


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Carlos Vilar Campos

**Estudo e compensação dos efeitos de carga
em atuadores MEMS capacitivos**

outubro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Carlos Vilar Campos

**Estudo e compensação dos efeitos de carga
em atuadores MEMS capacitivos**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob orientação do
Professor Doutor Luís Alexandre Rocha

DECLARAÇÃO

Nome: João Carlos Vilar Campos

Endereço eletrónico: jcvc.be@hotmail.com

Cartão do Cidadão: 14199087

Título da dissertação: Estudo e compensação dos efeitos de carga em atuadores MEMS capacitivos

Orientador:

Professor Doutor Luís Alexandre Rocha

Ano de conclusão: 2015

Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/_____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostava de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Luís Alexandre Rocha, por me ter facultado a possibilidade de trabalhar na área dos MEMS, bem como pela sua pronta disponibilidade e confiança depositada em mim.

Gostaria também de agradecer aos meus pais, Carlos Campos e Delfina Vilar e à minha irmã, Rosana Campos, pelo apoio que me deram ao longo da vida, em especial na vertente académica.

Quero ainda agradecer ao Vasco Lima, Filipe Alves e ao Nuno Brito por se terem mostrado sempre disponíveis a ajudar no desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

Os dispositivos *MEMS* têm apresentado ao longo dos anos um elevado crescimento, contudo as estruturas *RF MEMS* apresentam um problema, a sua fiabilidade. Esta deve-se ao facto de o tempo de vida das estruturas estar limitado, entre outros, aos efeitos de carga. Este efeito deve-se à contínua aplicação de um determinado valor de tensão sobre o atuador que, por sua vez, vai levar à injeção de carga no dielétrico do atuador, devido aos elevados campos elétricos gerados sobre o mesmo. Ao fim de algum tempo, esta acumulação de cargas vai começar a ser significativa, chegando a influenciar o comportamento do atuador, bem como o seu tempo de vida.

Este efeito, devido à sua importância nos *MEMS*, tem vindo a ser foco de imensos estudos [1]–[7]. Desde o impacto que o valor da tensão de atuação tem sobre o tempo de vida dos atuadores [1], a sua caracterização e modelização [4] até novas abordagens, recorrendo a atuações bipolares [7], para tentar eliminar este efeito. Por outro lado, tem também sido explorado o impacto que fatores como a temperatura, o *packaging* ou mesmo a humidade provocam na carga acumulada no dielétrico. Contudo, os efeitos de carga em estruturas *MEMS* de placas paralelas continuam ainda por explorar, tendo apenas em [3] sido medida experimentalmente a variação no valor da tensão de *pull-in* que a acumulação de cargas no dielétrico provoca. No entanto, são ainda inexistentes os modelos que permitam relacionar os valores de densidade de carga com os valores de tensão aplicados, ou com a variação da tensão de *pull-in*. Além disto, é também ainda desconhecido o impacto que os tempos de atuação on/off apresentam no processo de carga do dielétrico.

Assim, nesta dissertação foi efetuado um estudo em estruturas *MEMS* de placas paralelas visando a modelização das mesmas, onde um dos elétrodos do atuador é móvel e o outro se encontra fixo. Estes atuadores, devido ao seu processo de fabrico *DRIE*, possuem em cada um dos seus elétrodos uma fina camada de *Teflon*. Os modelos matemáticos considerados de base eram provenientes do estudo realizado em [4]. Contudo, para o estudo levado a cabo nesta dissertação, foi usado um tipo diferente de estrutura, apresentando uma tensão de atuação, enquanto a *on*, em rampa até ser atingida a tensão de *pull-in*, ao contrário do modelo apresentado por [4], onde as atuações são feitas com apenas um degrau de tensão. É também elaborado o estudo com o objetivo de observar o impacto que os diferentes tempos de atuação têm no processo de carga do dielétrico.

Para os atuadores de placas paralelas foi observada uma relação linear entre a carga injetada no dielétrico e o valor da tensão de atuação. Foi também observado que a densidade de carga injetada

no dielétrico é dada diretamente pela razão da área do dielétrico. Quanto aos tempos de atuação, foi observado que, com o aumento do tempo a *off*, o dielétrico demorava mais até carregar completamente, podendo mesmo chegar a nunca carregar na sua totalidade, dependendo do tempo a *off*.

Palavras-Chave: MEMS, pull-in, acumulação de carga, dielétrico, atuadores

ABSTRACT

MEMS devices during the past the years have experienced an high growth, however RF MEMS devices are hindered by their reliability problems. This is due to the lifetime of the devices being limited by, among others, charge effects. This effect is due to continuous applying a voltage on the actuator, which in turn, will lead to injecting charge in to the dielectric of the actuator, due to the high electric fields. After a while, the charge being built up will start to be meaningful, therefore changing the behaviour of the actuator as well as its lifetime.

This effect, due to his importance in MEMS, is being the main focus from several studies [1]–[7]. From the impact of the actuation voltage on the actuators lifetime [1], its characterization and modeling [4] to new methods to mitigate this problem through bipolar actuation [7]. On the other hand, it has also been explored the impact that factors such as temperature, packaging or even the humidity cause on the charge built up into the dielectric. However, charge effects in MEMS devices with parallel plates are yet to explore, having only been measured in [3] the voltage shift due to the built up of charges in the dielectric. However, the models that allow to relate the charge densities values with the voltage actuation or with the pull-in voltage shift are still inexistent. Furthermore, it is still unknown the impact of the actuation times on the dielectric charging.

Therefore, in this dissertation it has been made a study in a MEMS device of parallel plates, aiming their modeling, where one of the electrodes of the actuator is movable and the other one is fixed. These actuators, due to the its fabrication process DRIE, have in each of the electrodes a thin layer of Teflon. The mathematical models initially considered were from the study made in [4]. However, for the study accomplished in this dissertation it has been used a different kind of structure, where its actuation voltage, whilst on, is made by using voltage steps until the pull-in voltage is reached, in opposition to the modeling presented by [4], where the actuations are made with a single voltage step. It is also made a study in order to observe the role of different actuation times on the dielectric charging process.

For the actuators of parallel plates it has been noticed a linear relationship between the injected charge into the dielectric and the actuation voltage. It has also been observed that the charge density injected in the dielectric is directly given by the dielectric area. About the actuation times, it has been observed that with the increase of the off time, the dielectric will take more time to be fully charged, and it may even never charge entirely, depending on its off time.

KEYWORDS: MEMS, pull-in, charge built up, dielectric, actuators

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação e Enquadramento.....	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2. Estado-da-Arte e Fundamentos Teóricos.....	5
2.1 Acumulação de carga no dielétrico.....	6
2.1.1 Tensão de Atuação.....	6
2.1.2 Top vs Bottom charging.....	7
2.2 Efeitos de Carga (Condições que afetam os efeitos de carga).....	9
2.2.1 Injeção de carga no dielétrico.....	9
2.2.2 Efeito da Espessura do Dielétrico.....	10
2.2.3 Efeito da Temperatura.....	11
2.2.4 Efeito da Humidade.....	15
2.2.5 Efeito do <i>Packaging</i>	17
2.3 Modelização dos efeitos de carga.....	18
2.4 Métodos para anular a carga acumulada no dielétrico.....	22
3. Fenómeno de <i>Pull-In</i> e estruturas <i>MEMS</i>	25
3.1 Estrutura 1 – <i>DOF</i>	26
3.1.1 Análise Estática.....	27
3.1.2 Variação da Tensão de <i>Pull-in</i> com a carga acumulada no dielétrico.....	28

3.1.3	Varição da Tensão de <i>Pull-in</i> com a temperatura	29
3.1.4	Estruturas <i>MEMS</i>	30
3.1.5	Elétrodos Atuadores.....	31
3.1.6	Dimensões das estruturas	32
3.2	Modelo do atuador	34
3.2.1	Densidade de Carga	36
4.	Metodologia	39
4.1	Medição das correntes de carga e descarga.....	40
4.1.1	Diferente capacidade dos Atuadores	42
4.2	Medição da tensão de <i>pull-in</i>	43
4.2.1	Descarga do Dielétrico.....	46
4.2.2	Estudo da variação de carga injetada para diferentes tempos de atuação	46
5.	Resultados Obtidos	49
5.1	Modelo de carga e descarga.....	49
5.1.1	Modelo de tensão vs. carga	53
5.1.2	Aplicação de degraus de tensão.....	55
5.1.3	Relação entre diferentes capacidades	57
5.2	Tensão de <i>pull-in</i> em regime permanente	59
5.2.1	Medição da tensão de <i>pull-in</i>	59
5.2.2	Cálculo da carga acumulada no dielétrico	60
5.2.3	Descarga do Dielétrico.....	62
5.2.4	Diferentes tempos de atuação.....	63
6.	Conclusões e Trabalho Futuro	67
	Bibliografia	69
	Anexo I – <i>Pinout</i> Estrutura <i>MEMS</i>	73
	Anexo II – Modelos Matemáticos.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Caracterização do tempo de vida de uma estrutura <i>MEMS</i> [1]	6
Figura 2.2 – Corte de um interruptor capacitivo <i>RF MEMS</i> , caso de uma tensão de controlo positiva [2]	7
Figura 2.3 – Variação da tensão de atuação sobre tensões de 30V, 40V e 50V [2]	8
Figura 2.4 – Relação entre a carga acumulada no dielétrico e a espessura do dielétrico [11]	10
Figura 2.5 – Relação entre a carga acumulada no dielétrico e o campo elétrico, para diferentes dielétricos [18]	11
Figura 2.6 – Relação entre a densidade de carga e a temperatura. Densidade de carga extraída, trap1 (□) e trap2 (Δ) [20]	12
Figura 2.7 – Relação entre a temperatura e as constantes de tempo. Constantes de tempo extraídas trap1 (□) carga e (+) descarga, trap2 (Δ) carga e (x) descarga [20]	13
Figura 2.8 – Relação entre a carga acumulada no dielétrico e a tensão [5]	14
Figura 2.9 – Relação entre a carga acumulada e a espessura do dielétrico para diferentes temperaturas de deposição [21]	15
Figura 2.10 – Acumulação de carga no dielétrico para diferentes níveis de humidade [16]	15
Figura 2.11 – Medição da variação da tensão de <i>pull-in</i> para diferentes níveis de humidade [16]	16
Figura 2.12 – Estrutura <i>MIM RF MEMS</i> de um interruptor capacitivo [4]	18
Figura 2.13 – Forma da Corrente de Carga/Descarga [4]	18
Figura 2.14 – Relação entre a tensão aplicada e as constantes de tempo de carga e descarga. Constantes de tempo extraídas trap1 (□) carga e (+) descarga, trap2 (Δ) carga e (x) descarga [4]	20
Figura 2.15 – Relação entre a tensão aplicada (V) e a densidade de carga em regime permanente (QJ) [4]	21
Figura 2.16 – Variação da tensão de <i>pull-in</i> ao longo do tempo, com uma tensão de atuação de -30V [4]	22
Figura 2.17 – Formas de onda da tensão de atuação [7]	23
Figura 2.18 – Medição da variação da tensão de atuação. Frequência de comutação de 10hz(■) e 10khz(◇) [7]	23
Figura 3.1 – Topologia de um sistema eletromecânico de placas paralelas com 1-DOF [19]	26
Figura 3.2 – Variação do valor da tensão de <i>pull-in</i> a uma temperatura constante [3]	28

Figura 3.3 – Variação do valor da tensão de <i>pull-in</i> a uma temperatura constante com pausas na atuação [3].....	28
Figura 3.4 – Variação do valor da tensão de <i>pull-in</i> a diferentes valores de temperatura [3]	30
Figura 3.5 – Estrutura <i>MEMS</i>	30
Figura 3.6 – Imagem microscópica da estrutura A [19].....	34
Figura 3.7 – Modelo de um condensador de placas paralelas.....	35
Figura 3.8 – Equivalente elétrico de um condensador com dois dielétricos	35
Figura 3.9 – Imagem microscópica de uma parede de silício resultante do processo de fabrico da Bosch [30]	36
Figura 4.1 – Corte transversal de um cabo triaxial, com capacidades parasíticas do <i>shield</i> para a <i>guard</i> e do <i>guard</i> para a <i>force line</i> [31].....	40
Figura 4.2 – Configuração de uma medição <i>floating</i> [32]	41
Figura 4.3 – Montagem para medição de corrente	42
Figura 4.4 – Sistema para medição da tensão de <i>pull-in</i>	44
Figura 4.5 – Rampa de tensão aplicada à estrutura <i>MEMS</i>	45
Figura 5.1 – Forma de onda da corrente durante os 40s numa atuação de 1V	50
Figura 5.2 – Forma de onda da corrente de carga do dielétrico, 1V de atuação	51
Figura 5.3 – Forma de onda da corrente de descarga do dielétrico, 1V de atuação	51
Figura 5.4 – Valores de densidade de carga para tensões de -4V a 4V da estrutura S3, pino SRB	53
Figura 5.5 – Relação entre a densidade de carga e a tensão atuada.....	54
Figura 5.6 – Relação entre a constante de tempo e a tensão de atuação	55
Figura 5.7 – Forma de onda de corrente com duas atuações consecutivas.....	56
Figura 5.8 – Comparação entre os valores de carga obtidos da medição experimental.....	58
Figura 5.9 – Variação da tensão de <i>pull-in</i> com a carga acumulada no dielétrico	60
Figura 5.10 – Injeção de carga no dielétrico a cada ciclo de atuação.....	61
Figura 5.11 – Variação da tensão de <i>pull-in</i> durante a descarga do dielétrico.....	62
Figura 5.12 – Variação da tensão de <i>pull-in</i> normalizada para diferentes tempos de atuação. Azul (10ms de tempo a <i>off</i>), Verde (20ms de tempo a <i>off</i>), Vermelho (50ms de tempo a <i>off</i>).....	63
Figura 5.13 – Variação da tensão de <i>pull-in</i> normalizada para diferentes tempos de atuação <i>off</i> . Azul (100ms), Vermelho (300ms), Azul-bebé (400ms), Verde (500ms) e Roxo (800ms).....	64
Figura 5.14 – Relação entre o tempo a <i>off</i> e o valor da variação da tensão de <i>pull-in</i>	65
Figura 5.15 – Relação entre o tempo a <i>off</i> e o valor da variação da tensão de <i>pull-in</i>	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões das estruturas utilizadas	33
Tabela 2 – Tensão de <i>pull-in</i> das estruturas medidas experimentalmente	34
Tabela 3 – Valores de densidade de carga e constantes de tempo de 1V a 4V da estrutura S4 pino ART, Med n°1	52
Tabela 4 – Valores de densidade de carga obtido para tensões entre 1V e 3.5V.....	56
Tabela 5 – Valores da densidade de carga para as diferentes condições.....	58
Tabela 6 – Carregamento do dielétrico para diferentes tempos a <i>off</i>	64

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

MEMS – Micro Electro-Mechanical System

PCB – Printed Circuit Board

DOF – Degree of Freedom

RF – Radio Frequency

FDC-TF – Force Distance Curve - Thin Films

KPFM-TF – Kelvin Probe Force Microscopy - Thin Films

C/DCT – Charge/Discharge Current Transient

DUT – Device Under Test

DC – Direct Current

FPGA – Field Programmable Gate Array

TSDC – Thermally stimulated depolarization current

DRIE – Deep reactive-ion etching

RH – Relative Humidity

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia *MEMS*, *Micro-Electro-Mechanical-Systems*, é uma tecnologia tridimensional que combina sistemas elétricos e mecânicos, tendo surgido na década de 70 e que tem vindo, até aos dias de hoje, a crescer constantemente no mercado. Atualmente, na vida quotidiana, é possível observar uma enorme quantidade de produtos *MEMS*, desde sensores de pressão, sensores de movimento, cabeças de impressora, microespelhos para projetores, acelerómetros e dispositivos RF [8].

Os dispositivos *MEMS* são fabricados através de um processo de micromaquinação resultando, normalmente, numa estrutura 3-D sobre um substrato de silício. Contudo, outros materiais podem ser utilizados na micromaquinação, como por exemplo, quartzo, vidro, plástico ou cerâmica. No entanto, o silício continua a ser o material mais usado graças às suas excelentes propriedades elétricas e mecânicas. Além das suas excelentes propriedades, a utilização do silício é também extremamente atrativa graças à possibilidade de os fabricantes poderem produzir milhares de componentes micromaquinados, de uma só vez, em bolachas de silício, recorrendo às técnicas de fabricação em lote [8].

A popularidade da tecnologia *MEMS* tem vindo a crescer, e isto deve-se a um conjunto de vantagens, entre as quais, o seu tamanho extremamente reduzido e um baixo consumo energético, o que em várias ocasiões permite que as estruturas *MEMS* sejam capazes de operações mais rápidas e precisas, quando comparadas com os seus equivalentes macroscópicos. Além de todas estas vantagens referidas, os *MEMS* apresentam também a vantagem de serem baratos, o que do ponto de vista do consumidor é um fator que não pode ser ignorado [8].

Contudo, as estruturas *MEMS* apresentam alguns problemas ao nível da sua fiabilidade, principalmente nas estruturas *RF MEMS* [1], [4], [9], [10]. Estes problemas devem-se aos efeitos de carga a que os atuadores estão sujeitos que, devido à carga acumulada nos dielétricos dos mesmos, provoca efeitos indesejados. Estes efeitos chegam mesmo a reduzir o tempo de vida normal de uma estrutura. Este efeito foi inicialmente identificado em [1], onde se provou que o valor da tensão de atuação aplicada aos atuadores tinha influência direta sobre o tempo de vida do atuador. Resultados experimentais demonstraram que o tempo de vida do atuador diminuía exponencialmente com o aumento do valor da tensão de atuação. Mais tarde, foi feito um estudo de caracterização e modelização dos efeitos de carga nos dielétricos em interruptores *RF MEMS* [4], onde foram obtidos os modelos de carga e descarga de corrente do dielétrico dos atuadores, recorrendo a uma estrutura *MIM*

(*metal-insulator-metal*), para assim se obter o valor da densidade de carga total injetada no dielétrico dos atuadores. Posteriormente em [7], com base no estudo efetuado em [4], foram analisados diferentes métodos para diminuir a carga total injetada no dielétrico, onde uma consiste na aplicação de tensões positivas e negativas, e a segunda na variação do *Duty Cycle*, ou seja, variação dos tempos a *on* e *off* de atuação. É necessário referir que na segunda, embora os tempos *on/off* variem, a tensão de atuação era sempre fixa.

1.1 Motivação e Enquadramento

No trabalho aqui apresentado, os estudos desenvolvidos em [4] foram adaptados a estruturas *MEMS* capacitivas de elétrodos paralelos, cujo efeito de carga tem impacto no valor da tensão de *pull-in* e no tempo de *pull-in* da estrutura, provocando a diminuição de ambos. De modo a tentar reduzir o impacto da carga acumulada nos dielétricos, foi estabelecida uma relação entre o tempo de atuação *on/off* com a carga total injetada nos dielétricos dos atuadores. Para tal, foram estudados os efeitos de carga e descarga dos dielétricos com base nos modelos apresentados em [4], bem como a relação que a densidade de carga apresenta com o valor da tensão de atuação. No entanto, ao contrário do apresentado em [4] e [7] as tensões de atuação vão variar, uma vez que a tensão de *pull-in* vai diminuir com a acumulação de carga no dielétrico dos atuadores [3].

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o estudo dos efeitos de carga no dielétrico de estruturas *MEMS* capacitivas quando sujeitos a uma atuação eletrostática, de modo a gerar os modelos que relacionam o tempo e o valor de tensão de atuação com a carga acumulada nos dielétricos. Para estudar o efeito de carga, e consequente obtenção dos modelos, é utilizada uma estrutura de placas paralelas, onde uma das placas se encontra fixa e a outra móvel. Através destes modelos, tentar-se-á, através do tempo de atuação, controlar a carga acumulada nos dielétricos, tentando assim eliminar os efeitos provocados pela mesma.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo, Introdução, é feita uma breve apresentação do tema, bem como da motivação e dos objetivos deste trabalho. No segundo capítulo, são abordados os fundamentos teóricos sobre os efeitos de carga com base no estado-da-arte, ou seja, fatores que influenciam a carga injetada nos dielétricos, bem como modelos de estudo que permitam determinar a carga total injetada.

No terceiro capítulo, é explicado o fenômeno de *pull-in* de modo a entender-se o impacto que a carga acumulada nos dielétricos dos atuadores provoca no valor da tensão de atuação. São também apresentadas as características das estruturas utilizadas para os testes efetuados.

O quarto capítulo incidirá sobre a metodologia adotada em cada um dos testes realizados, onde serão explicados com detalhe os passos e os cuidados que foram tomados para a realização dos testes de medição de corrente de carga e descarga dos dielétricos, bem como a medição da tensão de *pull-in* para diferentes tempos de atuação. Já os resultados dos testes referidos ao longo do quarto capítulo são apresentados no capítulo 5. Os modelos de carga e descarga de corrente são extrapolados através das medições efetuadas, para assim, com recurso aos diferentes modelos, se conseguir calcular a carga total acumulada no dielétrico e a variação de tensão provocada por essa acumulação de carga. Através dos resultados da medição da tensão de *pull-in*, é possível observar a relação que existe entre os tempos de atuação e o tempo que a tensão de *pull-in* leva até estabilizar. Com esta relação, também é possível obter um modelo que relaciona o número de atuações necessárias ao completo enchimento do dielétrico e o tempo a *off* utilizado.

Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as principais conclusões dos resultados obtidos e possíveis alternativas para um trabalho futuro, que passa pelo desenvolvimento de uma estrutura especificamente desenhada para o estudo dos efeitos de carga.

2. ESTADO-DA-ARTE E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Ao longo deste capítulo são apresentados os vários fenómenos que influenciam no processo de carga do dielétrico de atuadores eletrostáticos, nomeadamente: a temperatura, o *packaging*, a humidade ambiente e a espessura do dielétrico do atuador [5], [9]–[12]. São também abordados os modelos existentes, que permitem o cálculo da densidade de carga total injetada no dielétrico de uma estrutura *RF MEMS* [4]. É importante perceber o impacto destes efeitos para assim se conseguir interpretar melhor os resultados obtidos.

No trabalho realizado em [4], é apresentado um modelo que relaciona a carga acumulada no dielétrico com a variação da tensão de *pull-in*. Este modelo é apresentado para uma estrutura *MIM* que, como o nome indica, é constituído por dois eléttodos, em paralelo, e um dielétrico que evita o contacto entre os eléttodos, impedindo assim um curto-circuito. As atuações efetuadas sobre o atuador da estrutura são constantes ao longo do tempo, alternando entre 0V e a tensão de atuação.

Em [7] é também apresentado um método, com base nos modelos presentes em [4], onde através de uma atuação bipolar, com diferentes *duty-cycles*, se reduz a carga total acumulada no dielétrico do atuador, permitindo assim reduzir os efeitos provocados pela acumulação da mesma. Contudo, devido à diferença da densidade de carga apresentada entre uma tensão positiva e uma negativa, a carga vai acumular de igual modo, no entanto a uma velocidade significativamente mais baixa. Em [11] é apresentada uma diferenciação entre a injeção de cargas no dielétrico, quando feita através do eléttodo superior móvel ou do eléttodo inferior fixo, em estruturas *MIM* e é abordada a diferença nos tempos de carregamento do dielétrico, bem como no valor da tensão de *pull-in*.

Todavia, nas estruturas usadas nesta dissertação para o estudo do efeito de carga, o atuador apresenta dois dielétricos de *Teflon* de pequena espessura devido ao processo de fabrico usado *DRIE* (*Deep-Reactive-Ion-Etching*), na ordem de alguns nanómetros [3], adjacentes a cada um dos eléttodos, tal como apresentado na Figura 3.8. Isto pode levar a que os modelos obtidos para o estudo da carga acumulada no dielétrico sejam diferentes dos apresentados em [4]. Relativamente ao dielétrico que se encontra em cada um dos eléttodos atuadores, considera-se que seja aproximadamente igual em todos os eléttodos. Uma vez que as tensões a que os atuadores são sujeitos são demasiado baixas, na ordem dos 5V, então o dielétrico vai apenas estar sujeito à acumulação de carga por parte do eléttodo inferior, *bulk charging*, tal como explicado em [2], [7]. Tendo em conta os resultados apresentados em [3], e uma vez que o valor da tensão de *pull-in* baixa ao longo do tempo, é seguro assumir que o

atuador está apenas sujeito ao *bulk charging*. Assim, e considerando apenas a carga acumulada por *bulk*, a modelização presente em [4] vai ser tida em conta na análise efetuada nesta dissertação.

