

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações iniciais sobre MEMS

A microengenharia é a área da engenharia que abrange as tecnologias de construção de estruturas tridimensionais, tais como dispositivos ópticos, fluídicos e eletromecânicos miniaturizados de alto desempenho [1]. Esses dispositivos são, em geral, funcionalmente sofisticados e têm muitas vezes tecnologia de fabricação baseada na tecnologia de Circuitos Integrados ou IC – *Integrated Circuits*. A área mais conhecida da microengenharia é a microeletrônica.

Microsistemas são um conjunto de ferramentas de projeto e fabricação que com precisão compõem máquinas e formam estruturas e outros elementos numa escala mecânica abaixo da percepção visual humana – a microescala.

Nos últimos anos, do ponto de vista de sistemas, foram desenvolvidos sistemas pequenos, distribuídos e de baixo consumo baixa potência; Quando antes havia uma maior quantidade de sistemas grandes, centralizados e de alto consumo de potência, provavelmente pela falta da tecnologia necessária para desenvolvimento de sistemas mais eficientes. Do ponto de vista tecnológico, enfatiza-se sistemas integráveis e toleráveis, que permitem um grau mais alto de funcionalidade para Rádio Frequência (RF) por unidade de volume, ao mesmo tempo em que mantém um alto nível de desempenho [2].

Buscando uma maior capacidade de integração em Circuitos Integrados Monolíticos de Microondas ou MMIC - *Monolithic Microwave Integrated Circuits* e em Circuitos integrados para Rádio Frequência ou RFIC - *Radio Frequency Integrated*

*Circuits*, incorporou-se a tecnologia de Sistemas Microeletromecânicos ou MEMS - *MicroElectroMechanical Systems* no desenvolvimento desses sistemas [3]. MEMS são a integração de elementos mecânicos, sensores, atuadores e microeletrônica em um substrato comum através de técnicas de fabricação de circuitos integrados.

É importante a distinção entre componentes MEMS de componentes miniaturizados: MEMS são componentes miniaturizados que necessitam de atuadores eletromecânicos. Assim, nem todos os componentes miniaturizados são MEMS, pois nem todos componentes miniaturizados possuem atuadores [4].

Atuadores realizam a execução ou transmissão de movimentos, forças e trabalhos mecânicos para um equipamento ou sistema na sua vizinhança em resposta à aplicação de uma tensão ou corrente [5].

O principal atuador eletromecânico utilizado em dispositivos MEMS é o Eletrostático, pois um dos processos de fabricação de dispositivos MEMS mais utilizados, a microusinagem de superfície, do inglês *Surface Micromachining*, produz atuadores eletrostáticos com grande facilidade e é compatível com os processos de fabricação de circuitos integrados. Isso foi importante para motivar o desenvolvimento de microsistemas complexos que empregam atuação eletrostática. Além disso, MEMS com atuadores eletrostáticos são mais fáceis de projetar, respondem mais rapidamente a uma excitação e consomem pouca potência. Outros atuadores importantes para MEMS são o piezoelétrico, o magnetostático e o eletrotérmico.

Uma possível classificação da micro-tecnologia é a seguinte:

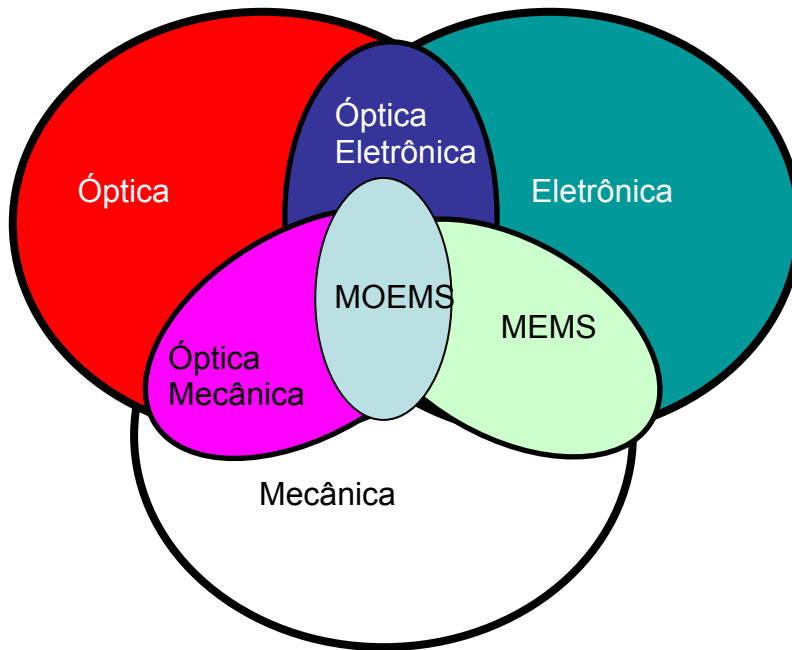


Figura 1.1 Classificação da micro-tecnologia

O processo de fabricação de MEMS utiliza-se de várias técnicas de fabricação de circuitos integrados e de alguns processos de fabricação específicos como *Bulk Micro-Machining*, processo no qual há corrosão profunda no substrato. As dimensões desses componentes e sistemas podem variar de micrometros a milímetros. MEMS podem detectar, controlar e atuar em microescala, funcionando individualmente ou em conjunto para a geração de efeitos em escala macroscópica.

A terminologia empregada para MEMS ainda não está padronizada. O termo MEMS é mais utilizado nos Estados Unidos. Na Europa é empregado o termo MST - *MicroSystems Technology* em lugar de MEMS. Já na Ásia, o termo *Micromachined Techonology*, Tecnologia de Microusinagem em português, é o mais difundido.

A falta de um produto ou uma família de produtos de alto volume de produção empregando MEMS e a existência de requisitos técnicos específicos para cada aplicação resultou no surgimento de múltiplos processos de fabricação e encapsulamento [6]. Além disso, o interesse atual da indústria ainda são processos seqüenciais que resultem em estruturas desejadas com precisão e manufaturáveis a um custo aceitável. Assim, o processo de fabricação envolve uma apropriada combinação de fatores técnicos, experiência na manufatura e visão de negócios.

## 1.2 Aplicações de MEMS e Mercado

A microengenharia não somente agrega valor aos produtos conhecidos, mas também permite o desenvolvimento de novos produtos e mercados. O fabricante irá justificar a escolha de uma tecnologia com base tanto no valor adicionado, como no aumento de produtividade e competitividade, o que resultará em vendas e lucros.

Fatores importantes neste contexto são:

- Uso de processos para integração microeletrônica, buscando aumento de desempenho e redução de custo. Ex. Fabricação de microestruturas no próprio chip para melhor dissipação de calor.
- Produção de sensores que aproveitam as características eletromecânicas do silício. Ex. Sensores de temperatura, pressão, aceleração e radiação.
- Produção de dispositivos mecânicos menores, mais leves, mais rápidos que seus dispositivos convencionais. Ex. Micromotores.
- Processos de fabricação em escala de componentes miniaturizados, a baixo custo.

MEMS têm encontrado aplicações em diversas áreas como, por exemplo, em:

- Sistemas automotivos:
  - Sensores inerciais de aceleração;
  - Sensores inerciais de colisão e *airbag*;
  - Sensores inerciais para controle de freios;
  - Sensores inerciais para controle da suspensão;
  - Sensores de pressão para o compressor do ar condicionado;
  - Sensores de pressão para o tanque de combustível;
  - Giroscópios;
- Sistemas Biomédicos:
  - Equipamentos para estímulo muscular e de órgãos;
  - Monitoramento da pressão sanguínea (como marca-passos);
  - Sensores biomédicos;

- Biochips para detecção de agentes químicos e biológicos nocivos;
- Aplicações militares:
  - Equipamentos para armazenamento de dados com baixo consumo de potência;
  - Processamento de sinais eletromecânicos para comunicação sem fio;
  - Componentes microoptoeletromecânicos, ou MOEMS - *MicroOptoElectroMechanical Systems*, integrados para identificar sistemas amigos ou inimigos;
  - Superfícies ativas e conformáveis para controle da aerodinâmica de aviões;
- Aplicações em escritórios:
  - Cabeças de impressão de impressoras jato de tinta [7];
- Aplicações ópticas
  - Chaves e redes de chaveamento ópticas;
  - Dispositivos com Microespelho Digital ou DMD - *Digital Micromirror Device*;
- Aplicações em RF
  - Antenas reconfiguráveis;
  - Filtros para telefonia móvel;
  - Ressonadores de Onda Acústica de Substrato ou BAW - *Bulk Acoustic Wave*;
  - Equipamentos de Teste Automatizado de RF
  - Defasadores.

A estrutura do mercado de RF MEMS é mostrada a seguir [8]:

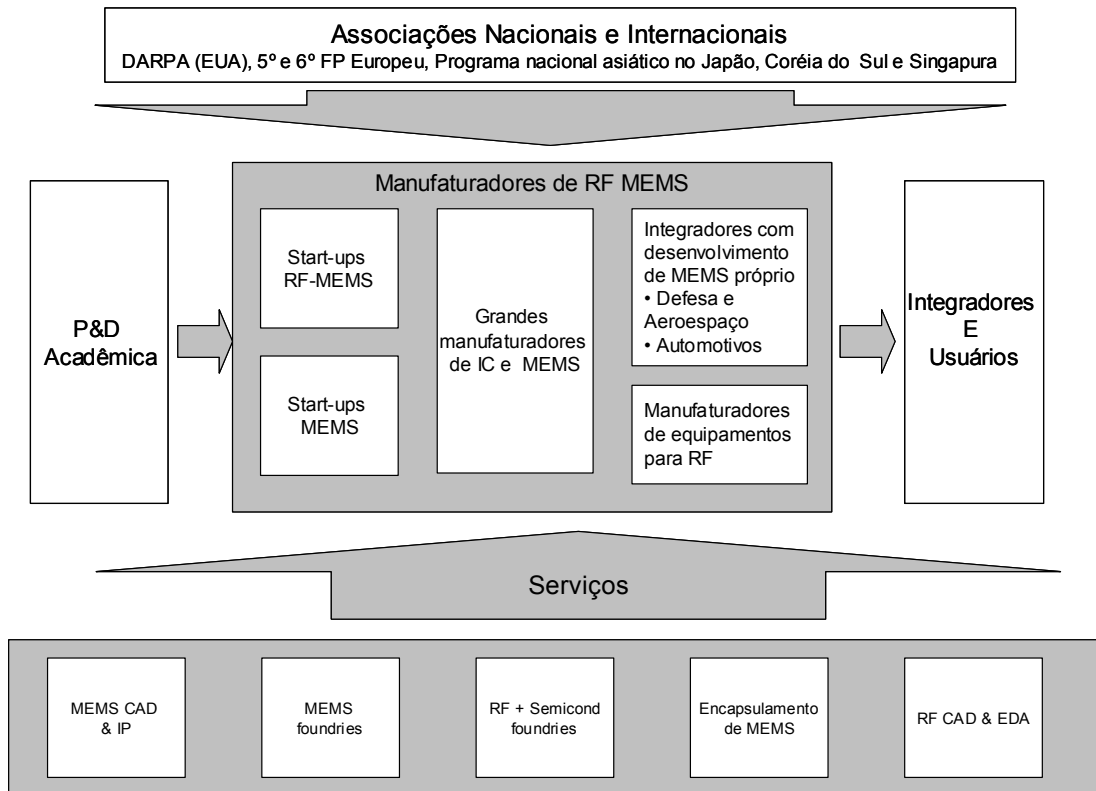


Figura 1.2 Estrutura do mercado de MEMS

As pequenas empresas *Start-up* realizam um papel essencial na comercialização de MEMS para RF, porque são elas, na maioria dos casos, as primeiras empresas a inserir novos produtos no mercado.

Em relação ao mercado de MEMS, segundo a WTC - *Wicht Technologie Consulting* [9], estima-se que ele será da ordem US\$ 25 bilhões, em 2009, muito à frente dos US\$ 12 bilhões verificados em 2004, o que representa um crescimento anual médio de 16% [9]. Essa evolução justifica plenamente a realização de maiores pesquisas em MEMS.

Especificamente para aplicações de MEMS em RF, as projeções da mesma consultoria para o faturamento de MEMS RF por aplicações são apresentadas na Figura 1.3.

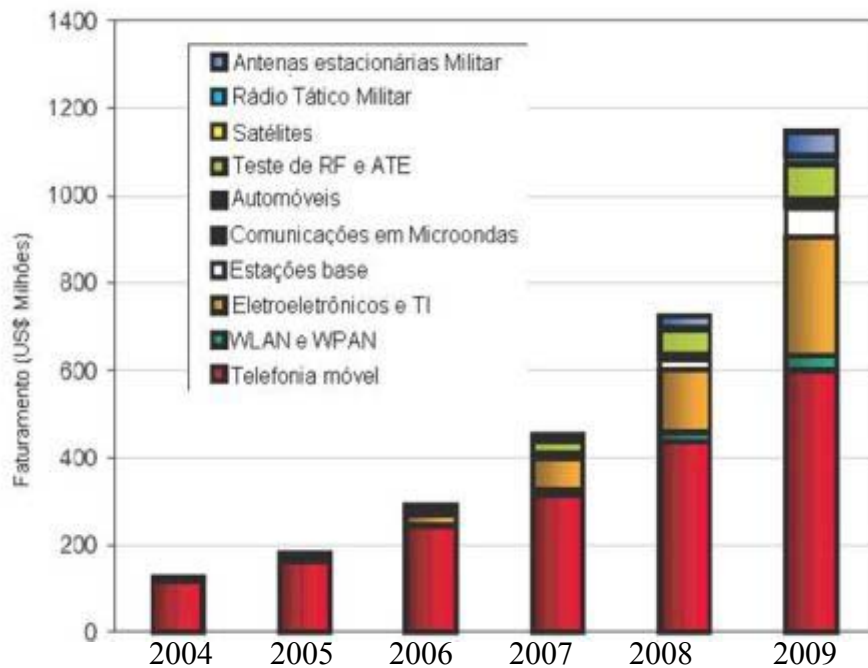


Figura 1.3 Perspectivas de faturamento para MEMS de RF por aplicação [9]

### 1.3 Fabricantes de MEMS

Apesar do primeiro artigo sobre MEMS de RF ter sido publicado em 1979, a indústria de MEMS de RF é ainda muito recente. O interesse da Agência de Projetos de pesquisa Avançada sobre Defesa dos Estados Unidos, a DARPA - *Defense Advanced Research Projects Agency*, em radares militares em meados da década de 90 incentivou a pesquisa e o desenvolvimento e, em 2001, a Agilent iniciou a comercialização do primeiro componente MEMS para RF com alto volume de produção; um filtro baseado Onda Acústica Volumétrica (BAW). Atualmente a Agilent domina o mercado dos dispositivos de Onda Acústica Volumétrica (BAW). A segunda empresa nesse mercado é a Infineon. Desde o final de 2005, diversas outras empresas cada vez mais estão próximas de comercializar BAW, incluindo a EPCOS e a Fujitsu. Vale a pena destacar outras duas empresas, a Skyworks e a Triquint, que recentemente adquiriram a tecnologia BAW da Agere e da TFR, respectivamente.

Em 2005, cerca de 60 empresas estavam desenvolvendo ou tinham desenvolvido componentes MEMS para RF e dezenas dessas empresas já entraram na fase de comercialização desses componentes.

Alguns fabricantes de MEMS são os seguintes:

- Advantest
- Akistica, Inc.
- Agere
- Agilent
- Applied MEMS, Inc.
- Coherix Corporation
- Conventor, Inc.
- EV Group US, Inc.
- Honeywell
- Fujitsu
- Infineon
- Intel Corporation
- JDS Uniphase Corporation
- Magfusion
- Matsushita
- MEMSCAP, Inc.
- MEMX
- MicroCHiPs
- Motorola
- Multitest Electronic System
- Philips
- Radant MEMS
- Raytheon (Texas Instrument)
- Rockwell
- Skywords
- Samsung América
- Teravicta
- TFR
- Triquint
- Verimetra, Inc.
- Xerox Corporation



- X-COM
- Wispry.

A curva de adoção de novas tecnologias, desenvolvida por analistas da empresa de consultoria Gartner e originalmente denominada *Hype Cycle*, está mostrada na Figura 1.4. Essa curva é a representação gráfica da adoção, maturidade e aplicações empresarias para um tecnologia específica e pode ser perfeitamente aplicada ao desenvolvimento de chaves MEMS. Essas chaves alcançaram o pico de visibilidade [10], também chamado “Pico de Expectativas Infladas”, conforme Figura 1.4, em 2003 quando os primeiros lotes de produção foram anunciados pela Magfusion e Teravicta.

Infelizmente, estas duas pequenas empresas *start-up* não conseguiram realizar um volume de produção suficiente para suprir a demanda que naquele momento se estabeleceu pelo mercado. Um grande número de usuários potenciais não recebeu seus lotes e ficaram frustrados. Além disso, os consumidores verificaram que o desempenho das chaves não correspondia às especificações da chave. Assim, as chaves passaram pelo “Vale de Desilusão”, indicado na Figura 1.4..

No final de 2005, a indústria e tecnologia de chaves MEMS já estavam mais maduras. As empresas *start-up* mudaram completamente suas equipes gerenciais e de vendas e adotaram estratégias de marketing mais realistas e modestas. Algumas empresas como a Wispry e a Teravicta conseguiram bons financiamentos governamentais; outras empresas como a X-COM e a Matsushita começaram a comercializar seus primeiros lotes e as primeiras aplicações comerciais implementadas com chaves MEMS, como por exemplo um sistema de teste automático desenvolvido pela Advantest, começaram a surgir no mercado. Além disso, o Departamento de Defesa Americano, DoD – *Department of Defense*, anunciou que a chave MEMS da Radant MEMS passou a marca de 200 bilhões de ciclos, minimizando questionamentos sobre a confiabilidade de chaves MEMS. Melhorias em técnicas de baixo custo para encapsulamento e integração com CMOS, *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*, foram anunciadas recentemente.

Após isso, foram anunciados aumentos de produção de chaves MEMS para

telefones celulares pela Philips e pela Wispry e incrementou-se a expectativa que, desta vez, muitas empresas atinjam um bom nível de produção em série, e que poderá fazer com que essas chaves entrem na última fase, o “Platô de Produtividade” da Figura 1.4., em pouco tempo.

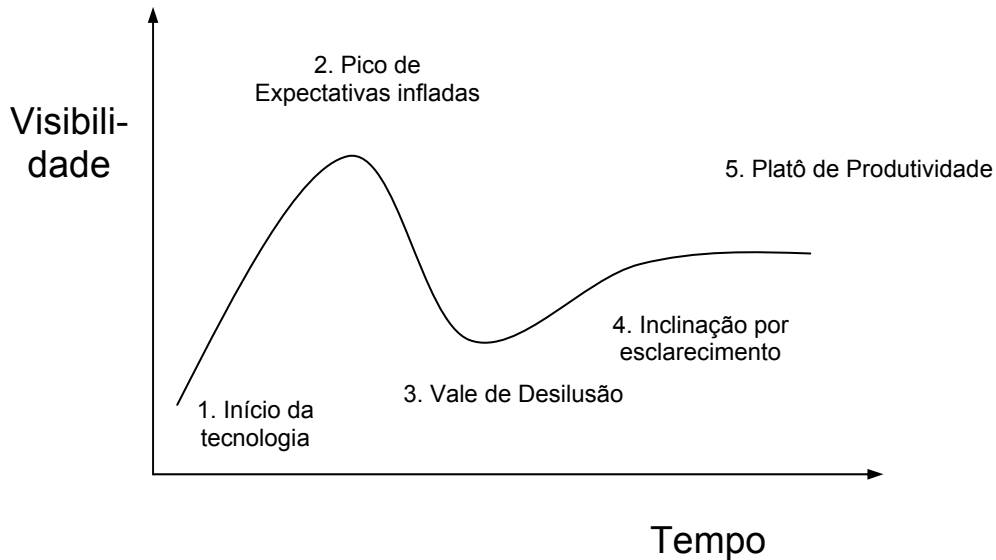


Figura 1.4 Curva de adoção de novas tecnologias (*Hype Cycle*)

## 1.4 Pesquisas em MEMS

As seguintes universidades têm importantes grupos de pesquisa em MEMS:

- University of Michigan;
- Georgia Institute of Technology;
- The University of Texas Arlington;
- University of Colorado of Boulder;
- University of New México;
- Carnegie Mellon University;
- University of Oslo;
- Imperial College London.

Na Europa existe inclusive uma rede de excelência em MEMS de RF denominada AMICOM (*The European Network of Excellence on RF MEMS and RF Microsystems*), que reúne pesquisadores de mais de 20 importantes universidades

européias.

No Brasil, existem as pesquisa no Departamento de Engenharia Mecânica e no Departamento de Engenharia Elétrica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, na Faculdade de Engenharia Elétrica e no Centro de Componentes Semicondutores da Unicamp, no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, entre outros órgãos de pesquisa.

As pesquisas sobre MEMS de RF não são custeadas de forma uniforme pelas principais fontes de recursos mundiais. Nos Estados Unidos, grande parte do financiamento é direcionado para desenvolvimentos com fins militares. O Departamento de Defesa Americano ou DoD financia o desenvolvimento de componentes MEMS de RF desde meados da década de 90. Até o início do ano 2000, o foco do DoD e da indústria estava no desenvolvimento de componentes como chaves, capacitores sintonizáveis para filtros sintonizáveis e deslocadores de fase. Atualmente, o foco está na melhoria da confiabilidade e das técnicas de encapsulamento para MEMS em RF como parte do programa de melhorias de MEMS para RF, que investiu mais de US\$ 25 milhões entre 2003 e 2005, e o programa HERMIT - *Harsh Environment Robust Micromechanical Technology* que investiu US\$ 21 milhões no mesmo período.

Na Europa e na Ásia, o volume de financiamento é menor. Na Europa, os financiamentos públicos começaram apenas em 1999 e os financiamentos para aplicações comerciais diretos ainda dominam. Isto ocorre devido a forte atuação das companhias de telefonia celular européias (como a Nokia, Siemens e Sony-Ericsson) e também ao importante papel representado pela Comissão Européia que enfoca o desenvolvimento para aplicações comerciais diretas. Aplicações espaciais também se beneficiam de financiamentos oriundos da Agência Espacial Européia.

Similarmente, o financiamento nos mercados asiáticos destina-se principalmente a aplicações comerciais diretamente. Entretanto, nesses países os programas de MEMS de RF incluem iniciativas tanto de Eletrônica como de Nanotecnologia. É interessante notar o alto nível de financiamento público na Coréia do Sul em programas de 5 anos objetivando aplicações em telefones

celulares. Os crescimentos rápidos e espetaculares da LG e da Samsung estão fortemente relacionados com esse investimento nacional público.

## 1.5 Organização da Dissertação

Nesta dissertação, os principais conceitos de MEMS, suas aplicações, processos de fabricação, componentes e sistemas são abordados. O objetivo desta dissertação é o estudo detalhado de chaves MEMS para aplicações em RF, que apresentam bom comportamento em altas frequências e com potencial de melhoria em sua banda de operação.

