



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Bruno Rafael Rodrigues Rasteiro

ESTUDO DOS PARÂMETROS QUE AFETAM A TENSÃO DE DESCARGA NUM DETETOR GASOSO

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Física, na especialidade de Instrumentação, apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Mestre

Orientadora:

Professora Doutora Maria Filomena de Osório Pinto dos Santos Figueiredo

Fevereiro 2016

Esta cópia da tese é fornecida na condição de que quem a consulta reconhece que os direitos de autor são pertença da Universidade de Coimbra e que nenhuma citação ou informação obtida a partir dela pode ser publicada sem a referência apropriada.

This copy of the thesis has been supplied on condition that anyone who consults it is understood to recognize that its copyright rests with University of Coimbra and that no quotation from this thesis and no information derived from it may be published without proper acknowledgement.

This work was supported by FEDER, through Programa Operacional Factores de Competividade - COMPETE and by National funds through FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia in the frame of Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas Project through the QREN RAD4LIFE with the designation CENTRO-07-ST24-FEDER-002007. Bruno R. R. Rasteiro was also supported by this project.



Resumo

A verificação de ocorrência de descargas em detetores gasosos que operam a altas pressões está devidamente documentada nos mais variados laboratórios de estudo de radiação, verificando-se ainda que, para as condições de ocorrências das referidas descargas existe uma correlação entre o campo elétrico máximo aplicável no interior do detetor e a pressão a que se encontra o gás, não havendo até ao momento qualquer explicação para o facto.

Assim, no presente trabalho, para além de um estudo detalhado desta dependência, procurou-se uma explicação para a origem das descargas concretamente se elas se devem exclusivamente à pressão de operação do detetor, ou também à complexidade dos detetores gasosos. Para isso, este trabalho consistiu no projeto, montagem e utilização de um dispositivo que fosse o mais parecido possível com um detetor gasoso, mas que ao contrário destes, o seu interior fosse o mais simples possível. Os resultados obtidos sugerem uma relação entre a origem das descargas e a complexidade do interior dos detetores gasosos a alta pressão. Ainda assim, o que mais influencia a ocorrência de descargas é a pressão do gás, existindo uma clara redução do campo elétrico reduzido aplicável com o aumento da pressão no dispositivo. Para além disso, verificou-se ainda uma dependência com o tipo de mistura gasosa utilizada na experiência e o *ripple* da fonte de tensão utilizada.

Abstract

The occurrence of discharges in gaseous detectors at high pressures is well documented in many studies. Some studies have been able to correlate the maximum reduced electric field that can be applied in the detector and the pressure of the gas.

The goal of present work was to study throughly this dependence and its origin and whether they occur exclusively due to pressure, or to the complexity of the detectors. Thus, this work consisted in the project design, assembly and test of a device which would be as close as possible to a gas detector, but with a much simpler interior. Results suggest a relationship between the origin of the discharges and the complexity of the interior of the gaseous detectors. Still, the major cause to the occurrence of discharges is the pressure in its interior, with a clear reduction of the reduced electric field that can be applied with increasing of pressure. In addition, there was also a dependency with the type of gas mixture used in the experiment and the ripple of the voltage source used.

Agradecimentos

A Ele nada é impossível! Gostaria assim de começar por dedicar esta dissertação de mestrado a Deus e agradecer-lhe por ter sido digno da sua graça, sem a qual não teria concluído o meu percurso académico e este trabalho.

Obrigado Professora Filomena! As palavras são poucas e não conseguem descrever o quanto lhe sou grato. Pela paciência, ajuda, força, conselhos e acima de tudo porque foi um prazer ter sido orientado por si.

O que seria uma grande jornada como esta, se não houvesse amigos com quem a partilhar? Agradeço assim a todos os com quem tive o privilégio de partilhar esta etapa marcante, em especial ao Pedro, ao André, ao Olivier, ao Daniel, ao Francisco e à Mariana.

Agradeço também ao Alexandre Trindade e ao André Cortez a disponibilidade e por toda a ajuda que me deram.

Mãe, Pai e João, sem pilares uma casa desmorona-se. Obrigado por serem os meus pilares!

Inês, e sem força tudo é mais difícil, agradeço-te por tornares tudo mais fácil.

Por fim, gostaria de aproveitar a oportunidade para agradecer à Conceição e ao Alberto por serem um exemplo de força e resiliência, muito do que sou hoje também o devo a vocês, sou-lhes eternamente grato.

A todos o meu sincero MUITO OBRIGADO!

Conteúdo

1 Introdução.....	1
2 Conceitos relevantes.....	3
2.1 Descargas.....	3
2.1.1 Avalanche de Townsend.....	4
2.1.2 Descarga de corona.....	5
2.1.3 Descarga <i>streamer</i>	5
2.1.4 Descarga de arco.....	6
2.1.5 Faísca	6
2.2 Lei de Paschen.....	7
2.3 Gás de <i>quenching</i>	8
3 Dispositivo para a deteção de descargas	11
3.1 Projeto do dispositivo	11
3.1.1 Câmara de gás do dispositivo	13
3.1.2 <i>Flanges e feedthroughs</i>	16
3.1.3 Eléctrodo	17
3.1.4 Peças de Teflon®.....	18
3.2 Montagem do dispositivo	20
3.3 Circuito de gás do dispositivo	21
3.4 Modo de funcionamento do dispositivo	23
4 Método experimental	25
5 Resultados e análise	29
5.1 Xénon	30
5.2 Misturas	34

5.2.1 Xénon + Metano.....	34
5.2.2 Xénon + Trimetilamina.....	37
5.3 Em conclusão.....	38
6 Conclusão	43
Referências bibliográficas.....	45
Anexo	I

Lista de figuras

Figura 1: Curvas de Paschen de diferentes gases	8
Figura 2: Corte diametral da câmara do dispositivo	13
Figura 3: Corpo do dispositivo com peça de Teflon® de suporte de um dos elétrodos.....	14
Figura 4: Corte diametral do dispositivo preparado para distância entre elétrodos ser fixa.....	15
Figura 5: Corte diametral do dispositivo preparado para movimento do eletrodo inferior	15
Figura 6: Flange da câmara de gás do dispositivo	16
Figura 7: a) Feedthrough do eletrodo não carregado. b) Corte do feedthrough	17
Figura 8: Eletrodo	18
Figura 9: Peça Teflon® de suporte do eletrodo.....	18
Figura 10: Peça Teflon® utilizada para a distância de 1cm entre os elétrodos	19
Figura 11: Peça Teflon® para movimento do eletrodo	19
Figura 12: a) Corpo do dispositivo com flange inferior e feedthrough. b) Corpo do dispositivo com peça suporte de Teflon® e eletrodo	20
Figura 13: Dispositivo pronto a ser fechado	20
Figura 14: Dispositivo pronto para utilização.....	21
Figura 15: Esquema ilustrativo do circuito de admissão e extração de gás do dispositivo.....	21

Figura 16: Curva de Paschen e medidas preliminares do xénon.....	27
Figura 17: Tensão de descarga em função do produto da distância com a pressão de xénon (foram usadas 3 fontes de tensão)	31
Figura 18: Tensão de descarga e curva de Paschen do xénon.....	33
Figura 19: Campo elétrico reduzido de descarga em função da pressão de xénon para 3 fontes de tensão	34
Figura 20: Tensão de descarga em função do produto da distância com a pressão da mistura de xénon com metano (com 2 fontes de tensão diferentes)	35
Figura 21: Campo elétrico reduzido de descarga em função da pressão da mistura de xénon com metano (resultados obtido com 2 fontes diferentes).....	36
Figura 22: Tensão de descarga em função do produto da distância com a pressão da mistura de xénon com trimetilamina (com 2 fontes de tensão diferentes).....	37
Figura 23: Campo elétrico reduzido de descarga em função da pressão da mistura de xénon com trimetilamina para 2 fontes de tensão	38
Figura 24: Tensão de descarga em função da pressão	39
Figura 25: Campo elétrico reduzido de descarga em função da pressão	40
Figura 26: Comparação de valores de tensão de descarga com outros estudos	41
Figura 27: Comparação do campo elétrico reduzido noutros trabalhos.....	42

Lista de tabelas

- Tabela 1:** Coeficientes de correlação das variáveis tensão e pressão para as diferentes séries de dados.....32
- Tabela 2:** Valores de tensão de descarga obtidos para o xénon nas 3 fontes de tensão utilizadas em função da pressão e o correspondente valor de campo elétrico reduzido.....I
- Tabela 3:** Valores de tensão de descarga obtidos para a mistura de xénon e metano nas 2 fontes de tensão utilizadas em função da pressão e o correspondente valor de campo elétrico reduzido.....II
- Tabela 4:** Valores de tensão de descarga obtidos para a mistura de xénon e trimetilamina nas 2 fontes de tensão utilizadas em função da pressão e o correspondente valor de campo elétrico reduzido.....II

Capítulo 1

Introdução

O primeiro tipo de radiação não visível descoberto foram os raios-X por Wilhelm Röntgen nos finais do século XIX. Desde então tem-se procurado compreender cada vez melhor todos os fenômenos associados a cada tipo de radiação e quais as suas interações com o meio. Essa busca pelo conhecimento tem conduzido ao desenvolvimento de cada vez melhores instrumentos que permitam detetar e estudar os mais variados tipos de radiação existentes. De entre eles destacamos os detetores gasosos, um dos vários tipos de detetores de radiação disponíveis.

No interior dos detetores gasosos de radiação trabalhando a alta pressão detetou-se um fenômeno adverso e para o qual ainda não é possível apresentar uma explicação adequada: descargas elétricas para valores de campo elétrico reduzido (E/p) abaixo do esperado. Essas descargas condicionam o funcionamento dos detetores não se podendo trabalhar nas condições ideais.

Contudo, apesar de se desconhecer a origem das descargas, os resultados até aqui conhecidos sugerem haver alguma dependência entre a sua ocorrência e a pressão no interior do detetor: quanto maior a pressão, mais baixo o limiar de descarga. Ainda assim, existe também outro fator que poderá estar a ser negligenciado e influenciar significativamente o aparecimento de descargas: a complexidade por vezes existente em detetores de alta pressão.

Desta forma, este trabalho tem como principal objetivo o projeto, desenvolvimento e posterior operação de um dispositivo que permita o estudo da ocorrência de descargas elétricas no interior, para diferentes valores de pressão, tensão e para diferentes misturas gasosas. Mas, ao contrário dos demais detetores, o nosso dispositivo terá a particularidade de não requerer janela de entrada de radiação, já que se

tornará mais simples todo o desenho e portanto mais fácil aferir inequivocamente a origem das descargas: a pressão, ou a complexidade no interior dos detetores.

A presente dissertação, dividida em seis capítulos, apresenta o trabalho realizado. O primeiro capítulo faz uma breve apresentação do tema em estudo, o segundo capítulo aborda temas relacionados com o trabalho e que permitem uma melhor compreensão deste. O terceiro capítulo apresenta as etapas que resultaram no desenho do dispositivo e do circuito de gás necessário para as medidas. O quarto capítulo é dedicado ao método experimental utilizado para a recolha de dados, enquanto o quinto capítulo apresenta e analisa todos os resultados. Por último, o sexto capítulo, faz uma síntese dos capítulos anteriores e faz uma análise geral do projeto desenvolvido.

Capítulo 2

Conceitos relevantes

Nesta parte seria importante fazer uma revisão da literatura acerca do tema em estudo. No entanto, não há ainda, pelo menos até ao momento e tanto quanto acreditamos saber, nenhum outro trabalho relacionado com o estudo de descargas em detetores gasosos a alta pressão de desenho simples, daí que não se saiba qual o fenómeno que lhes dá origem. Ainda assim, a ocorrência de descargas está devidamente registada nos mais variados trabalhos realizados no Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) de Coimbra, bem como noutros laboratórios. É sobretudo devido a essa grande quantidade de registos de descargas que o presente trabalho tem um interesse acrescido, já que a obtenção de uma resposta para a sua origem permitirá a abordagem futura do projeto de detetores gasosos de uma forma mais cuidada, de modo a prevenir ou mesmo evitar o aparecimento de descargas, ou de algum modo possibilitar o uso de mais ampla gama de campo elétricos reduzidos.

Posto isto, este capítulo servirá para abordar o conceito de descarga e descrever alguns dos tipos mais comuns, bem como assuntos que se relacionem com descargas em detetores gasosos, como por exemplo a curva de Paschen.

2.1 Descargas

As descargas são um fenómeno peculiar, já que, embora aparentem ser todas iguais e tomem todas a designação de descarga (porque efetivamente é isso que elas são) existem vários tipos de descargas no que respeita à origem. A distinção entre cada uma delas nem sempre é um processo fácil, já que apresentam características bastante semelhantes, tornando o processo de distinção praticamente impossível. Para além disso,

nem todas têm interesse para o presente trabalho, pelo que, apenas serão apresentadas aquelas que consideramos relevantes.

Em primeiro lugar veja-se o significado de descarga. Designa-se por descarga elétrica o fenómeno do transporte de electricidade através do meio que ocorre devido à existência de um “caminho” criado pela ionização do meio. A fase inicial do fenómeno de ionização do meio, que resulta na ocorrência da descarga, é semelhante em todos os tipos de descarga existentes, e consiste na descarga de Townsend, a mais elementar de todas.

2.1.1 Avalanche de Townsend

A avalanche de Townsend [1], [2] ocorre nos meios gasosos atravessados por radiação em que estejam aplicados campos elétricos. Ao atravessar o gás contido no interior de um detetor gasoso, a radiação ioniza átomos ou moléculas resultando na criação de pares (ião-eletrão) que, devido à existência do campo elétrico, são afastados em sentidos contrários. Os iões, de maior massa, são acelerados em direção ao cátodo enquanto por sua vez os eletrões, de menor massa, vão em direção ao ânodo. A diferença entre as massas dos dois constituintes do par faz com que os eletrões sofram uma maior aceleração, atingindo uma maior velocidade. Nesse movimento, um eletrão que se desloca no meio gasoso vai colidindo com os átomos/moléculas, e caso tenha adquirido a energia suficiente entre colisões pode produzir ionização. Os dois eletrões sofrem esse mesmo processo passando a existir no interior do detetor dois eletrões (ionizadores), duplicando novamente o número. Este processo é designado por avalanche de Townsend por ser um processo em cascata de crescimento exponencial do número de eletrões livres.

A avalanche de Townsend é afetada pela pressão no interior do detetor, já que ela determina o número de colisões, e ainda pela geometria dos elétrodos [3].

O processo de criação de carga na avalanche de Townsend explica bem o início da formação dos vários tipos de descargas. Assim é necessária uma distinção adicional entre eles, que é feita através da forma como cada tipo de descarga evolui após o processo inicial.

2.1.2 Descarga de corona

As descargas de corona [3] são um tipo de descarga que ocorre com alguma frequência em sistemas em que existe um forte campo elétrico, não uniforme causado por materiais de raios de curvatura pequenos, onde a densidade de carga aumenta. Esta configuração gera uma distribuição de cargas não homogênea, mais concentrada nas regiões com raios de curvatura pequenos, como arestas vivas ou vértices. Desse modo, nas vizinhanças da região de acumulação de carga, e de acordo com um processo semelhante ao descrito na descarga de Townsend, pode ocorrer ionização do meio gasoso, tornando-o condutor. O resultado dessa ionização no gás designa-se por plasma, devido à concentração de carga. Este tipo de descargas poderão ter surgido no nosso trabalho apesar das formas curvas dos elétrodos.

Neste tipo de descarga, um pequeno aumento da intensidade do campo elétrico não resulta instantaneamente na ruptura elétrica do meio gasoso mas num aumento da região condutiva do meio (o plasma) que fará com que a descarga se propague. No caso da propagação atingir o eletrodo oposto, a descarga será designada de descarga de arco, de que se fala mais adiante.