2.1 Acumulação de carga no dielétrico

Quando uma estrutura é atuada, durante um intervalo de tempo relativamente longo, o dielétrico está sujeito a um campo elétrico elevado fazendo com que a carga entre no dielétrico, fique presa e se comece a acumular [1]. Com a repetição da atuação, a carga vai gradualmente acumular-se no dielétrico, provocando uma alteração no valor da tensão total de atuação devido ao potencial elétrico gerado pela mesma, baixando o seu valor [3], ou chegando mesmo a fazer com que o interruptor do atuador fique colado [1]. Durante estas operações de comutação, o campo elétrico ao longo do dielétrico pode atingir os 10^6 V/cm, o que faz com que os eletrões, como ainda acima referido, sejam injetados nos dielétricos, ficando presos [1]. A carga acumulada, como já indicado em [1] e [4], vai depender, entre outros fatores, do tempo de atuação e do valor da tensão de atuação. Estes fatores observados em [4], [7], [13] foram obtidos em estruturas *MIM* e *RF MEMS*.

2.1.1 Tensão de Atuação

Como ainda agora referido, a repetição de uma atuação sobre um interruptor vai levar a uma acumulação de carga no dielétrico do atuador, provocando um mau funcionamento do mesmo. Em [1] foi testado experimentalmente pela primeira vez a relação entre a tensão de atuação aplicada ao interruptor e o tempo de vida do mesmo, recorrendo a interruptores *RF MEMS* capacitivos. O tempo de vida dos atuadores, que é dado pelo número de atuações do mesmo até falhar, foi estudado em função do valor da tensão de atuação aplicado.

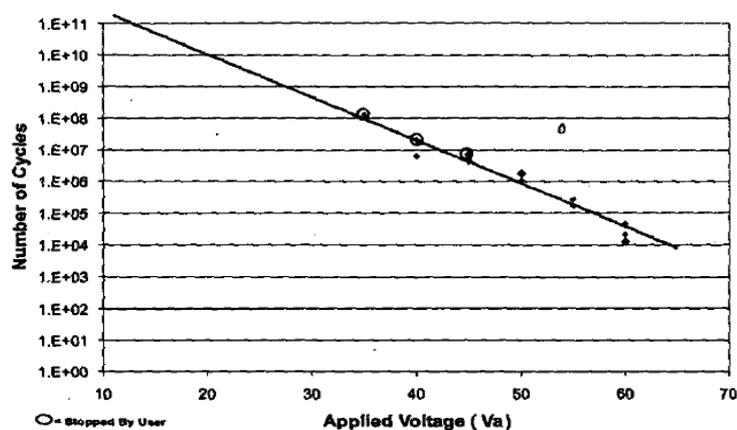


Figura 2.1 – Caracterização do tempo de vida de uma estrutura *MEMS* [1]

Os resultados obtidos em [1] são apresentados na Figura 2.1, na qual se pode observar que o tempo de vida do atuador diminui exponencialmente com o aumento do valor da tensão de atuação. O número de atuações, nos vários testes efetuados, chega a ser superior a mil milhões para tensões de atuação inferiores a 40V.

Este estudo permitiu compreender o impacto que a tensão aplicada tem sobre o tempo de vida de um atuador. Pelos resultados apresentados, é possível concluir que o valor da tensão de atuação aplicado tem impacto direto no valor da carga acumulada no dielétrico do atuador.

2.1.2 Top vs Bottom charging

Como já referido anteriormente, quando sujeito a uma atuação, o dielétrico vai ficar sujeito a um campo elétrico elevado, fazendo com que carga entre no dielétrico e fique presa. Contudo, essa acumulação de carga no dielétrico do atuador pode acontecer no eletrodo superior ou no eletrodo inferior. Em [2] foi efetuado um estudo pioneiro cujo objetivo foi identificar a diferença e o impacto do carregamento do dielétrico entre o eletrodo móvel superior e o eletrodo fixo inferior. Para tal, foi utilizado um condensador *MMM*, cujo dielétrico é de SiO_2 com uma espessura de 250nm e, quando sujeito a uma tensão, o eletrodo móvel entra em contacto com o dielétrico, formando assim um condensador cujas dimensões são de 120 μ m por 80 μ m. Para caracterizar os efeitos de carga, o interruptor foi sujeito a diferentes tensões de atuação. A estrutura foi sujeita a tensões de 30V, 40V e 50V todas com uma duração de 300 segundos. A polaridade da tensão de atuação foi aplicada de acordo com a Figura 2.2. A medição da variação da tensão do atuador, quando este está sujeito a tensões, foi efetuada através da aplicação de uma onda triangular de tensão e correspondente monitorização do sinal de saída *RF*.

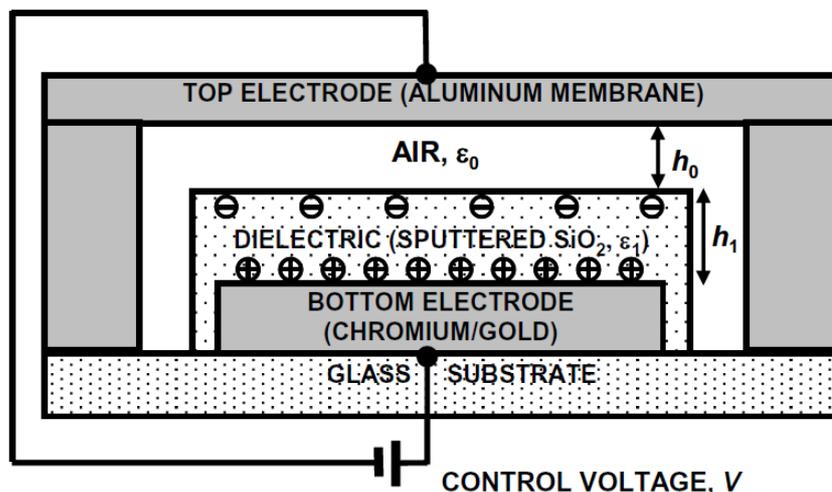


Figura 2.2 – Corte de um interruptor capacitivo RF MEMS, caso de uma tensão de controlo positiva [2]

Quando a estrutura é sujeita a uma tensão de 30V, a tensão de atuação diminui gradualmente em aproximadamente 5mV/s. Esta diminuição indica que carga positiva é injetada no dielétrico a partir do elétrodo inferior, como representado na Figura 2.2. Quando se interrompe a atuação, a tensão recupera o seu valor de *pull-in* original ao fim de aproximadamente 1000s. Para uma tensão de 40V o comportamento apresentado é similar ao de 30V. Para tensões de 30V e 40V, as cargas foram injetadas no dielétrico a partir do elétrodo inferior. Porém, quando o interruptor é sujeito a uma tensão de 50V, a tensão de atuação aumenta rapidamente antes de diminuir gradualmente. Isto sugere que, quando sujeita a uma tensão de 50V, além da carga positiva que é injetada no dielétrico proveniente do elétrodo inferior, é também injetada carga negativa no dielétrico vinda do elétrodo superior, como representado na Figura 2.2. Além do mais, o carregamento efetuado pelo elétrodo superior é muito mais rápido quando comparado com o elétrodo inferior, ao passo que o oposto acontece com a descarga, sendo a carga injetada pelo elétrodo superior descarregada muito mais lentamente do que a injetada através do elétrodo inferior. Esta diferença de tempos de carga e de descarga entre o elétrodo superior e o elétrodo inferior vai levar a que a tensão de atuação do atuador apresente um comportamento como o apresentado na Figura 2.3. Assim, quando a atuação é removida, a carga injetada pelo elétrodo inferior vai descarregar, todavia a carga negativa injetada pelo elétrodo superior vai descarregar muito mais lentamente, provocando uma subida no valor da tensão de atuação do interruptor, levando horas até voltar ao seu valor original.

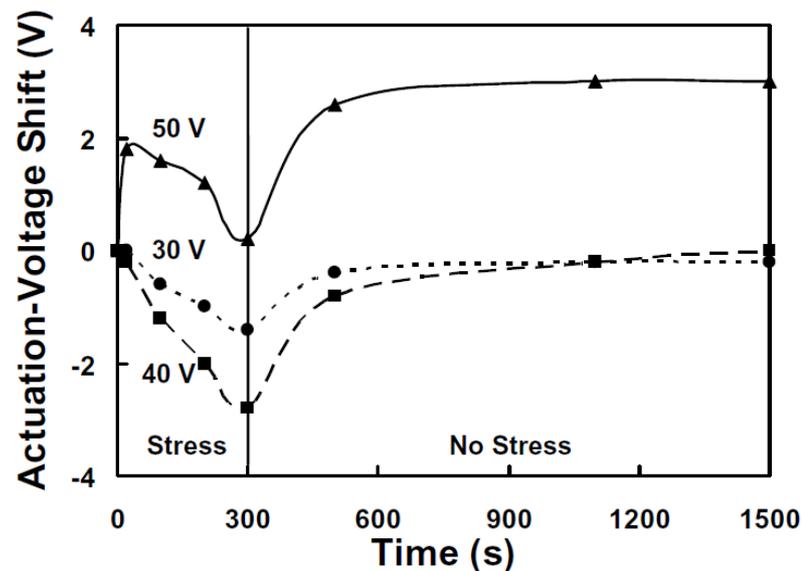


Figura 2.3 – Variação da tensão de atuação sobre tensões de 30V, 40V e 50V [2]

Para tensões de controlo negativas, conclui-se em [2] que o comportamento do carregamento por parte do elétrodo inferior é semelhante ao das tensões positivas. Contudo, para o carregamento do dielétrico por parte do elétrodo superior, é necessário aplicar uma tensão de valor mais elevado

quando em tensões de controlo negativas. Para além desta característica, a carga injetada pelo elétrodo inferior apresenta um menor tempo de carga e um maior tempo de descarga quando comparado com o elétrodo superior. Por esta razão, o elétrodo superior possui um maior impacto na operação de comutação.

Além das diferenças no tempo de carga e de descarga, o *surface charging* (fenómeno associado ao carregamento do elétrodo superior) possui também a particularidade de aumentar o valor da tensão de *pull-in*, ao contrário do *bulk charging* (fenómeno associado ao carregamento do elétrodo inferior) que diminuiu o valor da tensão de *pull-in*.

2.2 Efeitos de Carga (Condições que afetam os efeitos de carga)

A acumulação de carga no dielétrico é reconhecida como um dos grandes problemas nos atuadores das estruturas *MEMS*, principalmente nos *RF*, o qual tem sido alvo de estudo intensivo nos últimos anos [1], [9], [11]–[17]. Este efeito provoca comportamentos indesejados no atuador, chegando mesmo a influenciar o tempo de vida do mesmo [1]. Assim, de modo a perceberem-se melhor os efeitos de carga, nas estruturas *MEMS*, foram já realizados vários estudos, principalmente em estruturas *RF MEMS*, cujo objetivo é identificar diferentes fatores que influenciam na acumulação de carga. A acumulação de carga no dielétrico ocorre por uma atuação no atuador, contudo esta acumulação pode ser influenciada por outros fatores, como já referido, como a temperatura[5], humidade ambiental [9], [16], espessura do dielétrico [11], [18], e o *packaging*.

2.2.1 Injeção de carga no dielétrico

Mesmo sendo um problema que afeta imenso as estruturas *MEMS*, principalmente as *RF*, a física por detrás da injeção de carga no dielétrico, aquando da atuação, ainda não é completamente percebida. No entanto, supõe-se que quando é aplicada uma tensão, as cargas vão ficar presas à superfície ou no interior do dielétrico. Contudo, como as membranas capacitivas, nos *RF*, estão sujeitas a atuações entre os 30V e os 50V, o campo elétrico total gerado pode ser entre os 1MV/cm e os 3MV/cm. Sob estas condições é possível que as cargas entrem no dielétrico devido a um fenómeno similar ao *Frenkel-Poole*, ficando então presas, pois não há nenhum caminho de condução conveniente. As cargas presas no dielétrico podem ficar desde alguns segundos até dias [1].

Uma contínua atuação sobre o atuador vai fazer com que a carga comece a acumular no dielétrico, uma vez que se encontra presa no dielétrico e não tem tempo suficiente para sair. A

acumulação desta carga vai começar a ser notória, pois a carga que fica retida no dielétrico vai exercer uma força eletrostática sobre o atuador, devido ao campo elétrico gerado, influenciando o comportamento do mesmo. Esta carga acumulada vai diminuir o tempo de vida das estruturas [1] e provocar comportamentos indesejados.

No modelo da estrutura em estudo nesta dissertação, a acumulação de carga vai diminuir o valor da tensão de *pull-in* [3], levando desse modo à diminuição do tempo de *pull-in*, diminuindo assim a sensibilidade do sensor [19], ou causando *offset* ao sensor.

2.2.2 Efeito da Espessura do Dielétrico

No artigo [11] é feito pela primeira vez o estudo do efeito que a espessura do dielétrico apresenta nos processos de carregamento de atuadores capacitivos *RF MEMS*. Foram utilizados condensadores *MIM*, cuja espessura vai desde os 100nm até aos 600nm. O dielétrico do condensador é de Si_3N_4 e foi depositado a uma temperatura de 150°C. O processo de carga foi feito utilizando o método de *TSDC* (*Thermally stimulated depolarization current*). A polarização nos condensadores *MIM* foi efetuada de modo a garantir um campo elétrico igual de 1MV/cm em todas as amostras. O modelo que permite obter a relação entre a carga acumulada e a espessura do dielétrico é dada por (2.1):

$$\sigma(d) = \sigma_0 d^\gamma, \tag{2.1}$$

onde σ representa a carga acumulada, d a espessura do dielétrico e σ_0 e γ são parâmetros obtidos através dos resultados experimentais. A dependência da carga acumulada relativamente à espessura do dielétrico é apresentada na Figura 2.4, assumindo que na ausência de dielétrico não há carga acumulada.

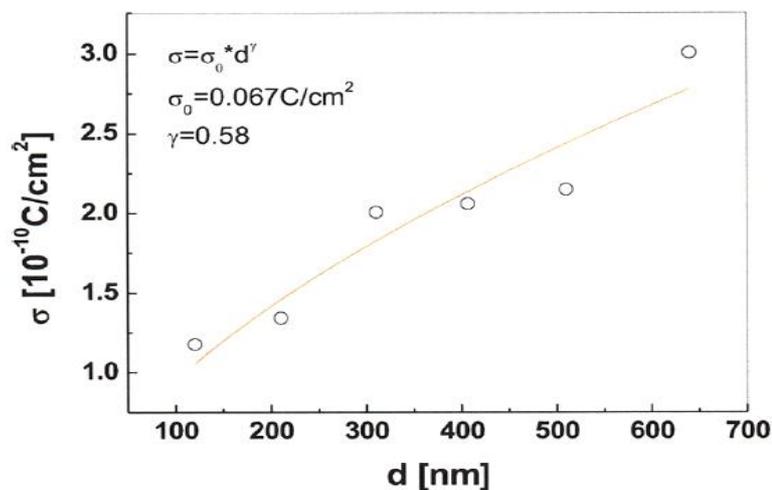


Figura 2.4 – Relação entre a carga acumulada no dielétrico e a espessura do dielétrico [11]

Em [11] é possível então concluir que quanto maior a espessura do dielétrico utilizado maior vai ser a quantidade de carga total injetada no dielétrico, assumindo que é aplicado um campo elétrico igual em todas as amostras.

No artigo [18] também foram efetuados testes, utilizando condensadores *MMM*, com o objetivo de observar a relação entre o campo elétrico a que um dielétrico está sujeito e a carga total acumulada. Para tal, foram usados dielétricos de S_iN_x com diferentes espessuras, 100nm, 200nm, 300nm e 400nm. Foram utilizados 3 métodos diferentes de medição da carga acumulada no dielétrico: *FDC-TF* (*Force Distance Curve - Thin Films*), *KPFM-TF* (*Kelvin Probe Force Microscopy - Thin Films*) e *C/DCT* (*Charge/Discharge Current Transient*). Na Figura 2.5, é apresentada a carga injetada medida em função do campo elétrico aplicado, para os 4 tipos de espessura de dielétrico utilizado. Os dados apresentados referem-se à técnica de *C/DCT*.

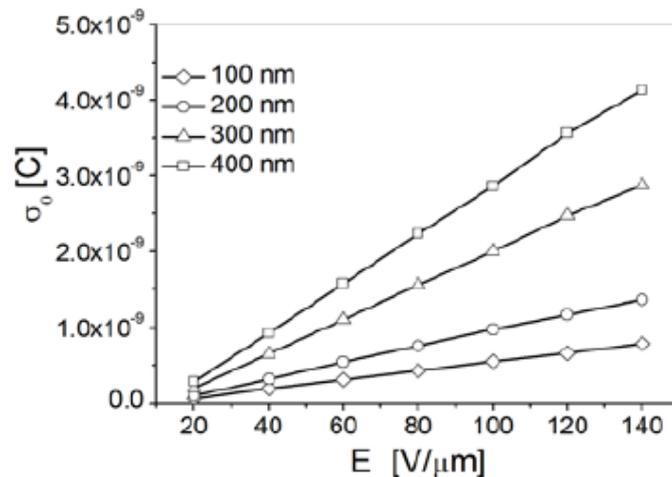


Figura 2.5 – Relação entre a carga acumulada no dielétrico e o campo elétrico, para diferentes dielétricos [18]

Através da análise da Figura 2.5 verifica-se que, com o aumento da espessura do dielétrico, para o mesmo campo elétrico aplicado, o valor da carga injetada medida aumenta também. Por comparação de resultados dos três métodos de medição de carga utilizados, *FDC-TF*, *KPFM-TF* e *C/DCT*, conclui-se que à medida que o campo elétrico e/ou a espessura do dielétrico aumenta, a densidade de carga injetada também aumenta.

2.2.3 Efeito da Temperatura

No artigo [20] foi caracterizado e modelado o efeito da temperatura no carregamento do dielétrico em interruptores *RF MEMS* capacitivos. Foi feito um modelo com o objetivo de prever a quantidade de carga injetada no dielétrico e a consequente alteração da tensão de *pull-in* quando sujeito a diferentes valores de temperatura. O estudo da carga do dielétrico foi feito recorrendo a um

condensador *MMM*, aplicando uma tensão de -30V no elétron inferior do interruptor durante diferentes períodos de tempo e para diferentes temperaturas. O dielétrico possui uma espessura de 250nm e o seu material constituinte é o dióxido de silício. Para determinar a dependência da densidade de carga foram feitas medições com temperaturas de -50°C, -25°C, 0°C, 25°C, 50°C e 75°C. Recorrendo ao modelo de corrente estudado em [4], obteve-se através dos resultados experimentais medidos, o valor da densidade de carga. Com os valores extraídos, calculou-se a relação entre a temperatura e a densidade de carga, tal como apresentado na Figura 2.6.

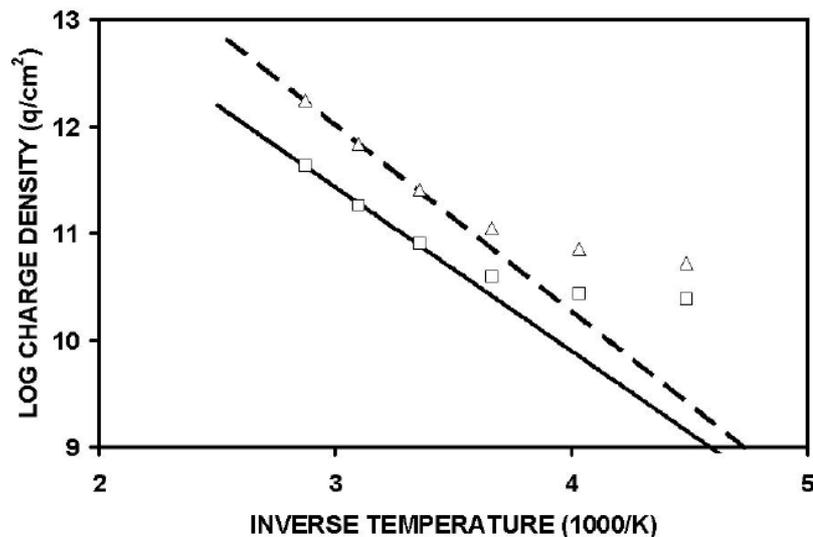


Figura 2.6 – Relação entre a densidade de carga e a temperatura. Densidade de carga extraída, trap1 (□) e trap2 (Δ) [20]

De acordo com os resultados apresentados na Figura 2.6, é possível observar que, para o mesmo valor de tensão, o aumento da temperatura leva a um aumento do valor da densidade de carga e, conseqüentemente, a um aumento do valor da tensão de atuação, sendo apresentada na equação (2.2) a relação entre a temperatura e a densidade de carga.

$$Q^J = Q_{0J} \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right), \quad (2.2)$$

onde Q_{0J} é um parâmetro obtido dos resultados experimentais, E_A é a energia de ativação, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura. Contudo, entre a temperatura e as constantes de tempo de carga e de descarga não se obteve qualquer tipo de relação, sendo os resultados apresentados na Figura 2.7.

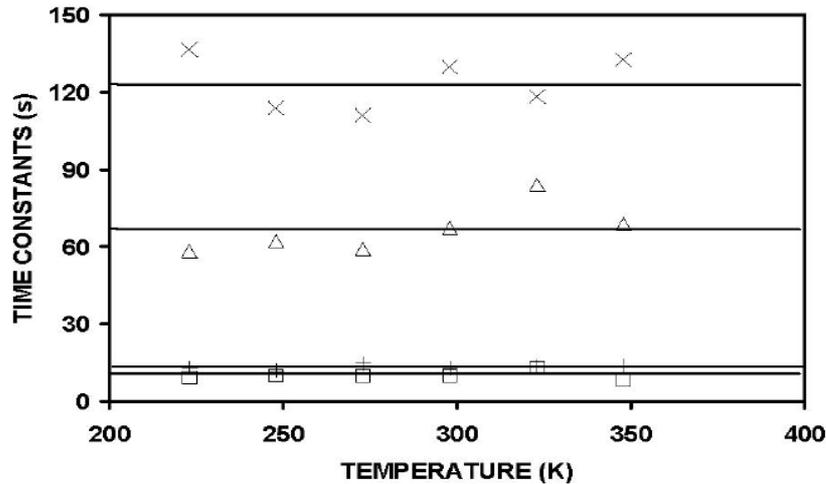
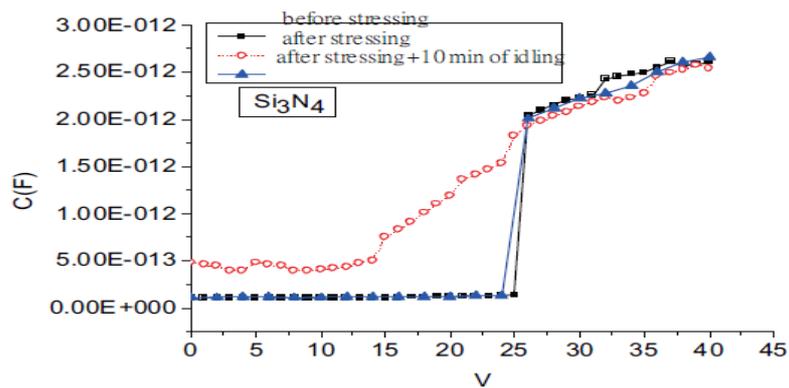


Figura 2.7 – Relação entre a temperatura e as constantes de tempo. Constantes de tempo extraídas trap1 (□) carga e (+) descarga, trap2 (Δ) carga e (x) descarga [20]

Assim, através dos modelos apresentados em [20], é possível concluir que, embora a densidade de carga aumente com o aumento da temperatura, para um mesmo valor de tensão de atuação, as constantes de tempo são independentes do valor da temperatura.

Maioritariamente, no estudo da injeção de carga, os materiais dos dielétricos com maior foco de estudo são os de SiO e SiN . Contudo em [5] é feito um estudo de comparação de um dielétrico de Si_3N_4 com um dielétrico de *nanodiamond* para a obtenção de uma relação de corrente-campo elétrico entre ambos os materiais, onde foram utilizados condensadores *MIM*. Foram aplicados vários níveis de tensão, 10V, 15V e 20V ao condensador de *nanodiamond* de modo a verificar que as constantes de tempo de descarga são independentes da tensão aplicada, tal como demonstrado em [4]. Com base nos valores obtidos dos transientes de corrente para o *nanodiamond*, concluiu-se que é um dielétrico melhor quando comparado com o de Si_3N_4 , pois possui tempos de descarga menores permitindo assim que a carga presa no dielétrico possa escapar mais rapidamente, reduzindo o efeito no valor da tensão de *pull-in*. Por fim, com o objetivo de testar a variação que a carga acumulada no dielétrico terá na variação da tensão de *pull-in*, foi aplicada uma tensão de 40V em ciclos de 80segundos, onde foi estudada a curva característica de C-V. O resultado deste teste é apresentado na Figura 2.8.