Em particular, aprofundou-se o estudo para o caso de uma chave MEMS de membrana capacitiva paralela sobre um guia de onda coplanar ou CPW – *Coplanar Waveguide*. O objetivo foi o de ampliar sua banda de operação, mantendo-se outras especificações inalteradas.

Partindo-se de uma chave com banda de operação nula para critérios de perda de retorno e isolamento mínimas iguais a 20 dB, com alteração na geometria da chave foi possível obter-se uma banda de 28 GHz e posteriormente ampliá-la para 31 GHz, praticamente sem alteração nas demais características elétricas.

A dissertação está dividida em seis capítulos, a saber:

- Capítulo 1: Introdução sobre MEMS, abordando suas principais aplicações, a situação do mercado atual, projeção para os próximos anos, fabricantes e universidades pesquisadoras e as fontes de financiamento da pesquisa sobre MEMS de RF.
- Capítulo 2: Apresentação de uma classificação de sistemas eletromecânicos, diferenciando MEMS, e apresentação de um histórico sobre MEMS, materiais utilizados para sua confecção e seus processos de fabricação mais comuns.

- Capítulo 3: Abordagem dos requisitos de sistemas de RF, componentes MEMS de RF e exemplos de sistemas com base na tecnologia MEMS, destacando suas vantagens em relação a sistemas que utilizem outra tecnologia.
- Capítulo 4: Abordagem específica sobre chaves MEMS, apresentando suas aplicações, suas vantagens e desvantagens frente a chaves de outras tecnologias, seus diferentes tipos de chaves e seus aspectos tanto mecânicos quanto elétricos. Além disso, ilustra diferentes chaves já construídas.
- Capítulo 5: Introdução sobre o software utilizado, discussão sobre a banda de operação de chaves paralelas e do conceito de isolamento e perda de retorno mínima. Posteriormente são apresentados resultados de simulações obtidos para chaves MEMS paralelas capacitivas sobre CPW que focaram no aumento da banda de uma chave encontrada na literatura, que inicialmente era nula, para um critério de 20 dB de perda de retorno e isolamento mínimas, e com otimizações da configuração geométrica da chave chegou a uma banda de 31 GHz.
- Capítulo 6: Relato de conclusões obtidas com o trabalho e indicação de perspectivas para futuros trabalhos.

## Capítulo 2

### MEMS

MEMS e NEMS têm sido objeto de muitos estudos e aplicações. Este capítulo, na seção 2.1, apresenta e discute uma classificação para sistemas eletromecânicos. A seção 2.2 apresenta um histórico de sistemas MEMS e NEMS. A seção 2.3 apresenta os materiais usados em MEMS e a seção 2.4 trata de métodos de fabricação de MEMS, detalhando esse processo para uma chave MEMS paralela.

#### 2.1 Classificação de Sistemas Eletromecânicos

Uma possível classificação de sistemas eletromecânicos [11] é a seguinte

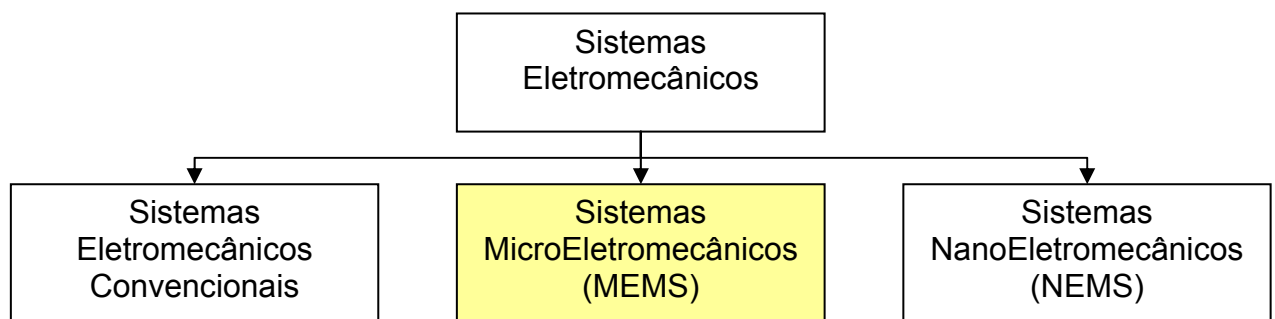


Figura 2.1 Classificação de sistemas eletromecânicos

MEMS são definidos como sistemas microeletromecânicos que envolvem uma ou mais micro-estruturas, que permitem a realização de um alto nível de integração resultando em componentes de funções múltiplas. Nesse processo, a relação custo-benefício de fabricação de componentes é otimizada com conseqüente redução de custos, inclusive de manutenção [6]. Por exemplo, é possível fabricar em um mesmo chip um micro-sensor, um micro-atuador e um dispositivo eletrônico.

Sistemas Nanoeletromecânicos ou NEMS - *Nanoelectromechanical Systems* são sistemas eletromecânicos, cujos componentes têm dimensões da ordem de  $10^{-10}$  m (tamanho de moléculas) a  $10^{-7}$  m.

A convergência de NEMS e MEMS é denominada NanoMEMS [12] e foi trouxe avanços na habilidade de fabricar dispositivos elétricos e mecânicos na escala de nanômetros.

As teorias fundamentais para o estudo de sistemas eletromecânicos convencionais e MEMS são a Mecânica clássica Newtoniana e o Eletromagnetismo. Já para os NEMS utiliza-se a teoria quântica e a Nanoeletromecânica para descrever suas características [13].

MEMS e NEMS integram diferentes estruturas de componentes e subsistemas, que podem agregar:

- Milhares de nós com sensores ou atuadores de alto desempenho e outras estruturas controladas por circuitos integrados ou antenas;
- Redes de comunicação de alto desempenho;
- Bancos de dados heterogêneos e distribuídos interconectados;
- Processadores de alto desempenho e multiprocessadores.

## 2.2 Histórico de MEMS

Parte da literatura atribui as primeiras origens de MEMS, a uma palestra, realizada em 26 de Dezembro de 1959 no Instituto de Tecnologia da Califórnia, na qual Richard Feynman sugeriu que, em um futuro não muito distante, os engenheiros poderiam utilizar átomos e posicioná-los como quisessem, desde que não fossem violadas as leis da natureza. Com isso, materiais com propriedades inteiramente novas, poderiam ser criados. Esta palestra, intitulada "*There's Plenty of Room at the Bottom*" (Há Muito Espaço lá Embaixo) é, hoje, tomada como o marco inicial da nanotecnologia. A idéia de Feynman é que não precisamos aceitar os materiais como a natureza nos provê como sendo os únicos possíveis no universo.

O termo nanotecnologia foi primeiramente utilizado por Norio Taniguchi em 1974 em seu artigo "*On the Basic Concept of Nanotechnology*" [13]. Nas décadas de 80 e 90 a nanoengenharia e nanofabricação foram popularizadas por Eric Drexler através do Foresight Institute.

Uma das primeiras aplicações de MEMS foi a fabricação de um transistor ressonante de efeito de campo, que consiste basicamente de uma alavanca de chapa metal suspensa sobre a região do canal. Esse transistor do tipo MOS foi projetado pela Westinghouse em 1967 [14]. O produto provou na época ser principalmente uma curiosidade técnica, mas sinalizou o começo do que seria uma tecnologia a ser encontrada em muitas aplicações. No início dos anos 70, os fabricantes usavam pastilhas de silício gravadas para produzir sensores de pressão.

Na década de 70, foi fabricada na IBM a primeira chave MEMS, uma chave de membrana capacitiva atuada eletrostaticamente e que foi desenvolvida por K. E. Petersen [15]. No começo dos anos 80 foram criados atuadores de poli-silício de superfície microestruturada que são usados nas cabeças de disco de impressoras. No final da década de 80, o potencial da tecnologia MEMS foi aproveitado e utilizado em projetos e implementações que estavam em andamento nas indústrias de produtos microeletrônicos e biomédicos.

Nos anos 90, a tecnologia MEMS teve grande atenção por parte do governo norte-americano, e agências de fomento relevantes deram suporte em larga escala para projetos envolvendo MEMS. Por exemplo, a Área de Pesquisa Científica da Força Aérea Americana ou AFOSR - *Air Force Office of Scientific Research* colaborou em pesquisas básicas sobre materiais, enquanto a Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa ou DARPA - *Defense Advanced Research Projects Agency* iniciou um serviço de *foundries* em 1993. Adicionalmente, o NIST - *National Institute of Standard and Technology* começou a patrocinar *foundries* comerciais para dispositivos MEMS e CMOS.

As pesquisas aplicadas em MEMS e NEMS foram afetadas drasticamente pelo surgimento da computação de alto desempenho, pois a análise, modelagem e simulação de MEMS e NEMS requerem a aplicação de teorias complexas que só



são exeqüíveis em computadores de alto poder de processamento, como por a simulação de desempenho de estruturas tridimensionais.

Larry Larson, do laboratório de pesquisa Huges em Malibu na Califórnia, desenvolveu a primeira chave MEMS especialmente projetada para freqüências de microondas em 1991, com apoio financeiro da DARPA [16]. Entretanto, como é comum em tecnologias novas, o projeto estava longe de sua maturidade, apresentava baixo rendimento do processo de fabricação e quase nenhuma confiabilidade. Mesmo assim, o projeto demonstrou um excelente desempenho até 50 GHz, muito melhor que o alcançável com dispositivos de GaAs da época.

Os resultados iniciais de Larson foram tão extraordinários que impulsionaram o interesse de diversos grupos no governo americano. Por volta de 1995, tanto o centro científico da Rockwell quanto a Texas Instrument desenvolveram chaves MEMS com desempenho sem precedentes. A chave da Rockwell era do tipo contato metálico, adequada para aplicação de DC a 4 GHz, enquanto que a chave da Texas Instrument era capacitiva e adequada para freqüência entre 5 e 20 GHz.

No final dos anos 90 e no início do século XXI, dispositivos MEMS estavam em escala considerável de produção em algumas regiões do mundo. Fabricantes comerciais de semicondutores dedicados à produção MEMS foram criados ou planejados por empresas como Bosch e Philips Semicondutores. O interesse do governo americano continuava, com significativo apoio à pesquisa através de agências de fomento como a DARPA.

Entretanto, foi somente nos últimos anos que surgiu a tendência de adotar sistemas microeletromecânicos em aplicações de RF e microondas [5], além de antenas e outros sistemas.

## 2.3 Materiais para confecção de MEMS

Assim como em circuitos integrados, o silício é um material extremamente utilizado para MEMS. Entretanto, muitos outros materiais como óxidos de silício, nitretos de silício, polímeros, metais, semicondutores compostos feitos de elemento dos grupos III e V também são empregados com esse propósito.

### 2.3.1. Escolha do Substrato

O silício é um dos poucos materiais em que a manufatura em substratos cristalinos únicos é viável economicamente. Ele foi muito estudado nas duas últimas décadas e uma enorme riqueza de informação foi acumulada sobre suas características elétricas, mecânicas e ópticas, as quais possibilitaram a exploração de novas áreas de aplicação a partir da manufatura de circuitos integrados.

Assim, no início das pesquisas em chaves MEMS, utilizava-se o silício como substrato, principalmente pelo seu uso extensivo na eletrônica. Com o desenvolvimento de algumas chaves, verificou-se algumas dificuldades técnicas nessas chaves tais como alta capacitância parasita DC, baixa tensão de ruptura e altas corrente de fuga.

A deposição de ouro para a realização de contatos metálicos produz uma região de aplicação de carga na área do silício em contato com o metal. Assim, cria-se uma capacitância parasita DC, que é comparável com a capacitância da chave, tornando medições DC mais difíceis. Adicionalmente, em algumas medições DC realizadas a polarização de chaves MEMS com substrato de silício ocorreu para tensões maiores que 60 V, e frequentemente induziram a ruptura do substrato com conseqüente destruição do dispositivo. Mesmo antes da ruptura, nas ocasiões em que foi possível medir, verificou-se uma corrente de fuga relativamente alta através do substrato.

Visando a solução dessas dificuldades, foram testadas amostras com camada de SiN e SiO<sub>2</sub> depositadas na parte superior do Silício. A tensão de ruptura foi

significativamente melhorada, mas a capacitância parasita não foi completamente eliminada. Safira ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silício de alta resistividade e vidro quando usados como substrato apresentam, por outro lado, características mais bem apropriadas como alta tensão de ruptura, inexistência de capacitância parasita e baixa corrente de fuga. Em comparação com a safira e o silício de alta resistividade, o substrato de vidro é disponível em grande quantidade com custo bastante baixo, sendo uma boa opção para fabricação de chaves MEMS.

Outros bons substratos, como demonstrado recentemente por [17], são os Polímeros de Cristal Líquido ou LCP – *Liquid Crystal Polymer*. Um LCP é um material cuja força mecânica, aderência ao cobre e via metalização/perfuração (*drilling*) foram otimizadas recentemente para seu uso em circuitos de microondas.

Um LCP é quase-hermético, tem boas propriedades elétricas ( $\xi_r \approx 2,9 - 3,0$ ,  $\tan \delta = 0,002 - 0,003$ ), é flexível, reciclável e tem excelente resistência química. Demonstrou-se que as perdas de chaves com substrato LCP são muito menores que as de chaves com substrato de silício, resultado em um melhor desempenho a baixo custo.

Os óxidos de Silício ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}$ , vidro de silício) são bastante usados por suas excelentes propriedades térmicas e elétricas como isolante. Esses materiais também são empregados como camadas nas sacrificiais na manufatura de MEMS, pois podem ser facilmente corroídos com ácido fluorídrico (HF).

Já o Arseneto de Gálio (GaAs) e compostos dos grupos III e V como o Fosfeto de Índio (InP) e o Nitreto de Gálio (GaN), além de serem materiais alternativos ao substrato de silício, são empregados em lasers e equipamentos ópticos.

### 2.3.2. Escolha do Filme Fino

Consideram-se filmes finos os que têm espessura entre alguns nanômetros a 100 micrômetros e a escolha de metais para esses filmes depende essencialmente da natureza da aplicação final. Para interconexões elétricas básicas, o alumínio (Al)

é o metal mais comum, mas sua utilização fica comprometida em ambientes corrosivos e para temperaturas acima de 300°C. Para temperaturas mais elevadas e ambientes agressivos, excelentes substitutos são o Ouro (Au), o Titânio (Ti) e o Tungstênio (W). Os nitretos de silícios ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) são amplamente empregados em filmes finos e são efetivos como barreiras contra a difusão de íons.

Um dos objetivos da fabricação de chaves MEMS, a serem vistos mais adiante, é a diminuição da tensão de acionamento (*pull-down*). Para isso deve-se escolher materiais de baixo estresse residual para a ponte metálica com condições de depósitos metálicos apropriados. Níquel (Ni) demonstrou ter um estresse residual alto. Titânio oxida rapidamente, podendo ter suas propriedades mecânicas e elétricas da chave. Além disso, a deposição de Titânio é instável e tende a gerar estresse residual no metal.

Já polímeros serão utilizados como fotoresiste ou filme dielétrico no processo de corrosão, sendo a espessura variável de alguns nanômetros a centenas de micra.

## **2.4 Processos de Fabricação de MEMS**

A microfabricação, praticada na microeletrônica e em algumas áreas de MEMS, é baseada em estruturas planares. Assim, a construção de dispositivos eletrônicos e de alguns componentes MEMS ocorre sobre substratos que estão sob a forma inicial de pastilhas planas.

Muitos dos processos de fabricação de MEMS são originados das tecnologias empregadas na indústria de circuitos integrados, aproveitando os imensos investimentos já anteriormente realizados no desenvolvimento de processos de fabricação de circuitos integrados. A diferença entre a tecnologia MEMS e a microusinagem convencional é que na primeira os processos de fabricação são paralelos e resultam em até dezenas de milhares de componentes idênticos simultaneamente, com dimensões da ordem de micra, enquanto que na segunda, os processos são em série e as dimensões são de pelo menos uma ordem de grandeza maior.

Entretanto a falta de um produto ou de uma família de produtos de alto volume de produção feitos com MEMS e requisitos técnicos específicos para cada aplicação resultaram no surgimento de múltiplos processos de fabricação e encapsulamento.

De uma forma genérica, as etapas de fabricação em Microeletrônica são:

- Deposição de filmes finos sobre um substrato;
- Realização de litografia;
- Gravação do material;

As tecnologias de deposição de filmes finos no caso para MEMS podem ser classificadas em 2 grupos:

1. Deposições por reações químicas:

- Deposição Química por Vapor ou CVD – *Chemical Vapor Deposition*
  - Forma-se um filme fino sólido e não volátil sobre o substrato por meio da reação química de bases no estado gasoso que contém os elementos do material a ser depositado. Pode ser dividida em CVD em pressão atmosférica ou APCVD – *Atmospheric Pressure CVD* e CVD em baixa pressão ou LPCVD – *Low Pressure CVD*.
  - As técnicas de LPCVD se destacam por produzirem filmes de silício policristalino com baixa tensão residual e são amplamente utilizados na fabricação de MEMS. Uma técnica de LPCVD é o CVD potenciado por plasma (PECVD), no qual é usado um sinal RF para criar um plasma na câmara de deposição. Este plasma transfere energia aos gases reagentes, catalisando a reação química de formação do filme e permitindo que substrato se mantenha com uma temperatura baixa.

- Eletrodeposição
  - É um processo no qual íons metálicos numa solução são depositados sobre o substrato. O controle do processo envolve a aplicação de uma corrente elétrica.
  
- Oxidação térmica
  - Este processo gera um estresse compressivo no filme de dióxido de silício, que ocorre por duas razões. Primeiramente, moléculas de dióxido de silício ocupam um volume maior em relação a moléculas de silício e há um descasamento entre os coeficientes térmicos de expansão do silício e do dióxido de silício. Como resultado, filmes de óxidos causam curvamento do substrato situado abaixo. Adicionalmente, membranas e alavancas suspensas feitas com óxido de silício tendem a se encarrucar devido à variação do estresse através da espessura do filme.

## 2. Deposições por reações físicas:

- Deposição Física por vapor ou PVD - *Physical Vapor Deposition*
  - Este processo cobre 2 grandes métodos: Evaporação, utilizada principalmente para metais, e Deposição Anódica, na qual átomos quimicamente inertes como Argônio são ionizados por uma descarga térmica.
  
- Evaporação
  - Coloca-se o material a ser depositado e o substrato em uma câmara de vácuo. Ao aquecer o material visando sua evaporação, ocorre a sublimação do mesmo sobre o substrato, originando o filme fino.

- Deposição Anódica ou *Sputter Deposition*
  - Forma-se um plasma entre material disposto do cátodo e o substrato disposto no anodo. Os íons formadores de plasma são acelerados em direção ao cátodo. Ao atingir o material a ser depositado, ocorre a liberação de átomos do material que se depositam sobre o substrato.

A Litografia é um processo fotográfico para impressão de imagens sobre uma superfície polimérica ou fotoresiste que é subseqüentemente utilizada como máscara de proteção contra a corrosão.

A técnica litográfica mais empregada na fabricação de MEMS é a fotolitografia. A evolução das técnicas de litografia foi uma das responsáveis pelo desenvolvimento da microfabricação, pois permitiu a geração de padrões em escala micrométrica. A Litografia envolve três passos seqüenciais

- Aplicação do fotoresiste que é uma camada de emulsão fotosensível;
- Exposição óptica para gravar uma imagem na máscara sobre o fotoresiste;
- Imersão em uma solução aquosa para dissolver o fotoresiste e gerar visivelmente a imagem latente.

Na corrosão, são removidos o filme fino e o substrato nas regiões não protegidas pela máscara de proteção. Estas etapas são repetidas até o acabamento da microestrutura [18]. As técnicas de gravação podem ser classificadas como úmidas ou secas e isotrópicas e anisotrópicas. Em corrosões úmidas, ocorre a imersão de uma lâmina em uma solução corrosiva (ácida ou básica). Sendo assim, as regiões não protegidas pelo fotoresiste são atacadas e o padrão do filme protetor é transferido para o filme que sofre o ataque. Já em corrosões secas, isso ocorre por meio da formação de partículas reativas dentro do plasma.

Uma corrosão anisotrópica se caracteriza pela existência de uma direção preferencial na qual a taxa de corrosão é maior. Já uma corrosão isotrópica forma uma cavidade circular. A corrosão de filmes finos de silício é relativamente mais fácil que a corrosão de silício maciço.

Exemplos de processos de gravação são:

- Corrosão por Íons Reativos ou *RIE – Reactive Ion Etching* é um tipo de corrosão seca e anisotrópica;
- Corrosão profunda por Íons Reativos ou *DRIE – Deep RIE*, é, um sub-tipo do *RIE* e também conhecido como *Bosch Process*;
- *Bulk micromachining*, Utiliza solventes alcalinos para dissolver o silício exposto anteriormente ao processo litográfico.

Existe também o processo de fabricação LIGA – do alemão *Lithographie, Galvanoformung, Abformung* no qual são utilizados moldes feitos por litografia profunda de raios-X para se construir microestruturas. As principais etapas do processo são a litografia, na qual é preparado o molde, eletroformação, na qual cresce um filme metálico sobre o fotoresiste e moldagem, na qual o padrão da microestrutura é transferido para outro material.

#### **2.4.1. Processo de fabricação de chave da literatura inicialmente empregada neste trabalho**

Uma chave MEMS paralela, desenvolvida pela Universidade de Michigan e descrita em [43], será utilizada inicialmente nesse trabalho. Esta chave foi implementada em um substrato de 400  $\mu\text{m}$  de silício de alta resistividade, de constante dielétrica  $\epsilon_r$  de 11,9 coberto com uma camada de 4000 Å de  $\text{SiO}_2$  usando um Guia de Onda Coplanar, em inglês *Coplanar Waveguide* (CPW). As linhas do CPW são obtidas usando um processo *liftoff* pela evaporação de uma camada de 300/8000 Å de Ti/Au. Após isso, uma camada de  $\text{Si}_x\text{Ni}_y$  de 1000-2000 Å é depositada por PECVD, Deposição química por vapor potencializada por plasma, e gravada.

Então, uma camada de sacrifício fina de 1,5-2  $\mu\text{m}$  de fotoresiste é depositada e gravada. A espessura dessa camada determina a altura nominal do gap da membrana. Uma camada semente (*seed*) de 300/1000/1000 Å de Cr/Au/Ti é evaporado, e então gravado para remover o topo da camada Ti, assim a membrana e o circuito metálico, excluindo a área abaixo e perto da membrana, pode ser



eletrodepositada com Au ao mesmo tempo. A espessura dos eletrodos é aproximadamente de 2-2,5  $\mu\text{m}$ . As camadas de sacrifício são removidas usando corrosivos de Ti, Cr e Au para remover as camadas semente e acetona para remover a camada resistiva.

Chaves com membrana de Au têm baixos estresses residuais compressivo, que diminui apenas suavemente a tensão de fechamento (*pull-down*) da chave, pois o estresse mecânico devido a constante da mola é muito maior que o estresse residual. Um material com pequeno estresse residual é preferido. A escolha do Au como material da membrana foi determinada pela viabilidade do processo.

