS Transducers—An Overview of How They Work. *Introdução aos MEMS*, v. 1, p. 167, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-09511-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-0-387-09511-0_7).

ALGAMILI, A. S.; KHIR, M. H. M.; DENNIS, J. O.; AHMED, A. Y.; ALABSI, S. S.; HASHWAN, S. S. B.; JUNAID, M. M. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices. *Nanoscale Research Letters*, v. 16, n. 1, 2021.

BEACH, W. F.; AUSTIN, T. M.; OLSON, R. Parylene Coatings. In: MINGES, M. L.; DOSTAL, C. A.; WOODS, M. S. (eds.). *Electronic Materials Handbook: Volume 1, Packaging*. Materials Park, OH: ASM International, 1989. p. 789–801.

BEEBY, S. P.; TUDOR, M. J.; WHITE, N. M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, v. 17, p. 175-195, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/17/12/R01>. Acesso em: 29 jun. 2025.

BRADLEY, P.; SORENSON, E.; LAURIA, D.; LIEW, L.-A. Characterizing MEMS switch reliability for cryogenic applications such as quantum computing. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Advances in Cryogenic Engineering*, Honolulu, HI, US, Jul. 2023. v. 1302, art. 012027, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1302/1/012027>.

BURRI, M. Calibration-Free Pressure Sensor System. Application Note AN1097, Motorola Sensor Device Data book, 1995.

CHAUDHARY, R.; KUMAR, D.; DAS, S.; PANT, B. D. Single Crystal Reactive Etching and Metallization (SCREAM). In: *Inovações e Pesquisas em Ciências Físico-Químicas — Um passo rumo à sustentabilidade*. International Science Community Association, 2017. p. 105–112.

DAMON, R. W.; ESHBACH, J. R. Magnetostatic Modes of a Ferromagnet Slab. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, v. 19, p. 308–320, 1961. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(61\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0022-3697(61)90041-5).

DE LOS SANTOS, Héctor J. RF MEMS circuit design for wireless communications. Norwood: Artech House, 2002.

DEC, A.; SUYAMA, K. Microwave MEMS-Based Voltage-Controlled Oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 48, n. 11, p. 1943–1949, Nov. 2000.

ERRANDO-HERRANZ, C. et al. MEMS for photonic integrated circuits. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, v. 26, n. 2, p. 1–16, mar.–abr. 2020. (Também disponível em arXiv:2212.05169).

EZAWA, M.; YASUNAGA, S.; HIGO, A.; IIZUKA, T.; MITA, Y. Universal quantum computation based on nanoelectromechanical systems. *Physical Review Research*, v. 5, art. 023130, maio 2023. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.5.023130>.