(a)

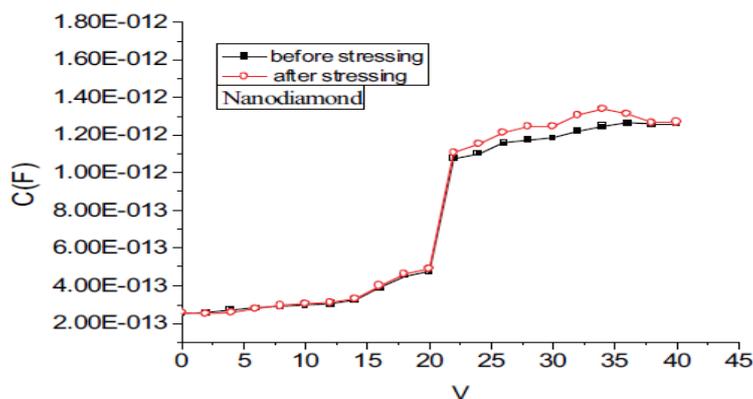


Figura 2.8 – Relação entre a carga acumulada no dielétrico e a tensão [5]

Através da Figura 2.8, é possível observar que o dielétrico constituído por Si_3N_4 vai baixar o valor da tensão de *pull-in* assim que se aplicam os 40V, querendo isto dizer que há carga acumulada no dielétrico do condensador. Todavia, no dielétrico de *nanodiamond*, não se observa grande alteração no valor da tensão de *pull-in*, ou seja, se ficar alguma carga acumulada no dielétrico vai descarregar rapidamente. Com estes resultados, pode-se concluir em [5] que o dielétrico de *nanodiamond* é melhor que o de Si_3N_4 pois minimiza a variação da tensão de atuação.

No artigo [21] foi feito o estudo da carga do dielétrico recorrendo a um condensador *MIM* com diferentes espessuras do dielétrico de Si_3N_4 . Neste artigo, é demonstrada a variação da carga acumulada no dielétrico do condensador com a temperatura de deposição do dielétrico. O valor do campo elétrico para as diferentes espessuras foi mantido constante. Na Figura 2.9 são apresentados os resultados de um teste realizado a dielétricos com diferentes espessuras, desde 100nm até aos 600nm, onde o objetivo era comparar a carga acumulada no dielétrico para diferentes temperaturas de deposição do dielétrico. Uns foram depositados a uma temperatura de 150°C e outros a uma temperatura de 250°C. É possível observar que os dielétricos, comparando a mesma espessura, depositados a 250°C, acumulam um maior valor de carga. Para além do aumento da carga acumulada

com a temperatura, é também possível observar um aumento da carga acumulada com o aumento da espessura do dielétrico.

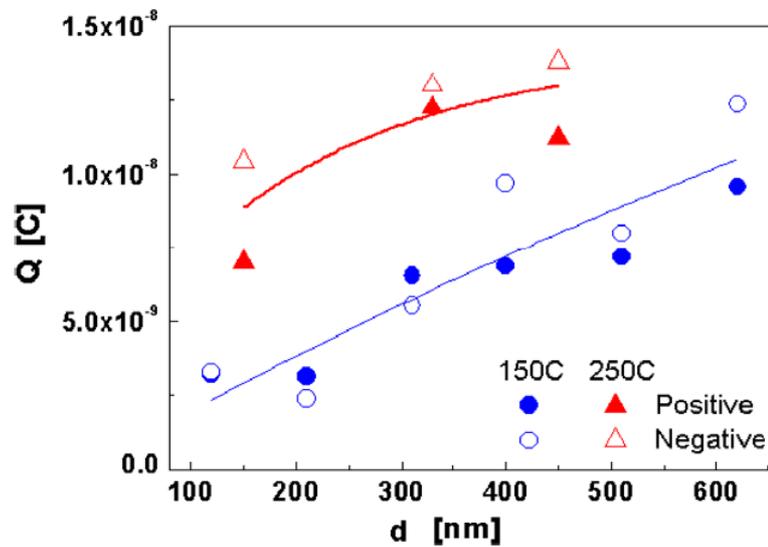


Figura 2.9 – Relação entre a carga acumulada e a espessura do dielétrico para diferentes temperaturas de deposição [21]

2.2.4 Efeito da Humidade

No artigo [16] foi medida a resposta da capacitância de interruptores de estruturas *RF MEMS* para diferentes níveis de humidade. O dielétrico utilizado nos testes é de nitreto de silício e foi depositado a uma temperatura de 350°C . Os valores observados para os diferentes níveis de humidade relativa, 20%, 50% e 80% revelam que a injeção de cargas aumenta linearmente com o aumento da humidade relativa para uma tensão de atuação constante de 30V, sendo os resultados obtidos apresentados na Figura 2.10.

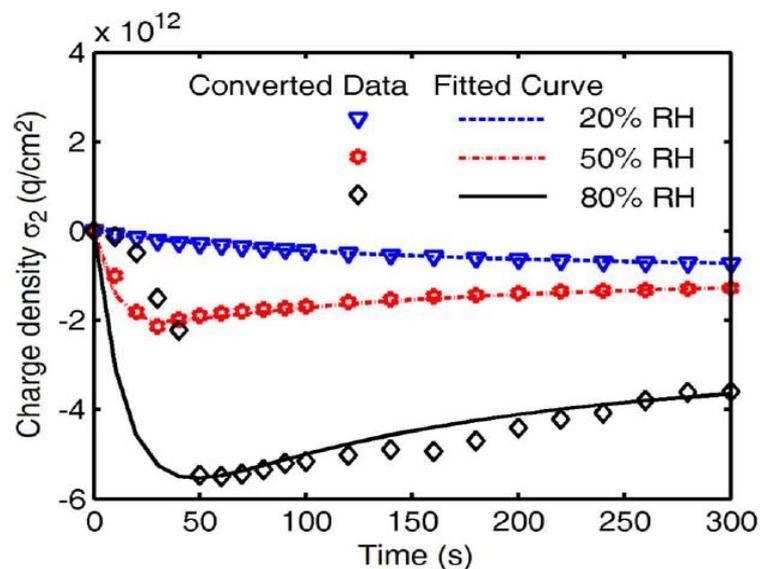


Figura 2.10 – Acumulação de carga no dielétrico para diferentes níveis de humidade [16]

Além de uma maior acumulação de cargas no dielétrico com o aumento da humidade, o aumento da humidade também leva a que a velocidade da injeção das cargas seja cerca de 10 vezes mais rápida para uma humidade relativa de 80% do que para a de 20%. Assim, de modo a verificar os resultados até aqui obtidos, foi medida a variação da tensão de *pull-in* para dois níveis diferentes de humidade relativa 20% e 80%. Cada ciclo de tensão teve uma duração de 3.5 segundos, sendo que a mesma ia desde os 0V até aos 50V. Por observação da Figura 2.11 conclui-se que para uma humidade relativa de 80%, a variação do valor da tensão de *pull-in* vai ser maior que a variação da tensão de *pull-in* quando sujeita a uma humidade relativa de 20%, confirmando assim os resultados obtidos e apresentados na Figura 2.10 onde, para o maior valor de *RH*, a injeção de carga seria maior.

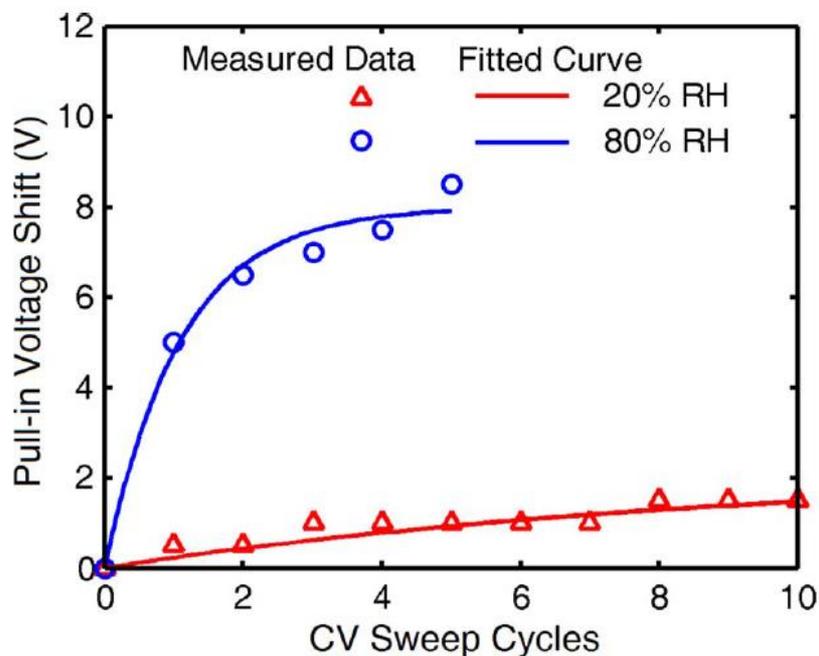


Figura 2.11 – Medição da variação da tensão de *pull-in* para diferentes níveis de humidade [16]

No artigo [9] são utilizados três tipos diferentes de materiais SiO_2 , SiN_x e SiN_y , com espessuras do dielétrico de 250nm, 280nm e 200nm, respetivamente com o objetivo de estudar o impacto da humidade durante a carga do dielétrico. Para investigar o carregamento do dielétrico, nos interruptores são aplicadas tensões cujo valor pode ir até ao dobro da sua tensão de *pull-in*. O campo elétrico aplicado a cada um dos dielétricos foi igual para todas as amostras. Através do comportamento do valor da tensão de *pull-in* é efetuado o estudo da carga injetada na superfície do dielétrico e da carga injetada no interior do dielétrico para diferentes níveis de humidade. De modo a diferenciar o *surface charge* do *bulk charge*, analisa-se o tempo que a tensão de *pull-in* demora a voltar ao seu valor normal, assim que se deixa de aplicar uma tensão. Uma vez que a carga do bulk descarrega em

segundos ou minutos, e a carga da *surface* descarrega em horas ou dias, e assim, a carga da *surface* pode ser quantificada através da análise do estado do carregamento ao fim de aproximadamente 20 minutos, dando tempo suficiente para a carga de *bulk* se dissipar completamente. A *surface charging* tem também a particularidade de aumentar o valor da tensão de *pull-in*, ao contrário da *bulk charging*, que diminui o valor da tensão de *pull-in*. Quando os interruptores são sujeitos a um campo elétrico, o aumento do nível da humidade faz com que a tensão de *pull-in* do interruptor demore mais tempo a retornar ao seu valor original. Para uma humidade de 5%, a tensão de *pull-in* diminui enquanto lhe é aplicada uma tensão, indicando assim que a variação da tensão de *pull-in* se deve ao *bulk charging*, sendo possível negligenciar o *surface charging*. Com o aumento da humidade, o *surface charging* vai ficar mais dominante relativamente ao *bulk charging*. Deste modo, conclui-se que com uma humidade de 0% a carga de *bulk* é predominante, ao passo que a carga de *surface* aumenta linearmente com o aumento da humidade. Como a carga de *surface* descarrega muito lentamente, é imperativo para o tempo de vida dos interruptores que estes estejam numa *package* com uma humidade relativa inferior a 1%.

2.2.5 Efeito do *Packaging*

Como já mencionado antes, as próprias condições ambientais, como a humidade, influenciam a carga acumulada no dielétrico. Deste modo, em [12] foi utilizado um método inovador como forma de avaliar a eficácia do *packaging*, cujo objetivo é manter um ambiente atmosférico seco para os interruptores capacitivos *RF MEMS* prevenindo assim o *surface charging*, que é caracterizada por ter longos tempos de descarga. Nos testes foram utilizados dois tipos de interruptores capacitivos, um de dióxido de silício e outro com nitreto de silício, com uma espessura de 250nm e 280nm respetivamente. Graças ao *packaging*, a *surface charging* é negligenciável e o *bulk charging* é minimizado, permitindo assim aos interruptores atingir um tempo de vida superior a 250 mil milhões de ciclos em operação. Dos testes efetuados a interruptores com e sem *packaging*, os resultados demonstraram que nos interruptores sem *packaging* a tensão de *pull-in* demorava mais tempo a voltar ao seu valor original, devido à *surface charge*.

2.3 Modelização dos efeitos de carga

Em [4] é apresentado um modelo para uma estrutura *MIM*, na Figura 2.14, que permite relacionar a carga total injetada no dielétrico do atuador com a variação da tensão de *pull-in* do mesmo.

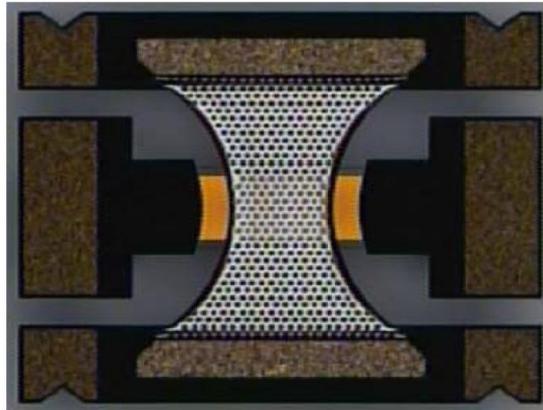


Figura 2.12 – Estrutura *MIM RF MEMS* de um interruptor capacitivo [4]

De modo a quantificar a carga injetada no dielétrico de um interruptor *RF* capacitivo foram efetuadas medições da corrente de carga e de descarga na estrutura apresentada na Figura 2.12. O interruptor apresenta um dielétrico em dióxido de silício com uma espessura de 250nm. Quando o interruptor é atuado, a membrana superior do interruptor vai entrar em contacto com o dielétrico, que cobre o elétrodo inferior, formando um condensador com uma área de 120 μm x 80 μm .

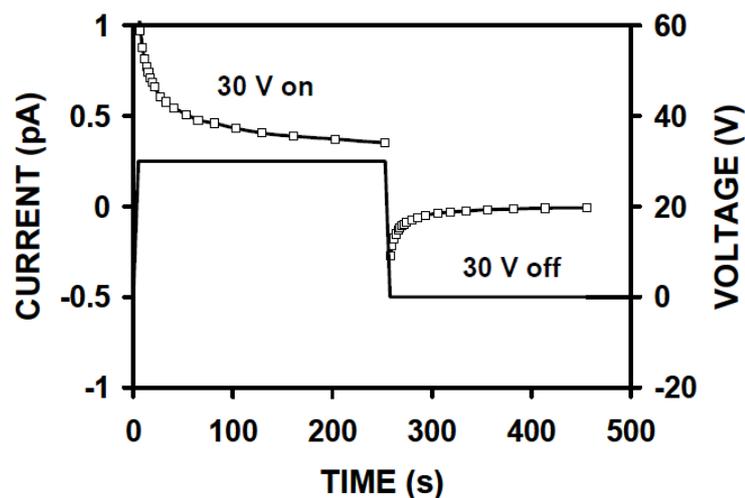


Figura 2.13 – Forma da Corrente de Carga/Descarga [4]

Na Figura 2.13, é apresentada a forma de onda da corrente de carga, que é obtida enquanto se aplica uma tensão constante, neste caso em particular de 30V. Durante o período no qual é aplicada a tensão, a carga vai-se acumular no dielétrico do atuador, ficando presa. Quando essa tensão

é removida, a carga acumulada nos elétrodos e no dielétrico começa a descarregar. Como a constante de tempo do deslocamento da corrente é na ordem dos milissegundos, então a corrente na Figura 2.13 contém maioritariamente corrente de carga e descarga do dielétrico. O modelo que descreve corretamente o transitório de corrente durante a sua carga para uma estrutura *MMM*, é apresentado na equação (2.3):

$$I_C = qA \frac{dQ}{dt} = qA \sum_J \frac{Q^J}{\tau_C^J} \exp\left(\frac{-t_{on}}{\tau_C^J}\right), \quad (2.3)$$

onde q é a carga de um eletrão e A é a área do dielétrico. Q^J é o valor máximo de densidade de carga que o dielétrico consegue armazenar para um determinado valor de tensão, τ_C^J é a constante de tempo de carga, τ_D^J é a constante de tempo de descarga e t_{on} e t_{off} são os tempos de atuação correspondentes à carga e à descarga, respetivamente. O modelo de descarga vai ser similar ao da carga, sendo o mesmo dado por (2.4):

$$I_C = -qA \frac{dQ}{dt} = -qA \sum_J \frac{Q^J}{\tau_C^J} \exp\left(\frac{-t_{on}}{\tau_C^J}\right). \quad (2.4)$$

De modo a investigar a relação da tensão, durante os períodos de carga e descarga de corrente, com os parâmetros apresentados nos modelos (2.3) e (2.4) foram aplicadas várias tensões de valor fixo de -40V, -30V, -20V, 20V, 30V e 40V, que com recurso aos resultados experimentais e às equações (2.3) e (2.4) é possível calcular o valor de Q^J e τ^J , durante os períodos de carga e descarga respetivamente.

Na análise dos resultados obtidos de Q^J e de τ^J , com recurso às equações (2.3) e (2.4), é possível observar, através da Figura 2.14, que as constantes de tempo de carga e descarga, τ^J , não apresentam qualquer relação com o valor de tensão aplicado.

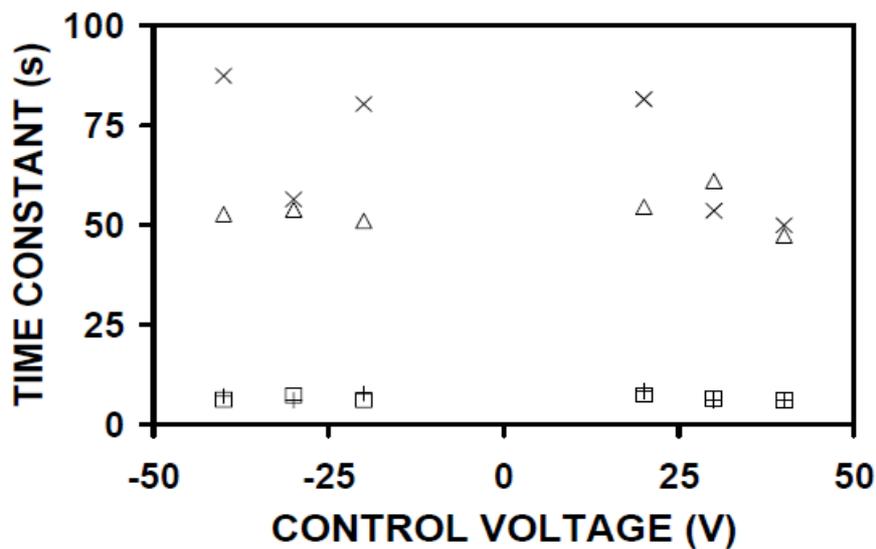


Figura 2.14 – Relação entre a tensão aplicada e as constantes de tempo de carga e descarga. Constantes de tempo extraídas trap1 (□) carga e (+) descarga, trap2 (Δ) carga e (x) descarga [4]

Contudo, para os diferentes valores de tensão aplicados, apresentados na Figura 2.15, os valores obtidos da densidade de carga, Q^J , variam exponencialmente com o valor da tensão que foi aplicada ao interruptor, obedecendo à equação (2.5):

$$Q^J = Q_0^J \exp\left(\frac{V}{V_0^J}\right), \quad (2.5)$$

onde V é a tensão aplicada, enquanto que Q_0^J e V_0^J são parâmetros obtidos através dos resultados experimentais.

Os resultados obtidos das medições, apresentados na Figura 2.15, mostram ser possível observar uma relação entre a tensão e o Q^J , tanto para as tensões positivas como para as tensões negativas. Além de ambas obedecerem à equação (2.5), também é possível observar que para os valores de tensão análogos, os valores da densidade de carga, Q^J , são aproximadamente iguais.

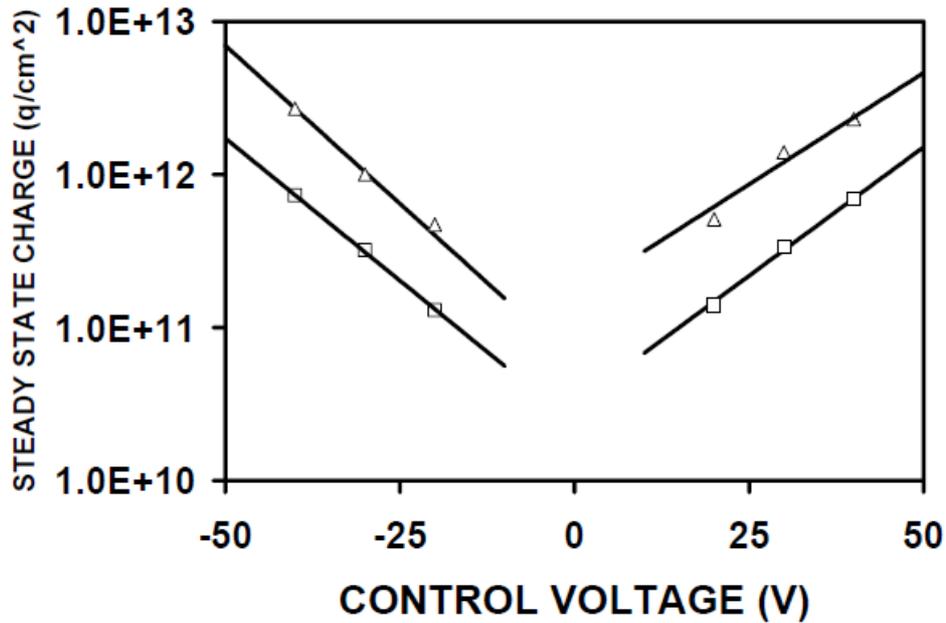


Figura 2.15 – Relação entre a tensão aplicada (V) e a densidade de carga em regime permanente (Q^J) [4]

Para o cálculo da carga total injetada no dielétrico da estrutura, recorre-se à equação (2.6). Na equação são tidos em conta os tempos de t_{on} e t_{off} , que correspondem aos tempos de carga e descarga, respetivamente, isto é, os tempos em que é aplicada uma tensão é dada por t_{on} , enquanto que os tempos onde não é aplicada qualquer tensão é dada por t_{off} .

$$Q = \sum_J Q^J \left[1 - \exp\left(\frac{-t_{on}}{\tau_{JC}}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_{off}}{\tau_D}\right). \quad (2.6)$$

Devido às várias atuações efetuadas sobre o interruptor, como já referido, a carga vai ficar presa no dielétrico, o que vai criar uma diferença de potencial entre os elétrodos do condensador. Essa diferença de potencial provoca uma alteração no valor da tensão de *pull-in* do atuador. Assim, com o valor da carga injetada, através da equação (2.7) pode-se calcular a variação da tensão de *pull-in* do interruptor provocada pela carga injetada no dielétrico:

$$\Delta V = \frac{qhQ}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}, \quad (2.7)$$

onde h é a espessura do filme de carga acumulada no elétrodo inferior, que se supõe que esteja distribuída pela espessura total do dielétrico, Q é a carga injetada calculada através de (2.6) e ε_0 e ε_r são os parâmetros do dielétrico, constante dielétrica do ar e do vácuo respetivamente. Na Figura 2.16 é apresentada a variação da tensão calculada recorrendo à equação (2.7) ao longo do tempo.

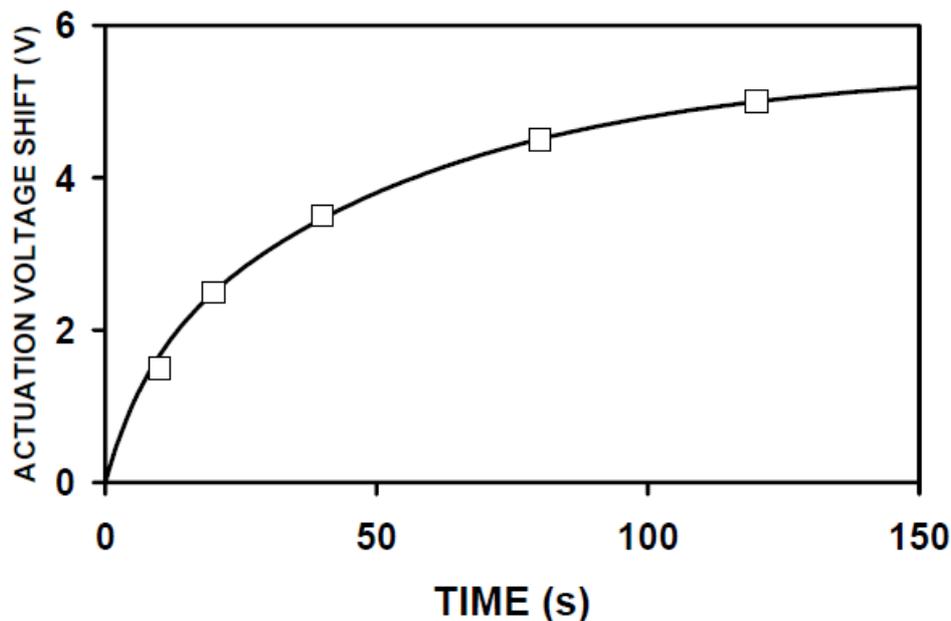


Figura 2.16 – Variação da tensão de *pull-in* ao longo do tempo, com uma tensão de atuação de -30V [4]

A Figura 2.16 apresenta a variação da tensão de atuação que o atuador sofre devido à carga acumulada no dielétrico. Esta variação é positiva, pois a tensão que está a ser aplicada é negativa, ou seja, a carga injetada no dielétrico do atuador vai ser negativa, como vai ser estudado no sub-capítulo 2.4, e não porque o atuador está sujeito a injeção de carga por parte do eletrodo superior, como o estudado em 2.1.2.