## Capítulo 3

### MEMS para aplicações em RF

MEMS é uma tecnologia que estabelece novos paradigmas em circuitos e sistemas para RF e vem apresentando níveis de desempenho e economia sem precedentes. Por isso alguns autores consideram que a aplicação da tecnologia MEMS para sistemas de RF e de Microondas está perto de revolucionar a comunicação sem fio [19]. A seção 3.1 trata de requisitos de sistemas de RF. A seção 3.2 apresenta alguns componentes MEMS para sistemas de RF e, na seção 3.3, são mostradas algumas aplicações de MEMS em circuitos de RF. Na seção 3.4, são apontadas oportunidades de uso de componentes MEMS de RF.

#### 3.1 Requisitos de Sistemas de RF

A exigência dos consumidores por conectividade em todos os locais é amplamente reconhecida como a demanda cujo atendimento está levando a sociedade para o início de uma revolução industrial ainda no século XXI [20]. Os resultados esperados após esta revolução é a capacidade de se obter acesso universal à informação. Os consumidores demandam conectividade bem como informações, que são necessárias por eles e são bastante diversas. Os consumidores utilizam tecnologias sem fio para conversar, gerenciar informações pessoais, como lista de contatos e agenda, verificar o extrato bancário, comprar reservas para o cinema além de se localizar.

Uma importante questão é a seguinte: Será possível realizar dispositivos sem fio empregando uma convergência de funções e com interoperabilidade, dadas as limitações de potência e banda que existe para circuitos RF? Na literatura, MEMS para RF é apontada como uma tecnologia a ser utilizada como uma das soluções para essa questão.

Analisando alguns requisitos técnicos para aplicações em circuitos de RF ou microondas, alguns deles são, de um lado menor peso, volume, consumo e custo, e, de outro lado alta funcionalidade e operação em altas frequências. Outro requisito para quaisquer equipamentos de RF é a manutenção da integridade do sinal. A transmissão do sinal desejado deve ocorrer com baixas perdas, minimizando reflexões, diminuindo a interferência de sinais externos e ruídos, permitindo a utilização de filtros e evitando a geração de sinais indesejados, como sinais harmônicos de ordem superior. Todavia, com o aumento da frequência em circuitos RF atuais, estes requisitos aparentemente simples, não são facilmente alcançados.

A tecnologia MEMS atende a muitos desses requisitos, o que tem gerado interesses sem precedente no desenvolvimento de circuitos e componentes feitos com esta tecnologia [21-22].

### **3.2 Principais componentes utilizando tecnologia MEMS**

Com a utilização da tecnologia MEMS é possível construir componentes como:

- Indutores

Estes componentes passivos, essenciais em circuitos de RF, são bastante empregados em ressoadores LC e circuitos de indução para fornecimento de potência DC, pois podem reduzir substancialmente o ruído de fase e o consumo de potência de osciladores e amplificadores. Alguns processos de fabricação de MEMS resultam na drástica redução das capacitâncias parasitas e da perda por condutividade do substrato pela utilização de para um substrato isolante. Em geral, esses processos de fabricação são usados para criar indutores de valor fixo de indutância com alto desempenho e podem criar indutores planares, em duas dimensões, ou indutores tridimensionais. Estes fatos contribuem para o aumento do fator de qualidade (Q) e da frequência de ressonância. Atualmente, a

faixa de valores de Q medidos varia de 6 a 28 para freqüências de 6 a 18 GHz com um valor típico de indutor de 1 nH.

- Capacitores Variáveis

Capacitores Variáveis são largamente utilizados na implementação de deslocadores de fase e no ajuste de freqüência em filtros, antenas e outros circuitos. O aumento do fator de qualidade Q trazido por processos de fabricação MEMS, tem contribuído para redução de perdas e a maximização do desempenho mesmo em situações de alto ruído. Eles podem ser classificados em duas categorias amplas: Superfícies bidimensionais e tridimensionais.

Tipos bidimensionais tendem a ter fabricação mais simples e serem mais facilmente integráveis no mesmo chip de um circuito. Eles usam processos de fabricação mais baratos que os tridimensionais. Entretanto os capacitores de superfícies bidimensionais têm resposta não linear com a tensão de operação.

- Cavidades ressonantes [23]

Os níveis de desempenho de cavidades ressonantes típicos podem ser alcançados no plano microscópico com a utilização de técnicas MEMS. A capacidade de permitir a fabricação de cavidades com Q elevados (da ordem 10.000 a 25.000) contribui para a utilização de MEMS com esse tipo de componente.

- Chaves

Chaves MEMS de RF são dispositivos que se utilizam da movimentação mecânica para alcançar em uma linha de transmissão RF um circuito aberto ou fechado. A força necessária para essa movimentação mecânica pode ser obtida através de atuação eletrostática, magnetostática, piezoeletricidade e termodinâmica. Até os dias atuais, o único atuador eletromecânico com o qual foi possível a fabricação de chaves MEMS com alta confiabilidade em freqüências de vários GHz, foi a de atuação eletrostática. Por esse motivo, esta dissertação

se focalizará em chaves com atuadores eletrostáticos.

### 3.3 Principais circuitos utilizando tecnologia MEMS

Existe uma grande quantidade de circuitos empregando MEMS como:

- Redes de chaveamento [24]

Estes circuitos são empregados em muitos sistemas de comunicação e incluem chaves SPNT (*Single Pole N-Throw*) para filtragem e ampliação de sinais, matrizes de chaveamento NxN e chaves de roteamento.

Em sistemas de comunicação por satélite, as redes de chaveamento eram constituídas usando chaves coaxiais, por causa da alta capacidade de potência, altíssima isolamento, baixíssima perda por inserção e pequenos produtos de intermodulação. Entretanto, são relativamente pesados (da ordem de 100g) e de alto custo unitário. Como sistemas de satélites costumam possuir entre 100 e 300 chaves, esta rede facilmente custaria milhões de dólares.

Com o emprego de circuito baseado em chaves MEMS, apesar de uma perda por inserção mais alta em relação a chaves coaxiais, os requisitos essenciais para aplicações de satélite são cumpridos, já que resultam em circuitos mais leves, menores e melhor adaptados para essa aplicação.

- Sistemas de comunicação sem fio portáteis

Circuitos MEMS são amplamente empregados em projetos de sistema de telefonia celular 3G, que requerem operação multi-banda e multi-modo. Cada tecnologia celular requer filtros específicos para as bandas ocupadas, tornando o sistema *front-end* maior, mais custoso e mais complexo. A inclusão de mais componentes impõe maiores perdas e uma maior distorção do sinal RF e para reparar isto é necessário aumentar a potência do sinal, prejudicando a tempo de

vida da bateria. A crescente complexidade em sistemas celulares trouxe a adoção de soluções RF sintonizáveis com emprego de chaves MEMS e filtros que simplificam essa arquitetura [25]. Componentes MEMS para RF podem também permitir o desenvolvimento de sistemas de baixa potência baseados em antenas sintonizáveis, osciladores de baixo-ruído e filtros sintonizáveis para aplicações em banda larga. Outra vantagem da utilização de dispositivos MEMS é a possibilidade de eliminação de indutores *off-chip* em circuitos osciladores e filtros em pastilhas de silício.

- Deslocadores de fase [26-27]

Com MEMS, é possível construir deslocadores de fase de baixa perda, especialmente para frequências entre 8 a 120 GHz. Com um melhor desempenho em relação a chaves FET de Arseneto de Gálio (GaAs) em relação a isolação do sinal, é possível eliminar uma ou duas etapas de amplificação do sinal na cadeia de transmissão / recepção, o que resulta em uma redução substancial de consumo de potência. Além disso, como chaves MEMS têm uma capacitância muito pequena na posição não atuada, o que resulta em um desempenho de banda mais larga que dispositivos de estado sólido. Embora as pesquisas tenham sido custeadas pelo governo americano, visando aplicações militares em sistema de telecomunicação e radar. Como deslocamentos de fases em frequências de microondas é um das funções de controle mais importante e presente em quase todos sistemas, uma demonstração de deslocadores de fase utilizando chaves MEMS irá destacar as vantagens da tecnologia MEMS para RF.

- Antenas reconfiguráveis [28-29]

Com o aumento da frequência de operação as antenas se tornam menores, e suas dimensões se situam na escala da arquitetura MEMS. Os diagramas de radiação de antenas dependem das suas dimensões relativas ao comprimento de onda do sinal. Por exemplo, dipolos são ressonantes em uma frequência tal que o comprimento do dipolo seja igual à metade do comprimento de onda do sinal. Dessa forma, visando o aumento da flexibilidade e da utilização de antenas, é possível pensar em formas de reconfigurar sua estrutura por alteração de suas dimensões.

Por exemplo, é possível construir uma rede de dipolos constituída de segmentos interligados por chaves MEMS, as quais abertas ou fechadas de uma maneira adequada alteram a estrutura, com a conseqüente alteração do seu diagrama de radiação. O conceito pode ser aplicado a uma extensa variedade de antenas como a Yagi-Uda, a parabólica, a log-periódica, entre outras.

Uma extensão da antena dipolo sintonizável, é a *multiband microstrip resonator antenna*. Nessa antena, ressoador em microlinha projetado a radiar na frequência mais alta, é excitado pelo sinal que atravessa a microlinha, impressa no substrato através de uma fenda acoplada, existente no plano de terra. Os comprimentos tanto do ressoador quanto da fenda acoplado são escolhidos como aproximadamente metade do comprimento de onda da maior frequência de interesse. A antena é feita reconfigurável por chaves MEMS, quando estão acionadas, muda o comprimento do ressoador para incluir um pedaço adicional de linha de transmissão. Um ressoador fisicamente maior ressoará e radiará mais eficientemente em uma frequência mais baixa. Para maximizar o acoplamento de potência do microlinha através da fenda para o ressoador, o microlinha tem uma terminação do tipo *tuning stubs* de  $\frac{1}{4}$  de onda, que induz curtos-circuitos na junção entre a frequência mais alta e mais baixa de interesse. Portanto, explorando a alta isolamento de chaves MEMS no estado desligado e sua baixa perda por inserção quando acionadas, o comprimento do ressoador pode ser chaveado entre sua a configuração de frequência mais alta, na qual ressoador é o único elemento, e sua configuração de frequência mais baixa, que inclui segmentos de linha de transmissão. Isso possibilita uma antena multi-frequência.

### **3.4 Oportunidades de uso de componentes MEMS de RF**

Existem muitas oportunidades para aplicação dos componentes MEMS em circuitos. O quadro a seguir foi mostrado por Héctor de Los Santos, pesquisador em MEMS, em palestra realizada no dia 24 de maio de 2007 no III Seminário realizado na Unicamp.

Tabela 3.1 Oportunidades para componentes MEMS RF

Função do sistema	Componente MEMS RF			
	Chave	Indutor	Capacitor / Varactor	Ressorador
Antenas multiband / banda larga	X			
Filtros transmissores e receptores reconfiguráveis	X			X
Seletor ajustável		X	X	
Sintetizador reconfigurável multi-banda	X			
Filtro reconfigurável de banda base		X	X	X
Casamento de impedâncias reconfigurável		X	X	
Amplificadores de Potência multi-banda	X	X	X	

Verifica-se que a reconfigurabilidade é uma das características importantes para as novas oportunidades de circuito para chaves MEMS e varactores. Ambos os componentes são ideais para sistemas reconfiguráveis, pois tem baixa perda por inserção, alto Q para frequências até 120 GHz e pode ser integrados com substrato de baixa constante dielétrica, que é fundamental para filtros sintonizáveis e redes de casamento de baixa perda. Além disso, eles geram baixos produtos de intermodulação, requisito essencial se o circuito reconfigurável fica antes do amplificador de baixo ruído.

Um dos desafios que a indústria de MEMS para RF necessita enfrentar é explorar a tecnologia em nível sistêmico e não mais no nível de componentes.



## Capítulo 4

### Chaves MEMS de RF

A modelagem de chaves MEMS é um tema de grande interesse de pesquisa, pois o uso destas chaves pode melhorar o desempenho e a funcionalidade de arquiteturas de sistemas de RF com significativa redução de complexidade e custo [30-31]. Na seção 4.1, são apresentados os principais requisitos de chaves para RF. Na seção 4.2, são comparadas as diversas tecnologias de chaves. Na seção 4.3, são apresentadas aplicações de chaves MEMS. A seção 4.4 mostra possíveis classificações de chaves MEMS. As seções 4.5 e 4.6 apresentam os modelos mecânicos e elétricos de chaves MEMS, respectivamente.

#### 4.1 Fundamentos e Requisitos de chaves para RF

Duas configurações possíveis usando chaves de um pólo uma posição ou SPST - *Single Pole Single Throw* são mostradas na Figura 4.1.

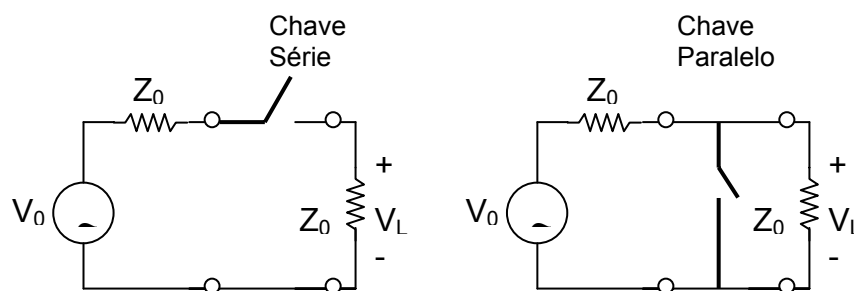


Figura 4.1 Circuitos SPST ideais

Uma chave ideal alterna entre o circuito aberto e o perfeito curto circuito perfeito dependendo da tensão de controle aplicada. Certos dispositivos microeletrônicos têm uma relação tensão-corrente que se aproxima da chave ideal, pelo menos para uma dada banda de frequências e até certos níveis de sinal. A utilização destes dispositivos facilita o controle eletrônico para um rápido

chaveamento e a integração monolítica.

Pode-se representar simbolicamente uma chave não-ideal como um dispositivo de dois terminais de impedância  $Z_D$ , como mostrado na Figura 4.2, onde  $Z_D$  depende da tensão aplicada no dispositivo. Esta impedância pode ser alternada entre os estados de baixa e alta impedância, dependendo da configuração do circuito e da tensão de controle aplicada.

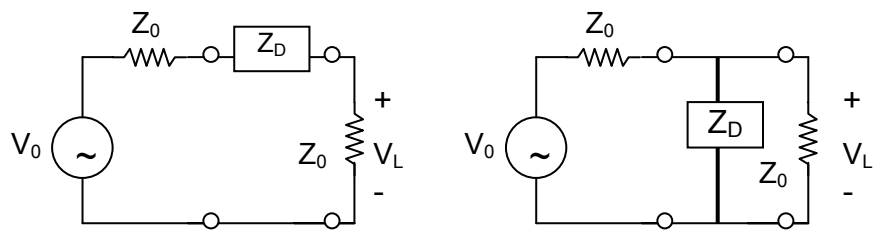


Figura 4.2 Modelos de circuitos de SPST utilizando um dispositivo de chaveamento não-ideal de impedância  $Z_D$ .

Uma característica importante para circuitos de chaveamento é a perda por inserção tanto na posição atuada quanto na posição não atuada. A perda por inserção na posição não atuada é geralmente denominada Isolação, enquanto na posição atuada é usualmente chamada de Perda de Inserção. Esta perda pode ser obtida em termos de  $Z_D$  como [32]

$$IL = -20 \log \left| \frac{V_L}{V_0} \right| = \begin{cases} 20 \log |1 + Z_D / 2Z_0|, & \text{para chaves série} \\ 20 \log |1 + Z_0 / 2Z_D|, & \text{para chaves paralelo.} \end{cases} \quad (1)$$

A Perda de Retorno também uma característica muito importante para uma chave tanto na posição atuada quanto na posição não atuada. Essa perda é definida como a relação entre a potência disponível do gerador pela potência refletida para o gerador. Ela está associada ao coeficiente de reflexão da chave.

Outras importantes características para chaves são capacidade de potência, a velocidade de chaveamento e a linearidade. A capacidade de potência pode ser entendida como a máxima potência de um sinal que a chave pode transferir. Ela está intrinsecamente associada às características dos dispositivos microeletrônicos reais empregados para a implementação da chave. No estado de baixa impedância, cada

dispositivo é limitado pela corrente máxima,  $I_{max}$ , que pode suportar. Já no estado de alta impedância, a limitação está na tensão máxima suportada entre os terminais,  $V_{max}$ . A Tabela 4.1 apresenta a máxima potência incidente do gerador que pode ser refletida ou transmitida por uma chave.

Tabela 4.1 Capacidade de potência para configurações do circuito de chaveamento SPST

Estado da chave	Configuração do Circuito	
	Série	Paralelo
Alta impedância ( $Z_D \gg Z_0$ )	$P_{OFF} \approx 1/8 V_{máx}^2 / Z_0$	$P_{ON} \approx 1/2 V_{máx}^2 \cdot Z_0$
Baixa impedância ( $Z_D \ll Z_0$ )	$P_{OFF} \approx 1/8 V_{máx}^2 / Z_0$	$P_{ON} \approx 1/2 V_{máx}^2 \cdot Z_0$

A velocidade de chaveamento é o tempo necessário para a chave responder em sua saída quando existe mudança na tensão de controle. Ela inclui o atraso de propagação no dispositivo bem como o tempo de transição (*transition time*), que é o tempo para a envoltória da tensão de RF subir de 10% até 90% de seu valor máximo, no caso de acionamento ou cair de 90% para 10% no caso de desligamento. A linearidade da chave tanto pior quanto maior forem as harmônicas do sinal de saída. Assim, chaves com maior capacidade de intermodulação são superiores neste aspecto.

Em altas frequências, quando uma chave está no estado acionado, a sua resistência e o descasamento de impedância causarão perdas por inserção e perdas por reflexão, respectivamente. Além disso, qualquer não linearidade ou dispersão nas características de transmissão pode gerar componentes de frequência indesejada que irão comprometer o desempenho do sistema.

Os requisitos essenciais para chaves de RF são:

- Baixa perda de inserção e baixa reflexão ou perda de retorno, no estado atuado;
- Alta isolamento, no estado não atuado;
- Baixo custo;
- Alta confiabilidade;

- Dimensões reduzidas;
- Alta linearidade;
- Baixas tensões de operações;
- Alta capacidade de potência.

Esses requisitos são muitas vezes difíceis de serem atingidos simultaneamente, principalmente em altas frequências, existindo em geral um compromisso entre vários deles.

## 4.2 Comparação com outras tecnologias de chaves

Usados desde a década de 1930, os tradicionais relés eletromagnéticos eram os tipos de chaves que apresentavam características elétricas mais próximas do caso ideal em relação a outras tecnologias. Uma das vantagens era a de não consumir potência quando estavam desligados. Contudo, por causa de seu tamanho considerável, do tempo de vida mecanicamente limitado, da baixa velocidade de transição, do alto custo e da difícil integração, a utilização de relés como chaves, atualmente, só é verificada em casos especiais.

Já os diodos PIN ou os transistores GaAs FET são de pequena dimensão, relativamente baratos e operam um número de ciclos antes de falharem muito maior que outras tecnologias, além de apresentarem alta velocidade de chaveamento. Entretanto, essas chaves não têm um bom desempenho em aplicações de banda larga, por causa das apreciáveis perdas por inserção, da isolamento insuficiente, da baixa imunidade a sinais de frequências harmônicas do sinal útil e apresentam consumo de potência considerável, mesmo quando em estado aberto. Além disso, diodos PIN não são facilmente integráveis com outros componentes RF, enquanto transistores FET são mais facilmente integráveis.

As principais vantagens das chaves MEMS sobre chaves semicondutoras são:

- **Baixa perda de inserção:** da ordem de 0,1 dB para frequências da ordem de 40

GHz

- **Alta isolamento:** Capacitâncias parasitas da ordem de fF resultam em excelente isolamento, mesmo para frequências da ordem de 40 GHz.

- **Baixa distorção do sinal:** Chaves MEMS são dispositivos de altíssima linearidade dado que não contém junções de semicondutores e, portanto, não apresentam uma relação exponencial entre corrente e tensão. Chaves MEMS são projetadas para ser mecanicamente rígidas (de alta constante elástica) e podem tolerar variações na tensão RF sem gerar níveis significativos de produtos de intermodulação. as harmônicas geradas por chaves MEMS são até 30 dB menores que as geradas por diodos PIN e transistores FET [33]. Elas são elementos quase ideais para redes de casamento e filtros sintonizáveis.

- **Alta capacidade de integração.**

- **Pequenas dimensões,** da ordem de centenas de  $\mu\text{m}$  tanto de comprimento quanto de largura.

A Tabela 4.2 compara chaves de MEMS de RF, diodos PIN e transistores MESET.

Tabela 4.2 Comparação entre chaves de RF

Característica	MESFET	Diodo PIN	RF MEMS
Resistência em série ( $\Omega$ )	3 a 5	1	< 1
Perda a 1 GHz (dB)	0,5 a 1,0	0,5 a 1,0	0,1
Isolação a 1 GHz (dB)	20 a 40	40	> 40
Tamanho ( $\text{mm}^2$ )	1 a 5	0,1	< 0,1
Tempo de chaveamento	~ ns	~ $\mu\text{s}$	~ $\mu\text{s}$
Tensão de controle (V)	8	3 a 5	3 a 80
Corrente de controle	< 10 $\mu\text{A}$	10 mA	< 10 $\mu\text{A}$

As principais desvantagens de chaves MEMS são:

- **Baixa velocidade de chaveamento:** para a maioria das chaves MEMS o tempo de chaveamento é da ordem de 2 a 40  $\mu\text{s}$ . Algumas aplicações em sistemas de comunicação e radar precisam de dispositivos de maior velocidade.

- **Encapsulamento:** Chaves MEMS devem ser empacotadas em atmosferas inertes e de umidade bastante reduzida. Atualmente, os custos desse tipo de empacotamento são altos e algumas técnicas de empacotamento afetam a confiabilidade da chave.

- **Confiabilidade:** Uma chave MEMS pode realizar da ordem de 0,1 a 10 bilhões de ciclos. Entretanto muitos sistemas necessitam de 20 a 200 bilhões de ciclos e só recentemente foram desenvolvidas chaves MEMS para um número de ciclos tão elevado.

- **Capacidade de potência:** Muitas chaves MEMS não suportam potências maiores que 20 a 50 mW com alta confiabilidade. Esta limitação é devido a complexa interação existente entre perdas eletromagnéticas, transferência de calor e deformações mecânicas, em torno da chave MEMS [35].

- **Custo:** Atualmente MEMS tem potencial para fabricação a baixíssimo custo, mas é ainda necessário considerar o custo de empacotamento. Entretanto, o custo de chaves FET, largamente testadas e utilizadas, é ainda menor.

