



Olivier dos Reis Lopes

Sensores inteligentes para a detecção de descargas parciais em activos de subestações de distribuição de energia eléctrica

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Física, na área de especialização em instrumentação, orientada pelo Professor Doutor Francisco José de Almeida Cardoso, apresentada ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador, Professor Francisco Cardoso pelo acompanhamento prestado ao longo do desenvolvimento deste projecto e pela partilha de conhecimento sobre diversos tópicos de relevância para o meu futuro.

À Sónia Semedo, por toda a ajuda dada ao longo do projecto.

Gostaria igualmente de agradecer à Eneida[®] e aos seus engenheiros, principalmente ao Luís Oliveira pelo apoio prestado.

A toda a minha família e em especial aos meus pais e irmãs pelo amor, apoio e paciência ao longo de todos estes anos. Ao meu pai em particular, por ser a minha grande inspiração para ser quem sou hoje.

Aos meus grandes amigos, por todos os bons momentos e boa disposição.

Por fim queria agradecer à minha namorada por todos estes anos de amor, apoio, conselhos e motivação para chegar sempre mais além.

Resumo

Esta tese apresenta o estudo, conceptualização e análise de um sensor inteligente sem fios como solução para a monitorização e detecção de descargas eléctricas em activos de subestações de distribuição de energia eléctrica com recurso a um microfone de ultrassons. É numa primeira fase estudada a origem de uma descarga eléctrica e o estado de arte para a sua detecção nos activos de distribuição. Sendo igualmente realizados testes a variados microfones de ultrassons para a detecção de descargas de forma a escolher o mais adequado. Numa fase seguinte é realizada a conceptualização do circuito a desenvolver. Sendo realizado o desenho e simulação do circuito final em MicroCap e o desenho numa placa de circuito impresso em Altium. Por fim é realizada a montagem do circuito numa *breadboard* sendo efectuados diversos testes com a finalidade de analisar a resposta do sistema a uma descarga eléctrica.

Abstract

This thesis presents the study, conceptualization and analysis of a wireless smart sensor addressing the condition, monitoring and detection of electrical discharges in actives of electrical energy distribution substations using an ultrasonic microphone. In a first phase, a study is made about the source of an electrical discharge and the state of the art for the detection in distribution actives. Also, to choose the most adequate, several microphones are tested to analyze their performance in the detection of a discharge. After that, there is a conceptualization of the circuit to develop. A drawing and simulation of the circuit is made with MicroCap and also the design of the circuit in a printed circuit board with Altium. Lastly, following an assembly of the circuit in a breadboard, various tests are made to analyze the response of the system to an electrical discharge.

Índice:

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS	1
1.2 MOTIVAÇÃO:	2
1.3 ABORDAGEM TECNOLÓGICA	4
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
2. DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM MEIOS GASOSOS.....	7
2.1 CARACTERIZAÇÃO DE DESCARGAS ELÉCTRICAS	7
2.1.2 Descargas eléctricas em activos de distribuição de energia eléctrica	8
2.1.2 Descargas Parciais	9
2.2 ESTADO DE ARTE NA DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉCTRICAS EM GASES	13
2.2.1 Sensor de transitório de tensão de terra	14
2.2.2 TP-RF (UHF)	15
2.2.3 Transformador de corrente para altas frequências (HFCT)	17
2.2.4 Detector de Ozono.....	18
2.2.5 Sensor Ultrassons	18
2.3 SENSORES DE ULTRASSONS.....	19
2.3.1 Som.....	19
2.3.2 Captação de ondas sonoras	20
2.3.3 Testes aos microfones de ultrassons.....	24
2.3 CONCLUSÃO.....	43
3. DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM SUBESTAÇÕES MT/BT	45
3.1 OBJECTIVOS ESPECÍFICOS:	45
3.2 MECANISMO DE INTEGRAÇÃO:.....	45
3.4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	48
3.4.1 Sensorização	49
3.4.2 Condicionamento do sinal - detecções de ocorrências.....	50
3.4.3 Aquisição e tratamento de dados.....	62
3.4.4 Comunicação.....	62
3.4.5 Alimentação	63
3.5 CONCLUSÃO.....	63
4. DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA DE SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS.....	65
4.1 OBJECTIVOS ESPECÍFICOS.....	65
4.2 MECANISMO DE INTEGRAÇÃO.....	66
4.3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA	68
4.3.1 Sensorização e Tratamento de Dados.....	69
4.3.2 Comunicação.....	70
4.3.4 Alimentação	72
4.4 CONCLUSÃO.....	72
5. CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