2.4 Métodos para anular a carga acumulada no dielétrico

Em [7] é proposto um método que permite a redução da carga que fica acumulada no dielétrico, através de uma atuação bipolar ao invés de uma atuação unipolar. Assim, alternando a tensão entre tensões positivas e tensões negativas recorrendo a interruptores *RF* capacitivos, foi efetuada uma modelização da carga do dielétrico. Como quando se aplica uma tensão positiva no atuador são injetadas cargas positivas no dielétrico e com a aplicação de uma tensão negativa injeta-se carga negativa no dielétrico, então é pretendido anular a carga injetada através de uma coordenação entre a atuação destas duas ondas.

As formas de onda de tensão aplicadas ao interruptor são apresentadas na Figura 2.17. As tensões aplicadas ao interruptor são de -30V, 0V e 30V.

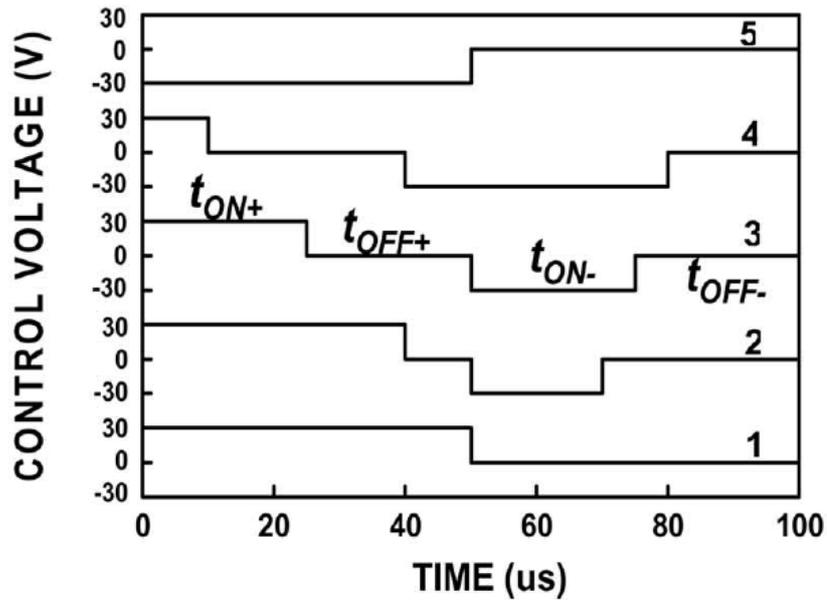


Figura 2.17 – Formas de onda da tensão de atuação [7]

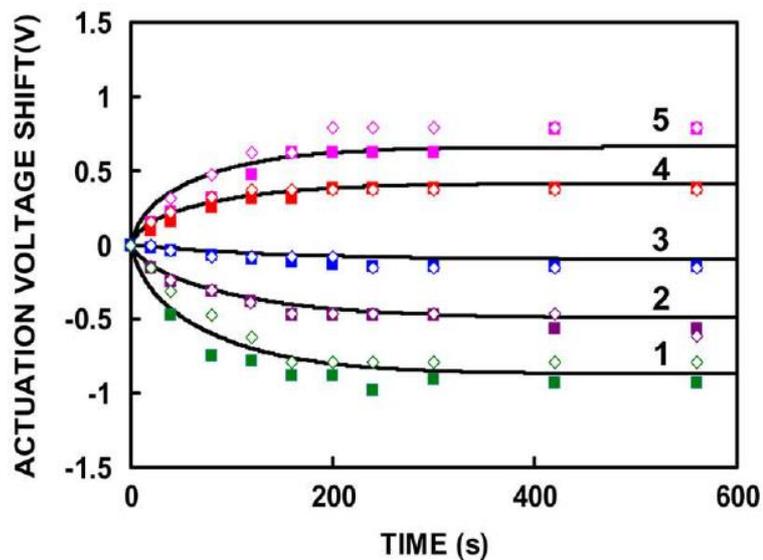


Figura 2.18 – Medição da variação da tensão de atuação. Frequência de comutação de 10hz(■) e 10khz(◇) [7]

Na Figura 2.18 são apresentados os resultados modelados, dados por uma curva, e os resultados medidos a uma frequência de 10hz, representados por um quadrado e a uma frequência de 10khz, representados por um losango, correspondentes aos tempos de atuação apresentados na Figura 2.17. Recorrendo a análise de ambas as figuras, é possível observar que com uma atuação simétrica, em termos de tempos de atuação, a medição número 3 é a que melhor consegue eliminar a carga acumulada no dielétrico.

No entanto, devido a uma diferença sutil entre os valores de carga acumulada quando aplicada uma tensão positiva de quando é aplicada uma tensão negativa, vai gradualmente acumular-se carga no dielétrico mesmo quando sujeito a uma atuação bipolar simétrica.

3. FENÓMENO DE *PULL-IN* ESTRUTURAS *MEMS*

Tendo em conta que o trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo, para além da modelização e caracterização dos efeitos de carga em atuadores *MEMS* capacitivos, verificar a variação do valor da tensão de *pull-in* com a carga total acumulada nos dielétricos dos atuadores, é necessário estudar e perceber o efeito de *pull-in* para, deste modo, se entender como é que a carga acumulada nos dielétricos vai provocar uma alteração no valor do mesmo.

O fenómeno de *pull-in* tem sido alvo de uma extensa pesquisa muito devido às suas características únicas [7], [18], [23]–[27]. Este fenómeno ocorre em estruturas *MEMS* baseadas na atuação eletrostática de placas paralelas. O efeito de *pull-in* é caracterizado pela perda do equilíbrio entre a força elástica e a força eletrostática. Este efeito pode ser dividido em duas análises, numa análise estática ou numa análise dinâmica. Numa análise estática, a tensão aplicada aos elétrodos atuadores varia lentamente permitindo, por isso, encontrar a tensão de *pull-in* que ocorre a 1/3 do espaçamento entre os elétrodos de uma estrutura de 1-*DOF* (*Degree-of-Freedom*). Na análise estática, as forças de inércia e de amortecimento são negligenciadas. No entanto, quando é aplicado um degrau de tensão, a análise estática deixa de ser válida, sendo necessário incluir as forças de inércia e de amortecimento para detetar eficazmente o movimento da estrutura. Neste caso, está-se perante uma análise dinâmica, onde todas as forças que atuam no sistema são tidas em consideração para uma análise detalhada do movimento da estrutura [23].

O efeito de *pull-in* é uma característica única do domínio dos *MEMS* e, embora esteja limitado por tensões de rutura, estas têm de ser extremamente elevadas, tendo em consideração os espaçamentos apresentados entre os elétrodos. No artigo [27] é possível verificar que é preciso aplicar uma tensão com cerca de 300V para provocar uma tensão de rutura, quando o espaçamento entre os elétrodos é de 2 μ m. Estes valores são obtidos através da curva de *Paschen* e variações da mesma. Como as tensões a aplicar aos elétrodos são na ordem dos 5V e o espaçamento é de 2.25 μ m, então não há risco de ocorrer uma tensão de rutura.

As estruturas *MEMS* a analisar apresentam um movimento com 1-*DOF*, cujo movimento se realiza perpendicularmente à área dos seus condensadores. Na Figura 3.1, é apresentado um modelo básico de uma estrutura de placas paralelas, onde um dos elétrodos do condensador se encontra preso por uma mola e o elétrodo oposto é fixo.

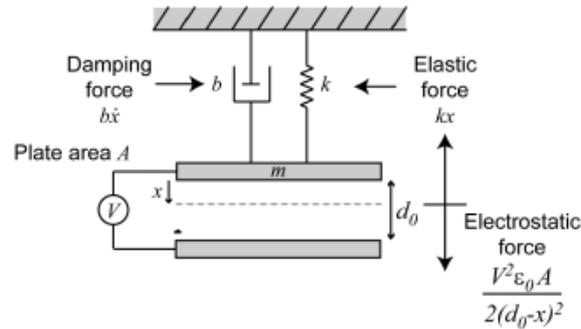


Figura 3.1 – Topologia de um sistema eletromecânico de placas paralelas com 1-DOF [19]

3.1 Estrutura 1 – DOF

Quando aplicada uma tensão aos terminais do condensador vai surgir uma força eletrostática de atração, fazendo com que o eletrodo móvel se desloque em direção ao eletrodo fixo. A força eletrostática é dada pela equação (3.1):

$$F_{\text{eletrostática}} = \frac{1}{2} V^2 \frac{C_0}{(d_0 - x)^2} \quad (3.1)$$

Através da análise da equação (3.1), facilmente se conclui que à medida que a distância entre os eletrodos diminui, a força eletrostática vai aumentar de uma forma não linear.

Em oposição ao movimento da estrutura, devido à força eletrostática vai surgir a força elástica, dada por (3.2), que também vai aumentar à medida que os eletrodos se aproximam um do outro. No entanto, esta força, ao contrário da força eletrostática, vai variar linearmente com o deslocamento efetuado pelo eletrodo que se encontra preso à mola.

$$F_{\text{elástica}} = -kx \quad (3.2)$$

Uma outra força que surge com o movimento da estrutura é a força de amortecimento, e é dada por (3.3). Esta força vai-se também opor ao movimento da estrutura, cujo valor vai variar de acordo com a velocidade a que a estrutura se move, assim como da constante de amortecimento, b . A constante de amortecimento vai contudo depender da geometria da estrutura e do fluido que se encontra no seu interior.

$$F_b = -b \frac{dx}{dt} \quad (3.3)$$

Outra força que surge em oposição ao movimento da estrutura é a força de inércia dada por (3.4). Esta força vai depender do peso total da estrutura e da aceleração que a mesma sofre durante o movimento.

$$F_i = -m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.4)$$

O sistema pode também estar sujeito a forças externas, como por exemplo, a aceleração. Esta força é dada por (3.5) e pode atuar no mesmo sentido do movimento da estrutura, ou no sentido oposto ao movimento da estrutura, ajudando ou opondo-se ao movimento, respetivamente.

$$F_{aext} = ma_{ext} \quad (3.5)$$

Com isto, as forças atuantes no sistema vão ser dadas por (3.6):

$$F_{elect} + F_{elastica} + F_b + F_i + F_{aext} = 0 \quad (3.6)$$

Na secção 3.1.1, vai ser feito um estudo mais detalhado das forças atuantes no sistema. Esta tem como objetivo uma análise estática do efeito de *pull-in*, que tem como principal papel o estudo do ponto de equilíbrio da estrutura, considerando apenas a força eletrostática e a força elástica.

3.1.1 Análise Estática

Numa análise estática do sistema, a força eletrostática e a força elástica são as únicas duas forças a atuar no sistema, negligenciando a força de inércia e a força de amortecimento que ocorre aquando do movimento da estrutura. A análise estática consiste basicamente em encontrar o ponto de equilíbrio entre a força elástica e a força eletrostática. À medida que o valor da tensão aplicada no condensador aumenta lentamente, de modo a que se mantenha o equilíbrio entre a força elástica e a força eletrostática, vai-se atingir um valor de tensão, conhecido como tensão de *pull-in*, em que a força elástica não consegue mais compensar a força exercida pela força eletrostática. Quando é atingida essa tensão, o eléctrodo móvel acelera em direção ao eléctrodo oposto até bater; no entanto, como as estruturas possuem *stoppers*, os eléctrodos não chegarão a tocar um no outro, ficando apenas a cerca de 0.25µm de distância. Esse ponto de equilíbrio é definido como tensão de *pull-in* que ocorre quando a estrutura se encontra a 1/3 do deslocamento total, em estruturas com 1-DOF. A tensão de *pull-in* é dada por (3.7):

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{d_0^2 k}{C_0}} \quad (3.7)$$

onde d_0 representa a distância inicial entre os eléctrodos do mesmo condensador, k a constante de elasticidade e C_0 a capacitância total dos condensadores atuadores em repouso.

Quando a tensão aplicada aos elétrodos é superior à tensão de *pull-in*, a força elástica não consegue mais compensar a força eletrostática e os elétrodos embatem um no outro. O *pull-in* é definido como a perda do equilíbrio entre as forças, elástica e eletrostática [23], [24], [28].

3.1.2 Variação da Tensão de *Pull-in* com a carga acumulada no dielétrico

Como abordado ao longo do capítulo 2, a constante atuação sobre os atuadores de uma estrutura vai levar a uma acumulação de carga no dielétrico do atuador. A acumulação desta carga, como também já referido, provoca, entre outros problemas, uma variação no valor da tensão de *pull-in*. Em [3] foi efetuada a medição da tensão de *pull-in*, com uma resolução de $100\mu\text{V}$, a uma estrutura com 2-DOF, de elétrodos paralelos, durante 26 dias, a uma temperatura constante de 32°C ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). O resultado da experiência é apresentado na Figura 3.2.

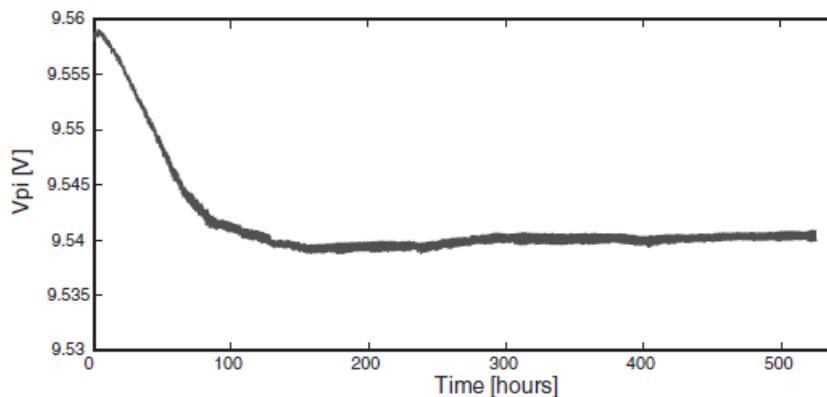


Figura 3.2 – Variação do valor da tensão de *pull-in* a uma temperatura constante [3]

Contudo, em [3] foi também questionada a hipótese de esta variação se dever a um stress mecânico, por isso, foi efetuado um novo teste, onde se parava a atuação sobre os atuadores durante algumas horas, resultando na Figura 3.3.

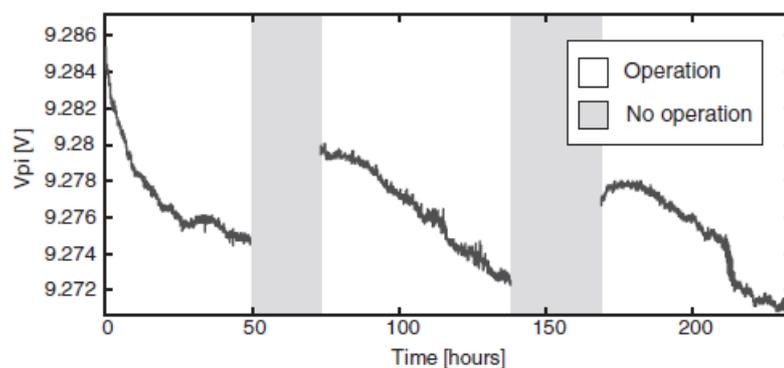


Figura 3.3 – Variação do valor da tensão de *pull-in* a uma temperatura constante com pausas na atuação [3]

Com os resultados apresentados na Figura 3.3, conclui-se em [3] que a variação do valor da tensão de *pull-in* não se deve ao stress mecânico pois, aquando da ausência da atuação, o valor da tensão de *pull-in* começa a recuperar o seu valor original.

É também importante referir que uma vez que o valor da tensão de *pull-in* vai baixar com a contínua atuação, então isso significa que o atuador está sujeito ao *bulk charging*. Ou seja, os tempos de carga do mesmo são maiores e os de descarga menores do que quando comparados com o *surface charging* [2].

A acumulação de carga, como observado na Figura 3.2, vai levar a uma variação da tensão de atuação. Esta variação é calculada em [3] e é dada por (3.8):

$$V_{offset} = \frac{d_d}{\epsilon_d} \sigma_p \quad (3.8)$$

onde d_d é espessura do dielétrico, ϵ_d é a permissividade do dielétrico e σ_p a densidade de carga acumulada no dielétrico. Esta variação de tensão é provocada pela acumulação de cargas que ficam presas no dielétrico. O novo valor da tensão de *pull-in* vai ser dado pelo valor inicial de *pull-in* subtraindo à variação de tensão provocada pela carga acumulada. A partir da equação (3.8) é possível observar que a variação da tensão de *pull-in* vai depender de d_d e ϵ_d do dielétrico bem como de σ_p .

No entanto, embora a acumulação de carga no dielétrico provoque a alteração da tensão de *pull-in*, em [29] foi calculado, para diferentes valores de carga acumulada, a posição da estrutura aquando da ocorrência de *pull-in*. Foi constatado que, para os diferentes valores de carga, a posição a que se dava o *pull-in* era constante, ou seja a 1/3 do deslocamento total da estrutura.

3.1.3 Variação da Tensão de *Pull-in* com a temperatura

Em [3], foi elaborado experimentalmente um teste com objetivo de determinar a relação da variação da tensão de *pull-in* com a temperatura em estruturas *MEMS* de placas paralelas. Para tal, foi efetuada a medição do valor da tensão de *pull-in* ao longo de 18 horas, com temperaturas a variar entre os 25°C e os 70°C. Os resultados da medição são apresentados na Figura 3.4.

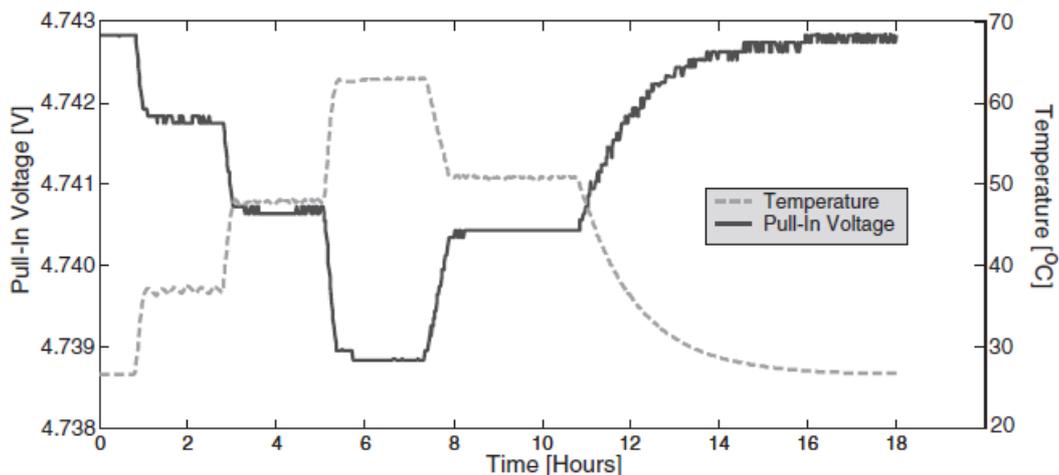


Figura 3.4 – Variação do valor da tensão de pull-in a diferentes valores de temperatura [3]

De acordo com a Figura 3.4, é facilmente observável que a diminuição da temperatura leva a um aumento da tensão de *pull-in* e o aumento da temperatura leva à diminuição do valor da tensão de *pull-in*. Uma variação na temperatura de cerca de 42°C provoca uma alteração de cerca de 4.2mV no valor da tensão de *pull-in*.

3.1.4 Estruturas MEMS

As estruturas MEMS utilizadas nesta dissertação contêm condensadores de placas paralelas e foram fabricadas através do processo SOIMUMPs. As estruturas são compostas por uma massa central que se encontra suspensa por molas. As estruturas são também compostas por dois conjuntos de elétrodos sensores e também por dois conjuntos de elétrodos atuadores. Os primeiros permitem, com recurso a um circuito de leitura, identificar a distância percorrida pela estrutura com precisão. Os segundos são compostos por dois conjuntos onde, quando atuados, levam a estrutura a mover-se: um dos conjuntos desloca a estrutura para a esquerda e o outro para a direita. A estrutura possui também *stoppers* mecânicos cujo objetivo é evitar que o elétrodo de um condensador bata no elétrodo oposto, aquando de uma atuação. A distância a que os *stoppers* se encontram da massa é dada pelo deslocamento máximo da estrutura. O movimento efetuado pela estrutura é no plano, isto é, o seu movimento ocorre perpendicularmente à área dos condensadores da mesma.

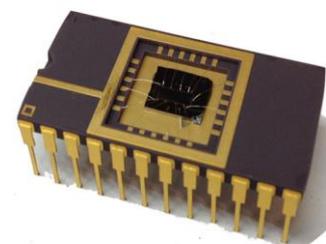


Figura 3.5 – Estrutura MEMS

Todas as estruturas utilizadas nos testes são provenientes do mesmo processo de fabrico, SOIMUMPs, por isso a espessura do dielétrico, para cada elétrodo, é esperado que seja igual em todas

as estruturas. Em todos os elétrodos, tanto o inferior como o superior, existe uma camada de dielétrico adjacente devido ao processo de fabrico, como apresentado na Figura 3.8.

Contudo, é também importante referir que a carga fica acumulada no dielétrico, portanto, quando se fala de uma maior capacitância numa determinada estrutura, o que de facto importa é que a quantidade de dielétrico total é maior. Por exemplo, assumindo que a espessura do dielétrico é sempre a mesma, um condensador com 10 braços no total vai ter uma maior camada de dielétrico do que um condensador com apenas 5 braços no total, assumindo também que todos os braços possuem as mesmas dimensões. Por simplificação, menciona-se o valor de capacitância dos atuadores da estrutura que, indiretamente, indica a camada de dielétrico da estrutura.

3.1.5 Eléttodos Atuadores

As estruturas *MEMS* utilizadas possuem eléttodos atuadores e eléttodos sensores. No entanto, apenas os primeiros influenciam o valor da tensão de *pull-in* de acordo com a equação (3.7). O valor da capacidade dos eléttodos atuadores também vai ser abordado mais à frente em 4.1.1, no que ao impacto da carga acumulada diz respeito.

A capacidade da estrutura vai ser dada pelo comprimento e espessura dos braços da mesma, bem como a distância inicial entre estes, de acordo com (3.9):

$$C_0 = \varepsilon \frac{A}{d_0}, \quad (3.9)$$

onde d_0 representa a distância inicial entre os eléttodos de um mesmo condensador, A representa a área do condensador e ε representa a permitividade dielétrica do gás que se encontra entre os eléttodos, neste caso, ar. Embora o valor de ε varie dependendo do gás no interior do condensador, a variação apresentada entre gases é insignificante, sendo por isso também insignificante a variação que vai provocar na força eletrostática [28].

Para deslocar a estrutura para a esquerda ou para a direita, vão ser utilizados dois grupos de condensadores atuadores cuja função vai ser deslocar a estrutura móvel. Cada um dos grupos tem como objetivo provocar o deslocamento da estrutura numa das direções, um desloca a estrutura para a esquerda, enquanto o outro desloca a estrutura para a direita. Cada um dos condensadores vai possuir um eléttodo na estrutura móvel enquanto o eléttodo oposto se encontra fixo. O movimento da massa móvel ocorre aquando da aplicação de uma tensão num dos grupos de atuadores, gerando uma força eletrostática que vai atrair os eléttodos de um mesmo condensador, fazendo assim com que a

estrutura se desloque em direção ao eletrodo fixo. Para cada grupo de atuadores, são utilizados oito condensadores.

Os *stoppers* evitam que os eletrodos de um mesmo condensador embatem um no outro, impedindo assim um curto-circuito. Os *stoppers* e a estrutura encontram-se ao mesmo nível de potencial, devido às molas que fazem a ligação entre a estrutura móvel e os *stoppers*. Os *stoppers* vão permitir um deslocamento máximo à estrutura de 2 μ m. De modo a evitar um desgaste precoce da estrutura por choque com os *stoppers*, para-se a atuação antes de a estrutura embater com os *stoppers*.

3.1.6 Dimensões das estruturas

As dimensões das estruturas utilizadas para o estudo do efeito de carga são apresentadas na Tabela 1. Os valores apresentados na Tabela 1 foram obtidos através da análise do *layout* das estruturas recorrendo ao *Rhinoceros*. Com estas dimensões vai ser possível calcular analiticamente o valor da massa da estrutura, da tensão de *pull-in*, da constante de elasticidade e da capacitância dos condensadores atuadores. O cálculo destes valores vai ser feito com base nas fórmulas apresentadas ao longo do Capítulo 3.

No entanto, no processo de fabrico, as estruturas vão estar sujeitas a *over-etching* e à deflexão. A primeira faz com que as dimensões das molas, atuadores e sensores sejam mais pequenos do que o expectável. A segunda altera a espessura da estrutura em diferentes valores, ao longo da mesma. Estas alterações levam a uma ligeira alteração do valor da tensão de *pull-in*. Os valores apresentados na Tabela 1 não têm em consideração as alterações provocadas pelo *over-etching* e pela deflexão.