2.1.3 Descarga *streamer*

As diferenças entre as descargas *streamer* e corona não são muitas, dado que ambas surgem pela existência de um forte campo elétrico, não uniforme e próximo do valor de ruptura elétrica do gás. Para além disso, há ainda uma semelhança adicional que consiste na criação de um plasma que apresenta características dipolares [3] dado que iões e eletrões criados na avalanche, apesar de se encontrarem sujeitos ao mesmo campo elétrico, adquirirão velocidades de sentido contrário devido às diferentes massas. O sentido contrário do movimento das cargas cria uma diferença de potencial que se opõem ao campo elétrico aplicado enfraquecendo-o, até deixar de ser suficiente para alimentar a multiplicação de carga. Assim, as descargas corona e as *streamers* não chegam atingir o outro eletrodo.

As diferenças entre os dois tipos de descargas verificam-se essencialmente a nível da densidade de carga e dimensão temporal. As descargas *streamer*, ao contrário das coronas, só ocorrem se a densidade de carga na avalanche atingir um valor próximo do limite de Reather [3] ($n=10^8$ cargas), valor a partir do qual a avalanche cresce bruscamente resultando na ruptura elétrica do gás. Ao nível da dimensão temporal, as

streamers são descargas transitórias ou efémeras que existem apenas em frações pequenas de tempo, apresentando formatos filamentosos [4].

2.1.4 Descarga de arco

Nas descargas descritas, o processo de formação de carga que está na origem das descargas é a avalanche de Townsend. Também no modo como terminam é semelhante: a ruptura elétrica do meio (descarga de arco), no caso de o sistema entrar num regime descontrolado.

Os campos elétricos gerados pela fontes de tensão no interior dos detetores gasosos não são na realidade verdadeiramente constantes, apresentando pequenas flutuações ao longo do tempo. Assim, nas regiões próximas dos elétrodos, existe um campo variável de que pode resultar a formação do plasma característico das coronas. Este efeito é ainda agravado nas regiões exteriores dos elétrodos, onde as linhas de campo elétrico adquirem uma ligeira curvatura. No caso de um aumento da intensidade do campo elétrico aplicado podem, no seguimento das descargas de corona, surgir *streamers*. Estas últimas indicam que o sistema está num estado de iminente ruptura elétrica e um pequeno aumento da intensidade do campo resulta na criação de um caminho de carga entre os dois elétrodos e inevitável descarga. Neste caso as *streamers* servem de precursoras da descarga.

A designação de descarga de arco deve-se ao aspeto visual que ela assume: é um tipo de descarga que ocorre entre superfícies com raios de curvatura reduzidos. O que a distingue das demais descargas é a enorme densidade de carga criada [3], que resulta numa descarga de elevada corrente. Por essa razão esta é, de entre os vários tipos de descarga, a mais perigosa por envolver uma maior densidade de corrente.

2.1.5 Faísca

A faísca, à semelhança da descarga de arco, é também caracterizada por ser o resultado da ruptura elétrica do meio.

No nosso caso, este tipo de descarga, a ter aparecido, deu-se próximo da região central dos elétrodos, onde as linhas de campo são paralelas entre si e perpendiculares aos elétrodos. Ao aumentar gradualmente a tensão da fonte e mesmo que de forma lenta, se estivermos muito perto do limite, dá-se a ruptura elétrica do gás e ocorre a faísca.

2.2 Lei de Paschen

Apesar da escassez bibliográfica relacionada com descargas em detetores gasosos a altas pressões há, para baixas pressões, uma expressão matemática - a lei de Paschen [5]–[8], que pode ser útil já que nos pode permitir estabelecer um eventual paralelo com os nossos resultados.

A lei de Paschen é descrita por uma equação matemática que tem como resultado o valor de tensão de rutura elétrica de um gás entre dois elétrodos, e é dependente da distância entre elétrodos, da pressão e do tipo gás:

$$V_{rutura} = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{Apd}{\ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)}\right)} \quad (2.1)$$

A e B são constantes que dependem do gás, p é o valor da pressão, d a distância entre os elétrodos e γ o coeficiente de emissão de eletrões secundários. A expressão pode ser entendida da seguinte forma [5]: consideremos um detetor composto por dois elétrodos com um qualquer gás no interior, onde se formam eletrões pela radiação incidente. Se entre os elétrodos estiver aplicada uma diferença de potencial, os eletrões são acelerados em direção ao ânodo produzindo, no seu caminho, outras ionizações. Os iões positivos resultantes da ionização são acelerados para o cátodo, de onde podem arrancar eletrões (eletrões secundários), que são também acelerados para o ânodo produzindo também novas ionizações. Se alguns iões arrancarem eletrões no cátodo, o processo pode entrar num regime auto-sustentável e pode dar-se a rutura elétrica do gás.

Na figura 1 estão mostradas as curvas correspondentes à lei de Paschen em alguns gases. Como se pode ver a tensão mínima necessária para que haja uma descarga diminui com o aumento da produto da pressão com a distância entre elétrodos (pd) até um valor mínimo, designado por mínimo de Paschen. Em primeira aproximação pode-se dizer que a diminuição da tensão de rutura com o aumento do produto pd ocorre até ao valor de $pd \approx 1$, isto é, para valores de distância e pressão verdadeiramente pequenos. Após o mínimo de Paschen a tensão de rutura vai aumentando de forma aproximadamente linear com o produto pd .

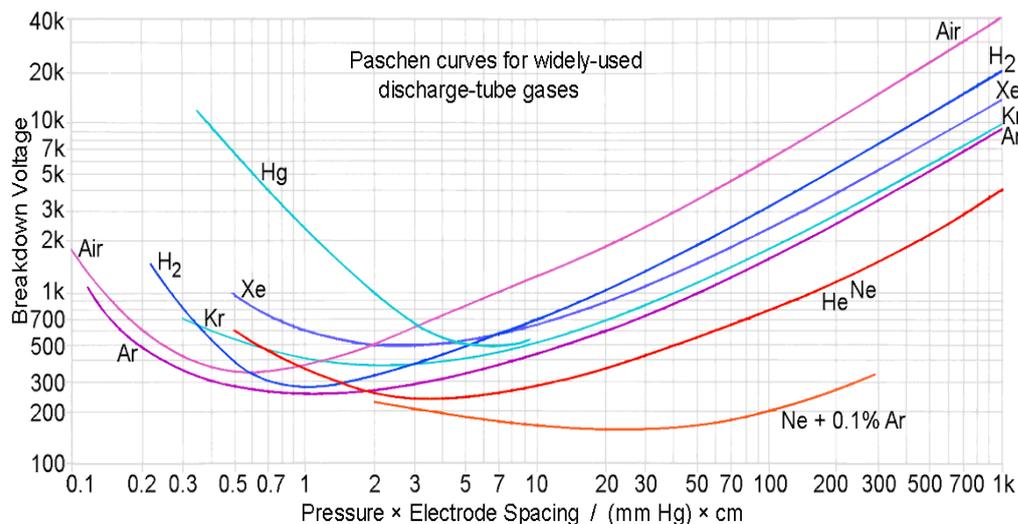


Figura 1: Curvas de Paschen de diferentes gases

(de: http://www.g3ynh.info/disch_tube/intro.html em 14/08/2015)

A lei de Paschen define, então, a diferença de potencial máxima que se podem aplicar entre dois elétrodos num detetor a baixa pressão sem que ocorram descargas.

2.3 Gás de *quenching*

A principal razão de utilização de gases, designados por gases de *quenching*, é o controlo da criação de carga livre no interior dos detetores gasosos evitando assim que a avalanche se descontrole, sendo muito comum, por exemplo, em detetores do tipo Geiger-Muller ou contadores proporcionais. Os gases de *quenching* [1], [9], ao contrário dos gases nobres, têm estruturas moleculares complexas e baixo potencial de ionização.

Por exemplo: os detetores do tipo Geiger-Muller têm como principal característica a deteção de radiação. Para que lhes seja possível detetar qualquer tipo de radiação, esses detetores operam com valores de tensão elevados, o que faz com que todo o gás de deteção acabe por ser ionizado. Desse modo, num ambiente de elevada radiação o detetor estaria continuamente saturado, já que a quantidade de radiação que lhe chegava não permitia que o meio gasoso regressasse ao estado inicial, uma solução é a utilização de gases de *quenching*.

Os iões do gás maioritário (normalmente um gás nobre) ao serem acelerados em direção ao cátodo poderão chocar com moléculas do gás minoritário (gás de *quenching*), que têm menor potencial de ionização que as moléculas do gás maioritário. Essa diferença de energia de ionização favorece a transferência de um eletrão da molécula do gás de *quenching* para o ião do gás maioritário. Após esse processo, começa a ser acelerado no

lugar do ião do gás maioritário, que agora se encontra neutralizado, o ião do gás de *quenching* criado.

Quando os iões do gás de *quenching* chegam ao cátodo e são neutralizados, a energia que, caso fosse um ião do gás maioritário, poderia servir para a libertação de um eletrão livre, neste caso pode ser absorvida na dissociação de moléculas mais complexas.

A mistura do gás principal com um outro gás para controlo da criação de carga não é mais do que um processo de controlo da avalanche no meio gasoso. O gás introduzido toma a designação de gás de *quenching*, termo inglês utilizado para caracterizar situações de mitigação ou atenuação de fenómenos indesejados. Por norma, a quantidade de gás de *quenching* utilizado situa-se entre os 5 e os 10% da quantidade total de gás utilizado na câmara do detetor.

Capítulo 3

Dispositivo para a detecção de descargas

No capítulo anterior foram referidos conceitos relevantes que tivemos de compreender para realizar o trabalho e que poderão ajudar na análise dos resultados. Este capítulo dá início à descrição do trabalho, concretamente com o projeto, montagem e modo de funcionamento do dispositivo. Assim, descrever-se-ão de forma detalhada as características do dispositivo e a fundamentação das escolhas efetuadas. Será também explicado o modo como se pretende detetar as descargas.

3.1 Projeto do dispositivo

As descargas elétricas verificadas em detetores gasosos, podem ter origem em fenómenos físicos ou ainda na complexidade dos dispositivos. Materiais pontiagudos e com arestas vivas, bem como ligações entre componentes (ainda que isoladas) aumentam a probabilidade de ocorrência de descargas. Deste modo, o projeto do dispositivo foi um procedimento criterioso, de modo a evitar a presença de pontos críticos.

O dispositivo foi projetado para conter o mínimo de componentes e mesmo esses com formas simples, sem arestas vivas ou saliências pontiagudas. Para além disso, considerou-se essencial a não existência de ligação física entre os dois elétrodos, pois ela constituiria um caminho para as cargas. Desta forma, decidiu-se optar por elétrodos circulares e desenvolveu-se um sistema para os manter paralelos.

Além disso, foi necessário garantir que a menor distância entre elementos fosse a distância entre elétrodos, para que, havendo descarga, ela apenas ocorresse entre elétrodos e não para o corpo do dispositivo: qualquer descarga que ocorra será necessariamente entre os elétrodos.

O dispositivo partilhava a linha de vácuo com outros detetores com fontes de alta tensão. Assim, no início da recolha de dados, foi criada uma ligação física entre a massa do dispositivo, o eléctrodo descarregado e a malha de terra do cabo de alta tensão. Este procedimento é importante na medida em que o corpo do dispositivo poderia funcionar como terra flutuante, por estar ligado a outros instrumentos, e dessa forma influenciar (atenuando ou amplificando) o campo eléctrico criado, o que poderia constituir uma causa para o aparecimento de descargas eléctricas.

Houve ainda outros aspetos considerados no projeto do dispositivo, nomeadamente, o seu dimensionamento que será um fator que depende da máxima pressão a aplicar. Como este trabalho é realizado a alta pressão, foi essencial estabelecer um limite máximo, que se decidiu ser 10 atm. Calculou-se a espessura mínima de aço inoxidável do corpo do dispositivo para a pressão máxima escolhida e adicionou-se uma margem de segurança. Tomou-se como grau mínimo de segurança uma pressão cinco vezes (5x) superior à pressão máxima. A espessura pôde ser obtida através da seguinte expressão empírica [10]–[12]:

$$t = \frac{p \times D_i}{2s - p} \quad (3.1)$$

na qual p é a pressão máxima (em psi) que se aplicará no interior da câmara do detetor, D_i é a medida do diâmetro interno da câmara (em cm) e s o máximo stress permitido para o material usado (no nosso caso aço inoxidável - 25000 psi). O valor mínimo calculado para a espessura da parede foi de $t = 2.24$ mm. Posteriormente, e uma vez que não implicava um muito maior gasto de material na construção, a espessura mínima que se decidiu para o dispositivo foi de 1 cm, o que garante um grau de segurança de mais de duas vezes o inicialmente considerado.

Outro aspeto importante a considerar foi o dimensionamento do diâmetro interno do corpo do dispositivo. Tendo em consideração que os gases normalmente utilizados neste tipo de trabalhos são dispendiosos, procurou-se dimensionar o dispositivo por forma a que o volume de gás utilizado fosse o mínimo possível, mantendo no entanto os eléctrodos suficientemente grandes para que as descargas não resultassem de um raio de curvatura reduzido.

Tal como no estudo de Paschen, fez-se também uma verificação da ocorrência de descargas em função da pressão. Era também importante que o dispositivo permitisse o estudo da ocorrência de descargas em função da distância entre eléctrodos, pelo que foi desenhado de modo a ser fácil a introdução de um mecanismo que permita a variação da

posição do eléctrodo ligado à terra, tomando-se como intervalo de distâncias entre os eléctrodos as distâncias de 0 a 1,5 cm.

Assim, o dispositivo foi desenhado com um diâmetro interno de 15 cm e uma altura de 6,5 cm e com um diâmetro máximo de eléctrodos de 10 cm. Com estas dimensões o volume de gás a utilizar em medidas para a pressão de 10 atm será de aproximadamente 6,5 l.

Nas secções seguintes serão mostradas algumas imagens do dispositivo desenhado num software adaptado a esse fim.

3.1.1 Câmara de gás do dispositivo

A câmara de gás do dispositivo foi desenvolvido em aço inoxidável. Como se pode verificar pela figura 2, é constituída por 3 partes distintas: a parte central, que se designará por corpo e duas *flanges* que estão aparafusadas ao corpo. O tipo e o número de parafusos a utilizar teve de ser criteriosamente escolhido. Uma vez que a pressão máxima utilizada seria de 10 atm, a força sentida em cada uma das *flanges* seria superior a 80000 N, a que seria necessário acrescentar um intervalo de segurança. O intervalo de segurança utilizado foi novamente de pressões cinco vezes maiores à pressão nominal. Assim, de entre os vários tipos de parafusos e de acordo com as especificações garantidas pelos fabricantes decidiu-se utilizar dezoito parafusos do tamanho M8, da categoria 8.8.