Índice de Figuras

Figura 1- Ilustração de um possível smart grid para a distribuição de energia eléctrica (JBoss, 2015).	5
Figura 2-Ilustração exemplificativa de uma descarga electroestática e de um arco eléctrico (Gear Diary, 2013) (ATZonline, 2014);	7
Figura 3-Ilustração de uma descarga parcial numa fissura de um isolador sólido (Nafar, 2013).	9
Figura 4-Efeito de árvore na resina (University of Leicester , 2015).	10
Figura 5-Relação entre a temperatura, humidade e a ocorrência de uma descarga eléctrica (De Witte & al, 2013).	12
Figura 6-Demonstração dos riscos associados às rupturas de sistemas de uma subestação de distribuição de energia eléctrica (Edvard, 2010); (EA Technology, 2015)	13
Figura 7-Rede de sensores TEV montados em sistema de comutação nas estações de distribuição de energia eléctrica (EATechnology, 2015).	14
Figura 8-Diagrama exemplificativo do sensor TEV (Haddad & Warne, 2004)	15
Figura 9 -Modo de funcionamento de um sistema TP-RF (Baker & al, 2010).	16
Figura 10-Inserção de uma antena RF num transformador (Baker & al, 2010).	16
Figura 11-Ilustração de um High Frequency Current Transformer (IPEC, 2015).....	17
Figura 12-Ilustração de um sensor de concentração de moléculas de ozono (Cole-Parmer, 2015). ..	18
Figura 13-Utilização de um sensor de ultrassons para a análise local (UESystems, 2015).....	19
Figura 14- Espectro Sonoro (Cavaleiro, 2006).....	20
Figura 15-Exemplo ilustrativo do efeito piezoeléctrico de um material (Cardoso J. , 2012)	21
Figura 16-Ilustração de um microfone piezoeléctrico (White & White, 1980)	22
Figura 17-Componentes que constituem um dispositivo MEMS (MNX MEMS & Nanotechnology, 2015)	23
Figura 18-Forma de onda obtida no osciloscópio para o microfone 400PT160.	26
Figura 19- Onda referente ao pico no osciloscópio para o microfone 400PT160.	27
Figura 20- Primeiro harmónico do pico em conjunto com a sua frequência.	27
Figura 21-Onda secundária e respetiva frequência.	27
Figura 22 - Espectro obtido para o microfone MEMS na detecção de uma descarga eléctrica.	30
Figura 23 -Sinal obtido do microfone 400SR10B na captação de uma descarga eléctrica.	30
Figura 24- Sinal obtido para o microfone 400PT160 na captação de uma descarga eléctrica.	31
Figura 25- Análise simultânea dos sinais do microfone MEMS (branco) e do microfone 400PT160 (vermelho).....	32
Figura 26- Espectro em potência do microfone MEMS.....	32
Figura 27 - Espectro em potência do microfone 400SR10B.....	33
Figura 28 - Espectro em potência do microfone 400PT160.....	33
Figura 29- Espectro de potência do ruído em comparação com o sinal do microfone.	34
Figura 30 - Fragmentação do sinal do microfone 400PT160.....	34
Figura 31-Análise do espectro em potência do microfone MEMS com a distância.....	36
Figura 32- Análise do espectro em potência do microfone 400SR10B com a distância.....	36
Figura 33- Análise do espectro em potência do microfone 400PT160 com a distância.....	37
Figura 34-Sinal adquirido na captação de um embate de metal com metal pelo microfone 400PT160.	37
Figura 35 - Espectro em potência para a captação de um embate de metal com metal e para a captação de uma descarga eléctrica pelo microfone MEMS.....	38
Figura 36- Espectro em potência para a captação de um embate de metal com metal e para a captação de uma descarga eléctrica pelo microfone 400SR10B.....	38