Tabela 1 – Dimensões das estruturas utilizadas

Dimensões da Estrutura	S	A	B	C	NC
Número de elétrodos atuadores	8	12	8	8	4
Comprimento dos elétrodos (área sobreposta)	500 μ m	500 μ m	500 μ m	500 μ m	500 μ m
Largura dos elétrodos	30 μ m	30 μ m	30 μ m	30 μ m	30 μ m
Espessura da estrutura	25 μ m	25 μ m	25 μ m	25 μ m	25 μ m
Comprimento da mola ($l_1; l_2; l_3$)	485; 462; 485 μ m	485; 462; 485 μ m	465; 447; 465 μ m	485; 462; 485 μ m	485; 462; 485 μ m
Largura da mola ($w_1; w_2; w_3$)	4.5 μ m; 4.25 μ m; 4.5 μ m	4 μ m; 4 μ m; 4 μ m	4.5 μ m; 4.25 μ m; 4.5 μ m	4.5 μ m; 4.25 μ m; 4.5 μ m	4.5 μ m; 4.25 μ m; 4.5 μ m
Distância inicial dos elétrodos (d_0)	2.25 μ m	2.25 μ m	2.25 μ m	2.25 μ m	2.25 μ m
Capacidade dos atuadores (C_0)	0.394pF	0.59pF	0.394pF	0.394pF	0.197pF
Constante elástica total (k)	4.46 N/m	3.31 N/m	5.01 N/m	4.46 N/m	4.46 N/m
Tensão de Pull-In (V_{pi})	4.12V	2.9V	4.37V	4.12V	5.83V
Cavidades	Não	Não	Não	Sim	Não

Na Figura 3.6 é apresentada a imagem ao microscópio da estrutura A, sendo que no entanto, o desenho das outras estruturas é semelhante, podendo diferir no número de elétrodos que as constituem, ou nas dimensões das molas. O movimento de todas as estruturas apresentadas dá-se de acordo com a apresentada na Figura 3.6.

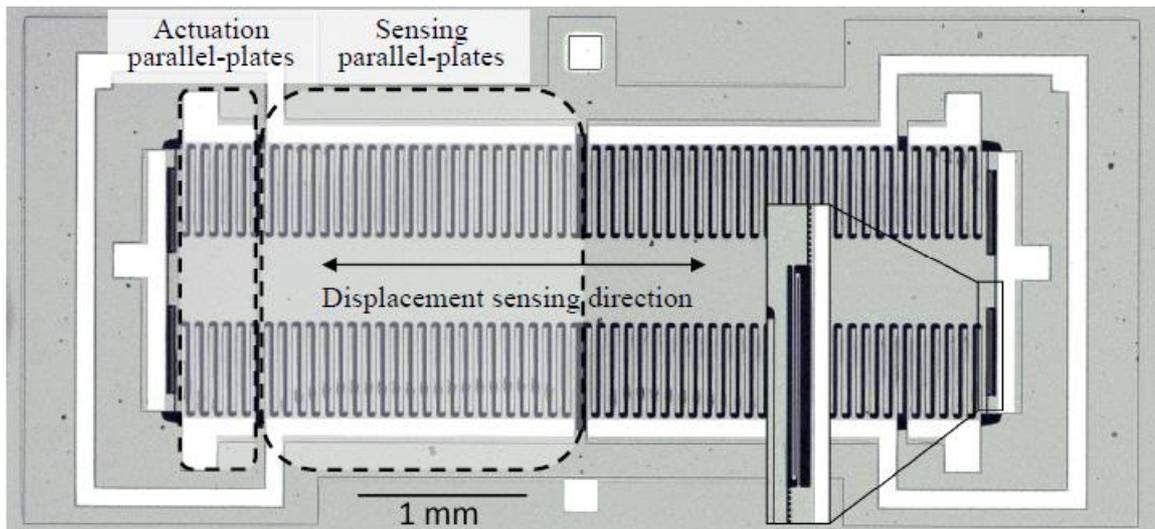


Figura 3.6 – Imagem microscópica da estrutura A [19]

É então apresentado na Tabela 2 o valor da tensão de *pull-in*, obtido experimentalmente, de todas as estruturas utilizadas para os testes. Através da análise dessa mesma tabela, é possível observar que o valor das tensões de *pull-in left/right* obtidas experimentalmente ainda diferem um pouco dos valores da tensão de *pull-in* calculados teoricamente apresentados na Tabela 1. Idealmente, os valores de $V_{pi_{left}}$ e $V_{pi_{right}}$ deveriam ser iguais, contudo, devido a fenômenos como *o over-etching*, deflexão ou mesmo uma ligeira inclinação da estrutura aquando da medição, estes valores são ligeiramente diferentes.

Tabela 2 – Tensão de *pull-in* das estruturas medidas experimentalmente

Estrutura	S3	A1	B	C	NC5
Tensão de <i>pull-in left</i> ($V_{pi_{left}}$)	5.676V	3.3V	5.4V	4.3V	6.6V
Tensão de <i>pull-in right</i> ($V_{pi_{right}}$)	5.507V	3.4V	5.1V	4.3V	6.6V

3.2 Modelo do atuador

Até agora, os estudos efetuados por [1], [4] foram feitos recorrendo a condensadores *MIM*, como o apresentado na Figura 2.2 e com atuações de tensão constantes.

Nesta dissertação, pretende-se criar um modelo genérico, de uma estrutura *MEMS* de placas paralelas, que permita determinar a variação do valor da tensão de *pull-in* devido à carga total acumulada no dielétrico dos atuadores, para diferentes tempos de atuação *on/off*. Ou seja, através do

controlo dos tempos de atuação e do valor da tensão de atuação, conseguir-se-á saber qual vai ser o valor da tensão de *pull-in*. Este modelo difere do apresentado em [4] pois, neste caso, a tensão de atuação vai ser variável no tempo, uma vez que o valor da tensão de *pull-in* vai baixar com a carga acumulada no dielétrico, como já visto em [3]. Em [4], as tensões de atuação são constantes, alternando entre um determinado valor de tensão e 0V. Após a obtenção destas relações, este modelo permitirá calcular matematicamente qual a variação do valor da tensão de *pull-in* para diferentes tempos de atuação *on* e *off*, para estruturas *MEMS* de placas paralelas.

Devido ao processo de fabrico, é depositada uma fina camada de *Teflon* nas paredes dos elétrodos dos atuadores [3]. Esta camada vai funcionar como um dielétrico, ou seja, com a aplicação de uma tensão sobre o atuador vai ser injetada carga no dielétrico do mesmo. Esta camada de dielétrico estima-se que seja de cerca de 12nm [3]. Na Figura 3.7, é apresentado o modelo dos diferentes atuadores que vão ser usados durante os diferentes testes efetuados.

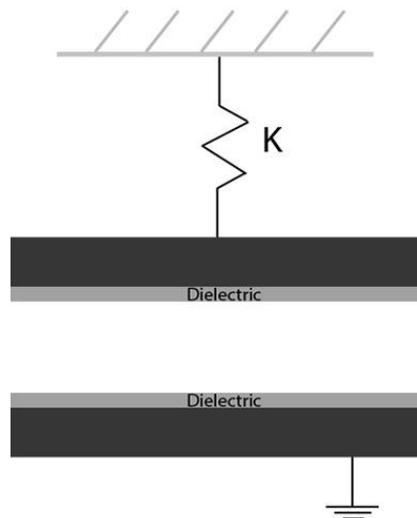


Figura 3.7 – Modelo de um condensador de placas paralelas

O modelo da Figura 3.7 pode ser traduzido num circuito equivalente elétrico como o apresentado na Figura 3.8.

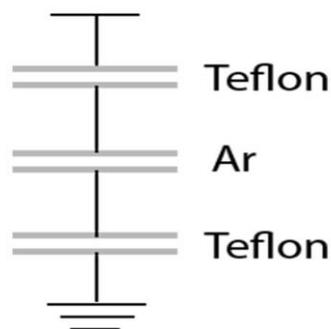


Figura 3.8 – Equivalente elétrico de um condensador com dois dielétricos

Como representado na Figura 3.8, cada um dos condensadores é subdividido em três condensadores, onde dois possuem o dielétrico constituído por *Teflon* e o terceiro tem como dielétrico o ar. Assim sendo, para o estudo em questão da acumulação de carga no dielétrico, o terceiro dielétrico, que é o ar, pode ser desprezado, considerando-se apenas os dois condensadores cujo material do dielétrico é o *Teflon*. Assim, através da análise da Figura 3.8, é possível observar que a carga vai ficar presa no dielétrico de cada um dos elétrodos, onde o constituinte do dielétrico é o *Teflon*. Assim, a espessura total da camada de dielétrico pode-se assumir como a soma de todos os dielétricos de cada um dos condensadores atuadores.

Na Figura 3.9 é também apresentada uma imagem microscópica de uma parede de silício, onde o dielétrico da mesma se encontra irregular resultante do *DRIE*.



Figura 3.9 – Imagem microscópica de uma parede de silício resultante do processo de fabrico da Bosch [30]

3.2.1 Densidade de Carga

Recorrendo aos cálculos apresentados em [3] conclui-se que a tensão aplicada ao condensador é dada por (3.10):

$$V_{aplicada} = E * d_{dielétrico}, \quad (3.10)$$

onde $V_{aplicada}$ é a tensão a que o condensador está sujeito, E é o campo elétrico do condensador e $d_{dielétrico}$ é a espessura do dielétrico. Ou seja, assumindo que se sujeita o condensador a dois diferentes valores de tensão, onde $V_1 = 2V_2$, então tem-se:

$$\begin{cases} V_1 = E_1 * d \\ V_2 = E_2 * d \end{cases} \Leftrightarrow 2 * E_2 * d = E_1 * d \Leftrightarrow E_2 = \frac{E_1}{2} \quad (3.11)$$

Através de (3.11) é possível concluir teoricamente que para uma tensão de atuação V_2 , o dielétrico vai estar sujeito a um campo elétrico com metade do valor do que estaria sujeito se fosse aplicada uma tensão de atuação V_1 .

Além da relação direta entre a tensão de atuação e o campo elétrico, o valor da densidade de carga está também diretamente relacionado com o valor do campo elétrico:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

Assim, através das equações (3.10) e (3.12), é possível observar a relação entre a tensão aplicada e a densidade de carga, em (3.13):

$$\begin{cases} V_{aplicada} = E * d_{dielétrico} \\ E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon} \end{cases} \Leftrightarrow V_{aplicada} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon} * d_{dielétrico} \quad (3.13)$$

Como a permitividade elétrica do dielétrico, ε , e a espessura do dielétrico, $d_{dielétrico}$, são constantes, a densidade de carga injetada no dielétrico do atuador, vai variar linearmente com o valor da tensão aplicada. No entanto, é também possível observar que o aumento da espessura do dielétrico, considerando um valor de atuação fixo, vai levar a uma diminuição da densidade de carga, assim como a diminuição da espessura do dielétrico vai levar a um aumento da densidade de carga injetada.

Em [4], é também relatada uma relação exponencial entre a densidade de carga e o valor de tensão aplicado. Ou seja, uma vez que, para um dielétrico, o aumento da tensão aplicado significa o aumento do campo elétrico a que o mesmo está sujeito [11], é aqui também possível concluir que o aumento do campo elétrico, num dielétrico, significa aumentar a densidade de carga que o dielétrico vai poder armazenar.

4. METODOLOGIA

Como já referido várias vezes ao longo da dissertação, esta tem como objetivo o estudo da carga acumulada no dielétrico dos atuadores para diferentes tempos de atuação *on/off*. Para tal, é necessário, primeiro, obter os modelos matemáticos que permitam determinar a quantidade de carga injetada nos mesmos. A aquisição destes modelos foi feita com base no estudo efetuado em [4] onde, através de uma estrutura *MMM*, se obtiveram os modelos de carga e descarga da carga injetada no dielétrico. Contudo, neste caso, a estrutura utilizada segue o modelo apresentado na Figura 3.7.

Neste capítulo, vai ser explicado em detalhe como foram efetuadas as medições para obter os resultados apresentados no capítulo 5. Os procedimentos realizados e os cuidados a ter em conta na execução das medições vão ser explicitados. Inicialmente é esclarecido como foi efetuada a medição da corrente de carga e descarga dos dielétricos dos atuadores, bem como o equipamento e ligações utilizadas para tal. Depois, é enunciado o modo como é feita a medição do valor da tensão de *pull-in* das estruturas *MEMS* utilizadas. Estas medições são realizadas com diferentes tempos de atuação, com o objetivo de tentar extrair modelos que permitam observar a variação do valor da tensão de *pull-in* para os diferentes tempos.

A medição das correntes de carga e descarga do dielétrico dos condensadores permite extrair os modelos de carga e descarga de corrente e, assim, saber qual a densidade de carga máxima que o dielétrico consegue acumular para uma determinada tensão. Com os modelos obtidos destas medições, através da medição da tensão de *pull-in* da estrutura, e sabendo os valores de tensão e os tempos dos degraus aplicados, é possível calcular a carga total injetada no dielétrico dos atuadores. Para isso, são efetuados testes com diferentes tempos de t_{on} e t_{off} , dos quais se podem extrair/perceber se existe uma relação entre esses tempos e o número de atuações até o dielétrico estar completamente carregado, com o objetivo de tentar diminuir o impacto da acumulação de carga no dielétrico para, por sua vez, diminuir o impacto no valor da tensão de *pull-in*.

É importante salientar que, neste caso, o foco do estudo apresenta tensões aplicadas variáveis, uma vez que o valor da tensão de *pull-in* vai diminuir devido à carga acumulada nos dielétricos [3], ao contrário de [4], onde a tensão aplicada sobre o atuador é fixa. Além do mais, durante a atuação não existe contacto entre os elétrodos, pois a atuação é desligada assim que é atingida a tensão de *pull-in*.

4.1 Medição das correntes de carga e descarga

Com base nos modelos de corrente apresentados em [4], a medição dos transitórios de corrente dos condensadores da estrutura foi efetuada com o intuito de obter o valor da densidade de carga máxima que o dielétrico do condensador consegue armazenar para um determinado valor de tensão.

A leitura dos transitórios de corrente dos condensadores, tanto os atuadores como os de leitura da estrutura, foi efetuada com recurso a um pico-amperímetro da *Keysight B2985A* e um adaptador *NI414A*. Tendo em conta que os valores de corrente esperados na leitura são muito baixos, foi necessário tomar certas precauções aquando da leitura da corrente, de modo a prevenir ao máximo a interferência de fatores externos, para tal [31]:

- Foi utilizada uma caixa metálica, onde foi colocado o sensor, cujo objetivo foi simular uma gaiola de *Faraday* para assim remover o ruído eletrostático.
- Foram utilizados cabos triaxiais para a medição da corrente de carga e descarga das cargas armazenadas no dielétrico do condensador para, através do sinal de *Guard*, reduzir ao máximo as correntes de fuga que ocorreriam entre o *Shield* e a *Force Line*. A linha de *Guard* vai reduzir estas correntes de fuga mantendo a linha de *Guard* ao mesmo potencial da *Force Line* (Ver Figura 4.1).

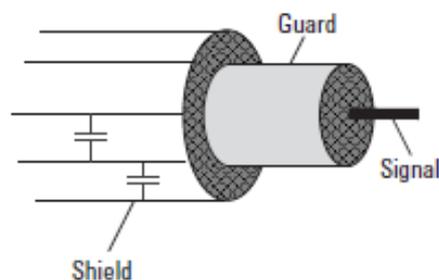


Figura 4.1 – Corte transversal de um cabo triaxial, com capacidades parasíticas do *shield* para a *guard* e do *guard* para a *force line* [31]

A montagem utilizada para a medição da corrente de carga e de descarga das cargas armazenadas no dielétrico do condensador é apresentada na Figura 4.2. Foi adotada uma configuração onde os terminais do *DUT* (Device Under Test) ligam diretamente ao amperímetro e à fonte *DC*. Esta configuração permite reduzir o impacto do ruído da massa nas medições. Para a medição de corrente, a ligação é feita entre a massa da estrutura e o pino correspondente do condensador atuador ou do condensador sensor, consoante a medição que se pretender efetuar. O esquema com os pinos da estrutura é apresentado no Anexo I.

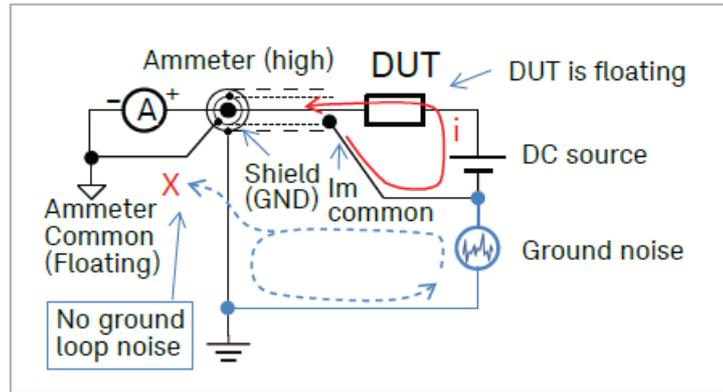


Figura 4.2 – Configuração de uma medição *floating* [32]

Para a execução dos diversos testes de medição de corrente, foi utilizado um *script* em *MATLAB*. Nos diversos testes efetuados, foram aplicadas tensões desde 1V até aos 4V, sendo que a corrente foi medida durante 40 segundos. Para cada uma das tensões aplicou-se um pulso de 20 segundos, de onde se obtém a corrente de carga do dielétrico. Os 20 segundos seguintes, período durante o qual a tensão aplicada é de 0V, correspondem à corrente de descarga do dielétrico. Não foi necessário recorrer a testes com um maior período, pois estes 40 segundos são suficientes para a corrente de carga e de descarga estabilizarem, ou seja, indicando que o dielétrico está totalmente carregado para o primeiro caso e descarregado para o segundo, para o respetivo valor de tensão de atuação.

Na Figura 4.3, é apresentada a montagem efetuada para a medição de corrente dos condensadores da estrutura. Esta montagem foi feita de acordo com a Figura 4.2 e tendo todos os cuidados até aqui referidos.

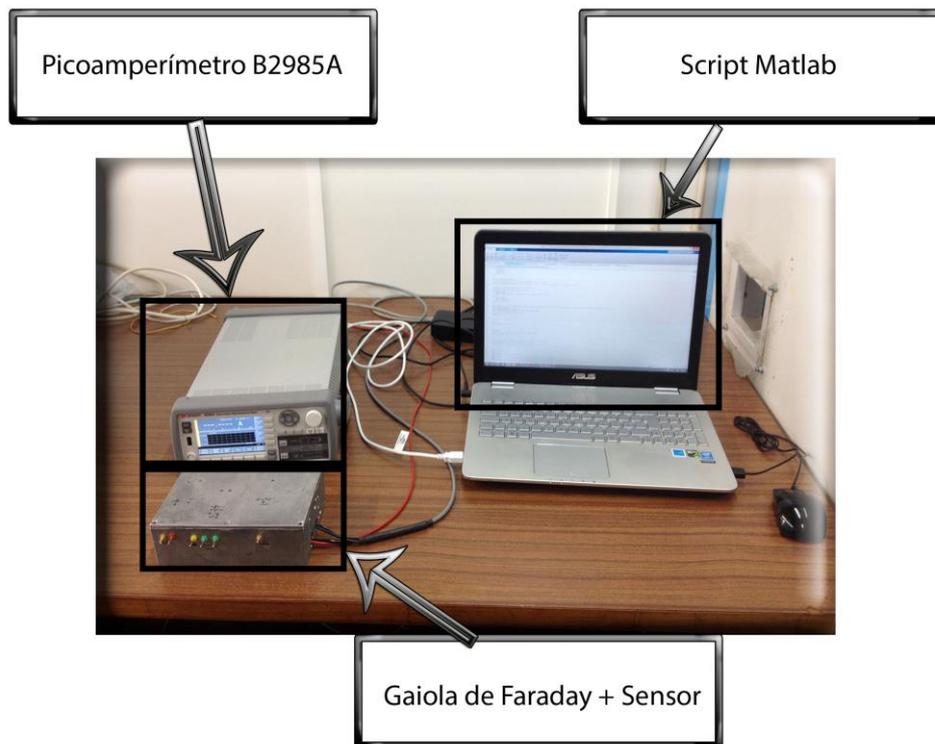


Figura 4.3 – Montagem para medição de corrente

Embora com uma menor importância, também foram efetuados testes com uma atuação simétrica, ou seja, para tensões de -1V até aos -4V. Este teste tem como objetivo comparar o valor da densidade de carga e da constante de tempo para tensões negativas.

A obtenção destes modelos permite determinar a carga total injetada no dielétrico do atuador e a consequente variação de tensão por ela provocada.

Os resultados obtidos destas medições para as diferentes estruturas são apresentados no subcapítulo 5.1. Estes resultados foram obtidos à temperatura ambiente (25°C). As estruturas utilizadas para as medições são as apresentadas na Tabela 1.

4.1.1 Diferente capacidade dos Atuadores

Um dos estudos efetuados visa saber se a capacidade total dos atuadores vai ou não afetar a carga acumulada no dielétrico dos atuadores. De modo a evitar algum comportamento desconhecido, para este teste, utilizou-se uma estrutura cuja única diferença reside no número de braços dos condensadores, ou seja, as dimensões da mola e dos elétrodos do condensador são iguais, contudo, o número de elétrodos total é diferente. Para este caso, utilizou-se uma estrutura S_x , onde foi medida a corrente de carga e descarga dos condensadores atuadores e dos condensadores sensores. Os primeiros são constituídos por 8 elétrodos, enquanto os segundos são constituídos por 30, para cada

um dos lados. Assim, como estes têm a mesma dimensão e divergem apenas no número de braços, é possível verificar se há relação direta entre a capacidade dos atuadores.

O aumento da espessura do dielétrico leva a um aumento da densidade de carga que fica presa no mesmo, mantendo o mesmo valor do campo elétrico aplicado ao dielétrico nos diferentes dielétricos [11]. Ou seja, quando a espessura do dielétrico passa para o dobro, de modo a manter um mesmo campo elétrico, é necessário aumentar para o dobro a tensão aplicada. Nos testes aqui efetuados, em vez de se manter um campo elétrico constante para as diferentes capacidades dos condensadores, a tensão será mantida constante a variar desde 1V até os 4V. Isso vai fazer com que a estrutura de maior capacidade, para um mesmo valor de tensão, possua um menor campo elétrico aplicado ao seu dielétrico, por isso, é expectável que, neste caso, a densidade de carga injetada seja menor quando comparada a um condensador de menor capacidade. Como já anteriormente referido, a área da camada de dielétrico vai variar proporcionalmente com a capacidade do condensador.

Para a comparação do valor da densidade de carga para diferentes números de braços, foram efetuados testes sobre a estrutura S7, onde foi feita a medição da corrente de carga e descarga para números de braços diferentes. Estas medições foram efetuadas com tensões de 1V até 2V. De forma a reduzir o efeito das capacidades parasitas provocadas pelo substrato, todos os atuadores e todos os sensores foram conectados, uma vez que se possui 4 conjuntos de atuadores e outros 4 conjuntos de sensores por estrutura. Assim, procedeu-se à medição da corrente de carga e de descarga:

- ❖ De todos os condensadores atuadores conectados;
- ❖ De todos os condensadores sensores conectados;
- ❖ Dos condensadores atuadores e sensores, ambos conectados;

Assim, de acordo com o estudo até aqui efetuado, será expectável que as correntes de carga e de descarga apresentem um valor relativamente próximo, uma vez que se está a desprezar o dielétrico total.

4.2 Medição da tensão de *pull-in*

A medição da tensão de *pull-in* foi efetuada com recurso a um circuito de atuação, uma *FPGA* e um circuito de leitura, como detalhado na Figura 4.4. O circuito de atuação tem como função excitar a estrutura, nomeadamente os condensadores sensores (com uma portadora de 1MHz), e atuar sobre os condensadores atuadores. O circuito de leitura vai através da medição da variação da capacidade dos condensadores sensores detetar a ocorrência do *pull-in* da estrutura. Por fim, a *FPGA* estará

encarregue de controlar a tensão aplicada à estrutura pelo circuito de atuação bem como a interpretação dos valores obtidos através do circuito de leitura.