- **Tensão de Operação elevada:** Chaves MEMS necessitam de uma tensão de operação entre 20 V e 80 V para operar com alta confiabilidade. A maioria dos sistemas de comunicação portátil é alimentada por tensões menores que esta (de 3 a 5 V geralmente). Entretanto isso problema é facilmente resolvido com a utilização circuitos elevadores de tensão, em inglês, *charge pumps*, como uma chave da Motorola descrita em [34]. Com a integração de uma chave MEMS e um *charge pump*, é possível obter-se um bom desempenho pois chaves de tensões mais elevadas tem acionamento mais rápido e são de maior confiabilidade.

### 4.3 Aplicações de chaves MEMS

As maiores áreas de aplicações de chaves MEMS são [30,36,37]:

- Sistemas de Comunicação sem fio
  - Em telefones Celulares;
- Sistemas de Comunicação por Satélite
  - Defasadores em redes de antenas;
- Radares automotivos
- Antenas reconfiguráveis
- Radares para sistemas de Defesa
  - Sistemas de mísseis;
  - Radares de longa distância;
- Sistemas de Instrumentação.

### 4.4 Tipos de chaves MEMS

Algumas das possíveis classificações de chaves MEMS, são as seguintes:

- Topologia: Série ou Paralela
- Tipo mecânico: Chaves de Membrana ou de Alavanca
- Tipo de Contato: metálico ou capacitivo
- Orientação: lateral ou em linha
- Movimento: vertical ou lateral
- Atuador: Eletrostático, térmico, piezo-eletricidade ou magnético

Chaves MEMS com diferentes combinações de topologias, tipos mecânicos, tipos de contatos possuem vantagens diferentes no desempenho da chave em RF, na integração com outros circuitos e na facilidade de fabricação [3].

Chaves em série ideais resultam em um circuito aberto na linha de transmissão quando não há aplicação da tensão de operação. Elas são consideradas como um curto circuito quando existe a aplicação da tensão de

operação na linha de transmissão. Esses dispositivos, se fossem ideais, teriam isolamento infinita na posição não atuada e perda por inserção zero na posição atuada. Esse tipo de chave é amplamente empregado para circuitos de frequência entre 0,1 GHz e 40 GHz. A Figura 4.3 mostra a estrutura padrão de uma chave em série pela vista de topo. Na Figura 4.4, a visão da seção transversal da chave é apresentada.

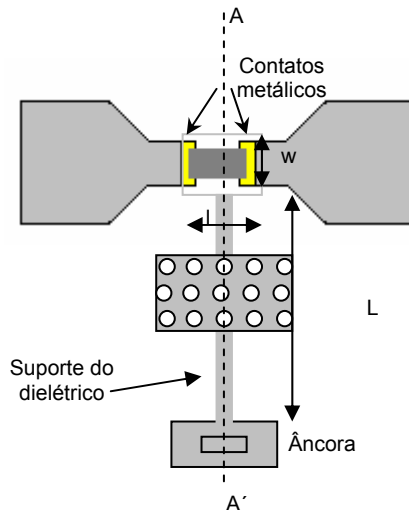


Figura 4.3 Chave série em com um eletrodo

Algumas chaves MEMS são fabricadas com orifícios pouco espaçados na membrana. Isto permite a remoção mais fácil da camada sacrificial no processo de fabricação usando-se técnicas de gravação seca e possibilita uma operação mais rápida da chave, pela redução do amortecimento do ar sob a membrana e sua menor massa da membrana, originando uma frequência de ressonância mecânica maior. Os orifícios liberam uma parte da tensão residual na membrana e reduzindo o módulo de Young, cumprindo. Deste modo, os orifícios cumprem uma dupla função em uma chave MEMS.

Os orifícios são geralmente dispostos formando um reticulado e resultam praticamente na mesma capacitância que no caso de uma membrana fabricada usando uma chapa de metal contínua, se seus diâmetros não ultrapassarem 3 ou 4 vezes a altura da membrana. Isto ocorre porque o efeito de borda nos furos compensa a falta de material.

Por outro lado, os furos afetam a capacitância na posição atuada e com isso,



reduzem a relação entre as capacitâncias na posição não atuada pela posição atuada.

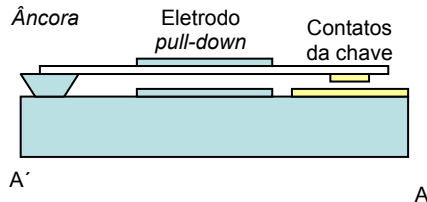


Figura 4.4 Seção transversal de Chave em série

As chaves ideais em paralelo, que são colocadas entre a linha de transmissão e o plano terra, podem se conectar com as linhas de transmissão ou com o plano terra, em função da tensão aplicada. Assim, se fossem ideais, resultariam em perda por inserção nula quando nenhuma tensão é aplicada (posição não atuada) e isolamento infinita quando alimentadas com a tensão de operação (posição atuada). Elas são mais apropriadas para frequências mais elevadas, da ordem de 5 GHz a 100 GHz. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam chaves em paralelo sobre um CPW na seção transversal e na vista superior, respectivamente.

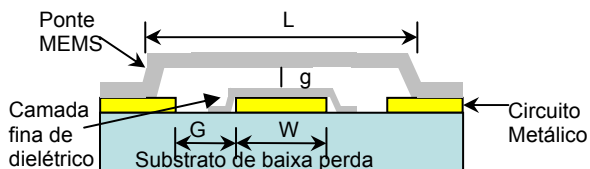


Figura 4.5: Seção transversal de uma chave em paralelo

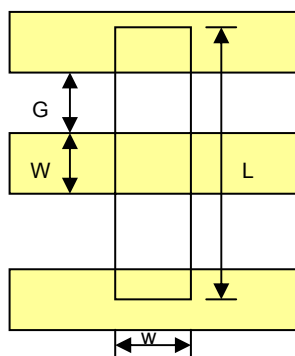


Figura 4.6: Vista do plano superior de uma chave em paralelo

Para se ter uma idéia das dimensões típicas deste tipo de chave, L em geral varia entre 200 a 1000  $\mu\text{m}$ , G varia entre 40 e 150  $\mu\text{m}$ , W entre 60 e 120  $\mu\text{m}$  e  $g_0$  entre 1  $\mu\text{m}$  a 4  $\mu\text{m}$ .

Em chaves de contato capacitivas, é utilizado um filme dielétrico entre as duas superfícies metálicas da chave. O contato capacitivo é caracterizado pela relação entre as capacitâncias nas posições não atuado (circuito aberto) e atuado (curto-circuito) e essa relação varia tipicamente entre 80 a 160. A capacitância *down-state* é tipicamente 2-3 pF. A aplicação dessa configuração é mais adequada sinais alternados de alta frequência da ordem de 8 a 100 GHz. Em geral, é difícil se obter uma capacitância *down-state* mais alta usando camada de nitratos ou óxidos e isso limita a frequência mínima de operação da chave. Usam a configuração paralela, pois é mais fácil obter-se uma boa isolação com uma relação de impedâncias limitada (como em uma chave capacitiva) em um circuito paralelo que em um circuito série.

As chaves de contato metálico, também chamadas de chaves de contato DC, são implementadas com contatos diretos entre duas superfícies metálicas. Na posição *up-state* (circuito aberto), se comportam como capacitâncias e podem operar em frequências de 0,01 a 40 GHz. Na posição *down-state* (curto-circuito), chaves de contato se tornam um resistor em série com resistência entre 0,5 – 2  $\Omega$  dependendo do contato metálico utilizado. Geralmente são montadas na configuração série.

Em uma chave em linha, a ponte ou a alavanca está posicionada na mesma linha de transmissão do circuito. Já em uma chave lateral, a alavanca fica posicionada na transversal da linha de transmissão do sinal. Em chaves do tipo membrana, as duas extremidades da chave são fixadas por meio de âncoras. As chaves do tipo alavanca têm apenas uma extremidade fixada a uma âncora.

Até os dias atuais, apenas chaves eletrostáticas demonstraram desempenho em frequências entre 0,1 até 100 GHz com alta confiabilidade (entre 100 milhões e 50 bilhões de ciclos dependendo do fabricante) para baixa potência para chaves de contato metálico e níveis médios de potência para contatos capacitivos e utilizam

técnicas de fabricação compatíveis com as de circuitos integrados.

Chaves térmicas/magnéticas apresentam velocidade de chaveamento entre 200 e 3000  $\mu\text{s}$  [24]. Diversas aplicações de comunicações e sistemas de radares requerem chaves muito mais rápidas. Apesar de essas chaves poderem ser atuadas com tensões entre 2 e 5 V, elas requerem correntes de atuação elevadas entre 10 a 100 mA.

#### 4.5 Considerações mecânicas sobre chaves MEMS

Como a operação de chaves MEMS é limitada a pequenas deflexões, é possível modelar mecanicamente chaves de membrana e de alavanca como molas com uma determinada constante elástica  $k$  [N/m], uma vez que a força de restauração que surge na membrana quando uma tensão é aplicada entre as armaduras da chave, é proporcional ao deslocamento realizado. Desse modo,

$$T = k \cdot y_0 \quad (2)$$

onde,

$T$  é a força eletrostática decorrente da tensão aplicada;

$y_0$  é o deslocamento da membrana.

A força restauradora na membrana resulta de duas forças distintas, como mostrado na Figura 4.7, que somadas equilibram a força eletrostática. Portanto, a constante elástica pode ser decomposta em dois componentes  $k'$  e  $k''$  tais que  $k = k' + k''$ . O componente  $k'$  é devido à rigidez da membrana que é associada a características intrínsecas do material como o momento de Inércia e o módulo de Young. O componente  $k''$  é devido ao estresse residual, que depende do processo de fabricação [38-40] e pode ser diminuído com a introdução de pequenos orifícios na membrana, conforme mencionado anteriormente.

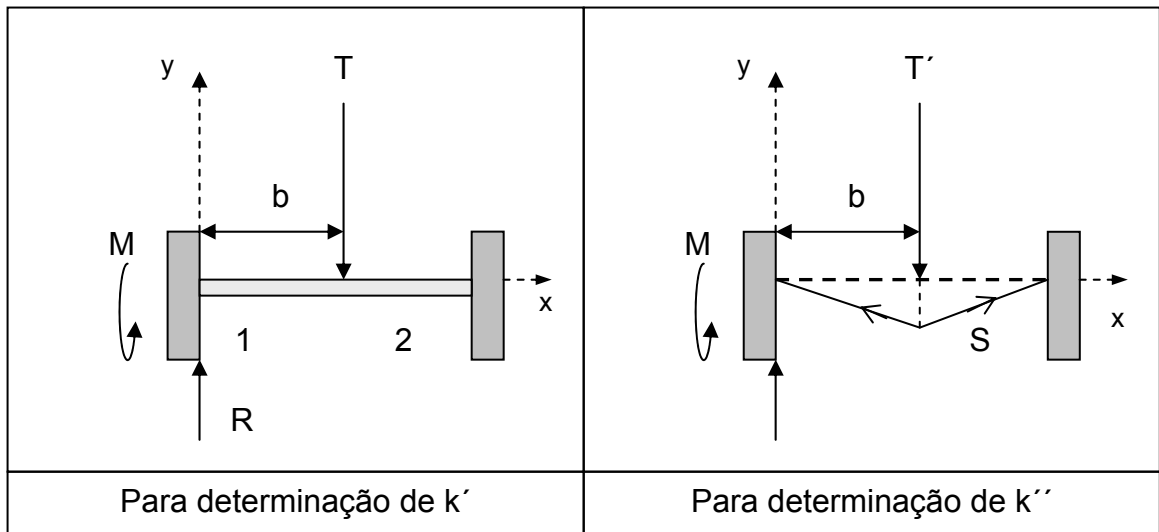


Figura 4.7 Esforços solicitantes sobre a chave para determinação de  $k'$  e  $k''$  [24]

No caso de uma carga distribuída uniformemente sobre toda a barra e considerando o centro da membrana como referência para determinação de  $k$ , determina-se  $k'$  por

$$E.I. \frac{d^2 y}{dx^2} = M_1 + R_1 \cdot x, \quad \text{para } x \leq b \quad (3)$$

onde,

$E$  é o módulo de Young do material;

$I$  é o momento de inércia, que no;

$M_1$  é o momento no ponto 1;

$R_1$  é a reação no ponto 1

sendo,

No caso de uma barra de seção transversal, o momento de inércia é dado por

$$I = \frac{w.t^3}{12} \quad (4)$$

onde,

$t$  é espessura da membrana;

$w$  é a largura da membrana.

Integrando-se (3) em relação a x duas vezes, obtém-se

$$y = \frac{M_1 \cdot x^2}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{R_1 \cdot x^2}{6 \cdot E \cdot I} \quad (5)$$

Para uma força aplicada em  $x=b$ ,

$$M_1 = \frac{-T' \cdot b}{l^2} \cdot (l-b)^2 \quad (6)$$

$$R_1 = \frac{-T'}{l^3} \cdot (l-b)^2 \cdot (1+2 \cdot b) \quad (7)$$

onde,

$T'$  é a parcela da força eletrostática que equilibra a força restauradora referente a  $k'$ .

Portanto, a deformação no centro da membrana é dada por

$$y_0 = -\frac{2}{EI} \int_{l/2}^L \frac{T'}{48l} (l^3 - 6l^2b + 9lb^2 - 4b^3) db \quad (8)$$

onde,

$L$  é o comprimento da membrana;

Assim,

$$k' = \frac{-T'}{l} = 32Ew \left( \frac{t}{l} \right)^3 \quad (9)$$

Para o cálculo de  $k''$ , considerando-se o estresse residual e desprezando-se o estresse causado durante a flexão,

$$S = \sigma(1-\nu)tw \quad (10)$$

onde,

$S$  é a força devida à tensão residual;

$\sigma$  é a tensão residual na membrana;

$\nu$  é a razão de Poisson para o material da membrana.

Calculando-se a deflexão para uma carga distribuída uniformemente sobre a barra,

$$y_0 = -2 \int_{l/2}^L \frac{T'''}{2IS} (l-b) db \quad (11)$$

onde a simetria foi utilizada para estabelecer a integral. Desse modo,

$$k'' = \frac{8\sigma(1-\nu)tw}{L} \quad (12)$$

$$k = k' + k'' = \frac{384EI}{L^3} + \frac{8\sigma(1-\nu)tw}{L} \quad (13)$$

No caso de uma membrana montada sobre um Guia de Onda Coplanar ou CPW - *Coplanar Waveguide* a distribuição da carga não será uniforme em toda a barra, pois ela existirá apenas no centro do condutor, como mostrado na Figura 4.8, onde  $\xi$  é a carga por unidade de comprimento.

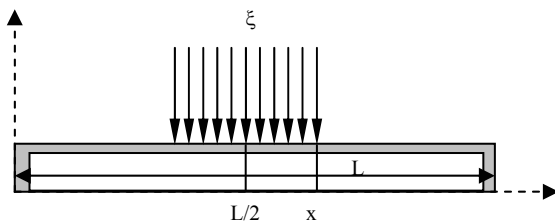


Figura 4.8 Distribuição de carga em uma membrana montada sobre um CPW

Nessas condições, pode-se calcular a constante de mola  $k$  da chave do tipo membrana por:

$$k = \frac{384.EI}{L^3} \cdot \frac{1}{8.(x/L)^3 - 20.(x/L)^2 + 14.(x/L) - 1} + \frac{8.\sigma.(1-\nu).t.w}{L} \cdot \frac{1}{3 - 2.(x/L)} \quad (14)$$

No caso de uma chave do tipo alavanca, por esta não ser fixada em uma extremidade, a constante de mola não conterá o componente devido à tensão

residual. Essa constante da mola será dada por:

$$k = 2Ew \left( \frac{t}{L} \right)^3 \frac{1 - (x/L)}{3 - 4(x/L)^3 + (x/L)^4} \quad (15)$$

Comparando a constante  $k$  para chaves do tipo alavanca e do tipo membrana, verifica-se que, para um mesmo material e para as mesmas dimensões, a constante de mola de uma chave tipo alavanca é até 48 vezes menor que a do tipo membrana [24].

Quando uma tensão é aplicada entre a alavanca ou a membrana e o eletrodo de fechamento, uma força eletrostática atua na barra, que é a conhecida força eletrostática existente entre as placas de um capacitor com uma tensão aplicada. A força eletrostática entre o eletrodo superior e o inferior é dada por:

$$F = \frac{QE}{2} = \frac{CVE}{2} = \frac{CV^2}{2(g + \frac{t_d}{\epsilon_r})^2} = \frac{\epsilon AV^2}{2(g + \frac{t_d}{\epsilon_r})^2} \quad (16)$$

onde,

$V$  é a tensão entre o eletrodo superior e inferior;

$G$  é a distância entre o eletrodo superior e inferior;

$C$  é a capacitância entre o eletrodo superior e inferior;

$A$  é a área do eletrodo;

$t_d$  é a largura da camada do dielétrico;

$\epsilon_r$  é a constante dielétrica relativa.

A intensidade da força resultante é pequena, sendo todavia suficiente para movimentar a chave. Quando a chave é atraída pelo eletrodo da parte inferior, a distância  $g$  diminui e a força eletrostática aumenta, facilitando o fechamento. Por outro lado, a força de restauração da mola também aumenta. O equilíbrio ocorre quando essas forças são iguais a:

$$F = \frac{\varepsilon A V^2}{2\left(g + \frac{t_d}{\varepsilon_r}\right)^2} = k(g - g_0) \quad (17)$$

onde,

$g_0$  é a altura inicial da ponte.

Resolvendo-se esta equação, a tensão aplicada resulta em

$$V = \sqrt{\frac{2kg^2(g_0 - g)}{\varepsilon_0 W w}} \quad (18)$$

onde,

$W$  é o comprimento da barra

$w$  é a largura da barra.

O gráfico da altura da barra pela tensão aplicada, apresentado na Figura 4.9, mostra duas possíveis posições para cada tensão aplicada no caso de  $W = 100 \mu\text{m}$ ,  $w = 100 \mu\text{m}$ ,  $g_0 = 3 \mu\text{m}$  e  $k = 10 \text{ N/m}$ .

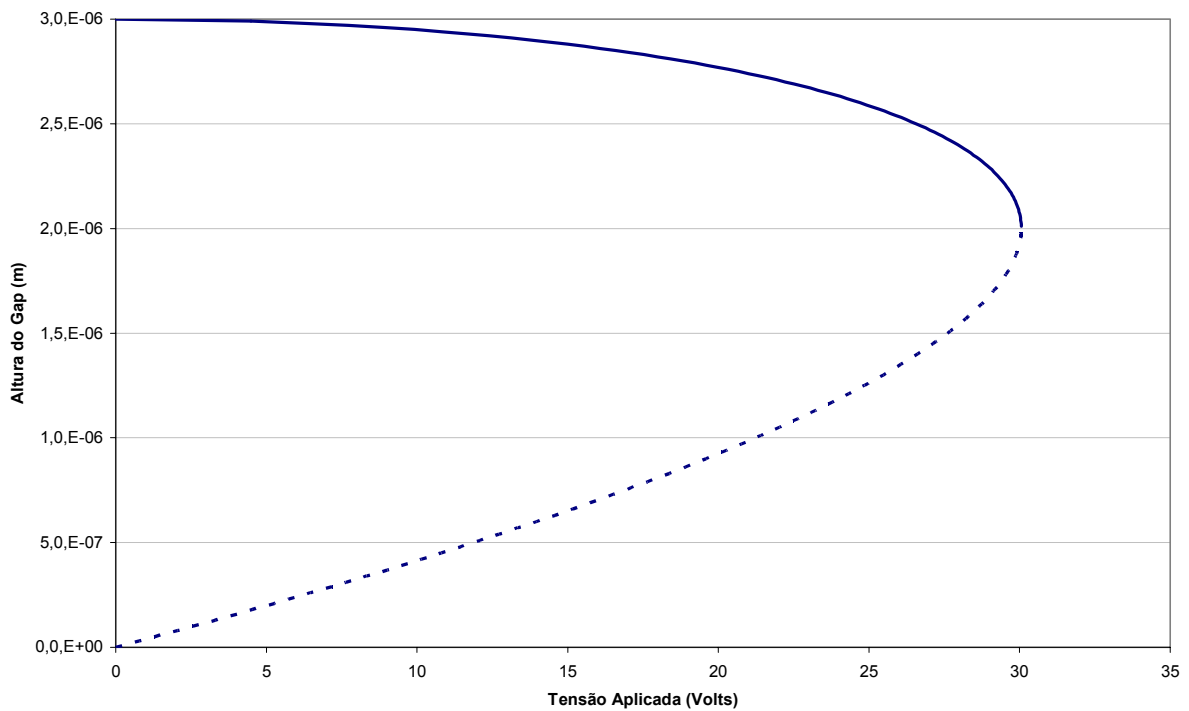


Figura 4.9. Gráfico da altura da barra versus tensão aplicada.



Isto ocorre, pois a posição da barra torna-se instável em  $2g_0/3$ . Este fato é compreensível, pois a força elétrica depende linearmente da carga na barra (Q) e do campo elétrico devida à aplicação da tensão ( $E = V/g$ ). Quando a tensão é aumentada, a força aumenta devido à diminuição da altura da barra, a qual aumenta a capacitância e, portanto, a carga e o campo elétrico. Em  $2g_0/3$ , o aumento da força eletrostática é maior do que o aumento na força restauradora, resultando em instabilidade da posição da barra e a conseqüente queda da barra para a posição atuada. A linha hachurada representa a parte instável da altura da barra.

Assim, a tensão que provoca o colapso da membrana, chamada de tensão de fechamento (*pull-down voltage*) é dada por

$$V_p = V\left(\frac{2g_0}{3}\right) = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\varepsilon A}}. \quad (19)$$

Para o caso simulado no gráfico, a tensão de fechamento é 30,06 V para  $g = 2,0 \mu\text{m}$ .

Goldsmith et al. [38] demonstrou que o tempo de vida de chaves MEMS capacitivas depende fortemente da tensão de atuação. Em particular, foi verificado experimentalmente que uma redução de 5 a 7 V na tensão de *pull-down* da chave aumenta o tempo de vida em cerca de dez vezes, existindo uma relação exponencial entre a tensão aplicada e a confiabilidade da chave. Assim, a redução da tensão de fechamento irá não apenas aumentar as possibilidades de aplicações de chaves MEMS, como também contribuir para aumento da confiabilidade.

É possível diminuir-se a tensão de fechamento de três diferentes maneiras:

- Diminuição da distância entre a chave e o eletrodo inferior;
- Aumento da área da membrana;
- Projetando uma estrutura com baixo constante elástica.

No primeiro caso, a isolação do circuito utilizando sinais RF irá se deteriorar rapidamente com a diminuição desse *gap*. Assim essa solução é inviável. No segundo caso, a área só pode ser aumentada com aumento das dimensões da chave e como tamanho reduzido é requisito essencial, essa solução também é inviável. O terceiro caso é o que oferece a maior flexibilidade, dado que o projeto da mola não impacta consideravelmente o tamanho, peso ou desempenho do circuito. Para um dado material, a constante elástica da membrana pode ser reduzida empregando-se suporte de meandros com estruturas *air-bridge*, como já foi mostrado na literatura em [39]. Isto ocorre porque a constante elástica efetiva total,  $k_{eff}$ , para a chave MEMS inteira pode ser determinada pela combinação das equações da constante elástica já demonstrada em [39] em procedimento similar ao de associação de capacitores.