- FEYNMAN, Richard P. There's plenty of room at the bottom. In: GILBERT, Horace D. (Ed.). *Miniaturization*. New York: Reinhold Publishing, 1961. p. 282-296.
- FLANNERY, A. F. et al. PECVD Silicon Carbide for Micromachined Transducers. *Proc. 1997 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, Vol. 1, Chicago, IL, June 16–19, 1997, p. 217–220.
- GOLDSMITH, C. L. et al. Performance of Low-Loss RF MEMS Capacitive Switches. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, v. 8, n. 8, p. 269–271, Aug. 1998.
- GREINER, K. et al. Integrated RF MEMS for Single Chip Radio. In: *Proceedings of Transducers'01*, Munich, Germany, June 10–14, 2001.
- HO, Chih-Ming; TAI, Yu-Chong. Sistemas microeletro-mecânicos (MEMS) e fluxos de fluidos. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 30, p. 379-612, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.30.1.379>.
- HOLANDA, J. Teoria de Ondas de Spin Magnetostáticas (MSW): Um Aporte. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2021.
- HOIVIK, N. et al. Digitally Controllable Variable High-Q MEMS Capacitor for RF Applications. In: *2001 IEEE International Microwave Symposium Digest*, Phoenix, AZ, 2001.
- HWANG, J. S. Solder Technologies for Electronic Packaging. In: HARPER, C. A. (ed.). *Electronic Packaging Interconnection Handbook*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1997. p. 5.4–5.20.
- INFINEON TECHNOLOGIES. A new high-performance digital MEMS microphone. *All About Circuits*, [S.l.], [2023?]. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/news/a-new-high-performance-digital-mems-microphone-infineon/>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- KOTTUR, H. R.; KHAN, A.; VARSHNEY, N.; BISWAS, L. K. Enhancing the MEMS gyroscope physical assurance using quantum sensing. *2024 IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID)*, Aug. 2024. DOI: 10.1109/RAPID60772.2024.10647048.
- LAU, J. H. et al. *Electronic Packaging: Design, Materials, Process, and Reliability*. New York: McGraw-Hill, 1998. p. 111–193.
- MALCZWSKI, A. et al. X-Band RF MEMS Phase Shifters for Phased Array Applications. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, v. 9, n. 12, p. 517–519, Dec. 1999.
- MALUF, Nadim; WILLIAMS, Kirt. *An introduction to microelectromechanical systems engineering*. 2. ed. Norwood: Artech House, 2004.
- MONK, D. J. et al. Media Compatible Packaging and Environmental Testing of Barrier Coating Encapsulated Silicon Pressure Sensors. *Tech. Digest Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, June 3–6, 1996, p. 36–41.
- OVARTCHAIYAPONG, P. et al. High quality factor single-crystal diamond mechanical resonators. arXiv:1206.4363, 2012.
- PHYSICS. In: *ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 2025. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/physics>>.
- PILLANS, B. et al. Ka-Band RF MEMS Phase Shifters for Phased Array Applications. In: *2000*

IEEE International Microwave Symposium Digest, 2000.

POCKETLAB. How does a pressure sensor work? Physics probeware. The PocketLab Archive, [S.l.], [2023?]. Disponível em: <https://archive.thepocketlab.com/educators/lesson/how-does-pressure-sensor-work-physics-probeware>. Acesso em: 15 mar. 2025.

SCME — SOUTHWEST CENTER FOR MICROSYSTEMS EDUCATION. Histórico do MEMS: Guia do Participante do Conhecimento Primário. SCME, 2017. Documento: *AppIntroPK10PG*. Disponível em: <http://scme-nm.org>.

SERGEANT, J. E. The Hybrid Microelectronics Technology. In: HARPER, C. A. (ed.). Electronic Packaging Interconnection Handbook. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1997. p. 7.10–7.26.

SŁOWIK, O. S.; ORŁOWSKA, K.; KOPIEC, D.; JANUS, P.; GRABIEC, P.; GOTSZALK, T. Quantum mechanical aspects in the MEMS/NEMS technology. Measurement, Automation Monitoring, v. 62, n. 3, 2016.

SMITH, C. S. Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon. Physical Review, v. 94, n. 1, p. 42–49, 1954. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.42>.

STRING, K. M. Assembly Techniques and Packaging of VLSI Devices. In: SZE, S. M. (ed.). VLSI Technology. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1988. p. 566–611.

SUN, X. et al. Diamond MEMS: from classical to quantum. Quantum Engineering, 2023.

SWAIN, N.; SARAVANAKUMAR, B.; KUNDU, M.; SCHMIDT-MENDE, L.; RAMADOSS, A. A brief review on stretchable, compressible, and deformable supercapacitor for smart devices. Chemical Engineering Journal, v. 446, p. 136876, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136876>.

TANAKA, Y. Recent advancements in physical and chemical MEMS sensors. Analyst, v. 149, p. 3498–3512, jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4AN00182F>.

WEI, L.; KUAI, X.; BAO, Y.; WEI, J.; YANG, L.; SONG, P.; ZHANG, M.; YANG, F.; WANG, X. The recent progress of MEMS/NEMS resonators. Micromachines, v. 12, n. 6, p. 724, jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12060724>.

ZHU, J. et al. Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS. Micromachines, v. 11, n. 7, 2019.