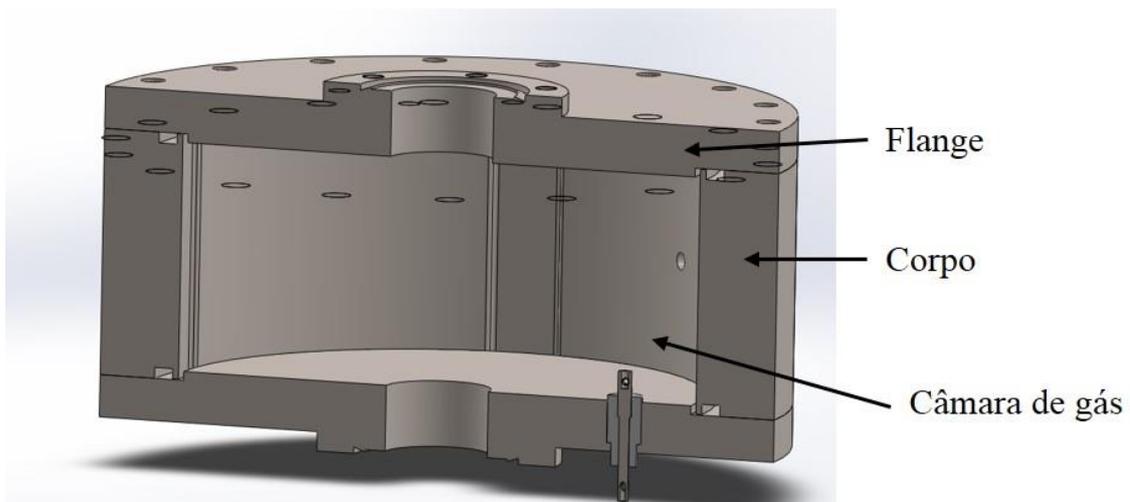


Figura 2: Corte diametral da câmara do dispositivo

A junção das três partes não garante o total isolamento do interior da câmara em relação ao exterior, pelo que, como se pode ver na figura 3, se desenhou no corpo do dispositivo uma ranhura circular onde se colocou um *o-ring*, na superfície de contacto com as *flanges*. No nosso caso, o *o-ring* é um anel de um fluorelastómero designado por Viton® [13] que, quando comprimido entre as duas superfícies, cria uma barreira isoladora de pressão. A ranhura teve de ser dimensionada de acordo com o anel [14], [15]. O papel do anel é importante, já que o gradiente de pressões experimentado vai do alto vácuo à pressão máxima de 10 atm. Houve ainda o cuidado de, ao juntar as duas partes, não esmagar o *o-ring* mas apenas comprimi-lo sem o danificar.

Na figura 3 podem ver-se 4 ranhuras verticais no corpo do dispositivo que conjugadas com a forma especial das peças de Teflon® garantem que os eléctrodos se encontram sempre paralelos.

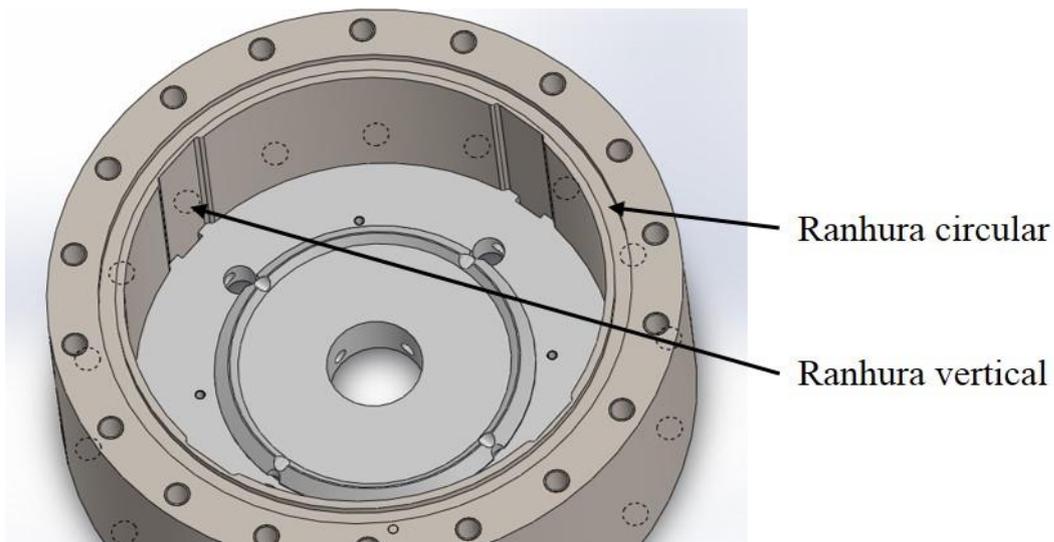


Figura 3: Corpo do dispositivo com peça de Teflon® de suporte de um dos eléctrodos

A espessura mínima da parede da câmara de gás utilizada foi 1 cm. A espessura adotada facilitou a maquinação do corpo e possibilitará uma gama de pressões superior à considerada neste trabalho em futuros estudos.

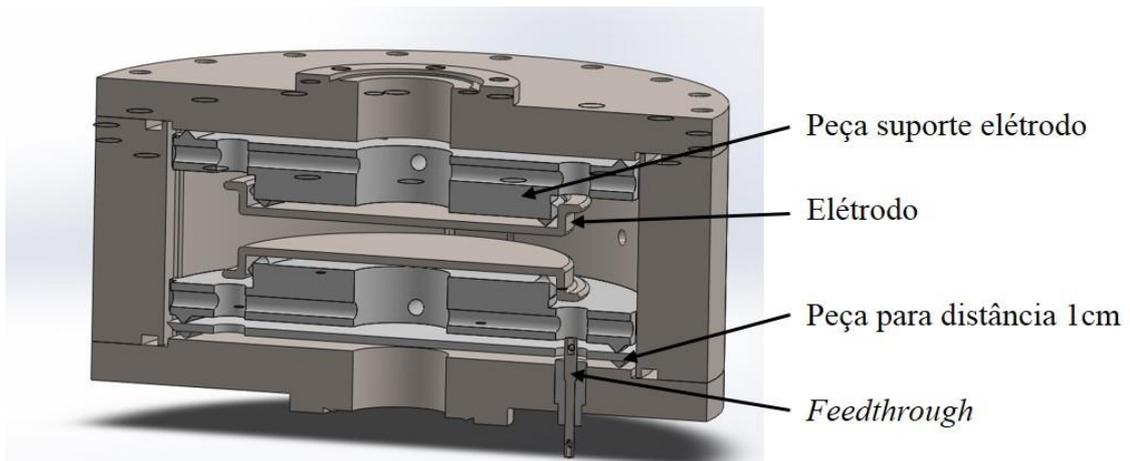


Figura 4: Corte diametral do dispositivo preparado para distância entre elétrodos ser fixa

Nas figuras 4 e 5 encontram-se ilustradas duas formas de utilização do dispositivo. Na montagem da figura 4 o dispositivo operará a uma distância fixa entre os dois elétrodos (1 cm). Na montagem da figura 5 e com o auxílio de um dispositivo, o *feedthrough*¹ de movimento, é possível alterar a distância entre os elétrodos. A gama de distância poderá ser aumentada, bastando para isso que se reduza a espessura das peças de suporte de Teflon®.

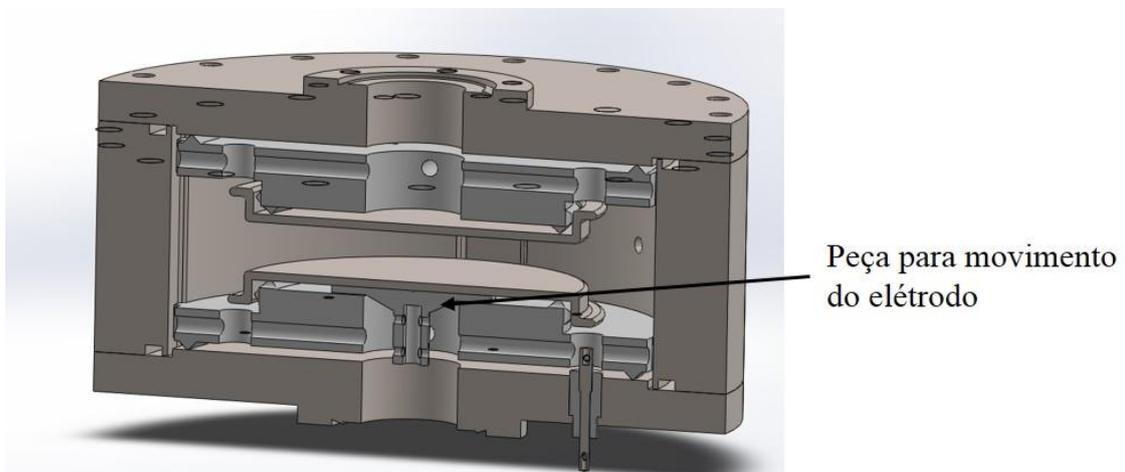


Figura 5: Corte diametral do dispositivo preparado para movimento do elétrodo inferior

¹O termo *feedthrough* é oriundo da língua inglesa e resulta da junção das palavras *feed* (alimentar) e *through* (através), sendo normalmente empregue para designar passadores elétricos.

3.1.2 *Flanges e feedthroughs*

Como se explica mais adiante, foram realizadas previsões das condições mais favoráveis ao aparecimento de descargas e trabalhando à máxima pressão (10 atm) a previsão de tensão de ocorrência de descargas era de algumas dezenas de kV, valores que requerem certas medidas de precaução. Com efeito, apesar de as correntes fornecidas por estas fontes de tensão serem muito baixas, é sempre um perigo a ter em conta. Assim, para a alimentação do eléctrodo foi comprado um *feedthrough* e respectivo cabo certificados, de forma a garantir que se cumpriam todas as normas de segurança.

Tal como se pode ver pela figura 6, as *flanges* da câmara de gás do dispositivo desenvolvido foram desenhadas de forma a que tivessem no seu exterior um encaixe que permitisse a fixação do *feedthrough* (como alternativa), garantindo ao mesmo tempo condições de isolamento de pressão pela introdução de um anel de cobre entre as duas superfícies. O encaixe exterior teria assim que ter as medidas o mais próximo possível das do *feedthrough* - uma *flange* do tipo NW35CF. Assim, o encaixe foi desenhado segundo as dimensões definidas para a superfície referida.

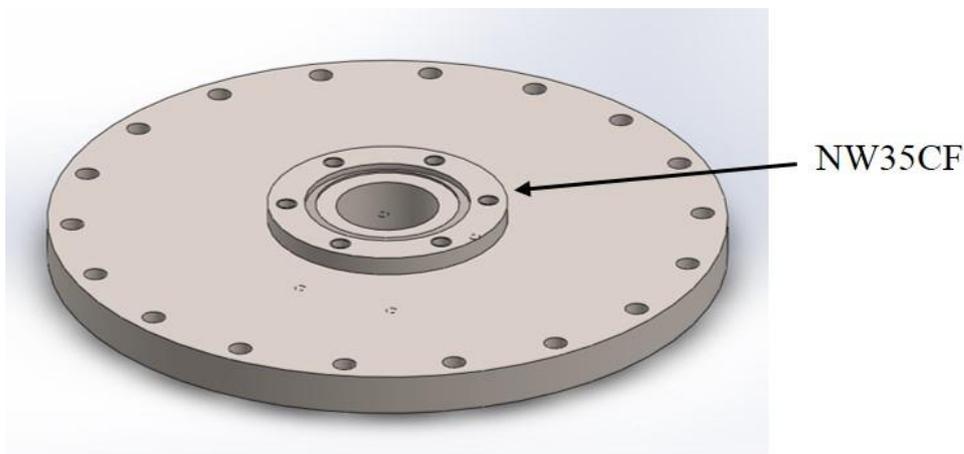


Figura 6: *Flange* da câmara de gás do dispositivo

Uma vez que a introdução de um mecanismo que possibilite o movimento do eléctrodo não carregado fará uso do encaixe desenhado na outra *flange* do dispositivo, procedeu-se ao desenvolvimento de um *feedthrough* de recolha, que se encontra ilustrado na figura 7. Neste dispositivo podem encontrar-se duas peças distintas: a peça central que é o *feedthrough* propriamente dito, feito em aço inoxidável e que estará ligado à malha de proteção do cabo de alta tensão. Todos os dispositivos ligados a linhas eléctricas estão ligados por um fio terra comum que garante a ligação efetiva à terra, permitindo que excessos de corrente sejam para lá escoados; a esse mesmo fio comum está também ligada

a malha de proteção dos cabos de alta tensão do eletrodo superior, o *feedthrough*, e como visto anteriormente, o corpo do dispositivo.

A peça exterior é feita numa cerâmica designada por Macor®. A escolha do Macor® [16] deveu-se ao facto de ser um material com um coeficiente expansão térmica semelhante ao do aço inoxidável e a ser um excelente isolante elétrico suportando uma elevada gama de valores de tensão. Para além disso, o Macor® é um material pouco poroso o que é de extrema importância no *outgassing*². Os contras deste material são o elevado custo e a fragilidade (é uma cerâmica), revelada na relativa facilidade de lascar.

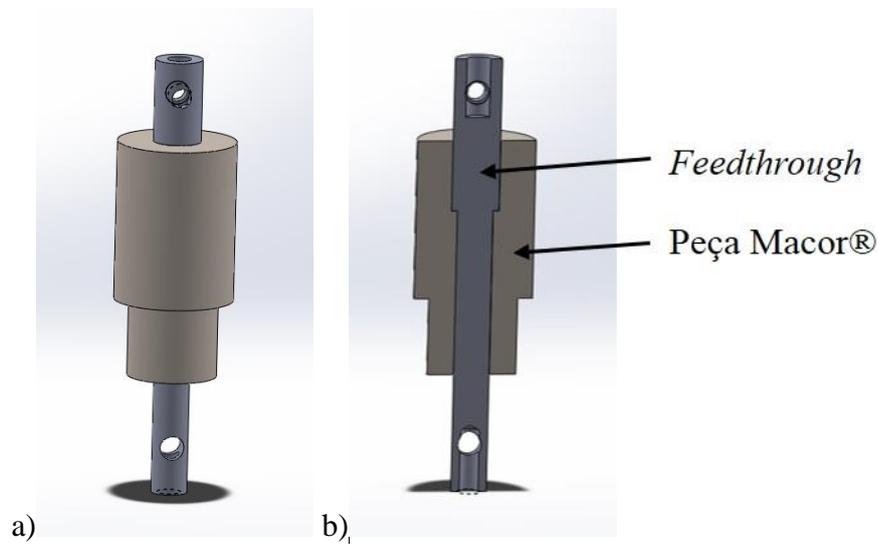


Figura 7: a) *Feedthrough* do eletrodo inferior. b) Corte do *feedthrough*

Ao contrário do *feedthrough* de alta tensão que estará aparafusado à flange superior do dispositivo, este, por nós desenvolvido, será colado ao Macor®, que por sua vez será colado à flange inferior, assegurando assim um completo isolamento do interior do dispositivo.

3.1.3 Eletrodo

Na figura 8 encontra-se ilustrado um dos dois eletrodos utilizados na realização do nosso estudo: como se pode verificar é completamente desprovido de arestas vivas e saliências pontiagudas. Deste modo, reduziu-se de forma significativa a possibilidade de ocorrências de descarga fora da zona circular (plana) do eletrodo. Inicialmente os eletrodos tinham sido desenhados para serem em forma de disco, no entanto, essa forma

²Designa-se por *outgassing* o processo de libertação dos gases que se encontram retidos nos poros de um material.

era pouco viável dado que era necessário que estes se encontrassem completamente estabilizados nas peças de suporte de Teflon®, assim foram redesenhados para conterem um bordo que permite serem aparafusados às peças de suporte.

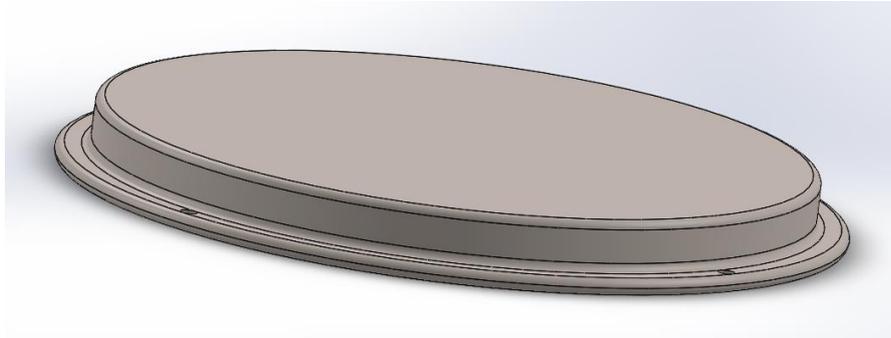


Figura 8: Eléctrodo

3.1.4 Peças de Teflon®

Para este trabalho foram desenvolvidas três tipos de peças de Teflon®. Nas figuras seguintes poder-se-á ver em pormenor a forma de cada uma delas.