Figura 37- Espectro em potência para a captação de um embate de metal com metal e para a captação de uma descarga eléctrica pelo microfone 400PT160.....	39
Figura 38 -Atenuação do sinal do microfone MEMS com a colocação de uma placa de fibra de vidro.	40
Figura 39 -Atenuação do sinal do microfone 400SR10B com a colocação de uma placa de fibra de vidro.	40
Figura 40 -Atenuação do sinal do microfone 400SR10B com a colocação de uma placa de fibra de vidro.	41
Figura 41- Travessias de um transformador e respectivos descarregadores e disjuntor com isolamento a gás SF6 (EDP Distribuição, 2010) (Efacec, 2015)	45
Figura 42- Características das várias tecnologias de comunicação sem-fios (Reiter, 2014).	46
Figura 43-Arquitectura geral do sistema.	48
Figura 44-Sistema de monitorização num posto de transformação.	49
Figura 45-Circuito de amplificação diferencial do sensor inteligente.	50
Figura 46- Circuito de rectificação do sensor inteligente.....	51
Figura 47- Circuito de detecção de pico do sensor inteligente.	52
Figura 48-Circuito de comparação do sensor inteligente.....	53
Figura 49- -Princípio de operação de um disparador Schmitt (Cockrill, 2011).....	54
Figura 50- Circuito dos acopladores ópticos do sensor inteligente.....	54
Figura 51- Circuito de condicionamento de sinal completo.	55
Figura 52- -Resultados da simulação do circuito desenhado em MicroCap.....	56
Figura 53- Resultados da 2ª Simulação do circuito desenhado em MicroCap.	57
Figura 54- Montagem do circuito.	57
Figura 55-Sinais obtidos na captação de uma descarga.	58
Figura 56- Espectro de potência do circuito.....	59
Figura 57- Sinais obtidos na captação de um choque de metal.....	60
Figura 58-Desenho e montagem do circuito final.	61
Figura 59- Esquema de comunicação do sistema.....	62
Figura 60- Montagem exemplificativa do sensor inteligente.....	64
Figura 61- Subestação AT/MT. Transformador de potência e linhas de transmissão (Wind Farm Construction, 2015).....	65
Figura 62-Exemplo de uma rede CAN (Corrigan, 2008).....	67
Figura 63-Rede de comunicação remota do sistema.	68
Figura 64- Esquema do sistema local para um posto de transformação.	69
Figura 65- Esquema de comunicação do sistema.....	71
Figura 66- Montagem exemplificativa do sensor inteligente.....	72

Índice de tabelas

Tabela 1- Resultados obtidos sobre a filtragem dos microfones.....	25
Tabela 2-Resultados referentes ao teste com o osciloscópio + Detector de Van der Graff.....	28
Tabela 3- Resultados obtidos para a 3ª Fase de testes.....	35
Tabela 4-Resultados referentes ao teste dos microfones com o aumento da distância.....	35
Tabela 5- Avaliação dos níveis de intensidade de uma descarga.....	70

Acrónimos

EDP- Energias de Portugal

REN- Rede Eléctrica Nacional

RF- Radio Frequency

SPI- Serial Peripheral Interface

SF₆- Hexafluoreto de enxofre

1. Introdução

1.1 Enquadramento e Objectivos

O fornecimento de energia eléctrica compreende diversas fases, sendo, em Portugal assegurada por diversas entidades: (i) geração, maioritariamente da responsabilidade da EDP Geração, (ii) transporte, da responsabilidade da REN, através de subsistemas de Muito Alta Tensão (MAT), em 150 kV, 220 kV e 400 kV, e de Alta Tensão (AT), em 60 kV, e (iii) distribuição, em AT, Média Tensão (MT), em 30 kV e 15 kV, e Baixa Tensão (BT), em 230 V, cuja infra-estrutura é da responsabilidade da EDP Distribuição, enquanto concessionária.