As chaves MEMS seguem a Mecânica Newtoniana. Aplicando-se a equação de movimento de d'Alembert, obtém-se [40]

$$m \cdot g'' + b g' + k(g_0 - g) = F_e \quad (20)$$

onde,

$F_e$  é a força dada pela equação (16);

$m$  é a massa da alavanca ou ponte;

$b$  é o coeficiente de amortecimento da alavanca ou ponte.

A Equação (20) representa um sistema de segunda ordem que tem uma frequência de ressonância dada por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (21)$$

É possível calcular aproximadamente o tempo de chaveamento, assumido  $b=0$  (sem amortecimento) e considerando a força elétrica igual a inicial (com  $g=g_0$ ),

$$t \cong \frac{3,67V_p}{V_s \omega_0} \quad (22)$$

onde,

$V_s$  é a tensão aplicada na chave.

## 4.6 Considerações elétricas sobre chaves MEMS

Serão verificados os modelos elétricos para chaves em série e em paralelo, que em geral são circuitos RLC. Os valores podem ser determinados através de medidas dos parâmetros S da chave.

### 4.6.1 Modelo de chaves capacitivas em paralelo [43,44,45,46]

Uma chave MEMS capacitiva em paralelo consiste de uma membrana fina metálica suspensa sobre o centro de um CPW ou de uma microlinha. Uma camada dielétrica é usada para a isolamento DC da chave do condutor central do CPW. Quando a membrana está levantada, a chave apresenta uma pequena capacitância, entre o condutor e o plano terra. Quando a membrana está abaixada, a capacitância aumenta de um fator de 20 a 100 vezes, apresentando um curto em RF para altas frequências.

A chave MEMS em paralelo pode ser representada por 2 pequenas seções da linha de transmissão e um circuito RLC cuja capacitância tem valores diferentes para a posição atuada e não atuada, conforme mostrado na Figura 4.10.

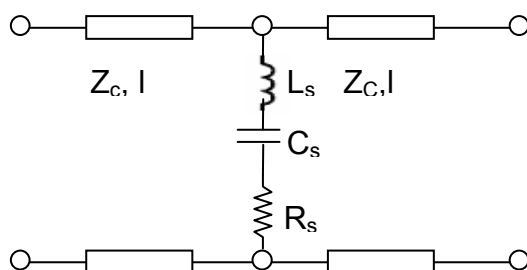


Figura 4.10: Circuito equivalente de uma chave em paralelo

A impedância da chave em série é dada por:

$$Z_S = R_S + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (23)$$

onde,

$C = C_u$  ou  $C_d$  dependendo da posição da membrana.

A frequência de ressonância do circuito LC da chave é:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (24)$$

A impedância da chave em paralelo pode ser aproximada por:

$$Z = \begin{cases} \frac{1}{j\omega C}, & \text{para, } f \ll f_0 \\ R_S, & \text{para, } f = f_0 \\ j\omega L, & \text{para, } f \gg f_0 \end{cases} \quad (25)$$

O modelo tem comportamento capacitivo para frequências abaixo da frequência de ressonância do circuito LC e indutivo acima dessa frequência.

A capacitância, aproximada pelo modelo de placas paralelas, para chaves MEMS em paralelo é dada por:

$$C_{pp} = \frac{\varepsilon_0 w W}{g_0 + \frac{t_d}{\varepsilon_r}} \quad (26)$$

A capacitância devida ao efeito de borda, em inglês *Fringing Capacitance*,  $C_f$ , é parte substancial da capacitância total representando de 20 a 60 % da capacitância do modelo de placas paralelas,  $C_{pp}$ , dependendo das dimensões da ponte e da altura [24].

A razão entre as capacitâncias nas posições atuado e não atuado é dada por:

$$\frac{C_D}{C_U} = \frac{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{t_d}}{\frac{\varepsilon_0 A}{g_0 + t_d / \varepsilon_r} + C_f} \quad (27)$$

Analisando essa relação e visando maximizá-la, parece apropriado que a camada de dielétrico seja o mais fina possível. Todavia, é impraticável depositar substratos com espessuras menores que 1.000 Å para garantir que a tensão de ruptura do dielétrico seja maior que a tensão de operação usual de chaves MEMS.

Quanto a resistência em série, existem dois componentes para a resistência em série da chave MEMS. O primeiro deles,  $R_{s1}$ , ocorre em função das perdas da linha de transmissão e pode ser calculado por:

$$R_{s1} = 2Zc\alpha l \quad (28)$$

onde,

$\alpha$  é a perda da linha em Np/m;

$l$  é o comprimento da linha.

Também é possível calcular  $R_{s1}$  através da medição da atenuação na linha CPW. O segundo componente,  $R_s$ , é causado apenas pela membrana MEMS e é bastante mais complexo de se calcular, devido à forma da distribuição de correntes na posição atuado e não atuado. Entretanto, essa resistência pode ser determinada através da medição dos parâmetros S.

A perda em uma chave MEMS é derivada dos parâmetros S através de

$$Perda = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (29)$$

A perda da chave é composta de duas parcelas: a perda na linha de transmissão abaixo da ponte e a perda na ponte MEMS. A perda na ponte é:

$$P_{perda} = I_s^2 R_s \quad (30)$$

onde,

$I_s$  é a corrente da ponte.

No estado não atuado e para  $S_{11} < -13$  dB, no caso,  $Z_s \gg Z_c$ , e a perda pode ser aproximada por:

$$Perda = \omega^2 C_u R_s Z_c \quad (31)$$

Na posição atuada e para  $S_{21} > -10$  dB, no caso,  $Z_s \ll Z_c$  e a perda pode ser calculada por:

$$Perda = \frac{4R_s}{Z_c} \quad (32)$$

O coeficiente de reflexão no estado não atuado é dado por:

$$S_{11} = \frac{-j\omega C_u Z_c}{2 + j\omega C_u Z_c} \quad (33)$$

Supondo  $\omega \cdot C_u \cdot Z_c \ll 2$ , o coeficiente de reflexão resulta em:

$$|S_{11}|^2 = \frac{\omega^2 C_u^2 Z_c^2}{4} \quad (34)$$

Quanto ao coeficiente de isolamento no estado atuado

$$|S_{21}|^2 \cong \begin{cases} \frac{4}{\omega^2 C_d^2 Z_c^2}, & \text{para, } f \ll f_0 \\ \frac{4R_s^2}{Z_c^2}, & \text{para, } f = f_0 \\ \frac{4\omega^2 L}{Z_c^2}, & \text{para, } f \gg f_0 \end{cases} \quad (35)$$

onde,

$f_0$  é a frequência de ressonância da chave na posição atuada.

O desempenho de uma chave em altas frequências não é de fácil determinação. Sua frequência de corte, empregando o modelo simplificado acima, é

dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s C_u} \quad (36)$$

Goldsmith et. al em [22] verificou que  $f_c$  para chaves MEMS é da ordem de 2 THz, o que representa no mínimo uma melhoria de 2 ordens de grandeza em relação às frequências de corte alcançadas com diodos PIN.

Embora o modelo de circuito RLC permita uma rápida análise de uma chave, ele é preciso para frequências até alguns GHz. Com o aumento da frequência de operação, as dimensões elétricas da chave continuam aumentando. Assim, a diferença de fase entre a entrada e a saída da chave pode ser de alguns graus. Com isso, as tensões aplicadas em diferentes pontos do capacitor, por exemplo, são diferentes, o que invalida o modelo. Desse modo, torna-se razoável considerar chaves MEMS como elementos de circuitos distribuídos quando a frequência é alta o bastante para introduzir uma diferença de fase de alguns graus através da chave.

Resultados mais realistas de circuito empregando de chaves MEMS podem ser obtidos com o emprego de técnicas de simulação eletromagnética sofisticadas, como serão explorados nesse trabalho. Várias empresas e universidades desenvolvem chaves MEMS paralelas, um exemplo é a chave desenvolvida pela Raytheon [22,47] e apresentada na Figura 4.11. O comprimento dessa chave varia entre 270 e 350  $\mu$  m e a largura entre 50 e 200  $\mu$  m.

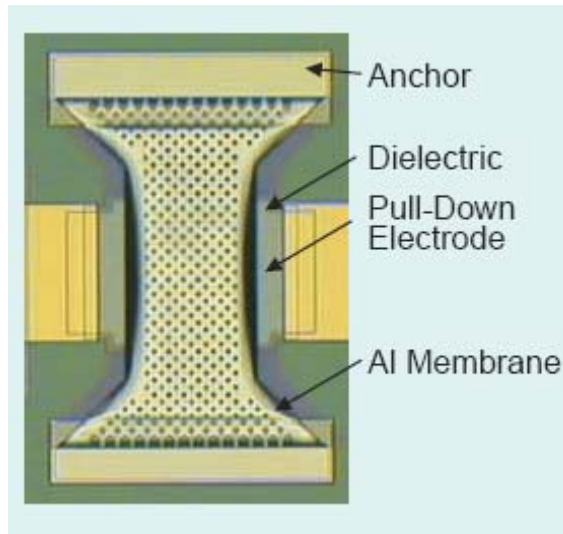


Figura 4.11 Chave em Paralelo capacitiva desenvolvida pela Raytheon.

#### 4.6.2 Modelo de chaves em série

Em uma chave MEMS em série, há uma separação (circuito aberto) na linha de transmissão, que no estado não atuado, resulta em alta isolação. No estado atuado a separação é fechada (curto circuito elétrico) por uma alavanca metálica, resultando em baixa isolação. Nesse caso a alavanca entra põe em contato as duas partes da linha de transmissão, que se encontravam separadas. Quando a tensão de operação é removida, a alavanca retorna a sua posição original devido a forças de restauração. Um circuito equivalente de uma chave em MEMS de RF capacitiva em serie é apresentado na Figura 4.12.

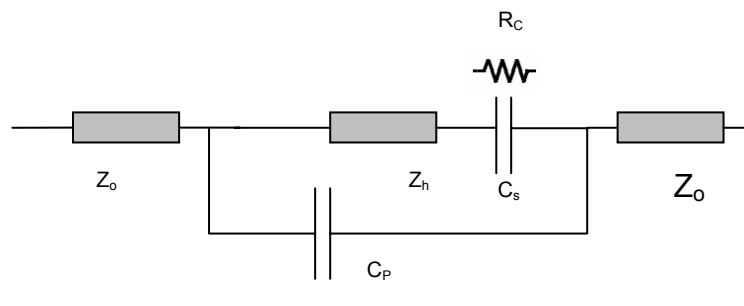


Figura 4.12 Circuito equivalente de uma chave em série.

A capacitância na posição não atuada é composta da capacitância em série,  $C_s$ , entre a linha de transmissão e a alavanca metálica e da capacitância parasita,  $C_p$ ,



entre as terminações da linha de transmissão. A capacitância total é a mesma para contato metálico ou capacitivo, de uma ou duas áreas de contato e é dado por:

$$C_u = \frac{C_s}{2} + C_p \quad (37)$$

Para uma chave em linha com uma única área de contato, a capacitância total é dada por:

$$C_u = C_s + C_p \quad (38)$$

A capacitância em série,  $C_s$ , é composta de uma parcela dada pelo modelo de placas paralelas e outra dada por uma capacitância devida ao efeito de borda, como nas chaves em paralelo.

A resistência em série de chaves MEMS corresponde à soma da resistência de um pequeno trecho da linha de transmissão com a resistência de contato DC. A resistência de contato depende da área de contato, da força mecânica aplicada e da qualidade do contato metálico. Em chaves em série, a resistência depende do seu comprimento e da sua largura, sendo dada por

$$R_S = 2.R_C + 2R_{s1} + R_l, \text{ para chaves de alavanca com duas áreas de contato,}$$

$$R_S = R_C + 2R_{s1} + R_l, \text{ para chaves em linha com uma área de contato,}$$

$$R_S = 2R_{s1} + R_l, \text{ para chaves de contato capacitivas.}$$

A perda intrínseca das chaves MEMS em série (desconsiderando a perda na linha de transmissão) é dada por:

$$Perda = \frac{4R_S Z_c}{|Z_x + 2Z_c|^2} \quad (39)$$

Na posição atuada,  $Z_s = R_s + j\omega L$ , e a perda se torna:

$$Perda = \frac{R_s}{Z_c}, \text{ para } \omega L \ll Z_c \quad (40)$$

O coeficiente de reflexão para chaves em série na posição não atuada é dado por:

$$|S_{21}|^2 = 4.\omega^2.C_u^2.Z_C^2 \quad (41)$$

onde,

$Z_C$  é a impedância da linha de transmissão.

A perda por inserção é calculada por:

$$|S_{21}|^2 = 1 - \frac{R_s}{Z_c} \quad (42)$$

Sua frequência de corte, empregando o modelo simplificado acima, é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_u R_s} \quad (43)$$

Um exemplo de chave em série foi a chave produzida pelo Rockwell Science Center [48], ilustrada na Figura 4.13. O comprimento dessa chave é de 250  $\mu\text{m}$  e a largura é de 150  $\mu\text{m}$ .

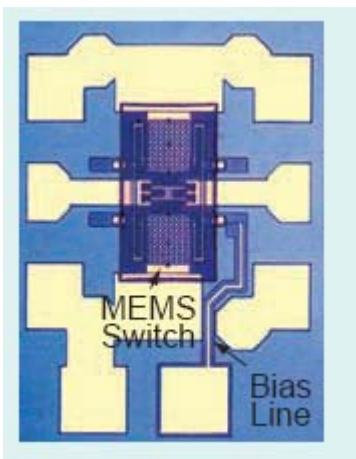


Figura 4.13 Chave em série desenvolvida pelo Rockwell Science Center.

## 4.7 Considerações de projeto

O projeto de uma chave MEMS deve levar em consideração características como confiabilidade, tensão de fechamento, faixa de valores de capacitância e a relação de capacitância  $C_D/C_U$ . Em linhas gerais, estruturas MEMS com suporte de

armadura estreito e grande área de contato de membrana, têm tensão de fechamento mais baixas que estruturas com suporte de armadura e contatos mais largo de áreas da membrana menores. Entretanto, estruturas com baixa tensão de fechamento requerem processos de controle mais exatos e geralmente são mais susceptíveis a falhas.

Quando são utilizadas chaves MEMS, requer-se um conhecimento perfeito das capacitâncias nas posições levantada/abaixada. Assim, estruturas MEMS mais simples são preferidas em relação às mais complexas, onde as capacitâncias por efeito de borda são difíceis de calcular. Por este motivo, muitos projetos resultam em uma estrutura de ponte de membrana retangular para simplificar a modelagem do dispositivo sem sacrificar o desempenho da chave.

Usualmente, uma alta tensão de pull-down é necessária para fechamento da chave MEMS, mas uma tensão muito menor que essa é suficiente para manter a membrana na posição abaixada. Nesta posição o espaçamento entre os eletrodos do superior e inferior é reduzido e uma pequena polarização DC não gera um alto campo elétrico e uma forte força eletrostática irá balancear a força elástica do topo do metal.

A taxa de falhas de chaves MEMS capacitivas é dominada pelo atrito (*stiction*) entre a camada dielétrica e o metal devido à grande área de contato da chave. A maior força é devido aos efeitos de carga (*charging*) na camada dielétrica de nitreto de silício e, dependendo de sua polaridade, isto pode causar o levantamento da chave no estado atuado e resultar em um aumento da tensão de fechamento não permitindo uma utilização posterior da chave.

A injeção de carga é exponencial com a tensão e a redução de tensão de fechamento em 6V pode resultar num aumento de 10 vezes no tempo de vida da chave MEMS [40] . Isto não leva por consequência ao projeto de chaves de baixa tensão (5-10V) e baixo coeficiente elástico, pois esta chave tem uma baixa força restauradora. Uma tensão de fechamento entre 25 e 30 V é a melhor resposta para equilibrar esses fatores.

Conforme verificado neste capítulo, existe uma grande quantidade de requisitos que devem ser considerados no projeto de chaves MEMS com níveis de importância variável conforme a aplicação. Frequentemente existem requisitos conflitantes. O compromisso entre todos eles e a seleção do componente final é fortemente guiado pelo objetivo das aplicações.

## Capítulo 5

# Chaves MEMS Capacitivas Paralelas sobre CPW

Neste capítulo, a modelagem e resultados de simulação de Chaves MEMS capacitivas paralelas sobre CPW serão apresentados. O aumento da banda de operação de chaves MEMS, que é um assunto muito estudado atualmente, será o objeto principal deste capítulo. Na seção 5.1, são discutidos os fundamentos do software de simulação utilizado para análise das chaves. A seção 5.2 apresenta uma estrutura CPW e a seção 5.3. apresenta a modelagem da perda de retorno e da isolamento de chaves MEMS paralelas. Na seção 5.4, os resultados de simulações para uma chave paralela convencional são apresentados. Na seção 5.5, são apresentadas as chaves otimizadas neste trabalho, com o intuito de aumentar-se a banda de operação, e os resultados de suas simulações.

### 5.1 Software de simulação

Para as simulações eletromagnéticas foi utilizado o software EM3DS [49] (*Electromagnetic 3-D Solver*), da Universidade de Ancona, Itália, do qual foi obtida uma licença temporária para a realização deste estudo.

O EM3DS é uma ferramenta de simulação no domínio da frequência voltada para a análise de estruturas quasi-planares e planares sobre substratos complexos, onde são consideradas as espessuras finitas dos condutores e as discontinuidades do dielétrico. Este software de simulação também leva em conta a condutividade finita dos condutores e as perdas dos dielétricos, bem como sua espessura.

A estrutura em análise é mantida em camadas, mas a corrente tem direção arbitrária ( $J_x$ ,  $J_y$ , e  $J_z$  estão sempre presentes no modo 3D), mesmo na superfície de

um condutor fino. Isto permite também realizar a modelagem completa de descontinuidades no dielétrico, incluindo ressoadores dielétricos. Os resultados obtidos são muito próximos dos encontrados na prática.

Este software utiliza o Método dos Momentos e se baseia na formulação GTRD - *Generalized Transverse Resonance-Diffraction*, apresentada em [50]. O método é apropriado para análise de circuitos de ondas milimétricas/micrométricas em uma única pastilha. Este método é aplicável com sucesso a várias estruturas como capacitores metal-isolante-metal, indutores em espiral e chaves capacitivas MEMS.

A primeira etapa do método é o cálculo das funções diádicas de Green ou DGF - *Dyadic Green's Functions* da estrutura. Funções de Green são uma importante ferramenta matemática aplicável em áreas teóricas da física como Mecânica, Eletromagnetismo, Acústica, Física dos Sólidos e Teoria de Partículas Elementares. Elas tiveram seu conceito inicial desenvolvido pelo matemático britânico George Green por volta de 1830.

O cálculo das funções de Green é uma etapa comum em aplicações utilizando o Método dos Momentos. As DGF empregando GTRD devem relacionar o campo elétrico com a densidade volumétrica de corrente. Uma dificuldade que se apresenta é que a representação deve ser válida inclusive nas regiões das fontes.

Assim,

$$\vec{E}(r) = -\iiint_V Z(r, r') \vec{J}(r') dr' \quad (44)$$

onde,

V é o volume para o qual as correntes não são evanescentes;

Z é a função diádica de Green, incluindo as perdas dielétricas da definição da permissividade complexa.

As correntes são obtidas através da imposição da Lei de Ohm, no caso de condutores com perdas. Esta condição deve ser utilizada em lugar da condição de

campos elétricos tangenciais nulos empregada nos Método dos Momentos no domínio espectral ou SD – *Spectral Domain*.

Ainda mais genericamente,  $\vec{J}$  pode ser uma corrente de deslocamento usada para modelar um corpo dielétrico finito. Neste caso, impõe-se a condição

$$\vec{E}(r) = \frac{\vec{J}(r)}{j\omega\epsilon_0(\tilde{\epsilon}(r) - \tilde{\epsilon}'(r))} \quad (45)$$

onde,

$\tilde{\epsilon}$  é a permissividade complexa do dielétrico;

$\tilde{\epsilon}'$  é a permissividade complexa do meio que envolve do material.

Uma excitação do tipo *delta-gap* deve ser imposta para se obter uma equação integral característica do problema. Admite-se que toda a estrutura está fechada por paredes elétricas e, em algum ponto ao longo das linhas de alimentação, um campo elétrico de amplitude constante, ortogonal ao plano virtual e cortando a linha do condutor é aplicado. Este plano pode ser definido em uma posição arbitrária ao longo das três direções.

$$\vec{E}_0(r) = -\delta(v - v_0)\vec{u}, \text{ para } r \text{ pertencente à linha de alimentação } p \quad (46)$$

onde,

$v$  é igual a  $x$ ,  $y$  ou  $z$ ;

$\vec{u}$  é a direção normal ao plano definido.

A condição (45) e a excitação (46) quando aplicadas a (44), fornecem a equação integral

$$\iiint_V \left[ Z(r, r') + \frac{1}{j\omega(\tilde{\epsilon}(r) - \tilde{\epsilon}'(r))} I(r, r') \right] \vec{J}(r') dr' = \delta(v - v_0) \text{rect}(p) \vec{u} \quad (47)$$

onde,

$I$  é o operador identidade;

$\text{rect}(p)$  é a função pulso, de amplitude unitária sobre a seção transversal da linha de alimentação na porta  $p$ .

A equação (47) deve ser resolvida no volume dos condutores e nas regiões dielétricas finitas, sem incluir as fronteiras do domínio. Para este fim, o método dos Momentos é aplicado a (47), expandindo-se as correntes desconhecidas como

$$\begin{aligned}
 J_x(x, y, z) &= \sum_{i=1}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{k=1}^{N_z} PWS(x, x_i, x_{i+1}) rect(y - y_j) rect(z - z_k) \\
 J_y(x, y, z) &= \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{k=1}^{N_z} rect(x - x_i) rect(y - y_j) rect(z - z_k) \\
 J_z(x, y, z) &= \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{k=1}^{N_z-1} rect(x - x_i) rect(y - y_j) PWS(z, z_k, z_{k+1})
 \end{aligned} \tag{48}$$

onde,

$PWS$  são funções senoidais por partes, assimétricas e com argumento  $k_0$ , o número da onda do vácuo;

$k_0$  é definido como  $2\pi/\lambda$ ,

$\lambda$  é o comprimento de onda no dielétrico

$N_x, N_y, N_z$  são os números de intervalos das subseções.

A expressão (48) é aplicável a uma ampla variedade de problemas eletromagnéticos. A modelagem do efeito pelicular é automaticamente considerada, com rigor, bastando apenas tomar um número de subseções na direção  $y$  suficientemente grande para aproximar a distribuição real de correntes. Assim cada subseção deve ser menor que a profundidade pelicular.

## 5.2 Guia de onda coplanar

O termo “linhas coplanares” é usado para linhas de transmissão onde todos os condutores estão no mesmo plano [51]. Guias de onda coplanares ou CPW - *Coplanar Waveguides* consistem de um trilha condutora central com duas trilhas de “planos” de terra paralelas no mesmo plano da trilha central, conforme mostrado na Figura 5.1.