Uma das peças desenvolvidas tem como função garantir o correto posicionamento dos eléctrodos no interior da câmara; foi também desenhada de forma a reduzir o volume de gás de enchimento necessário, figura 9. A complexidade observada nesta peça deve-se essencialmente a dois fatores: a estabilização dos eléctrodos, isto é, a necessidade de os eléctrodos se manterem paralelos entre si e a necessidade de eliminação de fugas virtuais. Este fenómeno consiste na existência de espaços ou fissuras de reduzidas dimensões entre os vários componentes, dos quais é extremamente difícil extrair os gases residuais e de *outgassing* que iriam funcionar como impurezas. Assim, procurou-se reduzir a superfície de contato entre cada um dos componentes e aumentar o volume de gás entre eles.

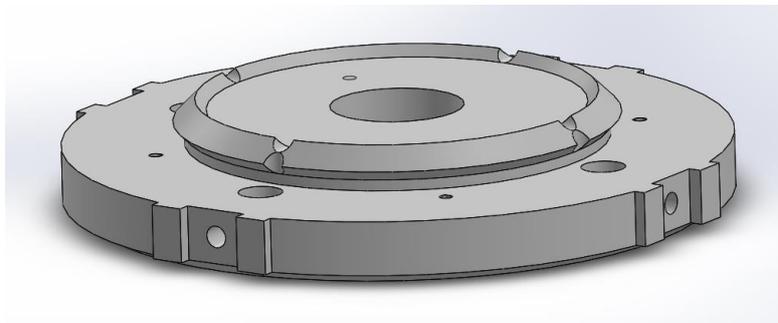


Figura 9: Peça Teflon® de suporte do eléctrodo

A peça da figura 10 tem também como objetivo o correto posicionamento dos elétrodos mas foi desenvolvido apenas para a situação em que se utiliza a distância fixa de 1 cm.

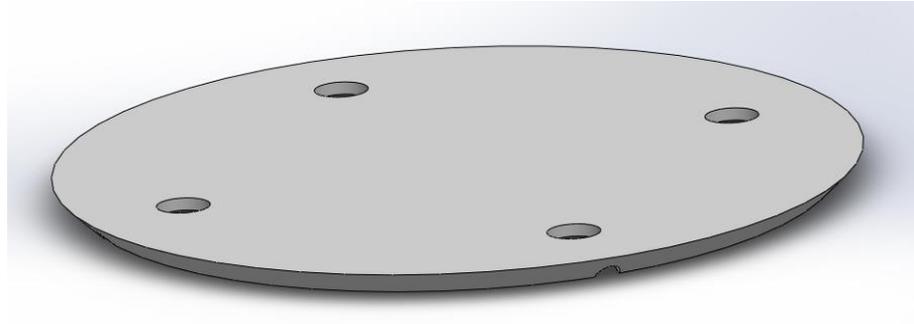


Figura 10: Peça Teflon® utilizada para a distância de 1cm entre os elétrodos

Por último, a terceira peça de Teflon®, ilustrada na figura 11, tem como principal função possibilitar o movimento do elétrodo descarregado, a partir do exterior. Esta peça foi projetada para estar fixa ao veio do *feedthrough* de movimento e deverá ser instalada entre o elétrodo e a peça da figura 9, por forma a que o movimento seja o mais suave possível.

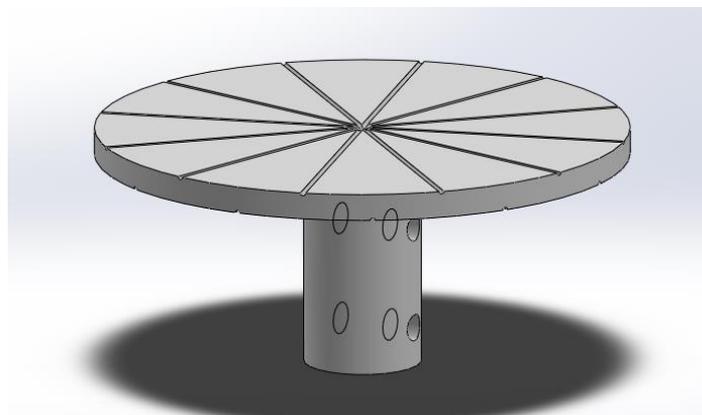


Figura 11: Peça Teflon® para movimento do elétrodo

O Teflon® [17] foi o material escolhido por ser um material praticamente inerte, de toxicidade nula, de fácil maquinação, mais barato que o Macor® e mais robusto. Assim, apesar da complexidade, as peças de Teflon® não terão qualquer efeito nos resultados, ficando assim salvaguardado um dos requisitos do projeto deste dispositivo: a menor complexidade possível do interior. Contudo, apesar das suas enormes vantagens, o Teflon® tem a desvantagem de ser um material poroso tornando o processo de *outgassing* bastante demorado.

3.2 Montagem do dispositivo

Concluída a fase de desenho e projeto do dispositivo chegou o momento de dar início à fase de construção, que teve lugar nas oficinas do LIP. Esta fase foi especialmente demorada, o que teve como consequência um atraso significativo em relação aos prazos previamente estabelecidos. Não obstante, houve uma recalendarização de todo o trabalho tendo-se conseguido, para além da montagem e ajuste do melhor método experimental a seguir, a realização de três estudos sobre descargas.

Após a maquinação, as peças que compunham o dispositivo foram limpas. Esse processo também ficou ao cuidado de um dos funcionários do LIP, por ser necessário recorrer à utilização de uma câmara limpa e ao manuseamento de máquinas próprias.

Finalizados estes processos pôde passar-se à fase de colagem e montagem do dispositivo de acordo com a configuração ilustrada na figura 4 (de distância fixa).

Nas figuras seguintes mostram-se algumas fotografias de diferentes fases da montagem do dispositivo.

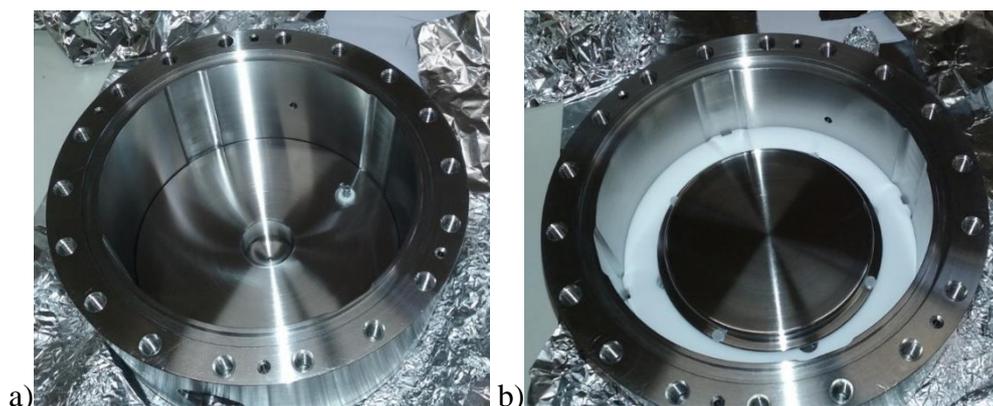


Figura 12: a) Corpo do dispositivo com flange inferior e feedthrough. b) Corpo do dispositivo com peça suporte de Teflon® e eletrodo



Figura 13: Dispositivo pronto a ser fechado



Figura 14: Dispositivo pronto para utilização

3.3 Circuito de gás do dispositivo

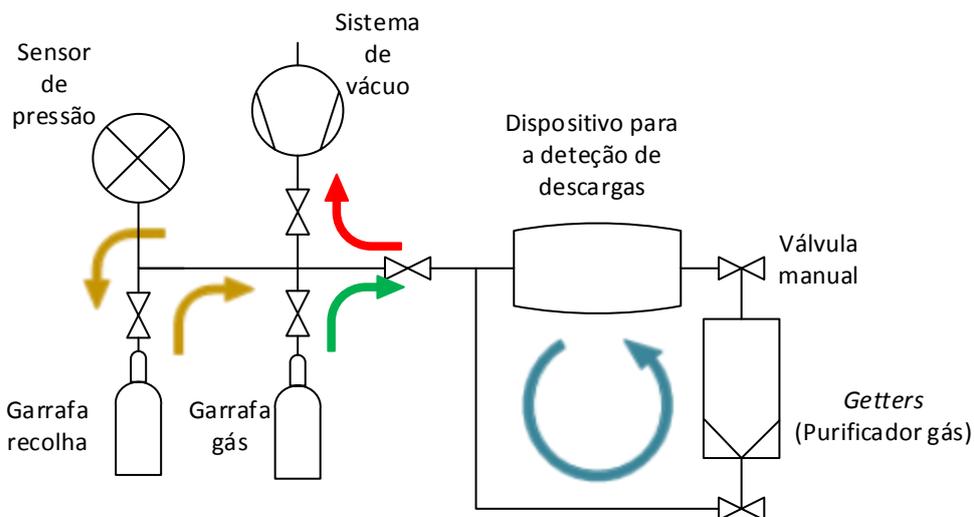


Figura 15: Esquema ilustrativo do circuito de admissão e extração de gás do dispositivo

Na figura 15 encontra-se ilustrado um esquema do circuito de gás que foi montado para albergar o dispositivo construído, como mostra a figura 14. O circuito, tal como se pode verificar, é constituído por um tubo com *getters*, duas garrafas de gás - uma de admissão e a outra de recolha, tubos de vácuo e válvulas manuais, para além do dispositivo construído. No esquema encontram-se desenhadas cinco setas, cada uma das quais representando as diferentes formas de utilização do circuito de gás.

O dispositivo é o elemento central do circuito. O tubo com *getters* é um cilindro oco, no qual se colocam umas “pastilhas” cilíndricas que têm o nome de *getters* [18] que são materiais que depois de aquecidos vêm ativada a capacidade de adsorver gases moleculares. As *getters* utilizadas foram as St 707 [19], fornecidas pela empresa SAES®, e, de acordo com o catálogo do fabricante, adsorvem moléculas como o azoto, a água, monóxido e dióxido de carbono e hidrogénio. Para a sua ativação utilizámos uma temperatura de 400°C durante um intervalo de tempo de quinze minutos que, segundo as informações fornecidas pelo fornecedor, garantem a total ativação das *getters*. O processo de aquecimento referido faz com que a película protetora das *getters*, que as protege da saturação por exposição ao ar, seja destruída. A partir desse momento as *getters* passam a estar ativas, não podendo ser expostas ao ar, caso contrário saturam devido à enorme quantidade de moléculas que adsorvem. Assim, o tubo que as contém tem, nas suas extremidades, válvulas que, quando fechadas, isolam completamente o tubo do restante circuito. Utilizou-se como temperatura de operação 150°C, que permite não só uma adequada purificação do gás, como prolongar o tempo de vida das *getters*.

A garrafa de gás é o recipiente onde se encontra armazenado o gás que se pretende estudar, tendo a possibilidade de ser substituída. A garrafa de recolha é um recipiente para onde se pode recolher todo o conteúdo gasoso do sistema, tornando o processo de enchimento reversível e poupando gás. O xénon, gás comum aos três estudos realizados, pode ser recolhido mergulhando a garrafa de recolha em azoto líquido, processo que resulta na recolha quase instantânea de todo o xénon. A bomba de vácuo permite evacuar o sistema retirando o restante gás e expelindo-o para a atmosfera.

Para além dos elementos enunciados, existem também no circuito válvulas, cuja principal função é a de possibilitar o isolamento dos diferentes elementos. É através da conjugação de abertura ou fecho das várias torneiras que se definem as diferentes formas de utilização ilustradas através das setas, na figura 15. O primeiro modo consiste em evacuar o dispositivo, isto é, retirar o ar do dispositivo. No trabalho aqui referido, este passo foi extremamente demorado essencialmente devido ao lento *outgassing* do Teflon® e às bolsas de ar acumuladas entre as superfícies dos diferentes materiais que compõem o dispositivo.

Depois de evacuado o dispositivo satisfatoriamente (pressão de gás residual próxima das dezenas de nanoTorr), passa-se à fase seguinte, ilustrada pela seta verde, na qual, com uma nova conjugação de abertura e fecho de torneiras, se permite que o gás contido na garrafa chegue ao dispositivo e *getters*.

Fechando o dispositivo e *getters* num único circuito entra-se numa nova configuração, correspondente a uma nova utilização do sistema gasoso: o modo que permite a experiência. As *getters* aquecidas, em contacto com o gás, estabelecem uma convecção que obriga o gás a circular, fazendo com que se “renove” dentro do dispositivo e se mantenha purificado, como indicado pela seta azul.

Finalizada a experiência, o gás pode ser recolhido na garrafa de recolha, para posterior utilização, como se mostra pelas setas laranja, ou pode ser rejeitado (seta vermelha), no caso de se encontrar misturado com outro gás.

3.4 Modo de funcionamento do dispositivo

A operação do dispositivo é simples: consiste no controlo do valor de tensão da fonte e dos seus sinais de alarme, ou através da audição do som emitido pelas descargas.

Depois de encher o sistema até à pressão que se pretende estudar, inicia-se a experiência através do fornecimento de tensão a um ou aos dois eléctrodos. No nosso estudo apenas será fornecida tensão a um dos eléctrodos, mais concretamente ao eléctrodo superior, estando o eléctrodo oposto ligado à malha de terra do cabo de alimentação de alta tensão, como referido anteriormente.

Depois de se iniciar o fornecimento de tensão, verificar-se-à a ocorrência de descargas pelas flutuações da tensão fornecida: com efeito, a fonte ao transmitir ao eléctrodo a tensão que gera, cria uma pequena corrente. Uma vez estabelecida a descarga, há a transferência de alguma dessa corrente entre os eléctrodos de forma quase instantânea, incidente ao qual a fonte não é capaz de responder, o que leva a que a tensão fornecida sofra uma queda abrupta. Contudo, é essa incapacidade de resposta ao fornecimento de corrente solicitado pela descarga, que resulta na extinção desta, visto que é o consumo de parte da corrente criada que faz com que a tensão deixe de ser suficiente para que a descarga se mantenha [2]. Extinta a descarga, a fonte é então capaz de repôr a tensão que se definiu e reestabelecer de novo a corrente, voltando a aparecer no mostrador os valores iniciais. Este é um dos modos de se perceber que ocorreu uma descarga no sistema.

Outra das formas de deteção de descargas é controlar o acender de um LED de alarme da fonte de tensão, que é ativado na ocorrência de descarga. Mas o tempo de ativação desse LED é mínimo, estando apenas aceso durante a ocorrência da descarga.

Há ainda um outro método de detetar a ocorrência de descargas que é o de tentar ouvir o som emitido. No entanto, o facto de a descarga se dar no interior da câmara do dispositivo feito em aço inoxidável com alguma espessura, e o som ser mínimo, dificulta a deteção.

Apesar das dificuldades inerentes aos dois últimos métodos, a utilização conjunta das três formas aqui apresentadas, mesmo no caso de uma delas falhar, permite uma boa deteção da ocorrência de descargas.

Capítulo 4

Método experimental

Neste capítulo descreve-se o método experimental, que foi sendo progressivamente melhorado ao longo da experiência, de modo a tirar o máximo partido dos recursos e equipamento, tornando o processo de recolha de resultados o mais eficiente possível.