A passagem entre os diferentes regimes de tensão é realizada através de subestações. No âmbito da distribuição, estas instalações são de dois tipos:

- Subestações AT/MT – responsáveis pela diminuição de tensões de 60 kV para 10, 15 ou 30 kV. São constituídas pelos pórticos de onde chegam e partem as linhas de transmissão, os transformadores de potência e acessórios de protecção. A distribuição em MT fornece a energia utilizada por médios e grandes consumidores. Em Portugal, para o ano de 2014, existiam cerca de 416 subestações com 725 transformadores instalados (EDP Distribuição, 2014);
- Postos de transformação MT/BT – representa a diminuição das tensões de 10, 15 ou 30 kV para 230 V para fase-neutro (400 V entre fases). Existem dois tipos diferentes de instalação: (i) postos de transformação cabinados, e (ii) postos de transformação aéreos, suportados em postes. Em Portugal, para o ano de 2014, estavam instalados 66 719 postos de transformação (EDP Distribuição, 2014);

Tanto as subestações como os postos de transformação dispõem de sistemas de protecção, de forma a proteger as instalações e os circuitos. Estas protecções podem ser consideradas em dois grupos:

- Protecção nas travessias de entrada e saída do transformador;
- Órgãos de comutação automáticos.

Os órgãos de protecção automática (disjuntores) têm por finalidade abrir os circuitos em que estão inseridos, em situações de sobre-corrente, como por exemplo de curto-circuito.

Os materiais isoladores empregados nos transformadores e nos órgãos de comutação têm como função proteger electricamente os activos da ocorrência de descargas eléctricas. Estes sistemas de protecção não são imunes a falhas, podendo ocorrer descargas eléctricas, que danificam os equipamentos e podem levar à total ruptura dos sistemas, em casos mais críticos.

Assim, o presente trabalho tem como objectivo o desenvolvimento de sensores inteligentes de detecção de descargas parciais em activos de distribuição de energia eléctrica; o conhecimento precoce da ocorrência destas pequenas descargas permitirá evitar situações catastróficas como as acima referidas. A sensorização é realizada com recurso a um microfone de ultrassons, de forma a captar as ondas sonoras criadas pelas descargas eléctricas. Estes sinais são digitalizados e analisados localmente, e informação de alto nível é transmitida a um sistema de informação SCADA, para que sejam tomadas as acções de manutenção adequadas: a capacidade para adquirir dados, convertê-los em informação de nível superior e gerar alertas e alarmes qualifica estes dispositivos como sensores inteligentes.

É necessário referir que o principal ponto de interesse a nível industrial para o desenvolvimento deste sensor passa pela criação de um sistema monitorização dos activos de distribuição de energia eléctrica inteligente com viabilidade económica para a monitorização a larga escala do vasto número de dispositivos existentes na rede eléctrica em Portugal. Este objectivo está directamente relacionado com o projecto *InovGrid* da EDP que tem como objectivo a criação de uma rede inteligente de distribuição de energia eléctrica (EDP, 2015).

1.2 Motivação:

Em Portugal, segundo o relatório de Qualidade de Serviço da EDP para o ano 2014 é possível observar que a maioria das causas para as interrupções de serviço têm origem em acidentes próprios com os sistemas de distribuição (EDP Distribuição, 2014).