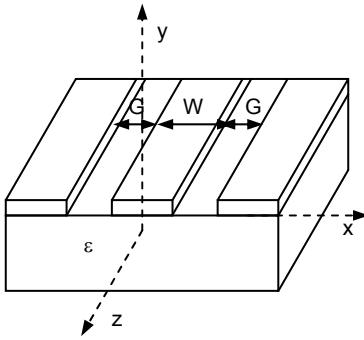


Figura 5.1 Guia de Onda Coplanar

Uma análise quase-estática pode ser realizada através de uma transformação conforme para o caso em que a espessura do dielétrico é suficientemente grande e pode ser considerada infinita no modelo analítico. A espessura da trilha central e dos “planos” terra são consideradas desprezíveis. A transformação conforme que mapeia o plano dielétrico verdadeiro  $z_1$ , indicado na Figura 5.2 (a), no interior do retângulo do plano  $z$ , indicado na Figura 5.2 (b), é a seguinte

$$\frac{dz}{dz_1} = \frac{A}{(z_1^2 - a_1^2)^{1/2}(z_1^2 - b_1^2)^{1/2}} \quad (49)$$

onde,

$A$  é uma constante.

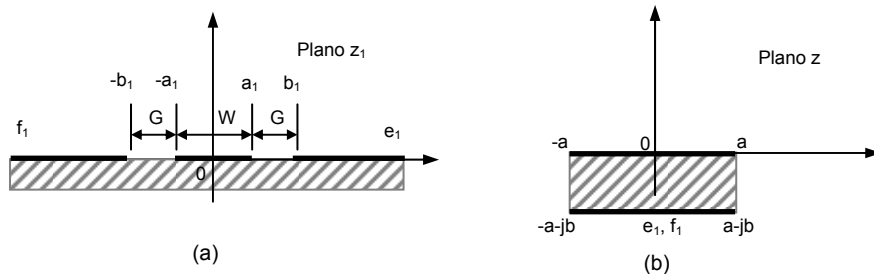


Figura 5.2 Transformação conforme para plano de CPW

Na Figura 5.2 (b) as superfícies dos condutores e a interface dielétrico-ar são representadas pelo topo, pela base e pelos lados do retângulo.

A relação  $a/b$  do retângulo no plano  $z$  pode ser calculada pela integração

$$a + jb = \int_0^{b_1} \frac{A dz_1}{(z_1^2 - a_1^2)^{1/2}(z_1^2 - b_1^2)^{1/2}} \quad (50)$$

sendo dada por

$$\frac{a}{b} = \frac{K(k)}{K'(k)} \quad (51)$$

onde,

$K(k)$  é a integral elíptica completa de 1º espécie

sendo,

$$k = \frac{a_1}{b_1} = \frac{W}{W + 2G} . \quad (52)$$

A função  $K'(k)$  pode ser expressa em função de  $K(k)$  como

$$K'(k) = K(\sqrt{1-k^2}) \quad (53)$$

A parcela da capacitância por unidade de comprimento da linha correspondente ao semiespaço inferior, ou seja, o que contém o dielétrico, pode ser expressa como

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2a}{b} . \quad (54)$$

A capacitância total por unidade de comprimento, incluindo a parcela correspondente ao semiespaço será, então

$$C_T = (\varepsilon_r + 1) \varepsilon_0 \frac{2a}{b} . \quad (55)$$

Usando-se a aproximação quase-estática pode-se escrever a velocidade de fase como

$$v_{cp} = \frac{c}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}} \quad (56)$$

e a impedância característica do CPW pode ser escrita como

$$Z_C = \frac{1}{C_T v_{cp}} = \frac{30\pi}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}}} \frac{K'(k)}{K(k)} \quad (57)$$

onde,

$c$  é a velocidade da luz.

Expressões simples e precisas para relação  $K/K'$  podem ser calculadas por

$$\frac{K(k)}{K'(k)} = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln\left(2 \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right), & \text{para } 0,707 \leq k \leq 1 \\ \pi \ln\left(2 \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right), & \text{para } 0 \leq k \leq 0,707 \end{cases} . \quad (58)$$

Estruturas CPW são comumente empregadas em chaves MEMS paralelas, pois podem proporcionar uma maior relação entre as capacitâncias no estado atuado e não atuado.

### 5.3 Modelagem da perda de retorno e isolação

Uma chave MEMS capacitiva paralela montada sobre um guia de onda coplanar pode ser modelada como mostrado na Figura 5.3. A região de conexão propriamente dita da chave está conectada a uma carga de impedância  $Z_0$  e a um gerador de força eletromotriz  $E_G$  e de impedância interna  $Z_0$ , através de linhas de transmissão de impedância característica  $Z_C$  da própria chave.

A chave paralela tem alta isolação quando a linha de transmissão é curto-circuitada. Assim, a condição ideal nesse caso seria um curto-circuito galvânico. Entretanto, o contato entre superfícies metálicas provocaria um desgaste no metal após muitos chaveamentos. Para se evitar esse problema, no caso de circuitos de RF, existe a possibilidade de realizar um contato capacitivo, separando-se os condutores através de uma camada de material dielétrico.

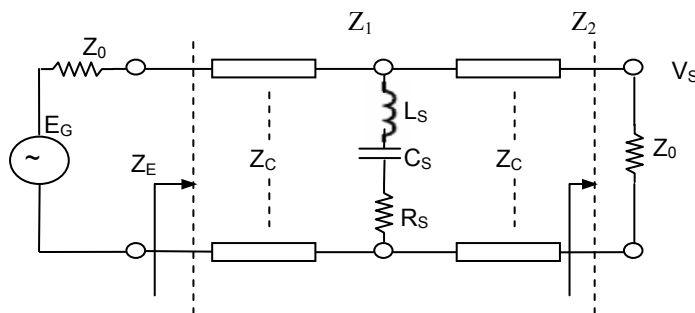


Figura 5.3 Circuito equivalente da chave MEMS em paralelo

O circuito equivalente da região de chaveamento tem impedância dada por

$$Z_S = R_S + j\omega L_S + \frac{1}{j\omega C_S} \quad (59)$$

onde,

$C_S = C_U$  ou  $C_D$  dependendo do estado da chave;

$L_S$  : indutância parasita da chave;

$R_S$  : resistência de perdas da chave.

A frequência de ressonância do circuito  $LC$  no estado atuado é

$$f_{0D} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_S C_D}} \quad (60)$$

No estado não atuado, a frequência de ressonância é muitas vezes superior a  $f_{0D}$  em virtude da relação  $C_D / C_U \gg 1$  e não será necessário considerá-la neste trabalho. Assim, a impedância  $Z_s$ , no estado não atuado, pode ser aproximada por

$$Z_{SU} \cong \frac{1}{j\omega C_U} \quad (61)$$

e no estado atuado por

$$Z_{SD} \cong \begin{cases} \frac{1}{j\omega C_D} & \text{para } f \ll f_{0D} \\ R_S - \frac{2}{j\omega C_D} \frac{\Delta\omega}{\omega_{0D}} & \text{para } f \approx f_{0D} \\ j\omega L_S & \text{para } f \gg f_{0D} \end{cases} \quad (62)$$

As impedâncias  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_E$ , da Figura 5.3, são

$$Z_1 = Z_C \frac{Z_0 + jZ_C T}{Z_c + jZ_0 T} \quad (63)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 Z_S}{Z_1 + Z_S} \quad (64)$$

$$Z_E = Z_C \frac{Z_2 + jZ_C T}{Z_c + jZ_2 T} \quad (65)$$

onde,

$$T = \operatorname{tg}(k_0 l);$$

$Z_s$  é a impedância da chave dada por (57);

$Z_c$  é a impedância do guia de onda .

O coeficiente de reflexão na entrada do guia de onda e o coeficiente de transmissão referidos a  $Z_0$ , para a chave da Figura 5.3, são definidos respectivamente por

$$\rho = \frac{Z_E/Z_0 - 1}{Z_E/Z_0 + 1} \quad (66)$$

$$\tau = \frac{2V_S}{E_G} \quad (67)$$

onde,

$Z_E$  e  $V_S$  são obtidas através de equações convencionais das teorias de circuito e de linha de transmissão.

A perda de retorno e a perda de inserção, usualmente denominada isolação no estado atuado, são expressas, respectivamente, por

$$PR = -10 \log(|\rho|^2) \quad (68)$$

$$PI = -10 \log(|\tau|^2). \quad (69)$$

É possível um equacionamento para se determinar a perda de retorno, a isolação e a perda de inserção em termos  $Z_E$ ,  $Z_1$  e  $Z_2$ . O módulo do coeficiente de reflexão está relacionado com a taxa de onda estacionária ou VSWR - Voltage Standing-Wave Ratio pela seguinte expressão

$$VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}. \quad (70)$$

Para o caso em que  $Z_C = Z_0$  [43], obtém-se, no estado não atuado,

$$|\rho_U|^2 = \left( 1 + \frac{4}{(\omega C_U Z_0)^2} \right)^{-1} \quad (71)$$

desprezando-se os efeitos do resistor e do indutor, e

$$|\tau_U|^2 = \frac{4|V_{SU}|^2}{E_G^2} \quad (72)$$

Para o estado atuado,

$$|\tau_D|^2 = \frac{4|V_{SD}|^2}{E_G} \quad (73)$$

$$|\tau_D|^2 \cong \begin{cases} \frac{4}{\omega^2 C_D^2 Z_0^2} & \text{para } f \ll f_{0D} \\ \frac{4R_S^2}{Z_0^2} & \text{para } f = f_{0D} \\ \frac{4\omega^2 L_S}{Z_0^2} & \text{para } f \gg f_{0D} \end{cases} \quad (74)$$

## 5.4 Chave convencional

A chave desenvolvida na Universidade de Michigan [43] será utilizada como exemplo neste trabalho e será denominada chave convencional. Sua estrutura é apresentada na Figura 4.5 e na Figura 4.6 e suas dimensões são  $L = 420 \mu\text{m}$ ,  $w = 80 \mu\text{m}$ ,  $G = 60 \mu\text{m}$ ,  $W = 100 \mu\text{m}$  e  $g = 1,5 \mu\text{m}$ . Esta chave tem  $Z_C = Z_0$  e o circuito equivalente da região de chaveamento tem  $R_S = 0,07 \Omega$ ,  $L_S = 7,7 \text{ pH}$ , e  $C_S = C_U = 70 \text{ fF}$ , no estado não atuado, e  $C_S = C_D = 2.700 \text{ fF}$ , no estado atuado.

Desprezando-se inicialmente  $L_S$  e  $R_S$ , no estado atuado, a isolação,  $I$ , cresce com a freqüência, enquanto que no estado não atuado a perda de retorno,  $PR$ , decresce com a freqüência, conforme se verifica na Figura 5.4. Se forem estabelecidos critérios de isolação mínima,  $I_{min}$ , e perda de retorno mínima,  $PR_{min}$ , esse comportamento intrínseco da chave conduz a uma freqüência mínima de utilização,  $f_{min}$ , limitada por isolação e uma freqüência máxima de utilização,  $f_{max}$ , limitada por perda de retorno, conforme apresentado na Figura 5.4. Para um critério de isolação mínima de 15 dB, por exemplo, obtém-se  $f_{min} = 13 \text{ GHz}$  e para um critério de perda de retorno mínima de 10 dB, obtém-se  $f_{max} = 31 \text{ GHz}$ . A banda de operação da chave, dada por  $f_{max} - f_{min}$ , é então de 19 GHz, para esses critérios de

isolação e perda de retorno mínimas.

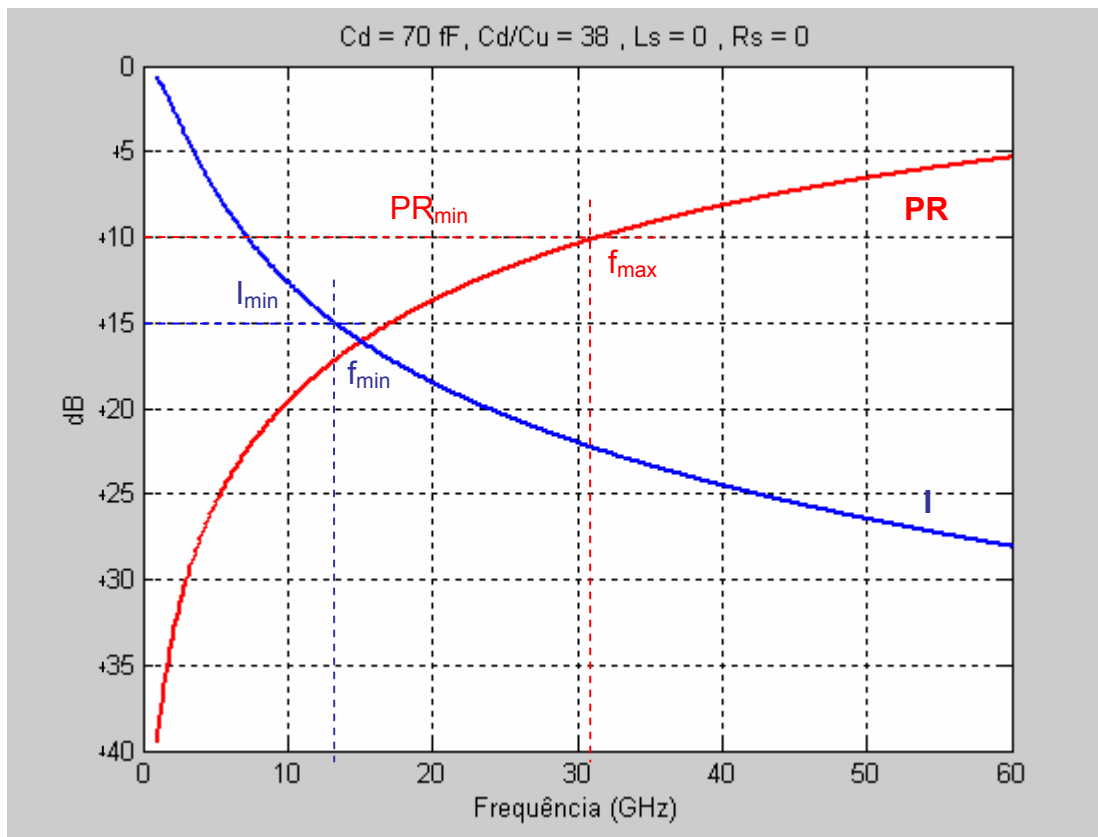


Figura 5.4 Isolação e perda de retorno em função da frequência indicando  $f_{max}$  e  $f_{min}$  para  $PR_{min} = 10 \text{ dB}$  e  $I_{min} = 15 \text{ dB}$

Na Figura 5.4 e na Figura 5.5, um ponto notável é o de cruzamento das curvas. Este ponto pode ser entendido como uma figura de mérito da chave e representa uma banda de operação nula para critérios de perda de retorno e isolação mínimas iguais aos dados por sua ordenada. No caso da chave considerada, tem-se  $f_{min} = f_{max} = f_c = 15,1 \text{ GHz}$  e  $PR_{min} = I_{min} = 16,1 \text{ dB}$ , nesse ponto, conforme indicado na Figura 5.5.

Os critérios de perda de retorno e isolação mínimos tomados como exemplo nas definições de  $f_{min}$  e  $f_{max}$ , são pouco exigentes para o desempenho de chaves de RF. Um critério mais realista seria  $PR_{min} = I_{min} = 20 \text{ dB}$ . No caso da chave em questão, esses critérios são mais exigentes que os dados pelo ponto de cruzamento das curvas, não sendo, portanto factíveis, pois resultam em  $f_{min} > f_{max}$ . A Figura 5.5 ilustra esse problema, mostrando que a aplicação dos critérios de 20 dB para a

chave em estudo resultam em  $f_{max} = 9,5$  GHz e  $f_{min} = 23,7$  GHz.

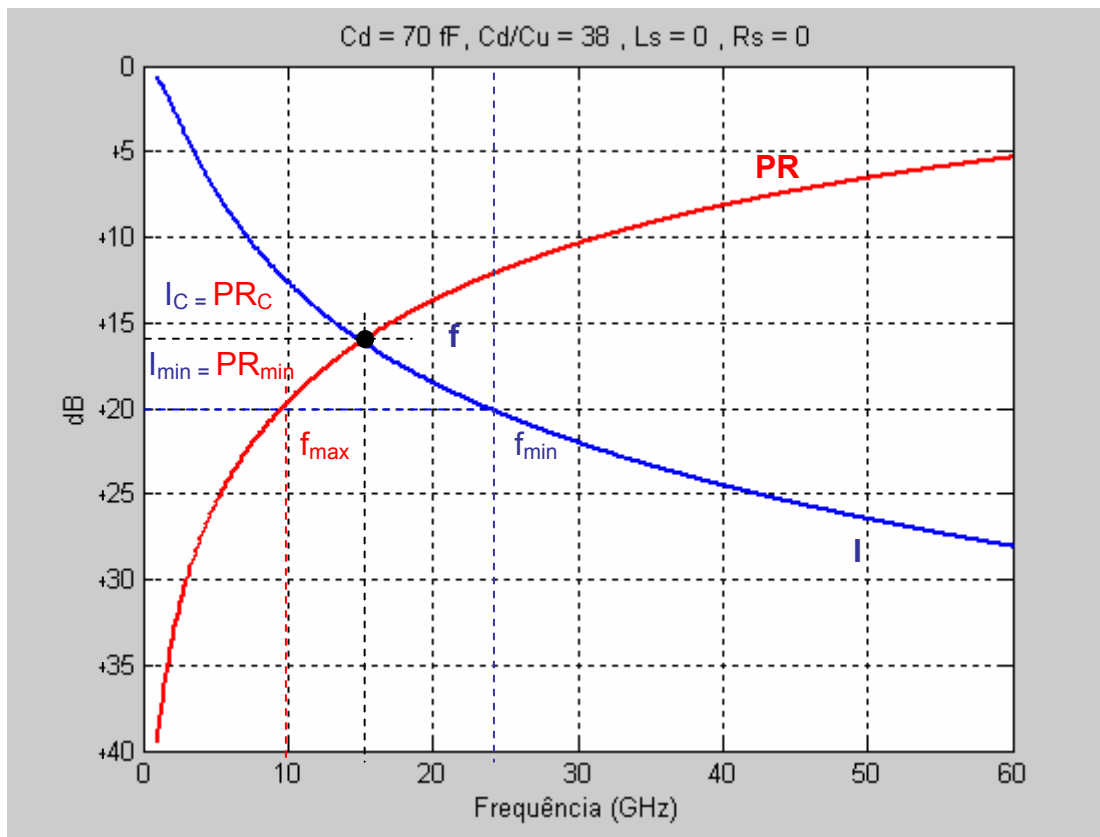


Figura 5.5 Isolação e perda de retorno em função da frequência indicando  $f_{max}$ ,  $f_{min}$  para  $PR_{min} = I_{min} = 20$  dB e o ponto de cruzamento das curvas

A indutância  $L_S$  introduz uma ressonância com a chave no estado atuado, a qual é nitidamente perceptível na curva de isolamento, conforme pode ser observado na Figura 5.6.  $L_S$  introduz também uma ressonância com a chave no estado não atuado cuja frequência é muito superior à máxima frequência de operação da chave, devido à relação  $C_D/C_U$  ser muito maior que 1. Por um lado, a frequência mínima definida por isolamento até diminui devido a  $L_S$ , deslocando o ponto de cruzamento para a esquerda e para baixo, o que é um benefício marginal para o aumento da banda de operação. Por outro lado, uma frequência máxima limitada por isolamento na faixa de frequências de interesse pode surgir, o que também poderá limitar o uso da chave em frequências muito altas.

Num caso prático,  $f_{max}$  deve ser então escolhida como a menor das frequências máximas definidas por isolamento e perda de retorno. A banda de



operação da chave incluindo os efeitos de  $L_s$  pode ser determinada através da Figura 5.6, onde foi considerado  $L_s = 7,7$  pH. Para um critério de isolamento e perda de retorno mínimas de 20 dB, obtém-se  $f_{max} = 9,5$  GHz que não sofreu alteração e  $f_{min} = 17,7$  GHz, que teve uma diminuição de 6 GHz com a introdução da indutância. Entretanto,  $f_{max} < f_{min}$ , o que ainda resulta em uma banda de operação nula. No caso da chave considerada, no ponto de cruzamento, tem-se  $f_c = 13,8$  GHz e  $PR_{min} = I_{min} = 16,8$  dB.

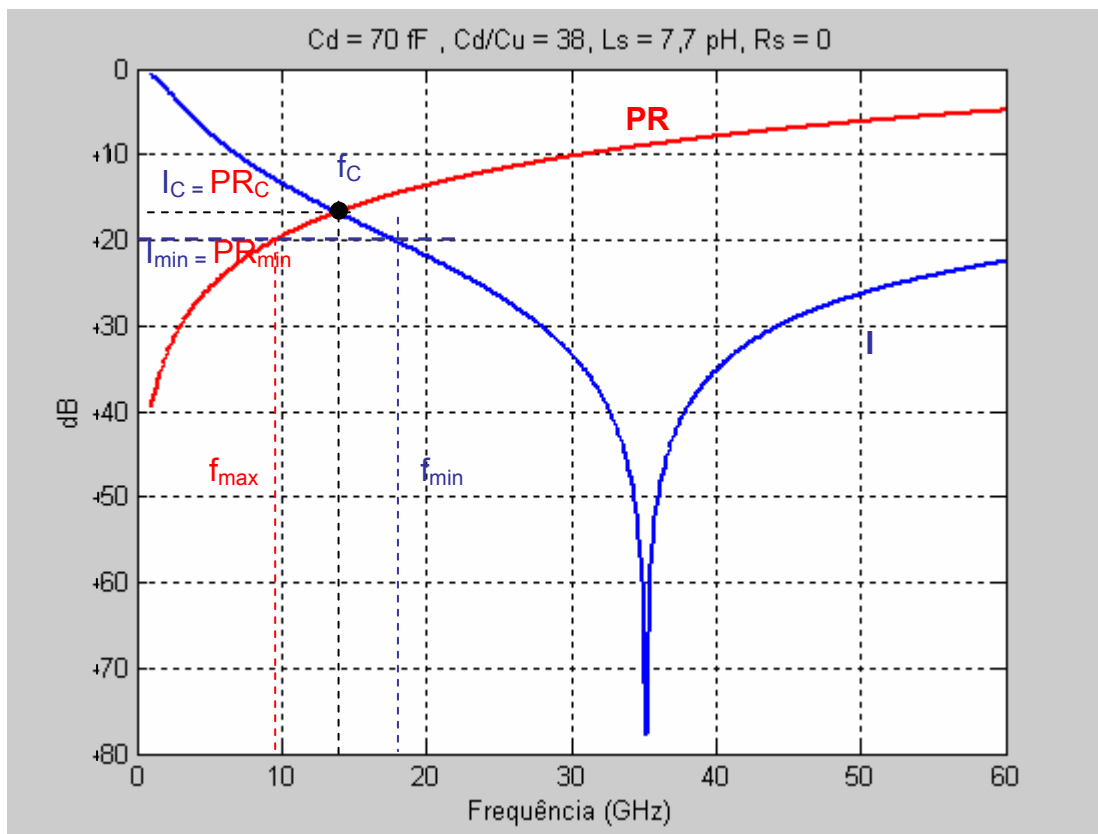


Figura 5.6 Isolação e perda de retorno em função da frequência indicando  $f_{max}$ ,  $f_{min}$  para  $PR_{min} = I_{min} = 20$  dB e ponto de cruzamento das curvas com indutância

A resistência  $R_s$  na prática somente diminui a isolação na ressonância da chave, como pode ser observado através de comparação entre a Figura 5.6 e a Figura 5.7. A isolação na ressonância, se alterou de 78 dB para 51 dB. Para as outras frequências as curvas se mantiveram praticamente inalteradas com a introdução da resistência  $R_s$  de  $0,07 \Omega$ .