Assim, baseando-nos em registos prévios de ocorrência de descargas a altas pressões decidimos fazer uma previsão das condições para a ocorrência de descargas para o gás em uso (o xénon), de que se sabe que a multiplicação de carga em avalanche acontece para valores de campo elétrico reduzido (E/p) superiores a aproximadamente $6 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Torr}^{-1}$, à pressão atmosférica. Assim, a partir daí poder-se-iam estimar os valores das variáveis disponíveis (tensão, distância e pressão) a que se poderia começar a obter resultados. Para isso recorreremos à expressão de E/p :

$$E/p = \frac{\Delta V}{d \cdot p} \quad (4.1)$$

onde, ΔV é a diferença de potencial dos elétrodos em Volts, d a distância entre eles em cm e p a pressão no interior do detetor em Torr. Sabendo que se utilizaria uma distância fixa de 1 cm, podemos substituir em 4.1 as variáveis conhecidas:

$$6 = \frac{V}{1 \cdot p} \quad (4.2)$$

Isto é:

$$V = 6 \cdot p \quad (4.3)$$

O aparecimento de descargas, nas unidades apresentadas, seria mais provável para valores de tensão no mínimo seis vezes superiores ao valor da pressão (em Torr) no interior da câmara do dispositivo, ou seja, para um valor de pressão próximo da

atmosférica (1 atm = 760 Torr), obteríamos descargas para valores de tensão superiores a 4560 V.

Chegados a este ponto estávamos em condições de iniciar a utilização do equipamento, e assim procedemos à recolha de uma primeira série de resultados que teve como objetivo principal o conhecimento das limitações dos dispositivos. A pressão utilizada nessas medidas foi de aproximadamente 1.05 bar ou 787 Torr. A escolha desta pressão superior à atmosférica será conveniente na eventualidade de uma pequeníssima fuga (sobre cuja existência se mantinham dúvidas) garantindo assim uma menor probabilidade de contaminação do gás no interior da câmara. Com o decorrer da realização experimental e sucessivas verificações da pressão confirmou-se que o dispositivo não tinha fugas. De referir ainda que o sensor utilizado na medição da pressão no interior do dispositivo foi um sensor analógico que mede pressões até 15 bar, cujo erro de leitura é de 0.05 bar. Assim, a pressão utilizada na primeira série era de 1.05 ± 0.05 bar (787 ± 38 Torr) o que, substituindo na expressão 4.3, dá como valor mínimo de tensão de descargas, $V = 4722 \pm 225$ V.

Assim, tendo já uma previsão da tensão mínima para ocorrência de descargas foi necessário definir o método experimental a seguir. Uma vez que estas primeiras medidas serviriam apenas para conhecimento do equipamento, decidiu-se que teriam a duração de trinta minutos cada (30 min), seguidas de intervalos de também trinta minutos. Os intervalos de repouso do sistema, iguais aos intervalos de medida, procura garantir que cada medida seja independente das anteriores, anulando um eventual plasma condutor que se pudesse ter formado na descarga.

Iniciou-se o trabalho com uma tensão de 5000 V, não se verificando qualquer descarga. Assim, foi-se subindo a tensão em intervalos de 250 V. Só se verificou o aparecimento de descarga para uma tensão aplicada de 6750 V. Ainda assim, subiu-se um pouco mais a tensão tendo-se verificado que quanto maior a tensão menor era o tempo até à descarga.

Verificando o bom funcionamento da câmara (a pressão manteve-se a 787 Torr) durante o período de operação estudaram-se outras pressões, mais concretamente menores que a primeira, já que se pretendia comparar com a curva de Paschen do xénon da figura 1 [8].

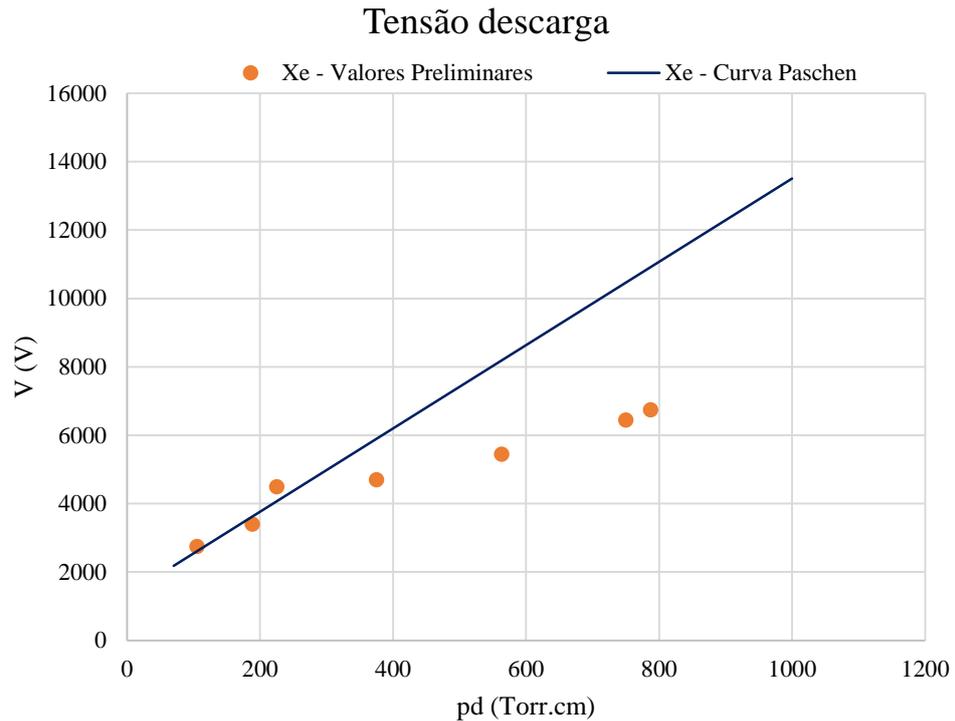


Figura 16: Curva de Paschen e medidas preliminares do xéon

Como se pode ver na figura 16 (a baixas pressões) os resultados preliminarmente obtidos demonstram concordância com a curva de Paschen do xéon, no entanto para valores superiores a 225 Torr (0.3 bar) a tensão de rutura do gás foi muito menor que o valor da curva de Paschen, pelo que tinha interesse estudar as maiores pressões. A curva de Paschen, ao contrário da maioria dos estudos em detetores gasosos em que se usa uma distância fixa durante toda a experiência, mostra a variação da tensão de descarga de um gás não só com a pressão, mas também em função da distância entre elétrodos. Esta pode ser uma justificação para a divergência entre os resultados recolhidos e a curva de Paschen.

Durante o estudo efetuado verificou-se que o aparecimento de descargas era influenciado por qualquer movimento brusco nas proximidades (quando a mesa era abanada, ou as portas da sala se fechavam bruscamente).

Estas foram as primeiras verificações feitas com o primeiro método experimental que nos permitiram definir um procedimento genérico que ainda assim acabou por ser alterado dependendo da fonte de tensão em uso:

- Medidas com um tempo máximo de recolha de quinze minutos (15 min), seguidas de intervalos de tempo iguais sem tensão aplicada;

- Procura da tensão de descarga em função da pressão em intervalos de 0.25 bar, tomando como pressão inicial 0.25 bar;
- Procura da tensão de descarga pelo método de aproximações sucessivas, começando com intervalos de 500 V e até um mínimo de 50 V;
- Verificação da tensão de descarga através da recolha de pelo menos duas descargas para a mesma tensão em medidas diferentes, respeitando os intervalos referidos.

Capítulo 5

Resultados e análise

Estabelecido o método experimental estava-se em condições de iniciar o estudo sistemático de descargas a altas pressões. As conclusões tiradas têm por base a comparação com os resultados obtidos em detetores mais complexos.

O dispositivo foi desenvolvido em aço inoxidável, o que não permite a visualização das descargas. Ainda assim, por vezes era possível, através dos sinais dados pela fonte de tensão, perceber qual o tipo de descarga que se estava formar. Por exemplo, em determinados valores de tensão verificava-se, através de pequenas flutuações do valor indicado na fonte de tensão, que se estavam a formar descargas de corona ou *streamers* que acabavam por fazer disparar o sinal de alarme da fonte. Posteriormente, após a carga se ter dispersado, verificava-se que eram falsos-positivos e que não tinha ocorrido o tipo de descarga que procurávamos: a descarga de arco ou a faísca. Daí ter sido feita referência a esse tipo de descargas no segundo capítulo.

Os resultados mostrados nas figuras deste capítulo estão também representados em anexo nas tabelas 3, 4 e 5, para xénon puro, mistura com metano e mistura com TMA, respetivamente. Como se poderá verificar o erro associado à medição da pressão é igual em todos os casos (± 0.05 bar, isto é ± 38 torr). Os erros associados à tensão aplicada aos elétrodos dependem da fonte utilizada e são fornecidos pelo fabricante na folha de especificações: para a fonte de 8000 V (CAEN N1470) [20] temos que a correção ao valor indicado na fonte é de $\pm(0.02\% \text{ do valor lido} + 2\text{V})$. Assim, por exemplo, para o primeiro ponto da figura 17 ($V = 3400$ V) ficamos com:

$$\Delta V = \pm \left(\frac{0.02}{100} \times 3400 + 2 \right) = \pm 2.7 \text{ V} \approx \pm 3 \text{ V}$$

Para as outras fontes: fonte de 15000 V (CAEN N570) [21] a expressão é, $\pm(0.2\% \text{ do valor lido} + 5\text{V})$, e para a fonte de 50000 V (BERTAN 205B) [22] $\pm(0.1\% \text{ do valor lido} + 0.1\% \text{ do valor máximo})$.

Desse modo, o cálculo do erro associado a cada valor de campo elétrico reduzido teria de ser calculado através da expressão de propagação de erros, ou seja:

$$E/p = \frac{V}{p \cdot d}$$

com o valor da distância igual a 1; não tendo forma de confirmar, consideramo-lo correto e sem erro associado. Então, o erro associado ao valor de E/p é dado por:

$$\left(\frac{\Delta_{E/p}}{E/p}\right)^2 = \left(\frac{\Delta_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_p}{p}\right)^2$$

Assim:

$$\Delta_{E/p} = E/p \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_p}{p}\right)^2}$$

5.1 Xénon

No primeiro estudo que se realizou usou-se xénon puro, com uma pureza garantida pela fabricante de 99.998%.

O xénon [23]–[26] é um elemento químico inodor e incolor, que pertence ao 18º grupo da tabela periódica por ter todas as suas camadas repletas de eletrões, propriedade que lhe confere a sua pouca afinidade para a formação de moléculas e portanto pouca reatividade, sendo por isso um gás monoatômico. A temperatura de ebulição do xénon é de -108.1 °C estando por isso à temperatura ambiente no estado gasoso. É um dos elementos com maior raio atômico de cuja camada d , é fácil arrancar eletrões. Por isso o xénon é um gás facilmente ionizável [23], [26]. Por ser monoatômico o xénon não tem modos inelásticos com níveis baixos de energia, como estados rotacionais ou vibracionais. Daí, o interesse da sua utilização em detetores gasosos (a energia é predominantemente gasta em ionizações).

Os resultados obtidos para o estudo de tensão de descarga com a pressão de xénon nas condições atrás referidas mostram-se na figura 17.

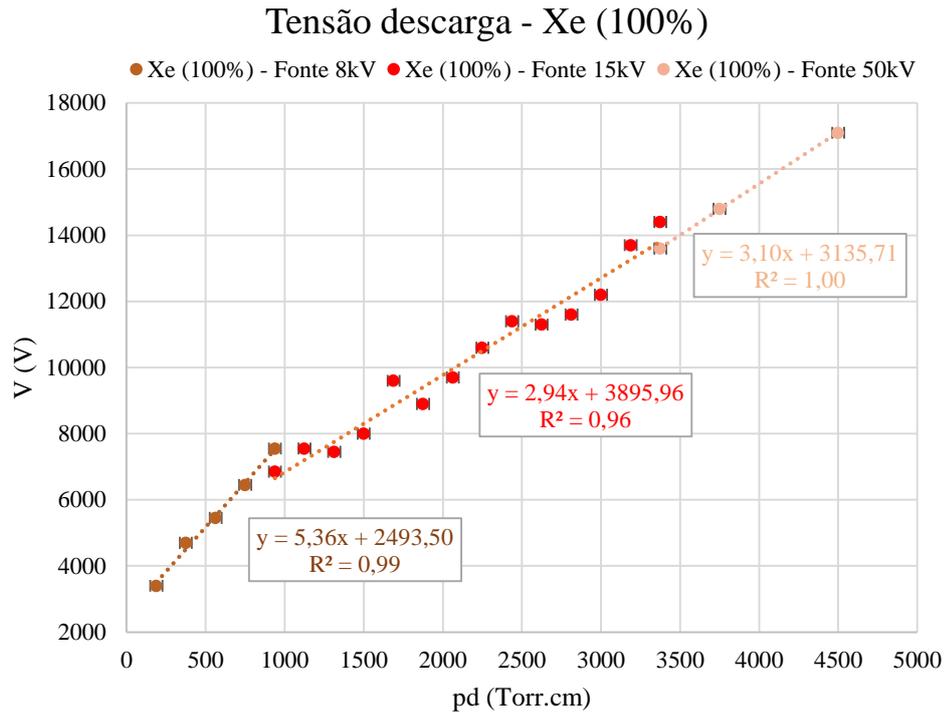


Figura 17: Tensão de descarga em função do produto da distância com a pressão de xéon (foram usadas 3 fontes de tensão)

Na figura 17 podem ver-se três diferentes conjuntos de pontos. Cada um desses conjuntos foi obtido com uma fonte de tensão diferente. A primeira fonte de tensão CAEN N1470 [20] tinha o limite máximo de 8000 V. Assim, esta fonte foi utilizada até ser possível; seguidamente usou-se a segunda fonte CAEN N570 [21], que já permitia atingir valores de 15000 V. Por último foi utilizada a fonte BERTAN 205B [22], que fornecia tensões até 50000 V. Utilizaram-se diferentes fontes de tensão porque para tensões mais baixas não se justificava a utilização da fonte BERTAN 205B que tem um erro de leitura e uma *ripple* maior que as restantes fontes. O erro quando propagado para o valor de campo elétrico reduzido seria significativo e, tal como se falará à frente, o *ripple* influencia o aparecimento de descarga.

Nos resultados obtidos para cada uma das fontes nota-se uma tendência linear nos pontos, tendência essa que é confirmada pelo valor do coeficiente de determinação (R^2), que nos indica o grau de ajustamento de um conjunto de pontos a uma dada regressão, neste caso a regressão linear.

No entanto, no conjunto de todos os pontos notam-se claramente dois comportamentos distintos: o declive dos pontos obtidos com a primeira fonte (CAEN N1470) é quase o dobro do declive dos restantes. Notar que, sempre que havia necessidade de mudança de fonte de tensão procedeu-se à repetição do último ponto

obtido com a fonte anterior. Tal como se pode verificar na figura 17 os valores de tensão de descarga obtido para a mesma pressão com fontes diferentes é significativamente diferente, sendo essa diferença de 700 V entre os valores obtidos para a fonte CAEN N1470 e a CAEN N570, e de 800 V entre a fonte CAEN N570 e a BERTAN 205B. A verificação de tal discrepância levou-nos a procurar a explicação, que deveria estar relacionada com as próprias fontes.

Como se viu no segundo capítulo, onde foram abordados os vários tipos de descargas que poderiam surgir no nosso caso, as descargas de corona ou as *streamers* deviam-se sobretudo a campos elétricos não uniformes. Assim, a característica das fontes que mais poderá influenciar o aparecimento de descargas no dispositivo é o *ripple*. O *ripple* aparece em componentes eletrónicos, mais concretamente nas fontes de tensão, devido a serem usadas correntes alternadas para gerar tensão contínua. No processo de transformação, em que são utilizados circuitos retificadores, acaba sempre por se sobrepor à tensão de saída alguma componente alternada que cria nesse sinal de saída uma variação periódica indesejável. Quanto maior é a tensão de saída maior é o valor de *ripple*. O valor do *ripple* é normalmente apresentado como tensão de *ripple* pico-a-pico, que nos dá a máxima variação que a tensão apresenta à saída da fonte.