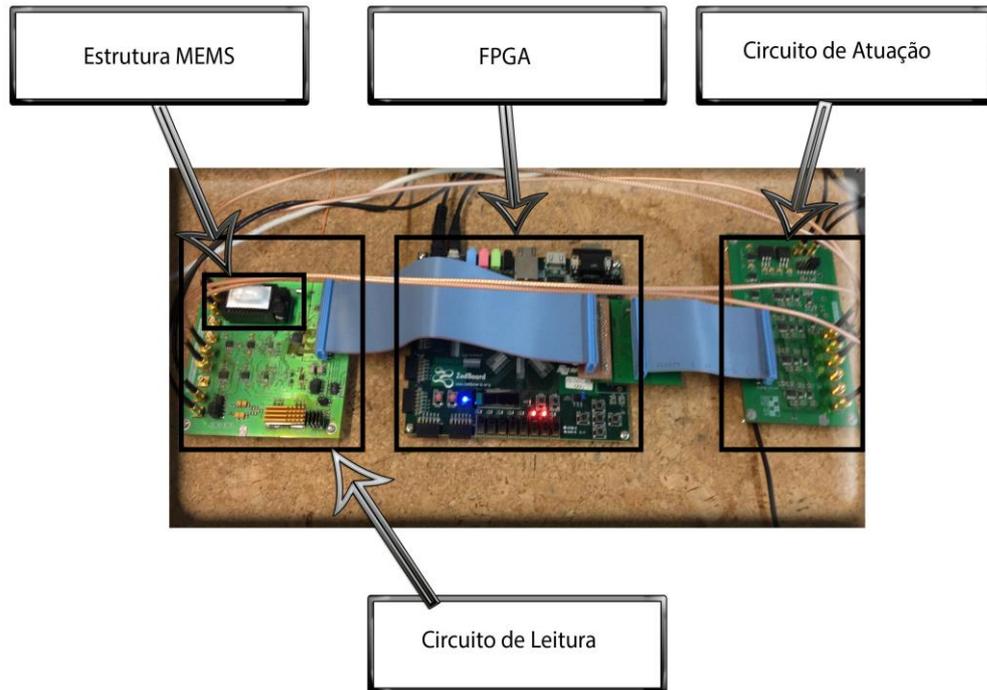


Figura 4.4 – Sistema para medição da tensão de *pull-in*

O circuito da Figura 4.4 tem como objetivo aplicar degraus de tensões numa ordem crescente até atingir a tensão de *pull-in*, que é detetada quando o valor de saída do circuito de leitura atinge um determinado valor de *threshold*. Para a determinação experimental da tensão de *pull-in*, são aplicados degraus de tensão. O valor da tensão destes degraus vai variar consoante o valor da tensão de *pull-in* da estrutura em questão. Mas o comportamento é padronizado, isto é, a rampa foi dividida em três partes. Uma primeira parte com degraus de tensão altos, de modo a aproximar a tensão de atuação rapidamente da tensão de *pull-in* da estrutura, constituída por 10 degraus. Em seguida, são aplicados degraus de ordem inferior, cujo objetivo é aproximar ainda mais do valor da tensão de *pull-in*, também esta constituída por 10 degraus. Por fim, a terceira parte onde cada degrau apresenta um incremento de $100\mu\text{V}$ à tensão de atuação, permitindo assim detetar a tensão de *pull-in* com uma resolução fixa de $100\mu\text{V}$. Todos os degraus, independentemente da tensão, apresentam uma duração de $100\mu\text{s}$. Este processo repete-se ao longo de várias horas até o valor da tensão de *pull-in* estabilizar. Na Figura 4.5 é apresentada a forma de onda de tensão que é aplicada aos condensadores atuadores da estrutura *MEMS*. Esta medição foi obtida para a estrutura S4 onde, numa primeira parte, os degraus são de 0.5V e, numa segunda, de 0.04V. Na terceira e última parte, como já referido, os degraus são de $100\mu\text{V}$.

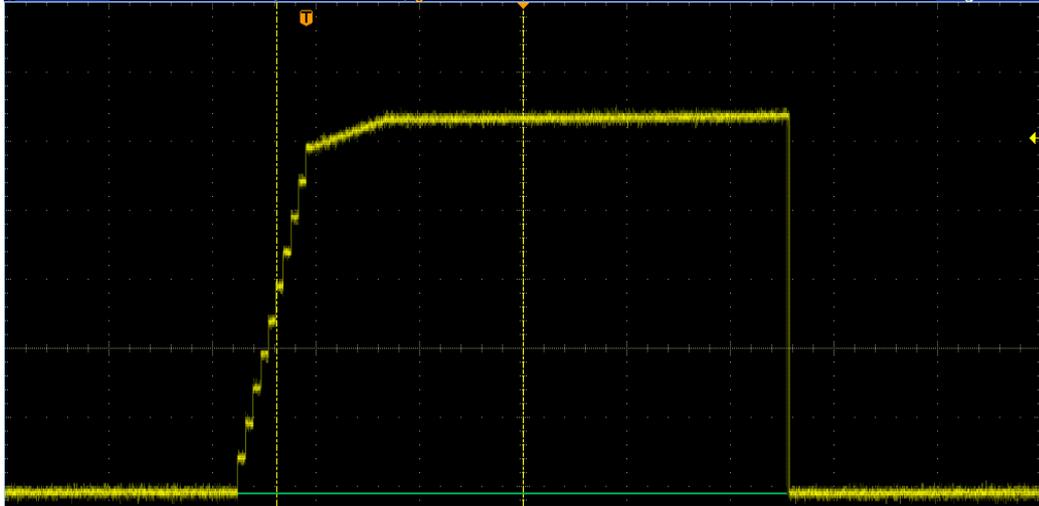


Figura 4.5 – Rampa de tensão aplicada à estrutura MEMS

De modo a obter tempos *on/off* mais precisos, a atuação pode ser efetuada apenas sobre o atuador esquerdo, não sendo aplicada qualquer tensão no atuador direito. Assim, o tempo a *on* de atuação é dado pelo tempo de *pull-in left*, enquanto o tempo a *off* é dado apenas pelo tempo de espera entre ciclos de atuação. Contudo, o tempo a *on* depende do valor da tensão de *pull-in*, ou seja, a diminuição da tensão de *pull-in* leva a uma diminuição do tempo a *on* da atuação. Portanto, durante as medições da tensão de *pull-in*, o tempo a *on* vai sofrer ligeiras variações, de acordo com a variação do valor da tensão de *pull-in*. No entanto, estas variações no tempo a *on* de atuação não irá afetar significativamente o processo de carregamento do dielétrico.

Entre cada um destes ciclos de *pull-in* coloca-se um tempo de espera, cujo valor pode variar (nos resultados apresentados foram usados intervalos entre os 10ms e os 800ms). Pretende-se, através do controlo do tempo *on* e *off* do atuador, verificar se existe uma relação entre o número de ciclos que é necessário efetuar até a tensão de *pull-in* estabilizar e o tempo a *off*. Também se pode relacionar a variação do valor da tensão de *pull-in* com o número de ciclos de atuação.

Uma vez que, na ausência de atuação, o dielétrico vai descarregar, é esperado que quanto maior for o tempo a *off*, maior seja o número de ciclos de atuação necessários até o dielétrico ficar completamente carregado, o que acontece quando a tensão de *pull-in* estabiliza. Como consequência, o tempo que o dielétrico vai levar até carregar totalmente vai também aumentar. Através destas medições, é possível observar se o tempo que leva até a tensão de *pull-in* estabilizar depende do tempo a *off* da atuação e também qual a influência do mesmo no valor da tensão de *pull-in* quando este estabiliza.

A medição da tensão de *pull-in* das estruturas foi efetuada durante várias horas, dependendo do tempo que a tensão de *pull-in* demorou a estabilizar. Para melhores medições e eliminação de vibrações externas, os testes foram executados numa mesa anti-vibrações.

Estas medições foram efetuadas à temperatura ambiente (25°C). As estruturas utilizadas para as medições são as apresentadas na Tabela 1.

4.2.1 Descarga do Dielétrico

Após efetuada uma medição de carga do dielétrico, é necessário esperar algumas horas até que o dielétrico descarregue completamente. De modo a proporcionar consistência nas medições de carga, foram também efetuadas medições da descarga do dielétrico do atuador. Imediatamente após se ter atingido o carregamento completo do dielétrico foram realizadas medições da variação da tensão de *pull-in* durante a descarga. Estas medições, além de permitirem perceber quando o dielétrico está completamente descarregado e pronto para novas medições, permitem também obter a forma de onda de descarga podendo, através desta, ser determinado quanto tempo o dielétrico demora a descarregar totalmente.

Similarmente ao processo de carga, a tensão de *pull-in* foi medida periodicamente, contudo, desta vez, os tempos de espera entre ciclos de atuação foram significativamente maiores; neste caso, foram utilizados tempos de espera de 60 segundos entre atuações. Este tempo entre atuações possibilita ao dielétrico a descarga, sendo possível observá-la através da variação do valor da tensão de *pull-in*.

4.2.2 Estudo da variação de carga injetada para diferentes tempos de atuação

De modo a analisar o comportamento da variação do valor da tensão de *pull-in*, foram efetuados vários testes, onde foram utilizados diferentes tempos de atuação, fazendo variar os tempos a *off*. Para os testes com os diferentes tempos, foi comparado o tempo de estabilização em cada um dos testes efetuados, para os diferentes tempos de atuação. O tempo de estabilização vai corresponder ao tempo que a tensão de *pull-in* medida demora até estabilizar. Quando é atingida esta estabilização no valor da tensão de *pull-in*, significa que o dielétrico do atuador se encontra totalmente carregado.

Para os diversos testes efetuados, assumindo idealmente que, no início, o dielétrico se encontra completamente descarregado e, quando a tensão de *pull-in* estabiliza, o dielétrico está totalmente carregado, então, teoricamente, a variação da tensão de *pull-in* durante este tempo de estabilização

deveria ser igual para todos os testes efetuados, independentemente dos diferentes *duty-cycles* utilizados. Contudo, como não é fácil de garantir esta condição, a variação da tensão de *pull-in* provocada pela acumulação de cargas no dielétrico, vai apresentar algumas variações para os vários testes realizados. Assim, de modo a contornar isto e, tendo em conta que o que importa analisar é os diferentes tempos de estabilização, é efetuada uma comparação normalizada dos valores de tensão. Isto é, inicialmente o dielétrico encontra-se a 0% carregado e, no fim, quando a tensão de *pull-in* estabiliza, o dielétrico encontra-se 100% carregado, ou poderá também não carregar na sua totalidade caso o tempo a *off* seja suficientemente grande.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados experimentais obtidos nos diversos testes realizados. A metodologia usada foi apresentada no capítulo 4. Os testes foram realizados à temperatura ambiente (25°C).

De modo a definir os modelos que determinam a carga injetada aquando de uma atuação, foi necessário primeiro determinar a relação entre o valor de carga injetada e um determinado valor da tensão de atuação. Além desta relação, e uma vez que a tensão de atuação é efetuada em rampa durante a medição de *pull-in*, é também necessário determinar o impacto da mesma na carga acumulada. Após estas duas relações determinadas é possível determinar a carga total acumulada no dielétrico para diferentes tempos de atuação.

Nas medições da tensão de *pull-in* foram comparados os diferentes tempos de atuação, ou seja, diferentes tempos a *off*, com o objetivo de comprovar que uma atuação, com um maior tempo a *off*, vai levar mais tempo até carregar completamente o dielétrico, podendo mesmo nunca chegar a carregá-lo na sua totalidade. Isto deve-se ao facto de o dielétrico ter mais tempo para descarregar entre cada atuação com o aumento do tempo a *off*. Este mesmo facto também pode ser comprovado nas medições de descarga do dielétrico, onde o tempo utilizado entre medições, 60 segundos, é suficiente para permitir ao dielétrico descarregar completamente. Recorrendo a estes resultados, obteve-se um modelo que permite determinar a carga que se encontra acumulada no dielétrico do atuador. Através dessa mesma carga é possível determinar a variação do valor da tensão de *pull-in*.

Com base nos resultados obtidos foi também possível determinar uma relação entre o tempo a *off* e a variação provocada na tensão de *pull-in*.

5.1 Modelo de carga e descarga

É apresentado na Figura 5.1 o resultado de uma das medições de corrente de carga e descarga do dielétrico do atuador, para uma tensão de atuação de 1V. Durante os primeiros 20 segundos, aquando da atuação de uma tensão de 1V sobre o condensador, vai ser injetada carga no dielétrico do atuador sendo que essa injeção de carga é representada pela corrente que é medida. À medida que a carga vai acumulando no dielétrico, este vai carregando e, por conseguinte, o valor da corrente vai baixando, até que a corrente de carga estabiliza num valor de corrente perto dos 0A. Quando a

corrente estabiliza significa que o dielétrico se encontra completamente carregado. Durante os 20 segundos seguintes, vai suceder o oposto, visto que não é aplicada tensão sobre o condensador. Assim, a corrente vai fluir no sentido oposto, indicando que o dielétrico está a descarregar. Mais uma vez, quando a corrente estabilizar, também ela perto dos 0A, significa que o dielétrico descarregou completamente ou, pelo menos, quase totalmente. Uma vez que existem correntes de fuga, e estas são tão maiores quanto maior for a tensão a que o condensador estiver sujeito durante o carregamento do dielétrico, o valor de corrente de estabilização durante a carga é ligeiramente superior quando comparado ao da descarga, onde não é aplicada qualquer tensão. Esta diferença é facilmente observável através da comparação da Figura 5.2 e da Figura 5.3, onde a primeira representa o período de carga e a segunda o período de descarga do dielétrico

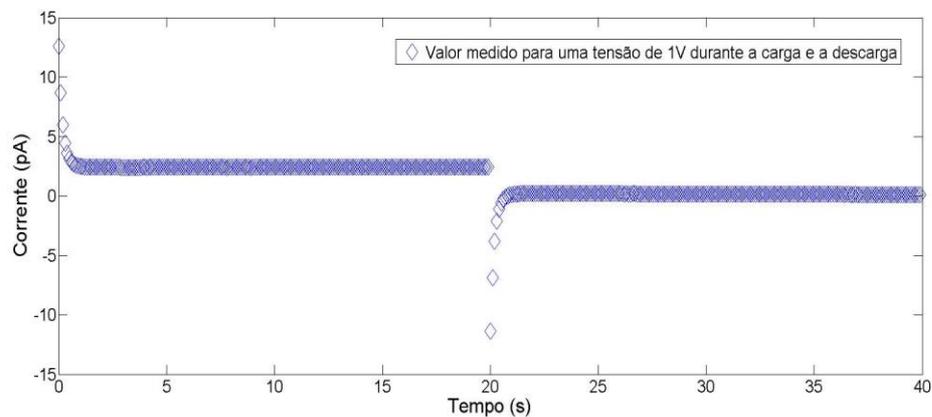


Figura 5.1 – Forma de onda da corrente durante os 40s numa atuação de 1V

Para uma tensão de 1V, foi obtida a forma de corrente durante a carga apresentada na Figura 5.2 e a forma de corrente durante a descarga apresentada na Figura 5.3. Em ambas as figuras é apresentado o resultado experimental de uma medição de uma tensão de atuação de 1V, confirmando assim os modelos (2.3) e (2.4), onde a primeira representa a carga do dielétrico e a segunda a descarga do dielétrico [2], [4], [13].

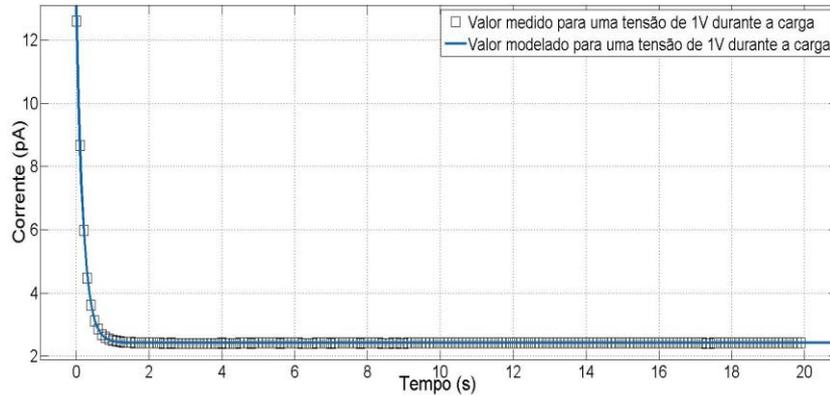


Figura 5.2 – Forma de onda da corrente de carga do dielétrico, 1V de atuação

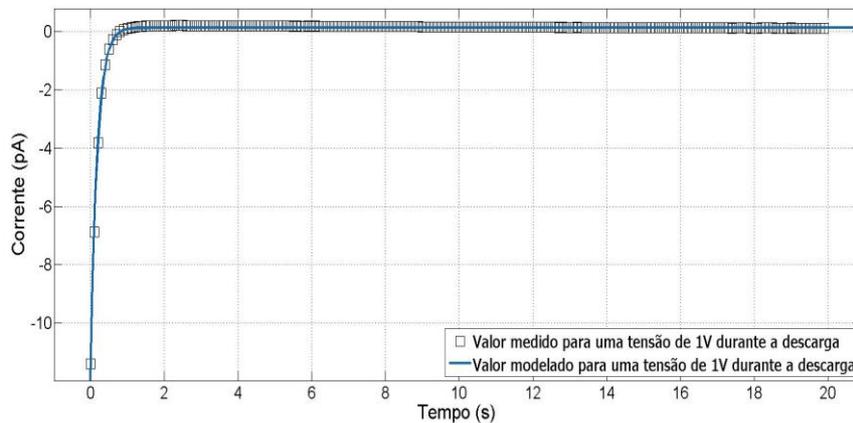


Figura 5.3 – Forma de onda da corrente de descarga do dielétrico, 1V de atuação

As formas de onda na Figura 5.2 e na Figura 5.3 foram obtidas utilizando a estrutura S4. O teste consistiu na medição do transiente de corrente de um dos atuadores, neste caso em específico do atuador superior direito, pino ART e o pino da massa. Contudo, foram também efetuados testes nos atuadores das outras estruturas, listadas na Tabela 1, sendo que nas estruturas S_x o teste foi também realizado nos condensadores sensores com o objetivo de analisar diferentes valores de capacitância, na mesma estrutura. É também importante salientar que cada um dos conjuntos atuadores é apresentado individualmente, não existindo qualquer conexão. O mesmo acontece com os condensadores sensores. Por isso, o número de condensadores atuadores no pino ART, ou de qualquer outro atuador é de 4, enquanto nos sensores, em cada um deles, o número de braços é de 15.

Na análise dos resultados obtidos, é possível concluir que os modelos utilizados em [4] também servem para as estruturas *MEMS* apresentadas na Figura 3.8, no que às formas de onda de corrente diz respeito. Tendo isso em conta, é então possível obter o valor da densidade de carga, dado por Q^J ,

e da constante de tempo, dada por τ^J , recorrendo à análise dos dados obtidos através da medição. Para tal, utilizou-se o modelo (2.3) para a forma de corrente durante a carga, e o modelo (2.4) para a forma de corrente durante a descarga. Na Tabela 3, são apresentados os resultados da densidade e da constante de tempo para tensões a variar entre 1V e 4V, tanto para a carga como para a descarga.

Tabela 3 – Valores de densidade de carga e constantes de tempo de 1V a 4V da estrutura S4 pino ART, Med n°1

Tensão Aplicada (V)	Carga		Descarga	
	Densidade de Carga (q/cm ²)	Constante de Tempo (s)	Densidade de Carga (q/cm ²)	Constante de Tempo (s)
1V	2.414e10	0.1887	2.686e10	0.1858
1.2V	2.921e10	0.1875	3.241e10	0.1842
1.5V	4.13e10	0.1876	4.083e10	0.1854
1.7V	4.188e10	0.1876	4.643e10	0.1856
2V	5.265e10	0.1883	5.286e10	0.1858
2.2V	5.803e10	0.1874	5.965e10	0.1835
2.5V	6.7e10	0.1887	6.875e10	0.1859
2.7V	7.258e10	0.1886	7.419e10	0.1857
3V	8.114e10	0.1888	8.27e10	0.186
3.2V	8.684e10	0.189	8.856e10	0.1862
3.5V	9.553e10	0.189	9.676e10	0.1858
3.7V	1.012e11	0.189	1.024e11	0.186
4V	1.1e11	0.1893	1.106e11	0.1857

Na Tabela 3, é possível verificar que tanto a densidade de carga como as constantes de tempos apresentam valores semelhantes, para um mesmo valor de tensão, tanto na carga do dielétrico como na descarga. Assim, no cálculo da carga total acumulada no dielétrico, pode-se assumir o valor da densidade de carga e das constantes de tempo iguais durante a carga e a descarga. Convém também lembrar, como já abordado no sub-capítulo 2.3, que o valor de densidade de carga em regime permanente, dado por Q_J , representa a quantidade máxima de carga que o dielétrico consegue armazenar, para uma determinada tensão de atuação. Ou seja, o valor da carga acumulada nunca poderá ultrapassar o valor obtido para Q_J com recurso ao modelo (2.3).

Outro aspeto a analisar é a atuação de tensões negativas. Em [7], como já referido anteriormente no sub-capítulo 2.4, foi efetuado um estudo onde se procurava anular a carga total injetada através da aplicação de tensões positivas e negativas, alternadamente. Embora esse estudo não seja crítico para o trabalho apresentado nesta dissertação, foram também efetuados testes aplicando tensões negativas no atuador, de modo a comparar o valor da densidade de carga e da constante de tempo para valores de tensões negativos. Os testes foram realizados para a estrutura S3 sobre o pino SRB.

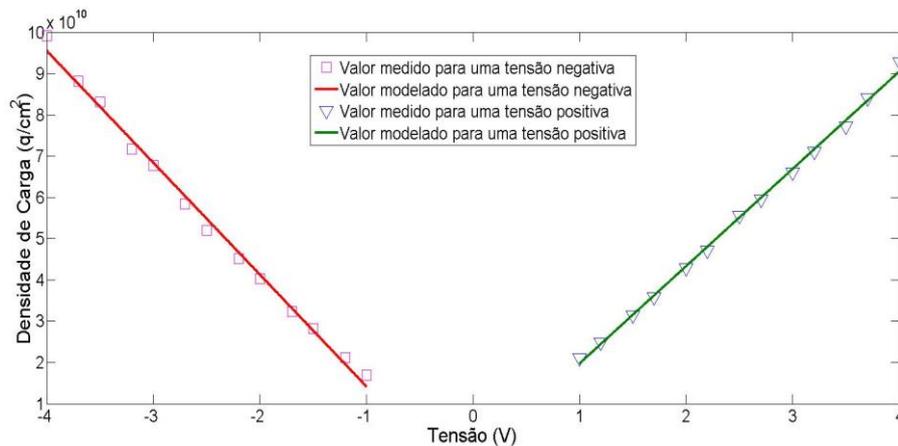


Figura 5.4 – Valores de densidade de carga para tensões de -4V a 4V da estrutura S3, pino SRB

Como se pode verificar pela Figura 5.4, os valores da densidade de carga são bastante aproximados, quando comparados para o mesmo valor de tensão. Assim, através de uma alternância no valor da tensão aplicado ao atuador, como sugerido em [7], talvez seja possível compensar a carga acumulada positiva com carga negativa e vice-versa. Desta maneira, a tensão de *pull-in* conseguirá manter-se com um valor constante.

5.1.1 Modelo de tensão vs. carga

Uma vez confirmada a forma de onda do transiente de corrente do condensador dos modelos (2.3) e (2.4), apresentada na Figura 5.2 e Figura 5.3, então é possível desenvolver um modelo que relacione a tensão aplicada ao atuador com o valor da densidade de carga e com a constante de tempo. Para isso, foi repetido o processo de análise dos resultados experimentais medidos recorrendo ao modelo (2.3) para diferentes tensões, a variar entre 1V e os 4V, durante os mesmos 40 segundos, tal como apresentado na Tabela 3. Ainda nos testes sobre o atuador da estrutura S4, obteve-se uma relação entre a densidade de carga e o valor da tensão aplicada, como se verifica na Figura 5.5.

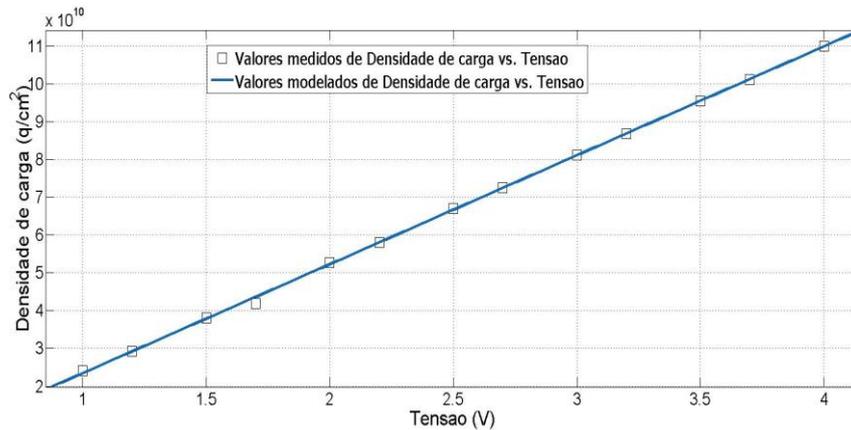


Figura 5.5 – Relação entre a densidade de carga e a tensão atuada

Os testes mostram que a relação entre a tensão aplicada e a densidade de carga para um condensador de placas paralelas é uma relação linear de acordo com o modelo (5.1), ao contrário dos resultados obtidos em [4] em que o modelo apresentado considera que a densidade de carga varia exponencialmente com a tensão aplicada.

$$Q = m * V + b. \tag{5.1}$$

No modelo (5.1), V representa a tensão que é aplicada ao atuador, Q a densidade de carga enquanto m e b são parâmetros obtidos através da análise dos dados experimentais medidos. Assim, através deste modelo, é possível saber qual a densidade de carga que fica presa no dielétrico quando é aplicado um determinado valor de tensão. Este modelo está de acordo com o apresentado teoricamente por (3.13), onde a variação do valor da tensão de atuação implica uma variação linear do valor da densidade de carga injetada.