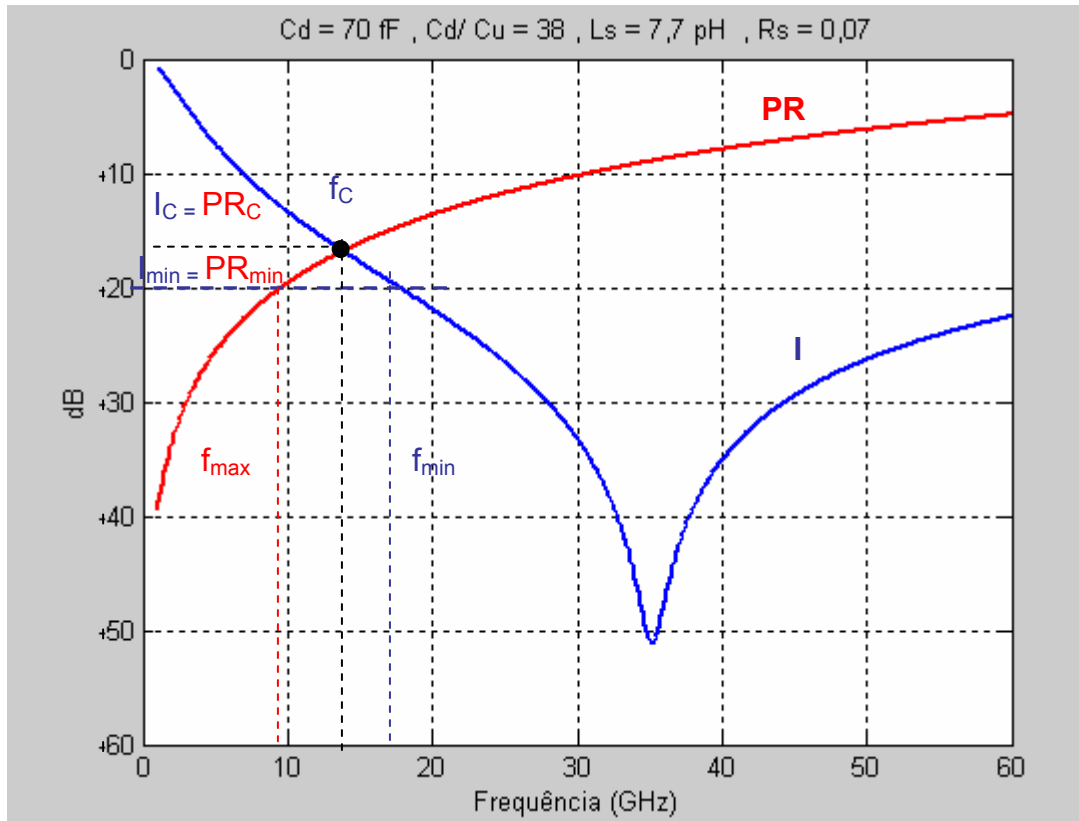


Figura 5.7 Isolação e perda de retorno em função da frequência indicando  $f_{max}$ ,  $f_{min}$  para  $PR_{min} = I_{min} = 20$  dB e ponto de cruzamento das curvas com indutância e resistência

Os resultados apresentados foram obtidos através de simulação empregando-se o modelo de circuitos da Figura 5.3. Esses resultados apresentam boa aderência com as medidas efetuadas no laboratório da Universidade de Michigan para a chave convencional e publicadas em [43], validando o modelo utilizado. Desse modo, o estudo deste trabalho permite concluir que a chave convencional não é utilizável na prática para critérios de 20 dB. Mais adiante no texto, será proposta uma solução para esse problema.

Resolvendo-se agora o problema eletromagnético para essa chave ao invés de se usar o modelo de circuitos, os resultados obtidos também estão em plena concordância com os de [43]. O *software* de simulação utilizado foi o EM3DS conforme discutido na seção 5.1, e as curvas de perda de retorno e isolamento obtidas encontram-se apresentadas na Figura 5.8 e Figura 5.9, respectivamente.

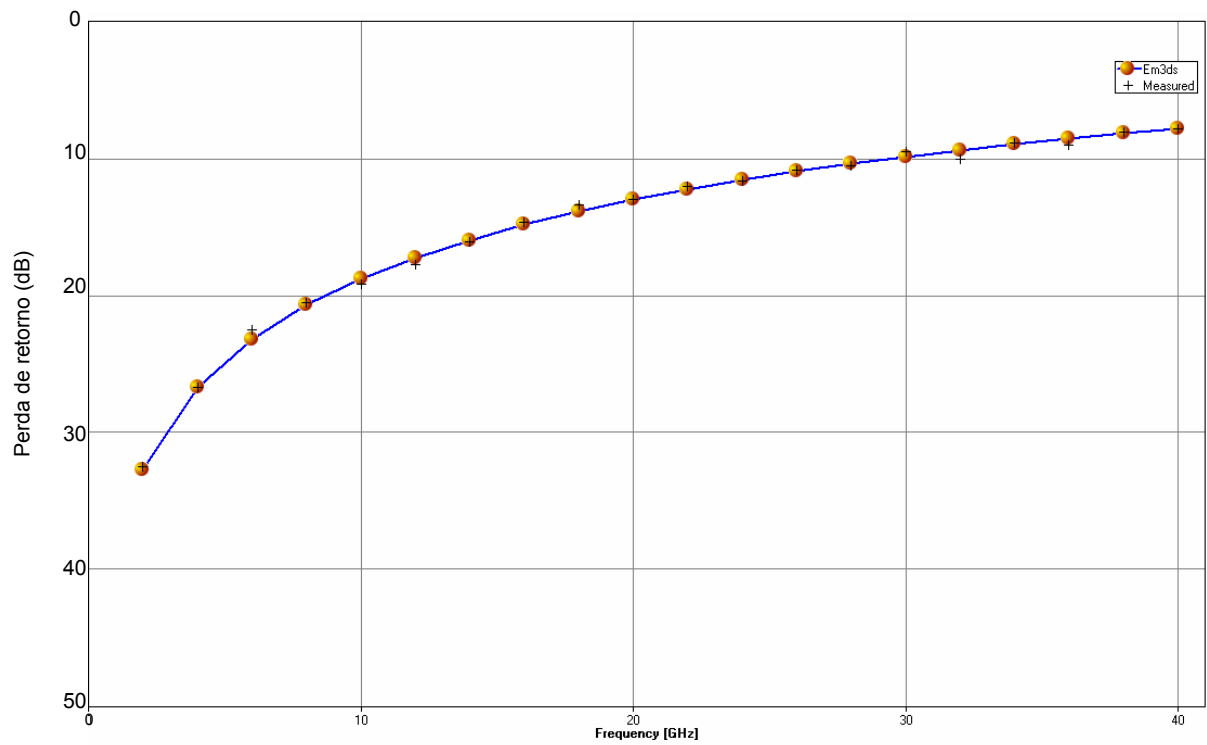


Figura 5.8 Perda de retorno no estado não atuado (em dB) para chave convencional medida e simulada com EM3DS

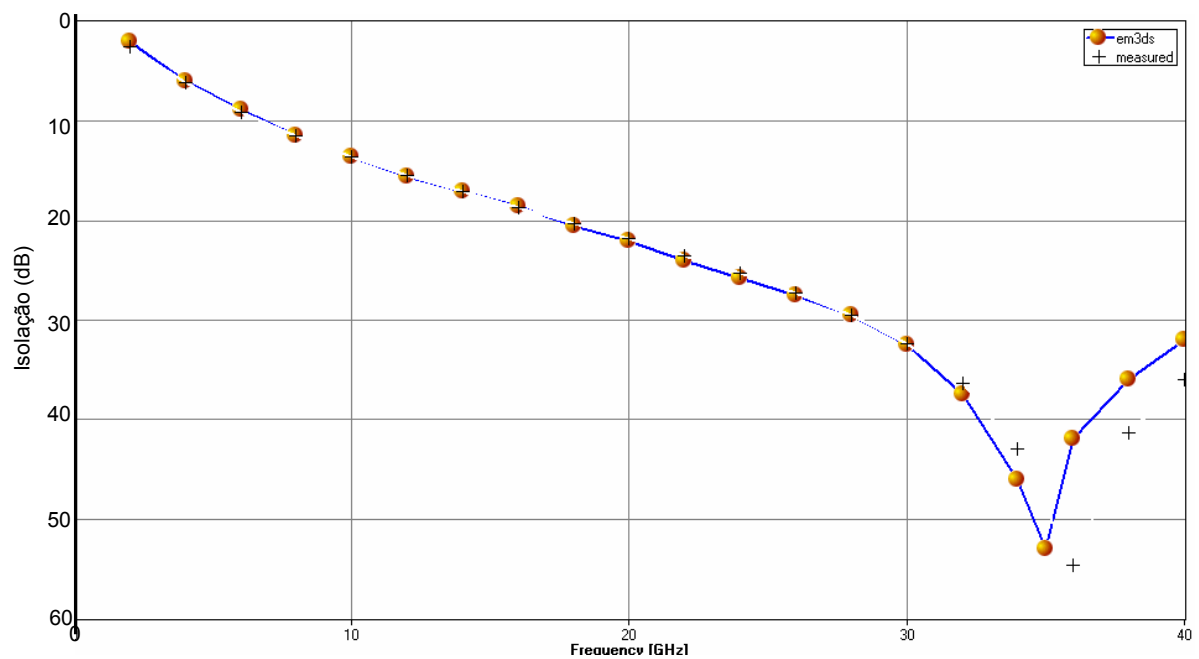


Figura 5.9 Isolação no estado atuado (em dB) para chave de convencional medida e simulada com EM3DS

Em [44], maiores bandas que a da chave de [43] são obtidas combinando-se

duas ou mais chaves para melhorar a isolação e a perda de retorno. Entretanto, o emprego de várias chaves num mesmo componente reduz sua confiabilidade, que já não é muita alta para chaves MEMS de RF comumente disponíveis no estado atual da técnica. Isso é talvez o fator mais importante que tem limitado o emprego de chaves MEMS de RF em sistemas comerciais e, portanto, a solução apresentada em [44] está longe de ser ideal.

Na próxima seção será apresentada uma solução para o aumento da banda de operação.

## 5.6 Chaves Otimizadas

A seguir é apresentada uma solução para melhorar a perda de retorno da chave no estado não atuado que não compromete as outras características da chave e que leva a um aumento da banda de operação. A solução apresentada resulta na elevação de  $f_{max}$  determinada por perda de retorno e é realizada por simples alteração das dimensões das linhas de transmissão de acesso a região de chaveamento. As alterações introduzidas não modificam as dimensões finais da chave.

A perda de retorno no estado não atuado é severamente limitada em altas frequências pela capacitância  $C_u$ . Na chave convencional, esse efeito foi verificado na seção 5.3, tendo ficado claro que um critério de perda de retorno mínima da ordem de 20 dB, combinado com um critério similar para a isolação pode dificultar significativamente a realização de uma chave MEMS de RF do tipo analisado. De fato, para as dimensões da chave escolhida como exemplo, esses critérios inviabilizam sua utilização.

Alterando-se a largura da trilha central do CPW em um determinado trecho fora da região de chaveamento, a perda de retorno apresenta sensível melhora em altas frequências. Num modelo de circuitos simplificado essa redução seria representada como um aumento de indutância em serie da linha de transmissão equivalente. Esse efeito é responsável por um melhor casamento de impedância do circuito global, elevando  $f_{max}$  e assim a banda de operação.

Uma vez que para altas frequências modelos de parâmetros concentrados não representam adequadamente o comportamento da chave faz-se necessário utilizar softwares de simulação eletromagnética para resolver o problema. Com o emprego do simulador EM3DS, dados foram obtidos para diversas combinações de largura e comprimento de parte da trilha central. Uma investigação criteriosa desses dados, combinada com simulações adicionais em um processo iterativo, resultou em uma chave ótima no sentido de banda de operação, sem alteração significativa das outras características originais da chave convencional.

Desse modo, a largura  $W$  das trilhas centrais dos guias de onda de acesso à região de chaveamento, foi reduzida para  $W'$ , em um certo trecho, como mostrado na Figura 5.10. Isso resulta em  $Z_C > Z_0$ . Razões tecnológicas limitam a menor dimensão possível para  $W'$ . Na chave otimizada utilizou-se  $W' = 8 \mu\text{m}$  e  $\ell = 160 \mu\text{m}$ . Na chave de [43],  $W = 100 \mu\text{m}$ ,  $G = 60 \mu\text{m}$ ,  $L = 300 \mu\text{m}$  e  $w = 80 \mu\text{m}$ . Para a chave otimizada  $W' + 2G' = W + 2G = 220 \mu\text{m}$  e as outras dimensões permaneceram inalteradas. Os resultados para a perda de retorno, isolação e perda de inserção estão mostrados nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, respectivamente, e constam em parte de [52].

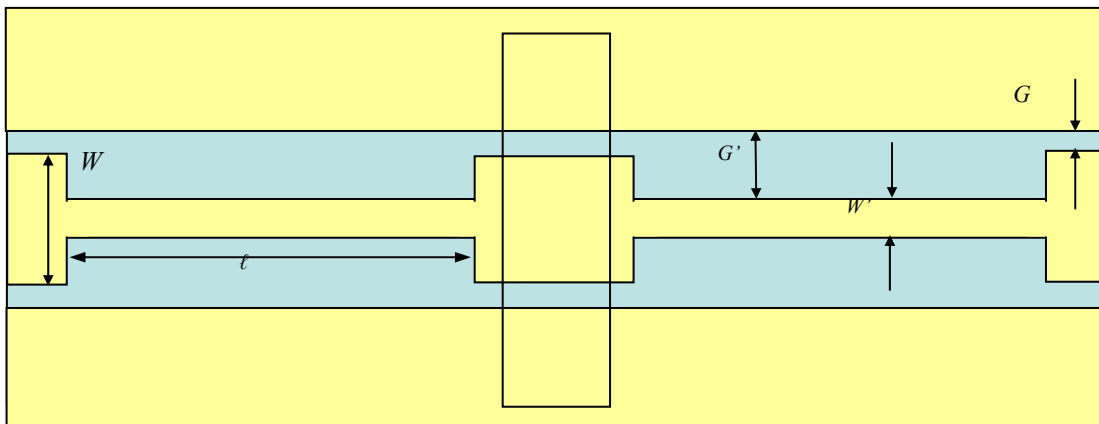


Figura 5.10 Estrutura da chave otimizada

Deve-se ressaltar que, como a região de chaveamento não foi alterada, a tensão de atuação, confiabilidade e demais características da chave foram mantidas.

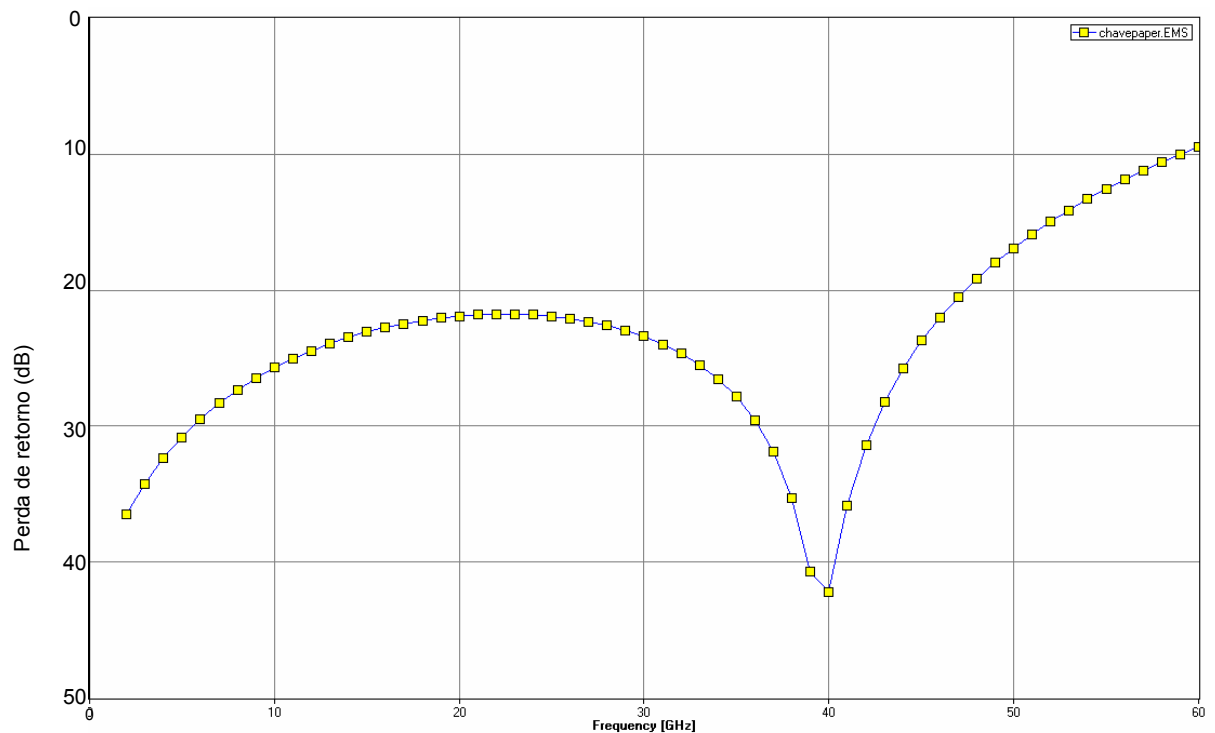


Figura 5.11 Perda de retorno da chave otimizada no estado não atuado (em dB)

Admitindo-se um critério de 20 dB para a perda de retorno mínima da Figura 5.11 obtém-se  $f_{max} = 47$  GHz. Como a isolamento praticamente não sofre alteração em relação à chave de [43], da Figura 5.9 obtém-se  $f_{min} = 19$  GHz para um critério de 20dB de isolamento mínima. Assim, a banda de operação para esse critério de 20 dB, que era nula na chave de [43], agora é de 28 GHz para a chave otimizada.

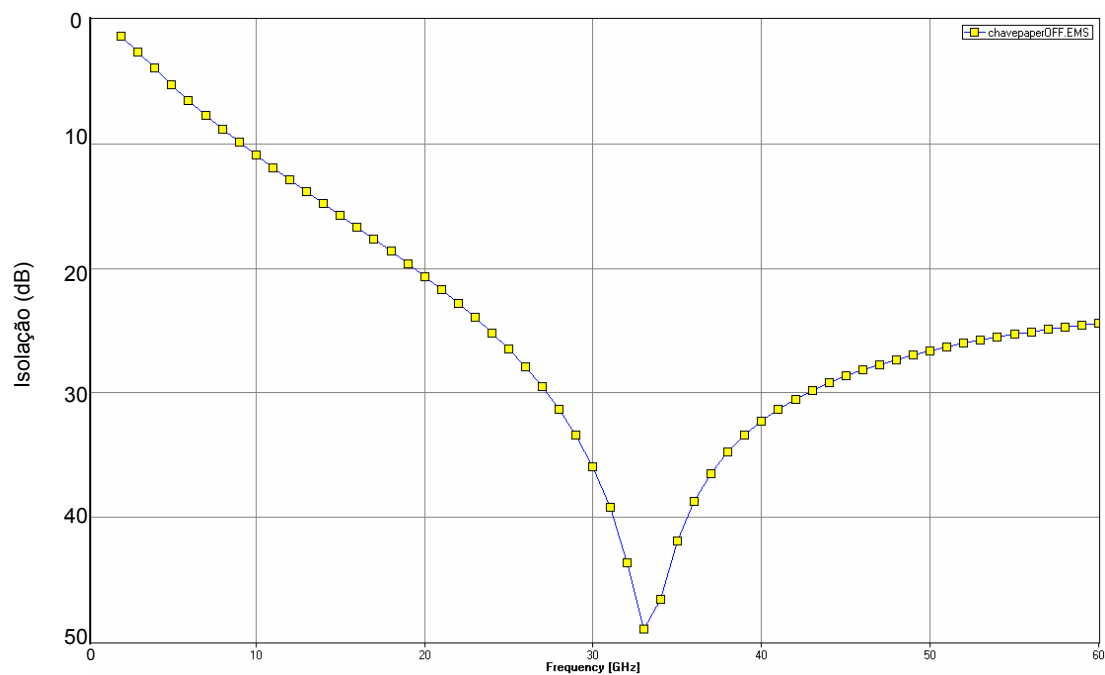


Figura 5.12 Isolamento da chave otimizada no estado atuado (em dB)

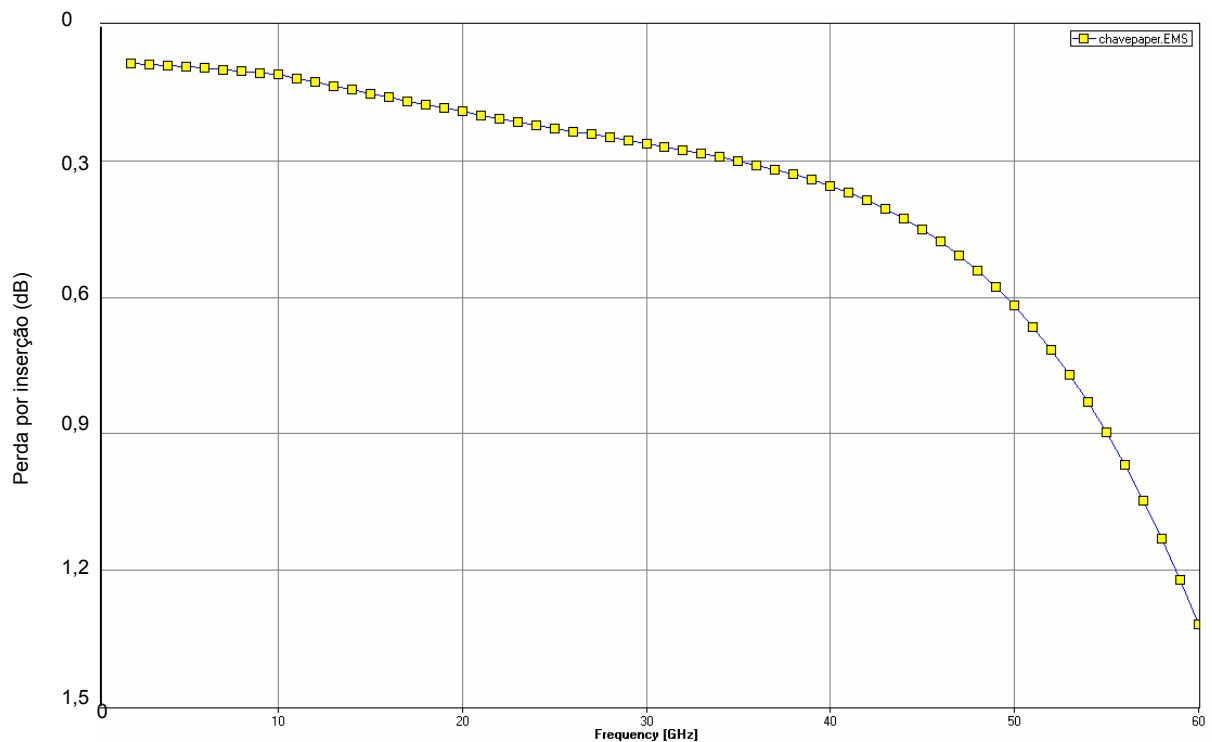


Figura 5.13 Perda por inserção da chave otimizada no estado não atuado (em dB)

Soluções com enfoque similar à apresentada foram investigadas produzindo resultados que apesar de melhores não ampliaram muito mais a banda de operação. A título de exemplo é apresentada a seguir uma configuração com capacitância da região de chaveamento distribuída em duas parcelas e com uma conexão através de uma linha estreita. As trilhas dos CPW também alteradas apresentando quatro segmentos de diferentes larguras, conforme mostrado na Figura 5.18. Os resultados apresentados constam em [53].