Fonte tensão	<i>Ripple</i> pico-a-pico
CAEN N1470 (8000 V)	< 15 mVpp
CAEN N570 (15000 V)	250 mVpp
BERTAN 205B (50000 V)	300 mVpp

Tabela 1: Valores de ripple das fontes de tensão utilizadas

Tal como se pode ver pela tabela 2 a diferença de valores de tensão de *ripple* entre a fonte de tensão CAEN N1470 e as outras é significativa, o que se reflete não só na diferença dos valores de tensão máximos atingidos para a mesma pressão em fontes diferentes, como também, pelo menos em parte, no declive dos pontos de cada fonte. Fomos levados a concluir a dependência da origem das descargas na amplitude do *ripple* da fonte. Como o *ripple* das fontes CAEN N570 e BERTAN 205B era mais de dez vezes superior à fonte CAEN N1470 decidiu-se aumentar para 100 V o intervalo mínimo de valores de tensão experimentados.

A forma de apresentação dos resultados da tensão de ocorrência de descarga em função do produto da pressão com a distância entre os elétrodos (pd) na figura 17 foi assim escolhida por maior facilidade de comparação com a curva de Paschen do xénon [8]. No entanto, os resultados por nós recolhidos apesar de revelarem também uma

tendência linear crescente, tal como a curva de Paschen, acabam por se afastar progressivamente desta, como se pode ver na figura 18. Como se referiu no capítulo anterior, este afastamento poderá estar ligado às condições em que foram obtidos os resultados da curva de Paschen (em função do produto pd) e as condições da nossa experiência (para uma distância fixa).

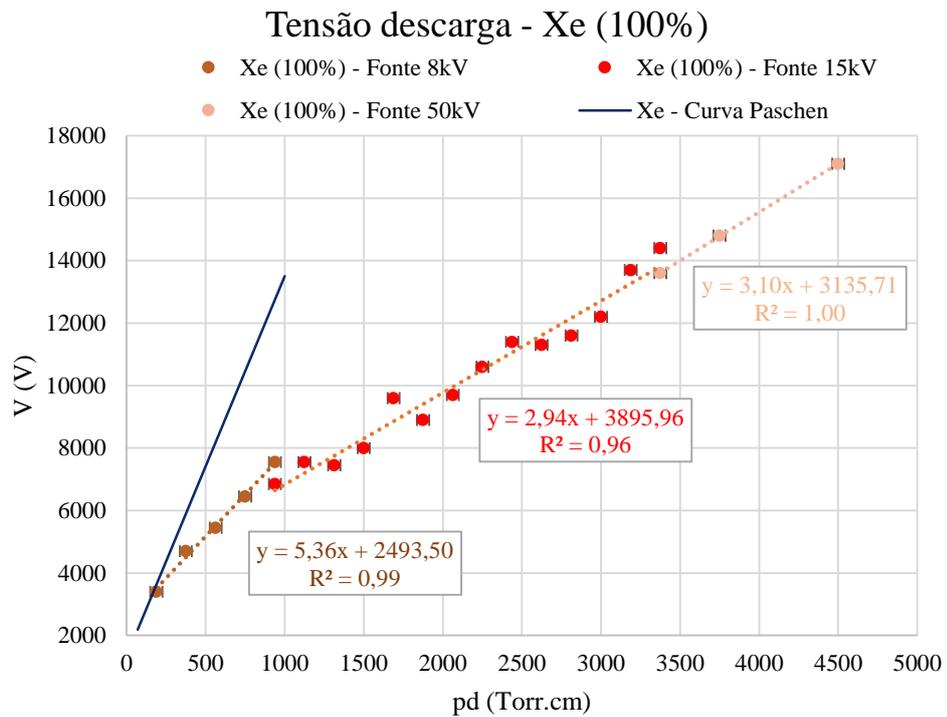


Figura 18: Tensão de descarga e curva de Paschen do xénon

Decidiu-se apresentar também os resultados do campo elétrico reduzido (ainda em função do produto pd), por este ser um tipo de medida vulgarmente utilizado na descrição das condições de trabalho de um detetor gasoso, figura 19. Como os valores obtidos pareciam tender para um valor máximo com o aumento da pressão, decidiu-se efectuar medidas apenas até à pressão de 5 bar e uma última para 6 bar, em vez de até aos 10 atm como inicialmente previsto.

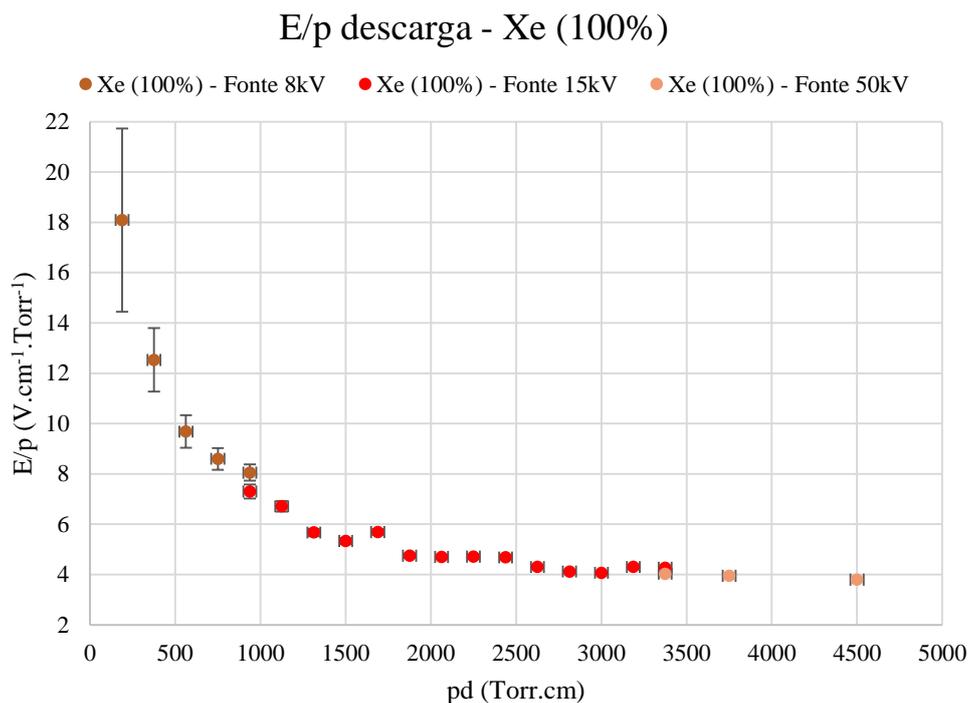


Figura 19: Campo elétrico reduzido de descarga em função da pressão de xénon para 3 fontes de tensão

5.2 Misturas

Após o estudo do xénon puro e sabendo-se que a mistura deste com outros gases noutros trabalhos, tinha resultado num comportamento diferente, decidiu-se fazer-se um estudo de misturas com o xénon como gás maioritário.

Nestes estudos, contrariamente ao estudo com xénon, não se permitiu que a mistura gasosa chegasse às *getters*, pois estas poderiam adsorver o gás minoritário.

5.2.1 Xénon + Metano

Começou-se por estudar uma mistura de xénon com um gás usado frequentemente como gás de *quenching*, o metano. O metano [27], [28] é o mais simples dos hidrocarbonetos existentes e é formado por um átomo de carbono ligado a quatro átomos de hidrogénio (fórmula química - CH₄), numa configuração tetraédrica, o que lhe confere a característica de molécula apolar. Tal como o xénon, o metano à temperatura ambiente encontra-se no estado gasoso e não tem qualquer odor ou coloração.

No estudo que se fez da mistura de xénon com o metano decidiu-se que a máxima pressão a atingir fosse 2 bar e que a proporção de metano para xénon fosse de 5% para 95%. Os resultados obtidos estão na figura 20.

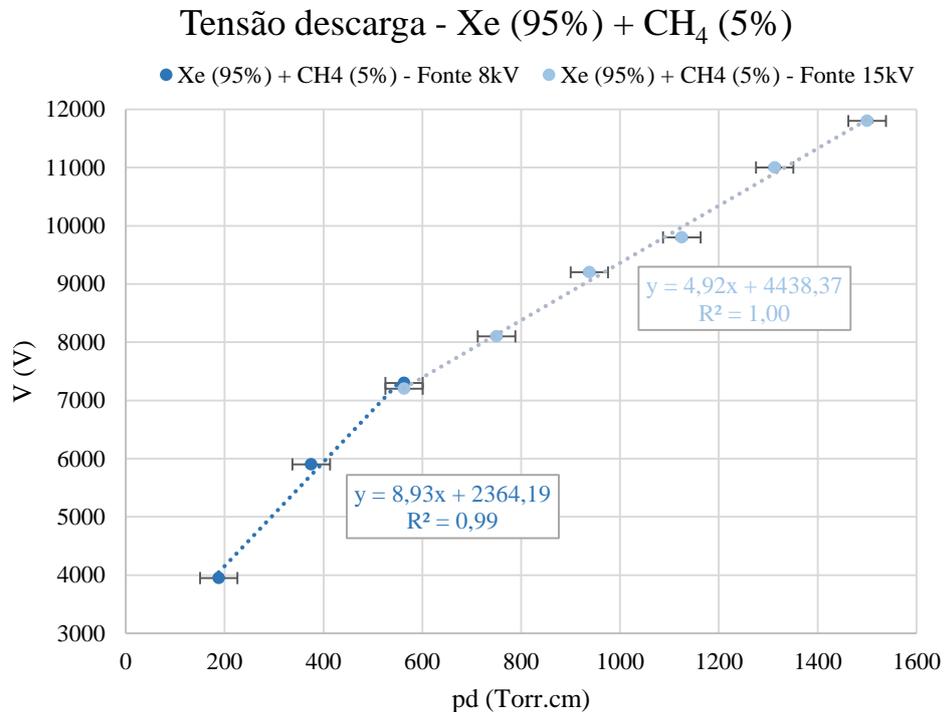


Figura 20: Tensão de descarga em função do produto da distância com a pressão da mistura de xénon com metano (com 2 fontes de tensão diferentes)

Para a mistura de xénon com metano, contrariamente ao que se fez para o xénon puro, a procura das tensões de descarga em função da pressão fez-se da pressão mais elevada para a menor. Este procedimento teve como objetivo garantir a manutenção da concentração da mistura fixa em toda a experiência já que, sendo a incerteza associada ao sensor de pressão grande, ao fazer a mistura para a maior pressão, terá um erro associado menor do que se fosse feita para a menor pressão.

Na figura 20 é possível verificar que a tendência dos pontos recolhidos para esta mistura é também linear, sendo os valores do coeficiente de determinação também eles iguais ou próximos do valor máximo, tal como para o xénon (figura 17). As diferenças entre as séries de pontos para as diferentes fontes em xénon puro e as séries da mistura com metano encontram-se nos declives das retas e no desvio dos pontos relativamente à reta de ajuste. Na mistura, as retas de ajuste apresentam um maior declive do que em xénon puro, resultado que se traduziu pelos maiores valores de tensão atingidos para a mesma pressão na mistura.

Na mistura confirma-se ainda a divergência entre os valores de tensão obtidos para a mesma pressão com fontes diferentes, embora muito menor do que a observada em xénon puro.

Considerando apenas os resultados obtidos para a fonte CAEN N570, em cada um dos estudos, nota-se claramente pelo valor de R^2 , uma maior linearidade dos pontos da mistura. Essa maior linearidade pode estar relacionado com o facto de o metano atenuar os efeitos do *ripple* da fonte no xénon, isto é, os efeitos das cargas que resultam da variação do valor de tensão são atenuados na presença do metano, reduzindo assim a possibilidade de descarga.

Na figura 21 mostram-se os resultados do campo elétrico reduzido correspondente à tensão de ocorrência de descarga em função do produto pd . Mais uma vez se verifica que é no intervalo de valores de pressão entre os 0.25 e os 1.5 bar (188 e 1125 Torr, respetivamente) que há maior variação de valores de campo elétrico reduzido que se conseguiram atingir.

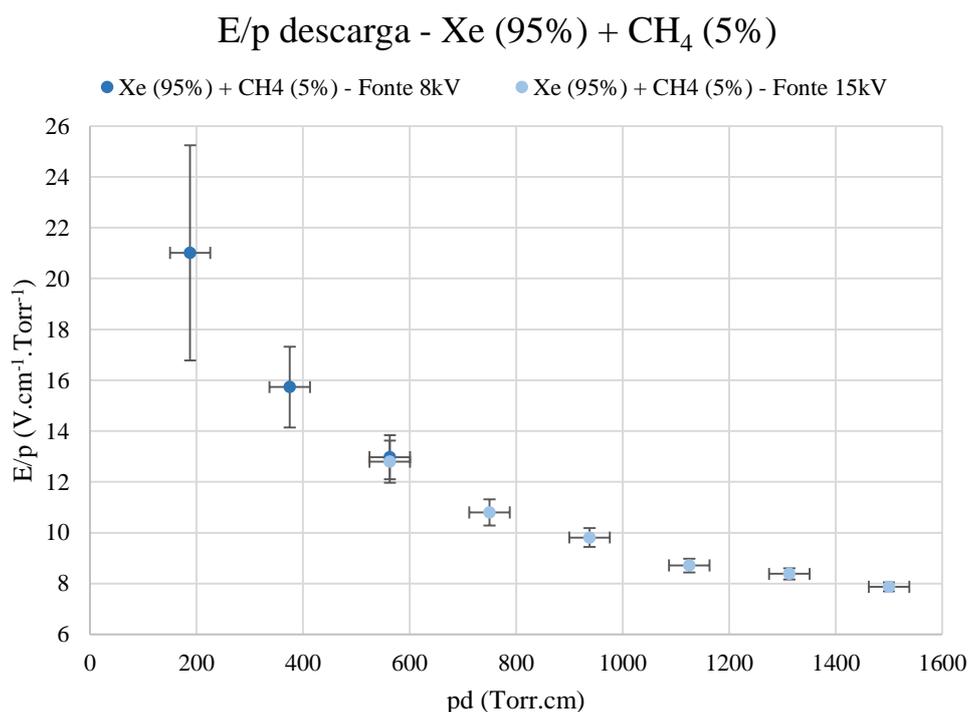


Figura 21: Campo elétrico reduzido de descarga em função da pressão da mistura de xénon com metano (resultados obtido com 2 fontes diferentes)

5.2.2 Xénon + Trimetilamina

Este trabalho teve como objetivo o estudo do xénon e, dado que também já se tinha estudado o comportamento de uma mistura com metano, tinha interesse neste último estudo verificar o comportamento de outra mistura de xénon, agora com um gás com momento dipolar não nulo. Decidiu-se estudar uma mistura de xénon com a trimetilamina, nas mesmas proporções e condições em que se estudou a mistura com metano.

A trimetilamina [29]–[31], cuja sigla é TMA, é uma amina terciária ligada a três iões metil, numa disposição de pirâmide trigonal que lhe confere polaridade. A TMA em pequenas concentrações tem um forte odor a peixe em decomposição e em maiores concentrações o seu odor assemelha-se ao do amoníaco. Ao contrário do xénon e do metano que têm temperaturas de ebulição extremamente baixas, a TMA apresenta uma temperatura de ebulição na ordem dos 3 °C, à pressão atmosférica, o que não sendo problemático para as condições em que se encontrava a sala de trabalho experimental, deve ser algo a ter em conta, pois qualquer abaixamento brusco de temperatura pode liquefazer a TMA.

Na figura 22 estão representados os resultados obtidos para a mistura de 95% de xénon com 5% de TMA.