A par com os valores da densidade de carga, obteve-se também o valor da constante de tempo de carga e de descarga, contudo, as variações não são significativas e sugerem que a constante de tempo de carga e descarga aumenta com a tensão de atuação, como apresentado na Figura 5.6. Porém, e como já referido, a variação verificada não é significativa.

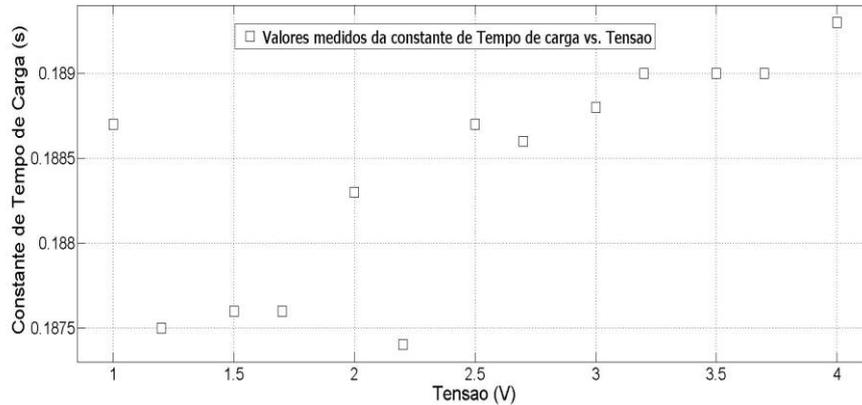


Figura 5.6 – Relação entre a constante de tempo e a tensão de atuação

Os resultados apresentados, que relacionam a constante de tempo de carga e descarga com a tensão de atuação, estão de acordo com os citados em [4], onde não há qualquer relação entre eles. No entanto, é possível observar que a variação da constante de tempo, tanto na carga como na descarga, apresenta um valor aproximadamente constante. Assim, e de acordo com os valores tabelados na Tabela 3, pode-se assumir para o cálculo da carga injetada que as constantes de tempo da carga e da descarga são aproximadamente iguais.

5.1.2 Aplicação de degraus de tensão

Tendo em consideração que, para se efetuar o cálculo da carga acumulada no dielétrico do atuador, que vai ser efetuado em 5.2.2, é necessário observar o comportamento da corrente, quando da aplicação consecutiva de dois degraus de tensão, sendo que o segundo degrau de tensão é maior que o primeiro, foram efetuadas medições para dois degraus de tensão consecutivos. As medições foram efetuadas sobre a estrutura S7, num dos seus atuadores, ARB.

À semelhança dos testes até aqui efetuados, foi efetuado um teste com uma duração de 40 segundos onde, durante os primeiros 20 segundos, é aplicado um degrau de tensão de valor 1V e, nos seguintes 20 segundos, é aplicado um degrau de tensão de valor 1.5V, sendo o resultado apresentado na Figura 5.7.

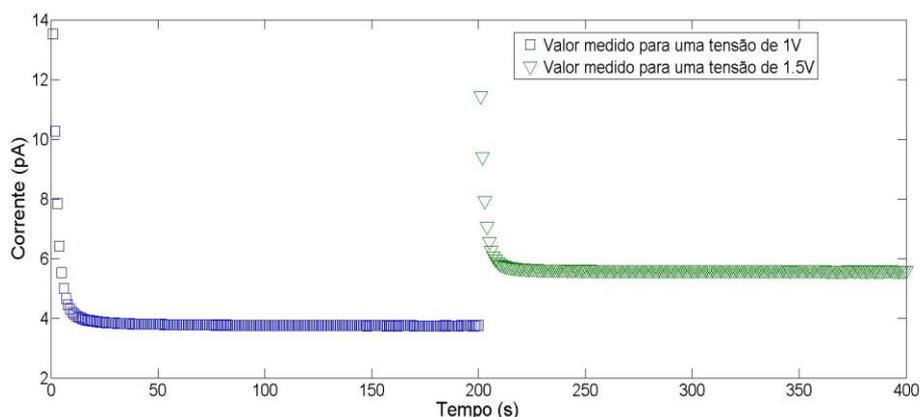


Figura 5.7 – Forma de onda de corrente com duas atuações consecutivas

Com recurso aos resultados experimentais obtidos, calculou-se o valor que se obtém para a densidade de carga com recurso ao modelo (2.3). Deste modo, é possível comparar o valor da densidade de carga para uma tensão de, por exemplo 1V, (quando, anteriormente, houve uma atuação de valor inferior) com o valor da densidade de carga para uma tensão de igual valor, ou seja de 1V, contudo, neste caso, onde não teria havido qualquer atuação anterior.

Os resultados desta experiência permitem determinar o modo como vai ser efetuado o cálculo da densidade de carga injetada em 5.2.2. Na Tabela 4, são apresentados os resultados dos dados experimentais obtidos para os diferentes valores de tensão aplicados. Os resultados tabelados por Tensão1 foram efetuados com o dielétrico descarregado, não existindo qualquer atuação anterior a esta. Já os da Tensão2 foram aplicados imediatamente a seguir à aplicação da Tensão1, de acordo com a Figura 5.7. Este teste foi realizado para a estrutura S7 no pino ARB.

Tabela 4 – Valores de densidade de carga obtido para tensões entre 1V e 3.5V

Tensão1 (V)	Carga1 (q/cm ²)	Tensão2 (V)	Carga2 (q/cm ²)
1V	2.884e10	1.5V	1.636e10
1.5V	4.544e10	2V	1.628e10
2V	6.306e10	2.5V	1.62e10
3V	9.424e10	3.5V	1.694e10
3.5V	1.082e11	4V	1.626e10

Através da análise dos resultados obtidos, presentes na Tabela 4, é possível observar que o valor da densidade de carga para o degrau de tensão aplicado nos últimos 20 segundos representa o valor da densidade de carga para a diferença de tensão entre o primeiro e o segundo degrau de tensão

que é aplicado. Isto é, aplicando um degrau de 1V, seguido de um degrau de 1.5V, na medição efetuada que corresponde ao degrau de 1.5V vai-se obter uma densidade de carga correspondente a uma tensão de 0.5V. Ou seja, a densidade de carga vai ser dada pela variação do valor da tensão de atuação entre o primeiro e o segundo degrau.

Uma vez que o tempo de aplicação de cada degrau é constante, 100 μ s, até atingir a tensão de *pull-in* e, assumindo estes resultados, o cálculo da carga injetada no dielétrico a cada ciclo vai ser feito através do valor médio da densidade de carga das tensões totais aplicadas, cujo valor vai ser muito próximo do valor da densidade de carga para o máximo de tensão em cada ciclo, ou seja, a tensão de *pull-in*.

5.1.3 Relação entre diferentes capacidades

O aumento da área do dielétrico leva a um aumento da densidade de carga que fica presa no mesmo, mantendo o mesmo valor do campo elétrico aplicado ao dielétrico nos diferentes dielétricos [11]. Ou seja, quando a área do dielétrico passa para o dobro, de modo a manter um mesmo campo elétrico, é necessário aumentar para o dobro a tensão aplicada, de acordo com (3.10). Nos testes aqui efetuados, em vez de se manter um campo elétrico constante para as diferentes capacidades dos condensadores, a tensão foi mantida constante a variar desde 1V até os 4V. Isso faz com que uma estrutura com uma maior capacidade, e para um mesmo valor de tensão, possua um menor campo elétrico aplicado ao seu dielétrico, e por isso, é expectável que, neste caso, a densidade de carga injetada seja menor quando comparada com um condensador de menor capacidade. Como já anteriormente referido, a área do dielétrico vai variar proporcionalmente com a capacidade do condensador. Assim, espera-se que, para as diferentes medições, o valor da carga injetada seja aproximadamente igual nos diferentes valores de tensões análogas. Deste modo, a relação para a densidade de carga entre os diferentes conjuntos de condensadores atuadores/sensores é dada diretamente pela relação entre o número de braços, visto que as dimensões são iguais.

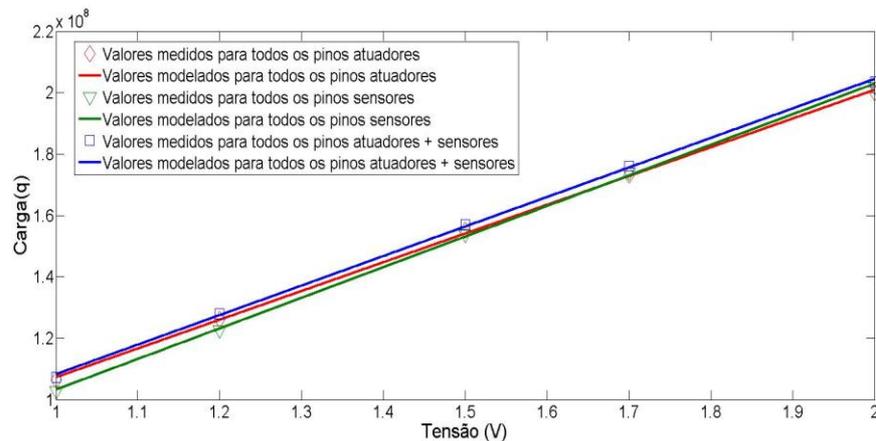


Figura 5.8 – Comparação entre os valores de carga obtidos da medição experimental

Dos valores apresentados na Figura 5.8, facilmente se vê que, apesar da variação do número de condensadores utilizados para a medição, o valor obtido das medições efetuadas para a carga acumulada é aproximadamente igual para os três casos, obedecendo também ao modelo (5.1). Portanto, a relação entre o valor da densidade de carga é dado diretamente pela relação entre o número de condensadores, assumindo que a espessura do dielétrico é igual em todos os condensadores, verificando assim a relação apresentada por (3.13).

Tabela 5 – Valores da densidade de carga para as diferentes condições

Tensão Aplicada (V)	Número de Braços		
	4*4 (q/cm ²)	4*15 (q/cm ²)	4*4 + 4*15 (q/cm ²)
1V	5.319e10	1.371e10	1.031e10
1.2V	6.306e10	1.636e10	1.271e10
1.5V	7.759e10	2.051e10	1.589e10
1.7V	8.678e10	2.321e10	1.791e10
2V	1e11	2.691e10	2.113e10

Conclui-se então que aquando da aplicação de uma determinada tensão, o aumento da área do dielétrico vai levar a uma diminuição proporcional do valor da densidade de carga. Assim, para um mesmo valor de tensão, a densidade de carga dos atuadores vai ser 3.75 vezes superior à densidade de carga dos sensores.

A medição com todos os braços da estrutura conectados permitiu reduzir o número de corrente de fugas, pois aquando da medição de apenas 1 dos braços, a corrente iria também escapar

através dos outros braços, além do substrato. Assim, com os braços todos conectados, a corrente de fuga é menor e por isso o campo elétrico a que o dielétrico está sujeito é maior, pois a corrente também vai ser maior. Uma vez que o campo elétrico a que o dielétrico está sujeito é maior, a carga injetada também é maior. Isto explica o facto de os valores apresentados na Tabela 5 serem maiores que os apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4.

5.2 Tensão de *pull-in* em regime permanente

Como já referido ao longo dos capítulos anteriores, a aplicação de uma tensão nos atuadores vai fazer com que seja injetada carga nos dielétricos dos atuadores e, como consequência, vai alterar o valor da tensão de *pull-in*, devido ao potencial elétrico gerado pela carga acumulada. Por isso, foram efetuados vários testes, com diferentes tempos de atuação *on/off*, durante várias horas até a tensão de *pull-in* estabilizar. Com recurso aos vários testes efetuados, foram efetuadas várias comparações, de modo a determinar o impacto que estes diferentes tempos de atuação possuem sobre o número de atuações necessárias para a tensão estabilizar e o valor da carga total acumulada no dielétrico do condensador.

De acordo com o artigo [2], como o atuador está sujeito a tensões baixas, apenas vai ser afetado pelo carregamento a partir do eléctrodo inferior, *bulk charging*. Contudo, e uma vez que a topologia do atuador é diferente, possuindo uma camada de dielétrico em cada um dos eléctrodos tal como se pode ver no modelo do atuador apresentado na Figura 3.7, os efeitos provocados pela atuação podem ser diferentes.

5.2.1 Medição da tensão de *pull-in*

No sub-capítulo 4.2 foi apresentado o procedimento efetuado para a medição da tensão de *pull-in*, durante várias horas. Na Figura 5.9 é apresentado o resultado de um dos testes efetuados à estrutura S3, onde é observado o comportamento do valor da tensão de *pull-in left*. O teste em questão teve uma duração de 6 horas e 30 minutos. O valor inicial da tensão de *pull-in* medido foi de 5.6414V e o final, quando a tensão de *pull-in* estabiliza, é de 5.6362V, apresentando uma variação total de 5.2mV. Entre cada uma das atuações foi aplicado um tempo de espera de 50ms, onde o tempo de duração de cada ciclo é de aproximadamente 0.34s. Esta variação no valor da tensão de *pull-in*, de aproximadamente 5mV, é a obtida quando o dielétrico se encontra completamente

carregado no fim do teste. Esta mesma variação vai ser utilizada para se poder efetuar uma comparação normalizada com diferentes tempos a *off*, onde o dielétrico não carrega completamente.

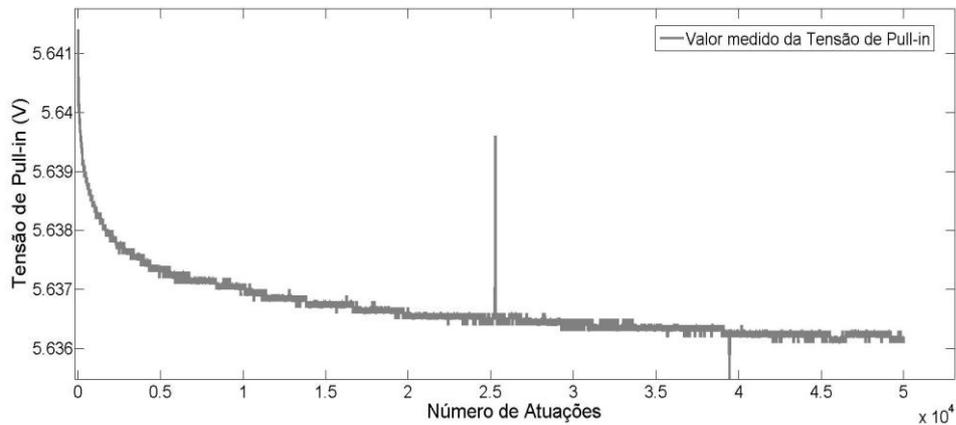


Figura 5.9 – Variação da tensão de *pull-in* com a carga acumulada no dielétrico

Através da observação da Figura 5.9 é possível reparar que, inicialmente, o valor da tensão de *pull-in* diminui rapidamente, e depois, apresenta uma fase que decresce mais lentamente até que, por fim, o seu valor estabiliza, indicando que o dielétrico está totalmente carregado. Este comportamento está de acordo com o esperado [3] pois, inicialmente, o dielétrico do atuador encontra-se descarregado e vai carregando à medida que lhe é aplicada tensão, sendo que fica totalmente carregado quando o valor da tensão de *pull-in* estabilizar. É passível concluir que o valor da tensão de *pull-in* está, como esperado, apenas sujeito a *bulk charging* [2], uma vez que o seu valor baixou com a injeção de carga.

Apesar das medidas tomadas, não foi possível garantir uma temperatura constante durante os testes. Essa variação de temperatura vai obviamente afetar os resultados, no entanto, verifica-se que uma variação de temperatura de 10°C, apenas representa uma variação de 1mV na tensão medida [3]. Tendo em conta estes valores, e para os testes efetuados, o impacto de pequenas variações de temperatura ($\pm 2.5^\circ\text{C}$) no valor da tensão de *pull-in* não vai ser muito significativo.

5.2.2 Cálculo da carga acumulada no dielétrico

Uma vez obtida a curva que reflete o comportamento da tensão de *pull-in* ao longo do tempo sob o efeito de uma atuação, foi necessário estudar as relações da mesma com a carga total acumulada, de modo a determinar a relação entre esta e a variação do valor da tensão de *pull-in*. A carga total acumulada é calculada com recurso aos modelos (5.1), (5.2), (5.3) e (5.4). Estes modelos foram adaptados de acordo com as características da atuação. Com base nos resultados obtidos

durante a medição de corrente dos atuadores, considera-se que a densidade de carga injetada no dielétrico apresenta uma injeção de densidade de carga no máximo de $1.5625e^{10} V * \frac{q}{cm^2}$.

Para o cálculo da carga total acumulada no dielétrico, é necessário ter em conta o valor de carga e de descarga. Recorrendo aos modelos apresentados em [4], [13] a carga acumulada a cada ciclo de atuação no dielétrico é dada por (5.2) e o de descarga é dado por (5.3):

$$Q_{carga} = \sum_J Q_J [1 - \exp(-\frac{t_{on}}{\tau_C})], \quad (5.2)$$

$$Q_{descarga} = \sum_J Q_J \exp(-\frac{t_{off}}{\tau_D}). \quad (5.3)$$

Com recurso aos modelos (5.2) e (5.3) é calculada a carga injetada a cada ciclo de atuação e apresentada na Figura 5.10. A carga injetada a cada ciclo vai ser dada pela subtração da carga acumulada durante o ciclo de atuação com a carga que descarrega durante o ciclo de espera, de acordo com o modelo (5.4):

$$Q_{acumulada} = Q_{carga} - Q_{descarga}. \quad (5.4)$$

Como o tempo de descarga não é suficiente para o dielétrico descarregar totalmente, a carga vai acumulando. Essa acumulação de carga vai levar à variação do valor da tensão de *pull-in*. A variação da tensão de *pull-in* acumulada pode ser calculada recorrendo aos modelos (5.1), (5.2), (5.3) e (5.4).

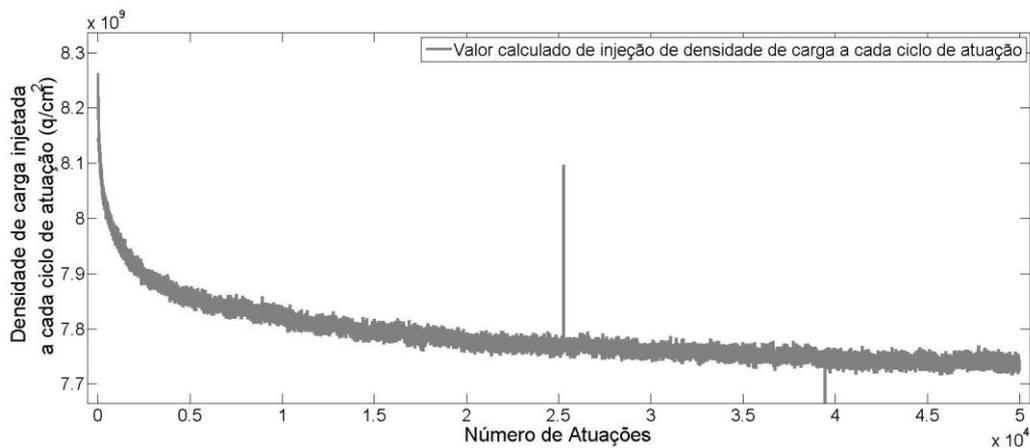


Figura 5.10 – Injeção de carga no dielétrico a cada ciclo de atuação

Por análise dos dados obtidos a partir da Figura 5.10, é possível observar uma injeção de carga máxima de cerca de $8.3e9 q/cm^2$ no dielétrico do atuador, onde ao longo da atuação se verifica uma variação de $5.229e8 q/cm^2$ na carga acumulada. Ou seja, a carga acumulada no dielétrico, que provoca uma variação de 5.2mV na tensão de *pull-in*, é de $5.229e8 q/cm^2$. Esta

mesma variação de tensão pode ser calculada recorrendo aos modelos mencionados, obtendo-se assim uma variação teórica de 5.2mV. O resultado apresentado na Figura 5.10 corresponde ao modelo (5.4), ou seja, tem em consideração a carga injetada e a descarregada a cada ciclo de atuação.

5.2.3 Descarga do Dielétrico

Na Figura 5.11 é apresentada a evolução da tensão de *pull-in* durante o processo de descarga. A forma de onda apresentada no processo de descarga é inversa à da carga onde, inicialmente, a carga acumulada no dielétrico descarrega rapidamente e vai descarregando mais lentamente, até que estabiliza. Quando a tensão estabiliza, à semelhança do processo de carga, significa que o dielétrico se encontra completamente descarregado. À semelhança do processo de carga, a variação da tensão de *pull-in* pode também ser calculada recorrendo aos modelos (5.2), (5.3) e (5.4). No entanto, neste caso, uma vez que o tempo de descarga é significativamente grande, o dielétrico vai ter tempo suficiente para descarregar mais do que aquilo que carrega. Assim, uma vez que o dielétrico já se encontrava totalmente carregado, a tensão de *pull-in* vai seguir no sentido oposto, retomando o seu valor de origem.

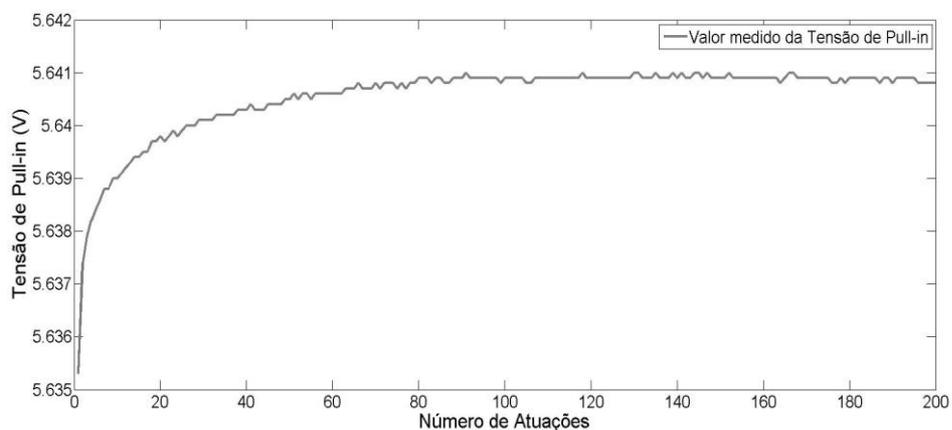


Figura 5.11 – Variação da tensão de *pull-in* durante a descarga do dielétrico

Através da análise da Figura 5.11, e uma vez que as medições são efetuadas de 60 em 60 segundos, ao fim de cerca de 100 medições, é possível constatar que o valor da tensão de *pull-in* estabilizou. Ou seja, o dielétrico demorou cerca de 100 minutos até descarregar na sua totalidade. Uma vez completamente descarregado, o atuador recupera a sua tensão de *pull-in* inicial e é então possível iniciar uma/ nova medição de carga. A variação da tensão de *pull-in* também pode ser calculada através dos modelos (5.1), (5.2), (5.3) e (5.4).

5.2.4 Diferentes tempos de atuação

A comparação normalizada presente na Figura 5.12 permite uma comparação direta entre os diferentes tempos de atuação. Esta é efetuada tendo apenas em consideração o tempo que o dielétrico levou até ficar totalmente carregado, ou até a sua tensão de *pull-in* estabilizar. Por análise dos resultados apresentados na Figura 5.12, é possível observar que o aumento do tempo a *off*, ou seja, a diminuição do *duty-cycle*, vai levar a um aumento do tempo até que o dielétrico fique totalmente carregado. Este aumento do tempo deve-se ao facto de o dielétrico ter mais tempo para descarregar enquanto não lhe é aplicada qualquer tensão.

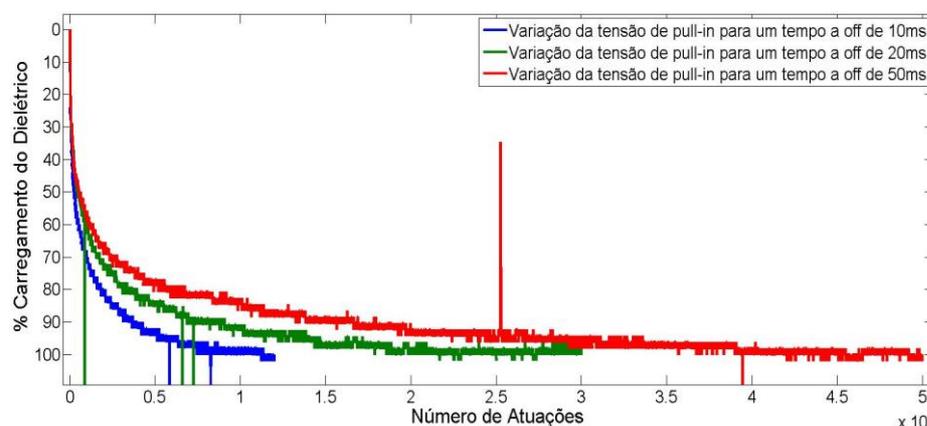


Figura 5.12 – Variação da tensão de *pull-in* normalizada para diferentes tempos de atuação. Azul (10ms de tempo a *off*), Verde (20ms de tempo a *off*), Vermelho (50ms de tempo a *off*)

A variação total da tensão de *pull-in* é de 5.3mV, 5.1mV e 5.2mV para 10ms, 20ms e 50ms de tempo a *off*, respetivamente. Esta variação no valor da tensão de *pull-in* confirma o esperado pois, quando o dielétrico, nos três casos, se encontra completamente carregado, é expectável que a variação da tensão, provocada por essa acumulação de carga, seja igual.