As dimensões para esta chave são  $W'' = 48 \mu\text{m}$ ,  $\ell'' = 20 \mu\text{m}$ ,  $\ell' = 14 \mu\text{m}$  sendo  $W'$ ,  $G'$ ,  $G$ ,  $\ell$ , e  $W$  iguais as da chave otimizada da Figura 5.10. A largura da membrana passou a ser  $w' = 94 \mu\text{m}$ . Esta modificação aumenta a área de contato da chave de maneira quase desprezível. Assim a tensão de atuação da chave pouco se altera.

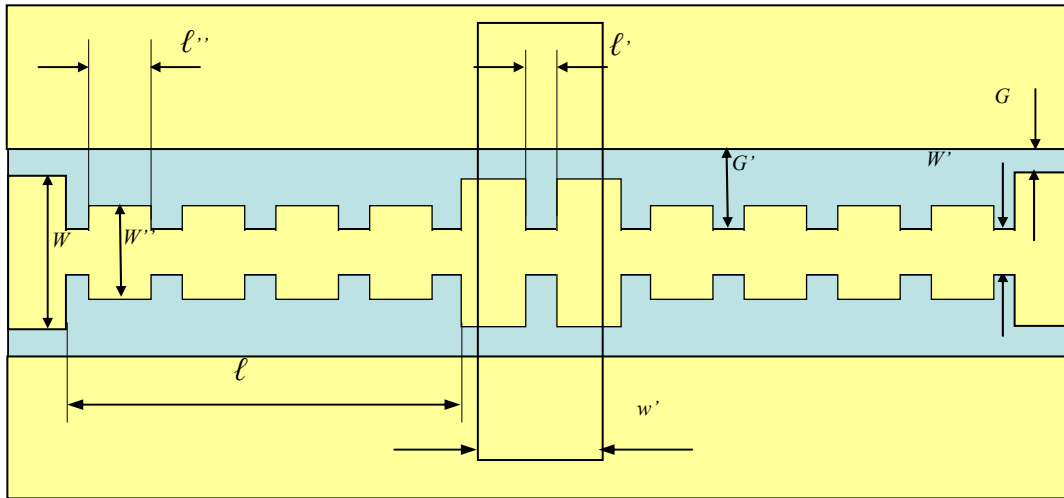


Figura 5.14 Estrutura da chave otimizada com capacitância distribuída

A Figura 5.15 apresenta a perda de retorno da chave otimizada. Para um critério de 20 dB, obtém-se  $f_{max} = 50$  GHz.

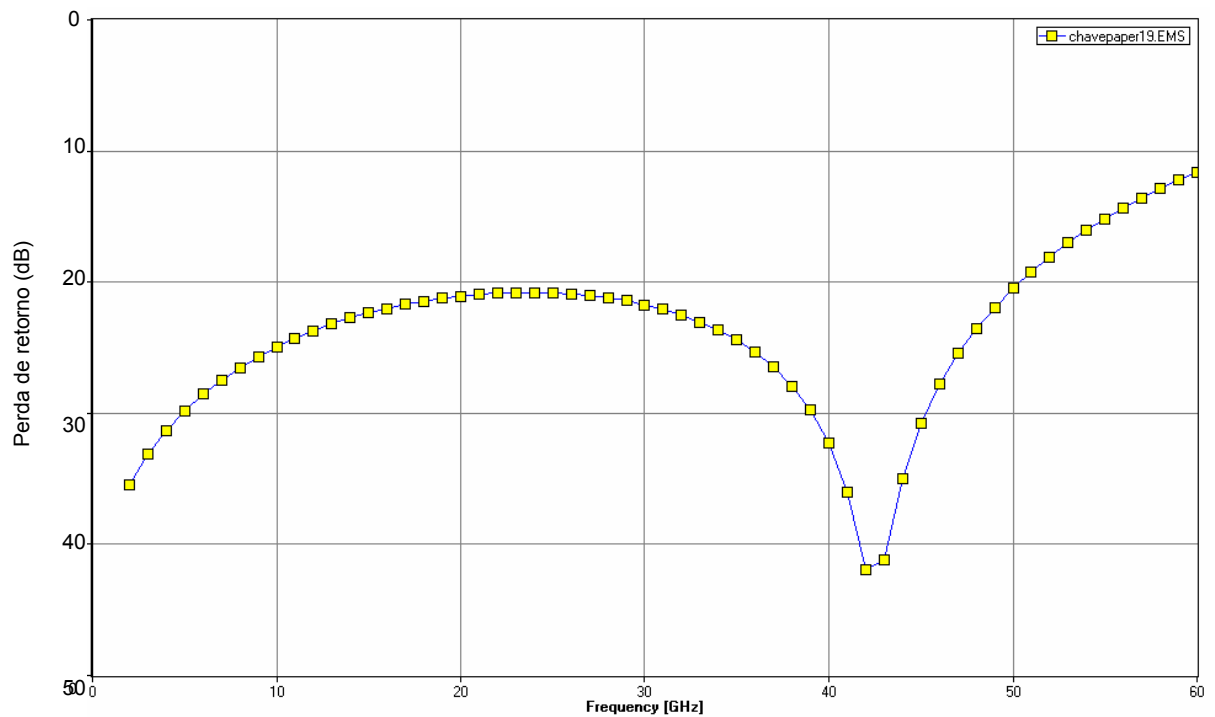


Figura 5.15 Perda de retorno para chave otimizada com capacitância distribuída no estado não atuado (em dB)

A Isolação praticamente não se alterou em relação à chave de [52], conforme



mostra a Figura 5.16. Para um critério de 20 dB,  $f_{min}$  continuado sendo de aproximadamente 19 GHz. Assim, a banda de operação para um critério de 20 dB é de 31 GHz que é 3 GHz superior a banda da chave otimizada.

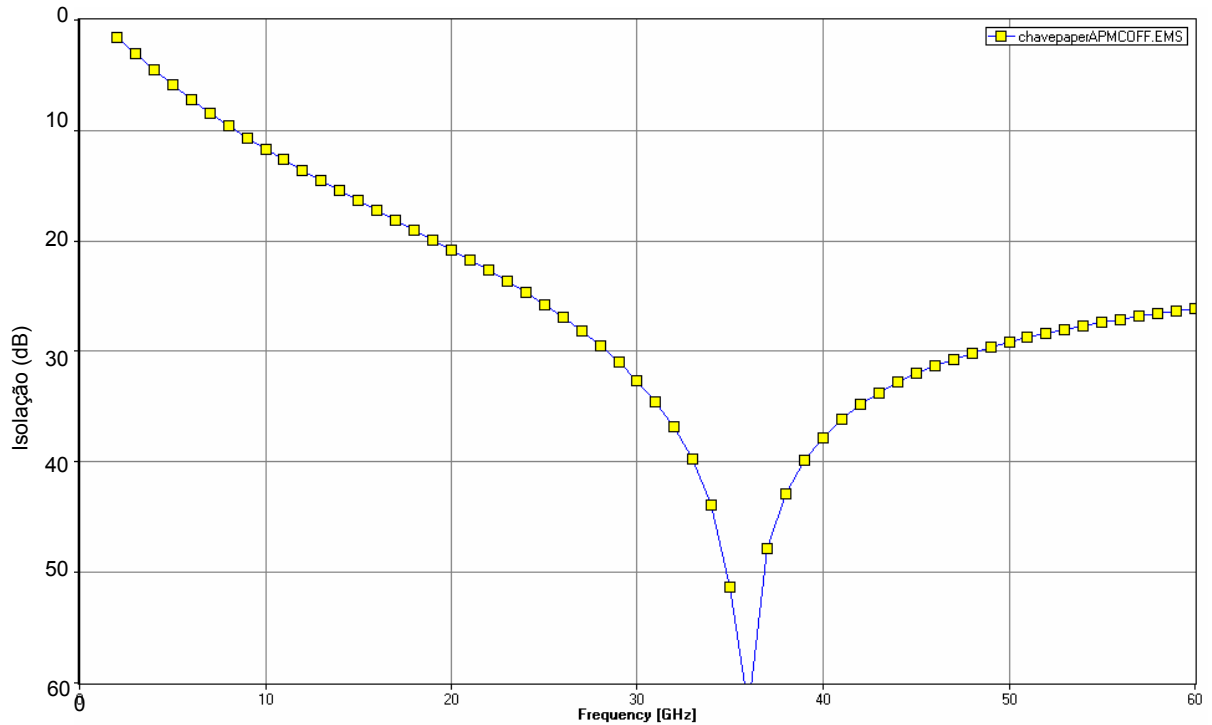


Figura 5.16 Isolação para chave otimizada com capacitância distribuída no estado atuado (em dB)

Os resultados apresentados neste capítulo validaram a solução proposta para aumento da banda de operação da chave MEMS e indicam a possibilidade de se obter novas soluções com resultados ainda melhores.

## Capítulo 6

### Conclusões

Nesta dissertação, os principais conceitos de MEMS, suas aplicações, processos de fabricação, componentes e sistemas foram discutidos e foram apresentadas evidências que permitem concluir sobre seu potencial crescente de utilização nos próximos anos.

Um modelo de circuito para uma estrutura de chave MEMS de RF em configuração paralela sobre guia de onda coplanar foi analisado em detalhe. A validade do modelo foi confirmada através de simulação eletromagnética e por comparação com resultados experimentais existentes na literatura.

Apresentou-se uma metodologia para a determinação da banda da chave MEMS através de um critério de perda de retorno e isolamento mínimas desejadas, dadas suas curvas de perda de retorno e isolamento em função da frequência. Foi definida uma figura de mérito como as coordenadas do ponto de cruzamento das curvas de perda de retorno e isolamento. Para um critério de perda de retorno e isolamento iguais à ordenada desse ponto, a banda de operação é nula.

Partindo-se de uma chave MEMS paralela capacitiva existente na literatura, através da escolha adequada da largura e do comprimento das trilhas centrais de acesso à região de chaveamento, foi possível aumentar significativamente a perda de retorno no estado não atuado da chave MEMS, ampliando-se assim sua banda de operação, segundo a metodologia proposta anteriormente. As modificações introduzidas não implicam em alterações das demais características da chave como a tensão de atuação e a confiabilidade, dentre outras.

A chave analisada, apresenta  $f_{max} = 9,5$  GHz e  $f_{min} = 17,7$  GHz obtidas respectivamente das curvas de perda de retorno e isolação para um critério mínimo de 20 dB para ambas. Nessas condições, a banda de operação é, portanto, nula. Modificando-se a largura da trilha central do CPW, obteve-se  $f_{max} = 47$  GHz e  $f_{min} = 19$  GHz, resultando em uma banda de operação de 28 GHz.

Foi também estudada uma configuração da chave com a trilha central da região de chaveamento dividida em duas partes, conectadas através de uma linha estreita. Para essa chave, obteve-se  $f_{max} = 50$  GHz e  $f_{min} = 19$  GHz, resultando numa banda de operação de 31 GHz. Houve uma ligeira mudança em seu comprimento, devido à linha de conexão, que praticamente não altera as outras características .

Em futuros trabalhos, seria interessante aplicar a solução apresentada a outros tipos de chaves, por exemplo, para uma chave série capacitiva, cujo comportamento é dual da chave analisada. Outra pesquisa importante seria a realização de chaves MEMS com a figura de mérito otimizada. Nessas pesquisas deveriam ser também levados em conta aspectos de fabricação, como, por exemplo, a utilização de material dielétrico de maior constante dielétrica.

## Bibliografia

- [1] SZE, S. M. **Semiconductor Sensors**, New York, 1994.
- [2] HERRICK, K. J.; YOOK, J. -G.; KATEHI, L. P. B. “*Microtechnology in the Development of Three-Dimensional Circuits*”, IEEE Trans. MTT vol. 46, 1998, pp. 1832-1844.
- [3] WANG, Y.A., **RF MEMS Switches and Phase Shifters for 3D MMIC Phased Array Antenna System**, Tese (Doutorado) - University of Cincinnati, Cincinnati, 2002
- [4] LUCYSYN, S., *Review of radio frequency microelectromechanical systems technology*, IEEE Proc-Sci Meas. Technol., March 2004, Vol. 151, n° 2, pp. 93-103.
- [5] DE LOS SANTOS, H. J.; **Introduction to Microelectromechanical (MEM) Microwave Systems**, Artech House, 1999.
- [6] MALUF, N.; WILLIAMS, K., **An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering**, Artech House, 2004.
- [7] HIRATA, S.; ISHI, Y.; MATOBA H.; INUI T., *An ink-jet head Diaphragm Microactuator*, The Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1996, IEEE, pp. 419-423.
- [8] GAMMEL, P.; FISCHER, G.; BOUCHAUD, J.; “*RF MEMS and NEMS Technology, Devices, and Applications*”, Bell Labs Technical Journal, 10(3), pp. 29-59, 2005.
- [9] WIRTH, H.; BOUCHAUD, J.; and R. Dixon, **The market for MST and MEMS 2004-2009**, Witch Technologies Consulting, 2005, Alemanha. (Market Report)
- [10] BOUCHAUD, J.; KNOBLICH, B.; “**Status of the RF MEMS industry 2006**”, Witch Technologies Consulting, 2007.
- [11] LYSHEVSKI, S. E.; **Nano- and Microelectromechanical Systems**, CRC Press, 2001.
- [12] DE LOS SANTOS, H. J.; “**NanoMEMS SYSTEMS ON CHIP**”, 19<sup>th</sup> Symp. On Microelectronics Tech. and Dev, Pernambuco, Brazil, September 7-11, 2004.
- [13] TANIGUCHI N.; “*On the basic concept of nanotechnology*”; In: Proc. Int. Cong. Prod. Eng. Tokyo: JSPE, 1974.
- [14] NATHANSON, H.C.; NEWELL, W.E.; WICKSTORM, R.A.; and DAVIS JR., J.R., “*The Resonant Gate Transistor*”, IEEE Trans. on Electron Dev., Vol. 14, no. 3, pp. 117-133, 1967
- [15] PETERSON, K. E., “*Micromechanical membrane switches on silicon*”, IBM J. Res. Dev. 1979, 23, (4), pp. 376-385.
- [16] LARSON, L.E.; et al., “*Micromachined microwave actuator (MIMAC) technology – a new tuning approach for microwave integrated circuits*”, Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium Digest, pp. 27-30, Jun. 1991, Boston, MA
- [17] WANG, G.; et al; “*Low Cost RF MEMS Switches Using LCP Substrate*”, 34<sup>th</sup> European Microwave Conference, pp. 1441-1444, Amsterdam, 12-14 Oct. 2004

- [18] GUIMARÃES, M. S., **Proposta de Método para caracterização de propriedades termomecânicas de filmes finos utilizando dispositivos MEMS**, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.
- [19] DE LOS SANTOS, H. J.: et al.; *RF MEMS for Ubiquitous Wireless Connectivity – Part I Fabrication*, IEEE Microwave Magazine, Dez. 2004, pp. 36-49.
- [20] DE LOS SANTOS, H. J., **RF MEMS Circuit Design for wireless communication**, Artech House, 2002.
- [21] DE LOS SANTOS, H. J.; Richards, R. J.; *MEMS for RF / Microwave Wireless Applications: the next wave*, Microwave Journal, March 2001, pp. 20-24.
- [22] GOLDSMITH, C. L., et al.; *Performance of Low-loss RF MEMS Capacitive Switches*, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, August 1998, pp. 269-271.
- [23] YAO, J. J., *Topical Review: RF MEMS from a device perspective*, J. Micromech, Microeng., V. 10, 2000, pp.R9-R30
- [24] REBEIZ, G. M., **RF MEMS: Theory, Design and Technology**, John Willey, 2003.
- [25] CHAPMAN, M.; “*The impact of MEMS on Cellular Phone Architectures*”, Microwave Journal, Mai 2006, pp. 256-262
- [26] DE LOS SANTOS, H. J.; Richards, R. J.; *MEMS for RF / Microwave Wireless Applications: the next wave – Part II*, Microwave Journal, July 2001, pp. 142-144.
- [27] REBEIZ, G. M.; TAN, G. L.; HAYDEN, J. S.; “*RF MEMS Phase Shifters: Design and Applications*”, IEEE Microw. Mag. Jun. 2002, pp. 72-81
- [28] CHIAO, J.C., *MEMS Technologies for high frequency applications*, Proceedings of ISSS-SPIE 2002, Bangalore, India , 17th-19th July 2002
- [29] BROWN, E. R.; *RF-MEMS Switches for reconfigurable integrated circuits*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, nº 11, Nov. 1998, pp. 1868-1880
- [30] REBEIZ, G. M. ; MUDALVIN, J. B., *RF MEMS switches and switch circuits*, IEEE Microwave Magazine, 2001, pp. 59-71.
- [31] GOLDSMITH, C., Lin; et. al., *Micromechanical membrane switches for microwave applications*, IEEE MRR-S Int. Microw. Symp. Proc, Orlando, FL, 16 – 20 Mai 1995, pp. 91 – 94.
- [32] POZAR, D.M.; **Microwave Engineering.**, John Willey, 1990
- [33] DUSSOPT, L. ; REBEIZ, G. M., *Intermodulation Distortion and Power Handling in RF MEMS Switches, Varactors and Tunable Filters*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 51, nº 4, april 2003, pp. 1247-1256
- [34] DE SILVA, A.P. et all; “*Motorola MEMS Switch Technology for High Frequency Applications*”, Microelectromechanical Systems Conference, 24-26 Jun 2001, Berkley, USA; pp. 22-24
- [35] WANG, Z., et. all; *Analysis of RF-MEMS using Finite Element-Boundary Integration with Moment Method*, Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 173-176, 22-27 June 2003,.
- [36] DANESHAMAND, M.; MANSOUR, R.R., *RF-MEMS Waveguide Switch*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, nº 12, December 2004, pp. 2651-2657
- [37] won JUNG, C.; LEE,M.; Li, G.P.; DE FLAVIIS, F. BROWN, E. R., *Reconfigurable Scan-Beam Single-Arm Spiral Antenna Integrated with RF-MEMS Switches*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 54, nº 2, February 2006, pp. 455-463
- [38] PELESKO, J. A.; Bernstein, D. H.; **Modeling MEMS and NEMS**, CRC Press, 2003.

- [39] LORENZELLI, L.; RANGRA, K. J.; COLLINI, C.; GIACOMOZZI, F.; MARGESIN, F. and PAINEGIANI, F. *Electro-mechanical performance analysis of RF MEMS Switches*, University of Trento May 2004.
- [40] GOLDSMITH, C. L.; BRANK, J.; Yao, Z.; EBERLY, M.; MALCZEWSKI, A. and EHMKE, J.; PILLANS B., *Lifetime characterization of capacitive RF MEMS Switches*, Raytheon Systems Company.
- [41] WANG, G. ***RF MEMS Switches with novel materials and micromachining techniques for SOC/SOP RF front ends***, Tese (Dourado), Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2006
- [42] PEROULIS, D.; PACHECO, S. P.; SARABANDI K.; KATEHI, L. P. B., *Electromechanical Considerations in Developing Low-Voltage RF MEMS Switches*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, January 2003, vol. 51, n° 1, 259-270.
- [43] REBEIZ, G. M.; MULDAVIN, J.B., *High Isolation CPW MEMS Shunt Switches Part 1: Modeling*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 48, n° 6, June 2000, pp. 1045-1052
- [44] REBEIZ, G. M.; MULDAVIN, J.B., *High Isolation CPW MEMS Shunt Switches Part 2 : Design*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 48, n° 6, June 2000, pp. 1053-1056
- [45] ESPINOSA, H. D.; FISCHER, M.; ZHU, Y. ; S. LEE, *3D Computational Modeling of RF MEMS switches*, Proceedings of the 4th International Conference on Modeling and Simulation, March 2001.
- [46] MILOSAVLJEVIC, Z. D. *RF MEMS Switches*, Mikrotalasna Revija, Jun 2004, pp. 2-8.
- [47] GOLDSMITH, C.L.; “*Characteristics of micromachined switches at microwave frequencies*”; Microwave Symposium Digest, 1996., IEEE MTT-S International, 17-21 Jun 1996, pp. 1141 - 1144
- [48] YAO, J.J.; CHANG, M.F.; “*A Surface Micromachined Miniature Switch For Telecommunications Applications With Signal Frequencies From DC Up To 4 GHz*”; The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX. Transducers '95; Estocolmo, Suécia, 25-29 Jun 1995; pp. 384-387
- [49] MEM RESEARCH, “*An EM simulator for MEMS and real life MMICs*”, Microwave Journal, pp. 310-316, May 2002.
- [50] FARINA, M.; ROZZI, T., “*A 3-D integral equation-based approach to the analysis of real-life MMICs: Application to microelectromechanical systems*”, IEEE transactions on microw. Theory and techniques, vol. 49, n° 12, pp. 2235-2240, Dec 2001.
- [51] GUPTA, K.C.; GARG, R.; BAHL, I. J.; ***Microstrip lines and Slotlines***, , Artech, 1979.
- [52] BARBIN, S. E.; SILVA, M. B. F., “*Chave MEMS capacitiva de baixo coeficiente de reflexão*”, XIII Taller Iberchip , 14-16 Mar 2007, Lima, Peru, pp. 139-142.
- [53] BARBIN, S. E.; SILVA, M. B. F.; CHRISTODOULOU, C.; “*A CPW MEMS switch with enhanced bandwidth*”, APMC 2007, 12-14 Dez 2007, Bangkok, Tailândia