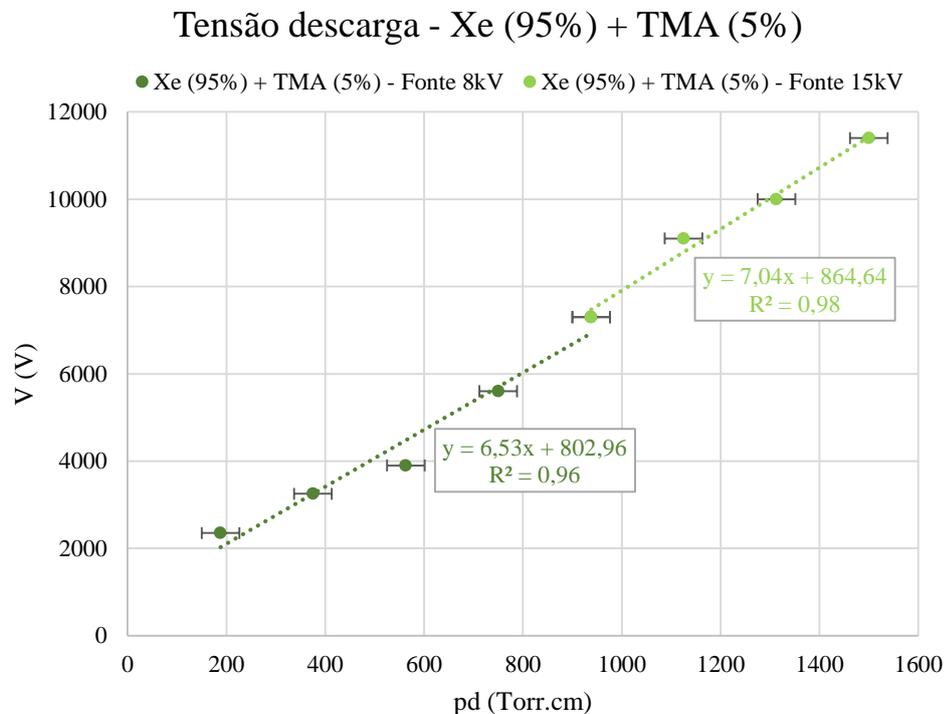


Figura 22: Tensão de descarga em função do produto da distância com a pressão da mistura de xénon com trimetilamina (com 2 fontes de tensão diferentes)

Os resultados desta mistura foram surpreendentes já que ao contrário dos dois estudos anteriores, ao aumento da pressão corresponde um aumento do declive das retas de ajuste dos pontos (figura 22). Embora não seja perceptível (os dois pontos estão sobrepostos) destaca-se ainda o facto de, para a mesma pressão o valor de tensão obtido com as duas fontes diferentes ser igual, o que não se verificou nos casos anteriores. Ainda na figura 22, e considerando apenas os pontos obtidos com a fonte de 8000 V, (CAEN N1470) verifica-se uma pequena concavidade que na figura 23 em termos de valor de campo elétrico reduzido assume de novo um comportamento inesperado.

Na figura 23 para o campo elétrico reduzido nota-se uma clara diferença relativamente aos outros dois estudos.

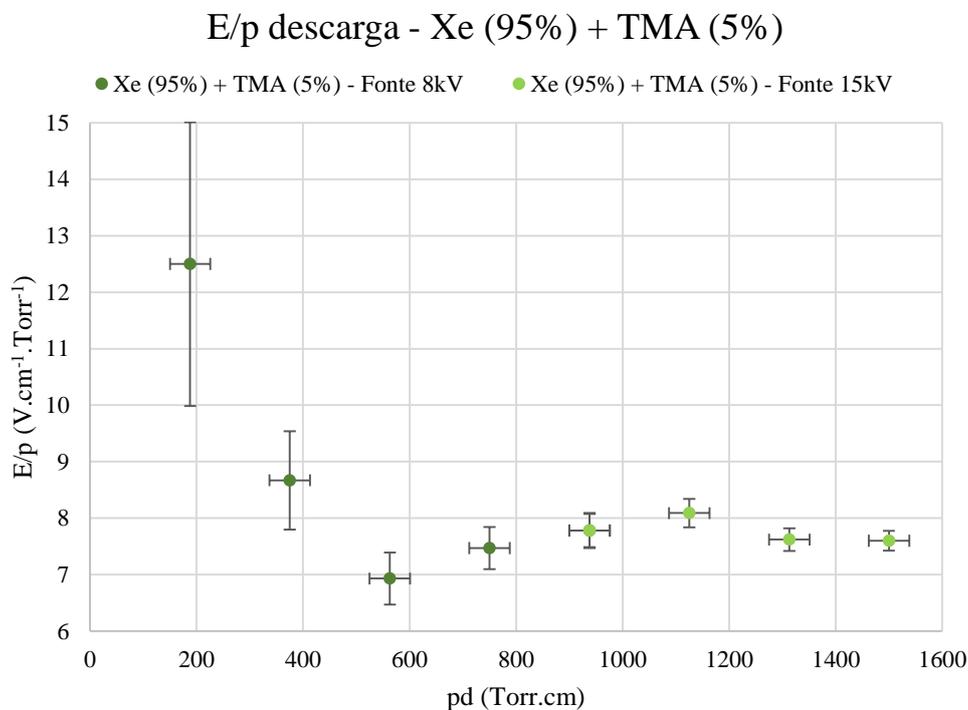


Figura 23: Campo elétrico reduzido de descarga em função da pressão da mistura de xénon com trimetilamina para 2 fontes de tensão

5.3 Em conclusão

Condensando em duas figuras gerais, em que se apresentam todos os resultados obtidos podemos tirar algumas conclusões do estudo realizado. As figuras 24 a 27 não apresentam as barras de erro de cada ponto dado que a densidade de pontos não permitiria a distinção.

O metano, tal como esperado, trouxe uma melhoria significativa relativamente às séries de resultados do xénon, assumindo também o papel de gás de *quenching* no nosso trabalho, através do controlo de criação de carga, o que leva à redução da probabilidade de formação de avalanche, reduzindo também a probabilidade de ocorrência de descargas. Este comportamento traduz-se, na figura 24, pelos valores maiores de tensão conseguidos na mistura de xénon com o metano e na figura 25 pelos maiores valores de campo elétrico reduzido.

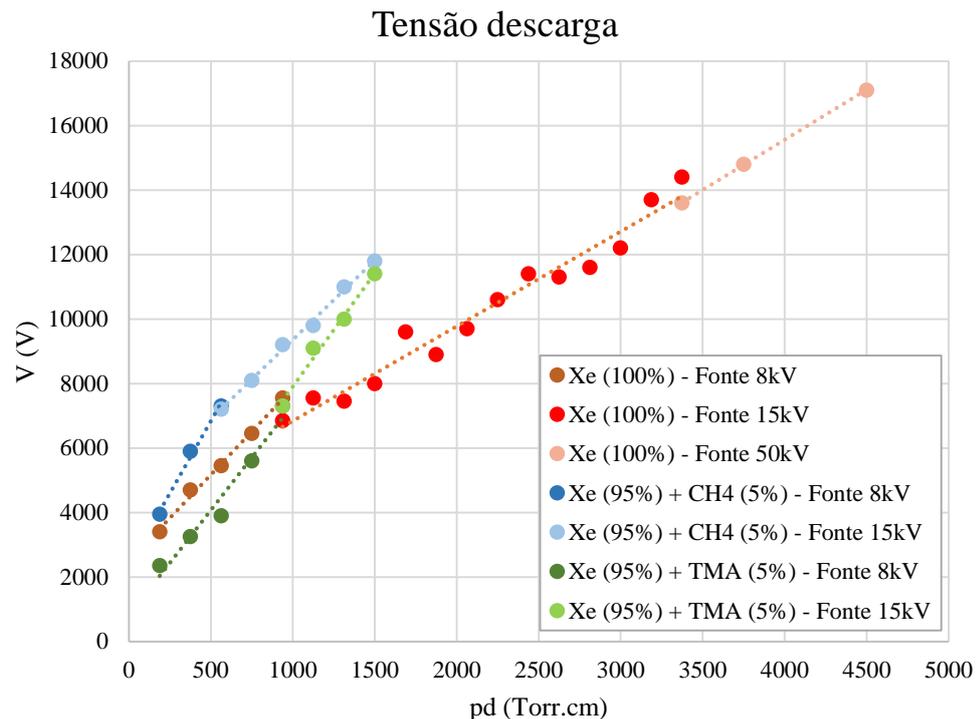


Figura 24: Tensão de descarga em função da pressão

Para a TMA os resultados, como foi dito anteriormente, são surpreendentes. Desde logo na figura 24 pode verificar-se que não parece existir dependência da ocorrência de descargas com o *ripple* da fonte já que o declive dos pontos de uma para a outra fonte, quando apresenta diferenças, elas são contrárias ao anteriormente observado. Para além disso, para a mesma pressão os resultados obtidos com fontes diferentes é igual, o que não se verifica nos outros estudos.

Há ainda outro aspeto a realçar na mistura de xénon com TMA. Num primeiro comportamento para pressões até 938 Torr (1.25 bar) as tensões de descarga são inferiores às do xénon puro. A partir dessa pressão a tensão de descarga é superior à do xénon puro, chegando mesmo a valores próximos dos da mistura de metano. Este comportamento da mistura de xénon com TMA fica mais evidente na figura 25, em que os resultados são

apresentados para o campo elétrico reduzido. Para baixas pressões na mistura de TMA com xénon o aparecimento de descargas surge a um valor de campo elétrico reduzido menor, notando-se a existência de um ponto crítico na região próxima da pressão de 563 torr (0.75 bar). Para maiores pressões (superiores a 938 torr [1.25 atm]) a TMA parece funcionar com gás de *quenching*, dificultando o desencadear das descargas, e os pontos da curva respetiva de campo elétrico reduzido aproximam-se dos da curva da mistura de xénon com metano.

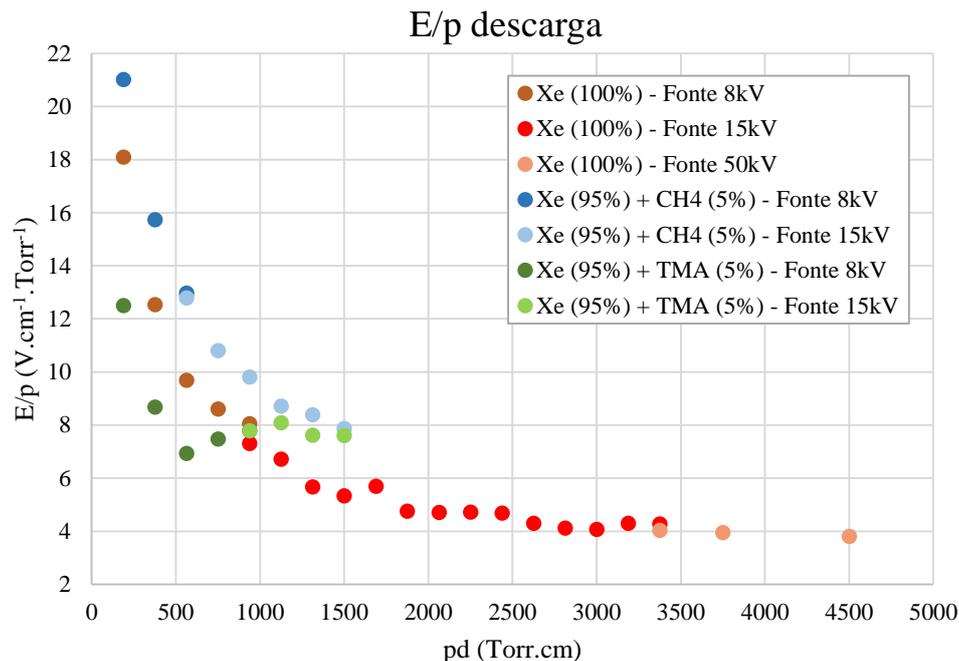


Figura 25: Campo elétrico reduzido de descarga em função da pressão

Da observação da figura 25 pode ainda verificar-se que há claramente uma dependência da ocorrência de descargas com o aumento da pressão, evidente pela acentuada diminuição dos valores máximos de campo elétrico reduzido ao longo da pressão.

Por último, nesta análise aos resultados obtidos, é importante uma comparação com os registos de ocorrência de descargas noutros trabalhos (figuras 26 e 27). No entanto, nem todos os trabalhos utilizados na comparação se encontram nas mesmas condições que nós e nem todos eles referem a ocorrência de descargas. No trabalho de D. Covita (2004) [32], não há referência clara da ocorrência de descargas. Para além disso, a descrição da fonte de tensão utilizada não nos permite saber ao certo de que tipo de fonte se trata.

No estudo de L. Coelho (2006) [33] o autor apesar de não referir quais as condições em que obteve descarga, refere que os resultados apresentados foram medidos em condições que não as permite. Assim, sabendo-se que, na região de cintilação de um contador gasoso de cintilação proporcional o campo elétrico deverá ser o mais próximo possível do valor de multiplicação de carga do xénon à pressão atmosférica ($6 \text{ V.cm}^{-1}.\text{Torr}^{-1}$), somos levados a pensar pelos valores que deverá ser próximo de valores para os quais houve descarga.

Por seu turno, J. Mariquito (2009) [34], que apenas trabalhou para uma pressão de 5.4 bar menciona claramente no seu trabalho que a máxima tensão utilizada na região de cintilação foi escolhida porque, para valores superiores, se verificavam descargas. Também, A. Trindade (2015), que ainda não tendo os seus resultados publicados nos facultou a informação dos valores de campo elétrico reduzido a que teve descargas. Este nos seus trabalhos usou a fonte de tensão CAEN N1470, tal como nós.

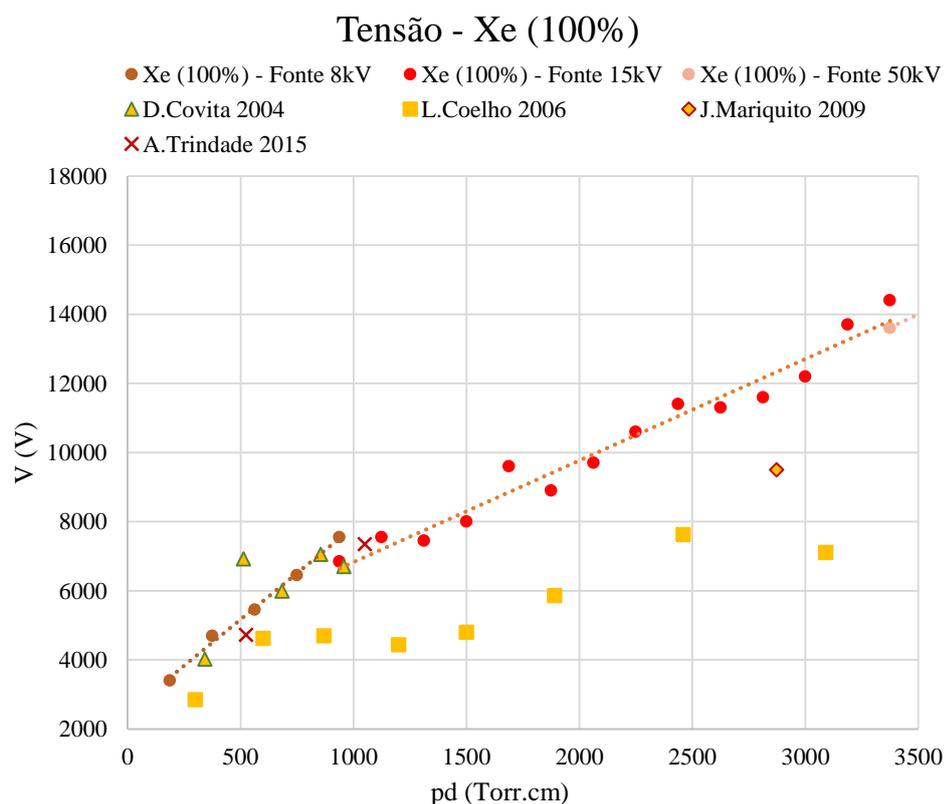


Figura 26: Comparação de valores de tensão de descarga com outros estudos

Observando a figura 26 é evidente que os valores de tensão por nós atingidos são na maioria dos casos superiores aos restantes trabalhos. Há apenas um ponto, no estudo de D. Covita, em que se atingiu um valor de tensão maior (o autor não menciona qualquer descarga). Contudo, A. Trindade que utilizou uma das fontes também usada neste

trabalho, apresenta, para um valor de produto pd próximo do de D. Covita, um menor valor de tensão do que aquele conseguiu atingir. Poderemos assim concluir que a melhoria dos resultados obtidos no presente trabalho deverá estar associado à complexidade dos detetores.