O aumento do tempo a *off*, como já referido, vai possibilitar ao dielétrico mais tempo para descarregar a carga nele acumulada, atrasando assim o tempo que leva a carregar na sua totalidade. Contudo, o aumento do tempo a *off* pode levar mesmo a que o dielétrico nunca carregue completamente, ou seja, fazendo com que a variação sofrida na tensão de *pull-in* seja inferior.

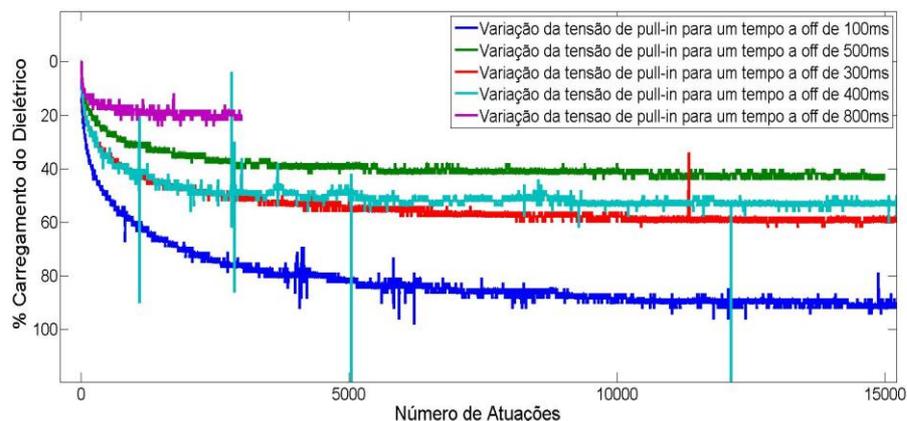


Figura 5.13 – Variação da tensão de *pull-in* normalizada para diferentes tempos de atuação *off*. Azul (100ms), Vermelho (300ms), Azul-bebé (400ms), Verde (500ms) e Roxo (800ms)

Na Figura 5.13 é apresentada a variação da tensão de *pull-in* normalizada, assumindo uma variação de 5mV nos 100% do dielétrico. Como é possível observar, apenas a medição com um tempo de espera de 100ms é que chega a carregar o dielétrico na sua totalidade. Isto acontece, pois o tempo de descarga é suficientemente elevado para conseguir compensar o tempo de carga.

Recorrendo aos modelos (5.1), (5.2) , (5.3) e (5.4) é possível calcular a variação teórica da tensão de *pull-in*. Estes cálculos são apresentados na Tabela 6, assumindo um dielétrico com espessura de 13nm em cada um dos elétrodos, 8 no total. Com o aumento do tempo a *off*, a carga acumulada no dielétrico vai ser menor, provocando uma menor variação no valor da tensão de *pull-in*.

Tabela 6 – Carregamento do dielétrico para diferentes tempos a *off*

Tempo a <i>Off</i> (ms)	Variação experimental da tensão de <i>pull-in</i> (mV)	Variação teórica da tensão de <i>pull-in</i> (mV)	Carga acumulada no dielétrico (q/m ²)
10ms*	5.3mV	5.63mV	5.687e+12
20ms*	5.1mV	5.57mV	5.625e+12
50ms	5.2mV	5.2mV	5.26e+12
75ms	5.5mV	5.66mV	5.725e+12
100ms	5,1mV	5.31mV	5.3625e+12
300ms	3.2mV	3.15mV	3,18e+12
400ms	2.7mV	2.72mV	2,75e+12
500ms	2.2mV	2.35mV	2.375e+12
800ms	1mV	1.05mV	1.0625e+12

*Para valores de descarga tão pequenos como nos 10ms e 20ms, a equação (5.4) não se verifica, sendo a carga acumulada dada apenas por (5.2).

Os valores apresentados na Tabela 6 podem ser apresentados num gráfico onde é apresentada a relação entre o tempo a *off* e a variação da tensão de *pull-in* medida. Esta variação é apresentada na Figura 5.14, onde é possível observar que a variação da tensão de *pull-in*, provocada pela acumulação de cargas no dielétrico, vai diminuir com o aumento do tempo a *off*. É possível observar, que para tempos a *off* até cerca dos 100ms, o dielétrico carrega na sua totalidade. No entanto, o aumento do tempo a *off* vai fazer com que o dielétrico tenha mais tempo para descarregar e, por conseguinte, o dielétrico nunca vai carregar totalmente. O carregamento parcial do dielétrico vai fazer com que a tensão de *pull-in* sofra uma alteração no valor de *pull-in* inferior quando comparada à da carga completa.

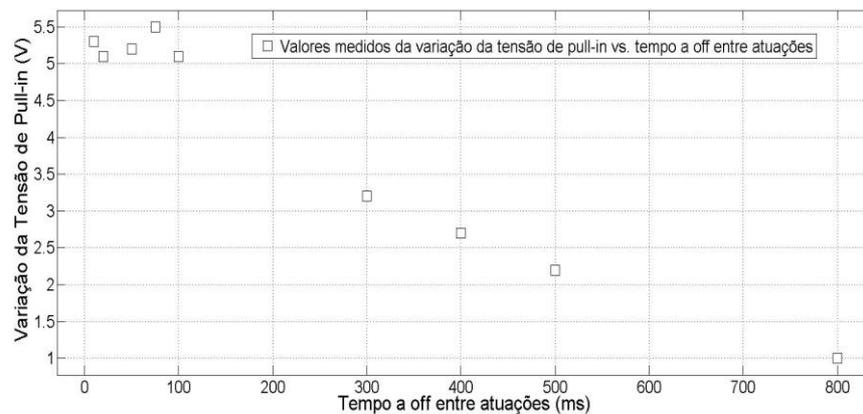


Figura 5.14 – Relação entre o tempo a *off* e o valor da variação da tensão de *pull-in*

Foi também efetuada uma análise dos valores experimentais medidos a partir dos quais o dielétrico já não carrega na sua totalidade. Na Figura 5.15 é apresentada a evolução da variação da tensão de *pull-in* com o tempo a *off* e dada pelo modelo (5.5):

$$\Delta V = \frac{V_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t_{off}}{\tau}\right), \quad (5.5)$$

onde t_{off} é o tempo entre atuações e V_0 e τ são obtidos através da análise dos resultados das medições.

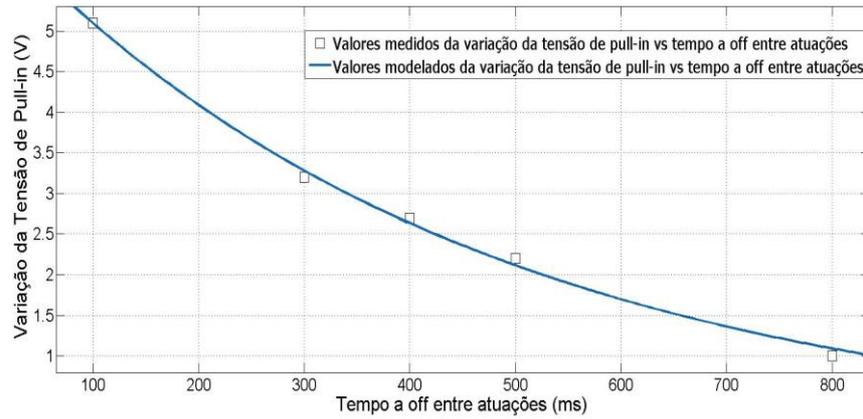


Figura 5.15 – Relação entre o tempo a *off* e o valor da variação da tensão de *pull-in*

Os resultados obtidos das medições efetuadas experimentalmente encaixam nos modelos teóricos, apesar de a superfície do dielétrico ser irregular, como apresentado na Figura 3.9.

6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

O trabalho apresentado nesta dissertação visou estudar o impacto da carga acumulada no dielétrico de atuadores *MEMS* capacitivos e como diminuir a mesma. Para tal, foram efetuadas medições de corrente dos condensadores de modo a se conseguir obter os parâmetros necessários de carga e descarga, para posteriormente se poder proceder ao cálculo da carga total acumulada no dielétrico através da curva medida da tensão de *pull-in*. Ficou provado que o aumento do tempo entre atuações permite uma diminuição da carga acumulada no dielétrico do atuador e por conseguinte uma menor variação no valor da tensão de *pull-in*. Além disto, provou-se também que a carga acumulada, para diferentes áreas do dielétrico, é constante para um determinado valor de tensão, sendo que a carga acumulada varia linearmente com o valor da tensão de atuação.

Como apresentado no estado-da-arte, a temperatura influencia o valor da carga total acumulada no dielétrico. Tendo isto em conta, como perspetiva de um trabalho futuro seria interessante estudar a carga acumulada no dielétrico dos atuadores sobre diversos valores de temperatura controlados numa estrutura *MEMS* de placas paralelas. Assim, seria possível através da medição da tensão de *pull-in*, determinar o impacto que o valor da temperatura teria sobre o valor da carga injetada e como consequência na variação da tensão de *pull-in*.

Tendo em conta que os valores de densidade de carga obtidos, para um mesmo valor de tensão positivo e negativo, apresentam um valor aproximadamente igual de densidade de carga injetada, abre-se então a possibilidade de se efetuar uma compensação dos efeitos da carga acumulada no dielétrico do atuador, através de uma atuação bipolar. Com isto, é possível, para um trabalho futuro, estudar os melhores tempos de carga e descarga para tensões positivas e negativas para, deste modo, conseguir compensar a carga que fica acumulada no dielétrico do atuador durante as atuações.

Como perspetiva de um outro futuro trabalho fica a ideia da utilização de uma estrutura dedicada exclusivamente ao estudo dos efeitos de carga. Para tal, a estrutura deverá possuir braços com diferentes características:

- Dois conjuntos com diferente número de braços, sem cavidades;
- Dois conjuntos com igual número de braços, um com cavidades outro sem;
- Dois conjuntos com igual número de braços mas com diferente constante elástica.

Estas características irão permitir averiguar se as cavidades no atuador, ou a constante elástica, vão provocar alterações nos valores de carga acumulada no dielétrico e, como consequência, alteração no valor da tensão de *pull-in*.

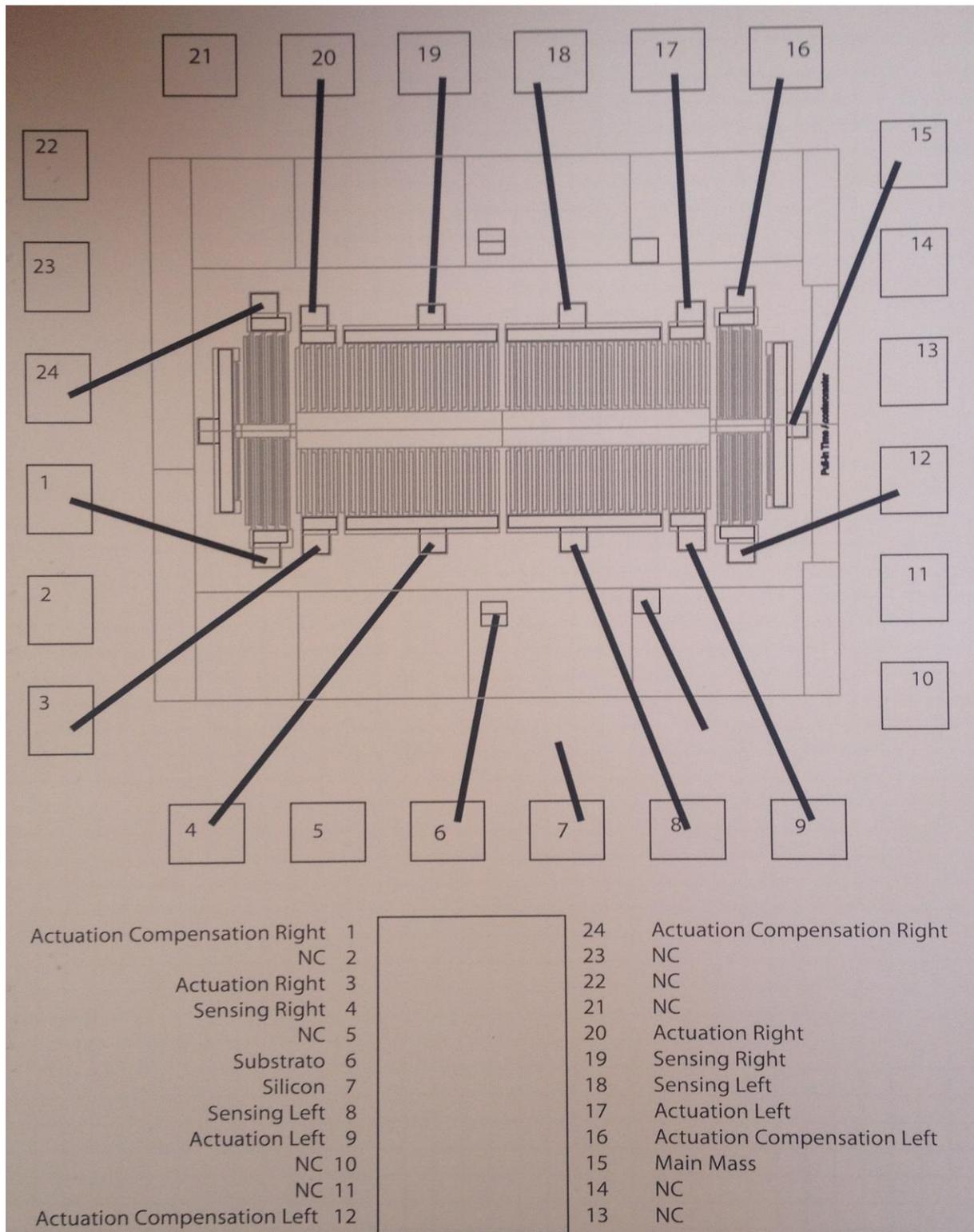
BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Goldsmith, J. Ehmke, a. Malczewski, B. Pillans, S. Eshelman, Z. Yao, J. Brank, and M. Eberly, "Lifetime characterization of capacitive RF MEMS switches," *2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.01CH37157)*, vol. 1. 2001.
- [2] Z. Peng, X. Yuan, J. C. M. Hwang, D. Forehand, and C. L. Goldsmith, "Top vs. bottom charging of the dielectric in RF MEMS capacitive switches," *Asia-Pacific Microw. Conf. Proceedings, APMC*, vol. 3, pp. 1535–1538, 2006.
- [3] L. A. Rocha, "Dynamics and Nonlinearities of the Electro-Mechanical Coupling in Inertial MEMS," Universidade do Minho, 2005.
- [4] X. Yuan, J. C. M. Hwang, D. Forehand, and C. L. Goldsmith, "Modeling and characterization of dielectric-charging effects in RF MEMS capacitive switches," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, vol. 2005, no. C, pp. 753–756, 2005.
- [5] C. Chen and Y. Tzeng, "Temperature effects on nanodiamond dielectric charging for RF MEMS capacitive switches," *2010 10th IEEE Conf. Nanotechnology, NANO 2010*, pp. 619–622, 2010.
- [6] M. Koutsourelis, L. Michalas, and G. Papaioannou, "Temperature effects on the bulk discharge current of dielectric films of MEMS capacitive switches," *Microelectron. Reliab.*, vol. 52, no. 9–10, pp. 2240–2244, 2012.
- [7] Z. Peng, X. Yuan, J. C. M. Hwang, D. I. Forehand, and C. L. Goldsmith, "Superposition model for dielectric charging of RF MEMS capacitive switches under bipolar control-voltage waveforms," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 12, pp. 2911–2918, 2007.
- [8] B. Vigna, "Future of MEMS: An industry point of view," *7th. Int. Conf. Therm. Mech. Multiphysics Simul. Exp. Micro-Electronics Micro-Systems*, pp. 1–8, 2006.
- [9] Z. Peng, C. Palego, J. C. M. Hwang, D. I. Forehand, C. L. Goldsmith, C. Moody, A. Malczewski, B. W. Pillans, R. Daigler, and J. Papapolymerou, "Impact of humidity on dielectric charging in RF MEMS capacitive switches," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 19, no. 5, pp. 299–301, 2009.
- [10] M. Koutsourelis, L. Michalas, and G. Papaioannou, "The effect of temperature on dielectric charging of capacitive MEMS," *IEEE Int. Reliab. Phys. Symp. Proc.*, pp. 290–296, 2011.
- [11] R. Daigler, G. Papaioannou, E. Papandreou, and J. Papapolymerou, "Effect of dielectric film thickness on dielectric charging of RF MEMS capacitive switches," *2008 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 1275–1278, 2008.

- [12] Z. Peng, C. Palego, J. C. M. Hwang, C. Moody, A. Malczewski, B. W. Pillans, D. I. Forehand, and C. L. Goldsmith, "Effect of packaging on dielectric charging in RF MEMS capacitive switches," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, vol. 1, no. 1, pp. 1637–1640, 2009.
- [13] X. Yuan, Z. Peng, J. C. M. Hwang, D. Forehand, and C. L. Goldsmith, "A transient SPICE model for dielectric-charging effects in RF MEMS capacitive switches," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 53, no. 10, pp. 2640–2648, 2006.
- [14] M. Lamhamdi, P. Pons, U. Zaghoul, L. Boudou, F. Coccetti, J. Guastavino, Y. Segui, G. Papaioannou, and R. Plana, "Voltage and temperature effect on dielectric charging for RF-MEMS capacitive switches reliability investigation," *Microelectron. Reliab.*, vol. 48, no. 8–9, pp. 1248–1252, 2008.
- [15] N. Tavassolian, G. Papaioannou, and J. Papapolymerou, "Dielectric charging in capacitive RF MEMS switches: The effect of extended durations of electric stress," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 21, no. 11, pp. 592–594, 2011.
- [16] L. Wang, J. Y. Tang, and Q. a Huang, "Effect of Environmental Humidity on Dielectric Charging Effect in RF MEMS Capacitive Switches Based on C-V Properties," *Microelectromechanical Syst. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 637–645, 2013.
- [17] X. Yuan, S. Cherepko, J. Hwang, C. L. Goldsmith, C. Nordquist, and C. Dyck, "Initial observation and analysis of dielectric-charging effects on RF MEMS capacitive switches," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1943–1946, 2004.
- [18] U. Zaghoul, G. Papaioannou, F. Coccetti, P. Pons, and R. Plana, "Dielectric charging in silicon nitride films for MEMS capacitive switches: Effect of film thickness and deposition conditions," *Microelectron. Reliab.*, vol. 49, no. 9–11, pp. 1309–1314, 2009.
- [19] R. M. A. Dias, "Micro-g MEMS Accelerometer Based on Time Measurement," Universidade do Minho, 2013.
- [20] X. Yuan, Z. Peng, J. C. M. Hwang, D. Forehand, and C. L. Goldsmith, "Temperature Acceleration of Dielectric Charging in RF MEMS Capacitive Switches," *Microw. Symp. Dig. 2006. IEEE MTT-S Int.*, 2006.
- [21] R. Daigler, E. Papandreou, M. Koutsourelis, G. Papaioannou, and J. Papapolymerou, "Effect of deposition conditions on charging processes in SiNx: Application to RF-MEMS capacitive switches," *Microelectron. Eng.*, vol. 86, no. 3, pp. 404–407, 2009.
- [22] S. R. Karumuri, K. G. Sravani, S. D. Sailaja, and J. V. Sekhar, "Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) Technology," vol. 4, no. 1, pp. 307–314, 2012.
- [23] L. A. Rocha, E. Cretu, and R. F. Wolffenbuttel, "DYNAMICS OF PULL-IN: ANALYSIS OF THE META-STABLE REGIME," *Micro Electro Mech. Syst. 2004. 17th IEEE Int. Conf. on.*, pp. 3–6, 2004.

- [24] L. a Rocha, E. Cretu, and R. F. Wolffenbuttel, "Behavioural analysis of the pull-in dynamic transition," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 14, no. 9, pp. S37–S42, Sep. 2004.
- [25] L. A. Rocha, E. Cretu, and R. F. Wolffenbuttel, "Analytical model for the pull-in time of low-Q MEMS devices," *Proc. Nanotech*, vol. 2, pp. 271–274, 2004.
- [26] W. M. Zhang, H. Yan, Z. K. Peng, and G. Meng, "Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: A review," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 214, pp. 187–218, 2014.
- [27] P. Carazzetti, P. Renaud, and H. R. Shea, "Experimental study of electrical breakdown in MEMS devices with micrometer scale gaps," *Proc. SPIE*, vol. 6884, pp. 688404–688404–11, 2008.
- [28] R. a. Dias, G. de Graaf, R. F. Wolffenbuttel, and L. a. Rocha, "Gas viscosity sensing based on the electrostatic pull-in time of microactuators," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 216, pp. 376–385, Sep. 2014.
- [29] K. Microelectronics, "On the effect of residual charges on the pull-in parameters of electrostatic actuators," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 3189, pp. 1–6, 2002.
- [30] F. Gao, S. Ylinen, M. Kainlauri, and M. Kapulainen, "Smooth silicon sidewall etching for waveguide structures using a modified Bosch process," *J. Micro/Nanolithography*, vol. 13, no. 1, p. 013010, 2014.
- [31] K. Technologies, "Keysight Technologies The Parametric Measurement Handbook," 2014.
- [32] K. Technologies, "Keysight Technologies Low Current Semiconductor Measurements Using the B2980A Series Ammeter," 2014.

ANEXO I – PINOUT ESTRUTURA MEMS



ANEXO II – MODELOS MATEMÁTICOS

$$\sigma(d) = \sigma_0 d^\gamma, \quad (0.1)$$

$$Q^J = Q_{0J} \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right), \quad (0.2)$$

$$I_C = qA \frac{dQ}{dt} = qA \sum_J \frac{Q^J}{\tau_C^J} \exp\left(\frac{-t_{on}}{\tau_C^J}\right), \quad (0.3)$$

$$I_C = -qA \frac{dQ}{dt} = -qA \sum_J \frac{Q^J}{\tau_C^J} \exp\left(\frac{-t_{on}}{\tau_C^J}\right). \quad (0.4)$$

$$Q^J = Q_0^J \exp\left(\frac{V}{V_0^J}\right), \quad (0.5)$$

$$Q = \sum_J Q^J \left[1 - \exp\left(\frac{-t_{on}}{\tau_C^J}\right)\right] \exp\left(-\frac{t_{off}}{\tau_D^J}\right). \quad (0.6)$$

$$\Delta V = \frac{qhQ}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}, \quad (0.7)$$

$$F_{electrostática} = \frac{1}{2} V^2 \frac{C_0}{(d_0 - x)^2} \quad (0.8)$$

$$F_{elástica} = -kx \quad (0.9)$$

$$F_b = -b \frac{dx}{dt} \quad (0.10)$$

$$F_i = -m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (0.11)$$

$$F_{aext} = ma_{ext} \quad (0.12)$$

$$F_{elect} + F_{elastica} + F_b + F_i + F_{aext} = 0 \quad (0.13)$$

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8 d_0^2 k}{27 C_0}} \quad (0.14)$$

$$V_{offset} = \frac{d_d}{\varepsilon_d} \sigma_p \quad (0.15)$$

$$C_0 = \varepsilon \frac{A}{d_0}, \quad (0.16)$$

$$V_{aplicada} = E * d_{dielétrico}, \quad (0.17)$$

$$\begin{cases} V_1 = E_1 * d \\ V_2 = E_2 * d \end{cases} \Leftrightarrow 2 * E_2 * d = E_1 * d \Leftrightarrow E_2 = \frac{E_1}{2} \quad (0.18)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon} \quad (0.19)$$

$$\begin{cases} V_{aplicada} = E * d_{dielétrico} \\ E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon} \end{cases} \Leftrightarrow V_{aplicada} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon} * d_{dielétrico} \quad (0.20)$$

$$Q = m * V + b. \quad (0.21)$$

$$Q_{carga} = \sum_J Q_J [1 - \exp(-\frac{t_{on}}{\tau_C})], \quad (0.22)$$

$$Q_{descarga} = \sum_J Q_J \exp(-\frac{t_{off}}{\tau_D}). \quad (0.23)$$

$$Q_{acumulada} = Q_{carga} - Q_{descarga}. \quad (0.24)$$

$$DeltaV = \frac{V_0}{\tau} \exp(-\frac{t_{off}}{\tau}), \quad (0.25)$$