Verifica-se ainda que a melhoria é maior com o aumento do produto pd . No entanto, para o campo elétrico reduzido essa melhoria é pouco significativa, isto é, ao longo do produto pd a diferença entre o campo elétrico reduzido atingido neste trabalho e o dos restantes trabalhos é praticamente constante. Podemos assim concluir que, trabalhando a uma distância fixa, o maior fator de influência no aparecimento de descargas é a pressão no interior do detetor, visto que as distâncias utilizadas nos vários estudos é semelhante e constante durante todo o processo. As figuras 25 e 27 confirmam esta afirmação já que há uma clara descida do valor do campo elétrico reduzido permitido com o aumento da pressão (distância fixa em todos os trabalhos).

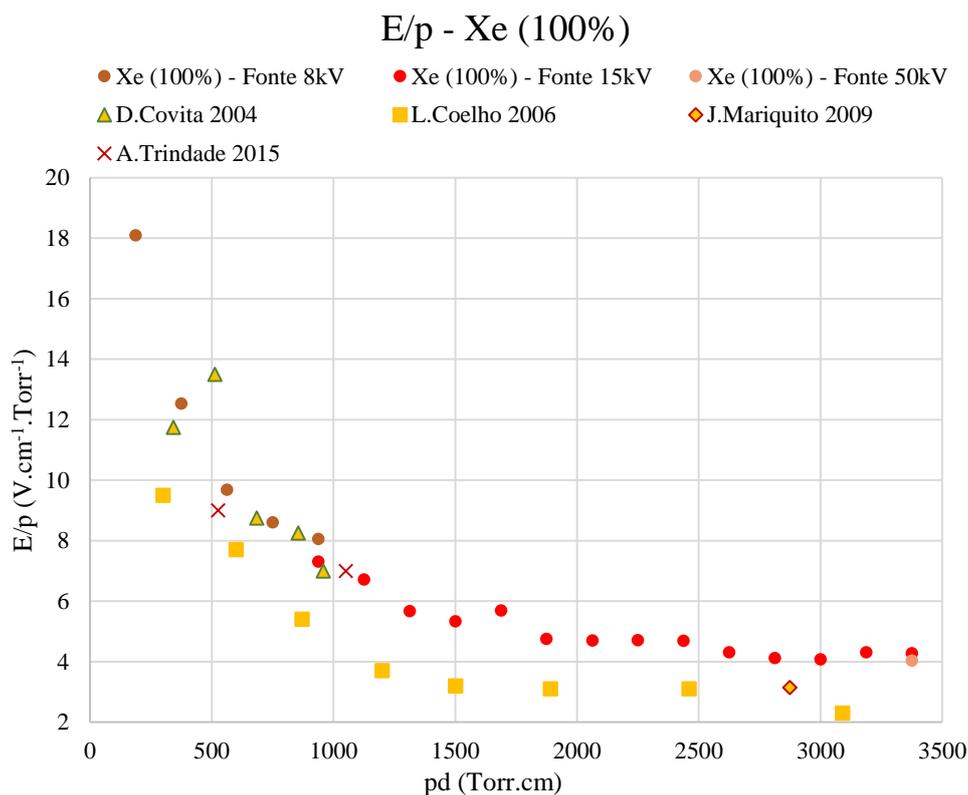


Figura 27: Comparação do campo elétrico reduzido noutros trabalhos

Capítulo 6

Conclusão

O trabalho apresentado nesta dissertação pode ser dividido em várias etapas, para as quais se estabeleceram objetivos, que permitiram no final atingir a meta inicialmente estipulada: verificar a dependência da tensão máxima aplicável num dispositivo gasoso com a pressão de gás.

A realização de cada uma das etapas nem sempre foi um processo simples. Na fase de desenho e projeto por cada avanço que se desenvolvia no trabalho havia quase sempre um recuo, ou porque a informação acerca dos componentes comprados nem sempre estava totalmente disponível, ou porque a forma escolhida não era a melhor, etc. Esta fase, parecendo fácil, não foi tão linear quanto se esperava o que acabou por levar mais tempo do que o estimado. Também as fases seguintes, a de construção e limpeza do dispositivo, por não serem da nossa inteira responsabilidade (ficaram ao encargo das oficinas e funcionários do LIP), se mostraram mais demoradas do que se previa. Juntamente com as sucessivas alterações na fase de desenho, estes problemas resultaram num atraso significativo que só nos permitiu iniciar a montagem quando era suposto que estivéssemos a terminar a recolha de dados. Montado o dispositivo veio a fase de teste, também esse um processo demorado.

Concluídas todas as etapas referidas pôde finalmente iniciar-se o estudo. Contudo, houve também nesta fase do trabalho momentos em que a expectativa de um comportamento de nada serviu, tornando necessário experimentar um grande número de tensões. Como se estipulou que só se consideraria descarga (positivo) o caso em que para a mesma tensão houvesse duas medições distintas, ambas com o mesmo desfecho, houve também muitos falsos-positivos que fizeram perder mais tempo do que o previsto.

Apesar dos sucessivos atrasos e com mais ou menos dificuldade em solucionar os problemas que iam surgindo, os objetivos de cada uma das etapas foram sendo cumpridos.

Em relação ao objetivo final, podemos afirmar que embora pareça existir uma relação entre a ocorrência de descargas e a complexidade dos detetores gasosos, a causa mais importante é sem dúvida a pressão do gás no interior. Sendo o nosso dispositivo mais simples possível, verificou-se que é com o aumento da pressão que se verifica o maior decréscimo do valor de campo elétrico máximo atingível. Verificou-se ainda que a ocorrência de descargas é influenciada pelo *ripple* da fonte de tensão, correspondendo menores valores de *ripple* a valores mais altos de tensão permitidos, para a mesma pressão. Por fim, podemos concluir que, como seria de esperar, as descargas são ainda dependentes da mistura gasosa.

Mas, a partir do presente trabalho surgem outros que seria interessante realizar. Um trabalho que teria interesse era um estudo mais detalhado da mistura de xénon com a TMA, em que se experimentassem intervalos de pressão menores, mas também outras concentrações de TMA uma vez que temos indicações de outros comportamentos a outras concentrações.

Por último, e porque apesar de estar prevista a realização neste trabalho não nos foi possível concretizar, estudar a variação com a distância entre eléctrodos, até porque o dispositivo se encontra preparado para tal.

Para finalizar, este trabalho, ao contrário do que parecia (e possa parecer), foi difícil de concretizar. Ainda assim, pessoalmente foi sem dúvida alguma o que mais gosto me deu realizar, não só por ser algo que desenvolvi desde o início, mas também porque me permitiu contactar com a uma variedade enorme de matérias e porque me ensinou uma quantidade práticas que sem dúvida serão úteis no meu futuro.

Referências bibliográficas

- [1] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed. 2010.
- [2] S. N. Ahmed, “Gas-filled detectors,” in *Physics and Engineering of Radiation Detection*, 2nd ed., Elsevier, Ed. 2014, pp. 157–232.
- [3] M. S. Naidu and V. Kamaraju, “Conduction and Breakdown in Gases,” in *High Voltage Engineering*, 4th ed., T. M.-H. Education, Ed. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2009, pp. 26–70.
- [4] Y. V Serdyuk, “Propagation of Cathode-Directed Streamer Discharges in Air,” *COMSOL - Conf. Rotterdam*, no. 1, pp. 1–5, 2013.
- [5] S. S. P. Berzak L F, Dorfman S E, “Paschen’s Law in Air and Noble Gases,” 2008.
- [6] E. Sili and J. Pascal Cambronne, “A New Empirical Expression of the Breakdown Voltage for Combined Variations of the Temperature and Pressure,” *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 4, pp. 1–6, 2012.
- [7] C. Torres, P. G. Reyes, F. Castillo, and H. Martínez, “Paschen law for argon glow discharge,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 370, p. 012067, 2012.
- [8] D. W. Knight, “Gas Discharge Tubes - Introduction,” 2013. [Online]. Available: http://www.g3ynh.info/disch_tube/intro.html. [Accessed: 14-Aug-2015].
- [9] K. S. Krane, *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [10] Amiantit Pipe Systems, “AMIPOX GRE Pipe.” .
- [11] H. & S. E. HSE, “Home office specification for seamless alloy steel cylinders for the conveyance of compressed gases hot,” no. 1. pp. 1–9.
- [12] International Association of Classification Societies, “Requirements concerning pipes and pressure vessels.” p. 69, 2011.

- [13] T. I. Rev, “DuPont™ Viton® Selection Guide,” p. 16, 2010.
- [14] Apple Rubber Products, *Seal design guide*. .
- [15] Dichtomatik, “O-Ring Gland Design Guidelines,” in *Dichtomatik O-Ring Handbook*, 2010, p. 12.
- [16] Corning, “MACOR® Machibable Glass Ceramic for Industrial Applications.” p. 6, 2012.
- [17] Dupont, *Teflon PTFE® Properties Handbook*. .
- [18] W. Espe, M. Knoll, and M. P. Wilder, “Getter materials for electron tubes,” in *Vacuum*, vol. 1, no. 2, 1951, pp. 128–133.
- [19] SAES, “St 707 Non Evaporable Getters Activatable at Low Temperatures.” .
- [20] CAEN, “N1470 / NIM High Voltage Power Supplies.” .
- [21] CAEN, “N570 / NIM High Voltage Power Supplies.” .
- [22] Spellman, “BERTAN 205B / NIM High Voltage Power Supplies.” 2005.
- [23] M. Halka and B. Nordstrom, “Krypton and Xenon,” in *Halogens and Noble Gases*, Facts on File, Inc, 2010, pp. 91–101.
- [24] I. Compressed Gas Association, “Rare gases,” in *Handbook of Compressed Gases*, 4th ed., Kluwer Academic Publishers, 199AD.
- [25] N. C. for B. Information, “PubChem Compound Database - Xenon.” [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/23991>. [Accessed: 19-Jan-2016].
- [26] A. Liquide, “Gas Encyclopedia - Xenon,” 2013. [Online]. Available: <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?LanguageID=11&CountryID=19&Formula=&GasID=71&UNNumber=&EquivGasID=103&RD20=29&RD9=8&RD6=64&RD4=2&RD3=22&RD8=27&RD2=20&RD18=41&RD7=18&RD13=71&RD16=35&RD12=31&RD19=34&RD24=62&RD25=77&RD26=78&RD28=81&RD29=8>. [Accessed: 19-Jan-2016].
- [27] N. C. for B. Information, “PubChem Compound Database - Methane.” [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/297>. [Accessed: 19-Jan-

- 2016].
- [28] A. Liquide, “Gas Encyclopedia - Methane,” 2013. [Online]. Available: <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?LanguageID=11&CountryID=19&Formula=&GasID=41&UNNumber=&EquivGasID=71&VolLiquideBox=&MasseLiquideBox=&VolGasBox=&MasseGasBox=&RD20=29&RD9=8&RD6=64&RD4=2&RD3=22&RD8=27&RD2=20&RD18=41&RD7=18&RD13=71&RD16=35>. [Accessed: 19-Jan-2016].
- [29] S. A. Lawrence, “Aliphatic, fatty and cyclic amines,” in *Amines: Synthesis, Properties and Applications*, 1st ed., C. U. Press, Ed. Press Syndicate of the University of Cambridge, 2004, pp. 25–68.
- [30] N. C. for B. Information, “PubChem Compound Database - Trimethylamine.” [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1146>. [Accessed: 19-Jan-2016].
- [31] A. Liquide, “Gas Encyclopedia - Trimethylamine,” 2013. [Online]. Available: <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?LanguageID=11&CountryID=19&Formula=&GasID=103&UNNumber=&EquivGasID=41&VolLiquideBox=&MasseLiquideBox=&VolGasBox=&MasseGasBox=&RD20=29&RD9=8&RD6=64&RD4=2&RD3=22&RD8=27&RD2=20&RD18=41&RD7=18&RD13=71&RD16=3>. [Accessed: 19-Jan-2016].
- [32] D. dos S. Covita, “CGCPs a alta pressão com fotossensores integrados,” Universidade de Coimbra, 2004.
- [33] L. C. C. Coelho, J. F. C. A. Veloso, D. S. Covita, L. F. Requicha Ferreira, and J. M. F. dos Santos, “High-pressure operation of a xenon-GPSC/MSGC hybrid detector for hard X-ray spectrometry,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 569, no. 3, pp. 796–802, 2006.
- [34] J. C. R. Mariquito, “Detector Gasoso de Cintilação Proporcional Multi-Grelhas para Radiação X de Alta Energia e Radiação Gama,” Universidade de Coimbra, 2009.

Anexo

Xe (100%)						
	p (torr)	Δp (torr)	VDESCARGA (V)	Δv (V)	E/p DESCARGA (V/cm.torr)	$\Delta E/p$ (V/cm.torr)
Fonte 8000V	188	38	3400	3	18,09	3,66
	375		4700	3	12,53	1,27
	563		5450	3	9,68	0,65
	750		6450	3	8,60	0,44
	938		7550	4	8,05	0,33
Fonte 15000V	938		6850	19	7,30	0,30
	1125		7550	20	6,71	0,23
	1313		7450	20	5,67	0,16
	1500		8000	21	5,33	0,14
	1688		9600	24	5,69	0,13
	1875		8900	23	4,75	0,10
	2063		9700	24	4,70	0,09
	2250		10600	26	4,71	0,08
	2438		11400	28	4,68	0,07
	2625		11300	28	4,30	0,06
	2813		11600	28	4,12	0,06
	3000		12200	29	4,07	0,05
	3188		13700	32	4,30	0,05
	3375		14400	34	4,27	0,05
Fonte 50000V	3375		13600	64	4,03	0,05
	3750	14800	65	3,95	0,04	
	4500	17100	67	3,80	0,04	

Tabela 2: Valores de tensão de descarga obtidos para o xénon nas 3 fontes de tensão utilizadas em função da pressão e o correspondente valor de campo elétrico reduzido

Xe (95%) + CH₄ (5%)						
	p (torr)	Δp (torr)	VDESCARGA (V)	Δv (V)	E/p DESCARGA (V/cm.torr)	ΔE/p (V/cm.torr)
Fonte 8000V	188	38	3950	3	21,01	4,25
	375		5900	3	15,73	1,59
	563		7300	3	12,97	0,88
Fonte 15000V	563		7200	19	12,79	0,86
	750		8100	21	10,80	0,55
	938		9200	23	9,81	0,40
	1125		9800	25	8,71	0,30
	1313		11000	27	8,38	0,24
	1500		11800	29	7,87	0,20

Tabela 3: Valores de tensão de descarga obtidos para a mistura de xénon e metano nas 2 fontes de tensão utilizadas em função da pressão e o correspondente valor de campo elétrico reduzido

Xe (95%) + TMA (5%)						
	p (torr)	Δp (torr)	VDESCARGA (V)	Δv (V)	E/p DESCARGA (V/cm.torr)	ΔE/p (V/cm.torr)
Fonte 8000V	188	38	2350	2	12,50	2,53
	375		3250	3	8,67	0,88
	563		3900	3	6,93	0,47
	750		5600	3	7,47	0,38
	938		7300	3	7,78	0,32
Fonte 15000V	938		7300	20	7,78	0,32
	1125		9100	23	8,09	0,27
	1313		10000	25	7,62	0,22
	1500		11400	28	7,60	0,19

Tabela 4: Valores de tensão de descarga obtidos para a mistura de xénon e trimetilamina nas 2 fontes de tensão utilizadas em função da pressão e o correspondente valor de campo elétrico reduzido