Todos os sistemas de uma subestação ou posto de transformação sofrem danos ao longo do tempo, seja devido ao desgaste causado pelas condições atmosféricas onde

os sistemas se encontram instalados, seja pela passagem de micro correntes nas suas superfícies. A degradação de vários componentes causa o aparecimento de descargas eléctricas (Haddad & Warne, 2004).

Ao tipo de descarga eléctrica no interior de isoladores, em resultado da degradação das suas propriedades, dá-se o nome de descarga parcial. Decorrendo da degradação de activos, as descargas parciais contribuem para aprofundar essa degradação, em avalanche, pelo que o recurso a métodos de detecção de descargas é de grande utilidade na gestão da manutenção de sistemas de distribuição de energia eléctrica (Haddad & Warne, 2004). De facto, a ocorrência continuada de descargas parciais irá culminar em descargas entre terminais condutores, potencialmente causadores de acidentes catastróficos devido às grandes quantidades de energia libertada. Também, uma ruptura do sistema provoca a paragem total da distribuição de energia eléctrica para um certo segmento da rede, aumentando ainda mais os custos por parte da empresa responsável pela distribuição.

Como é, ainda, comum na organização da manutenção, também em Portugal ela resulta de acções de inspeção periódica, sendo que, segundo o plano de monitorização da qualidade de energia eléctrica (QEE), apenas 40 subestações da EDP são monitorizadas permanentemente (EDP Distribuição, 2014). Esta deficiência de monitorização explica a razão pela qual existe um número tão elevado de falhas acidentais dos activos; no entanto, é importante referir que este número tão reduzido de acções de monitorização permanente pode ser explicado pelo elevado custo para estender as soluções existentes no mercado para um tão elevado número de activos existentes no País.

Desta forma é essencial o desenvolvimento de sensores inteligentes que, além de eficazes, sejam economicamente competitivos e que permitam uma abordagem à monitorização dos activos de energia eléctrica semelhante aos planos das maiores companhias de distribuição de energia — como a *State Grid Corporation of China*, que preconiza a obrigatoriedade de monitorização *online* de todos os seus subsistemas (Zpryme Smart Grid Insights, 2012).

1.3 Abordagem tecnológica

Existe uma dificuldade fundamental na detecção de descargas parciais, uma vez que estas têm curta duração, da ordem de 0,1 μ s, dificultando assim o processo da sua detecção. No entanto, as descargas parciais produzem energia de várias formas, seja sonora, seja pela produção de ondas electromagnéticas, ou mesmo reacções químicas na sua vizinhança. Assim, a maior parte dos equipamentos utilizados para a detecção de descargas recorre à sensorização de uma destas formas de energia. Neste trabalho, foi seguida uma abordagem baseada na captação das ondas sonoras provocadas pela descarga. No entanto, outras tecnologias recorrem principalmente à detecção de radiofrequência emitida por micro correntes de frequências elevadas.

Deste modo é possível verificar que existe uma elevada variedade de respostas para a detecção de descargas, em que cada uma tem as suas vantagens e desvantagens.

A criação de sistemas de monitorização *online* está directamente relacionada com o plano de desenvolvimento de produtos integrados na cultura da *Internet of Things*.

A *Internet of Things* está ligada ao desenvolvimento de equipamentos inteligentes que sejam capazes de se incorporarem numa rede de dispositivos já existentes. Projecções recentemente realizadas indicam que existirão 50 mil milhões de equipamentos integrados nesta cultura de desenvolvimento para o ano 2020, demonstrando o elevado índice de interesse nesta tecnologia e no uso da mesma para a criação de redes inteligentes como a *smart grid* ^(Chase, 2013).

A EDP apresenta igualmente como estratégia de negócio a criação e implementação de uma rede inteligente para a distribuição de energia eléctrica. A *InovGrid* é uma empresa criada pela EDP que tem como foco para a sua actividade o desenvolvimento destas redes inteligentes ^(EDP, 2015). A Figura 1 apresenta uma possível rede inteligente para a distribuição de energia eléctrica.

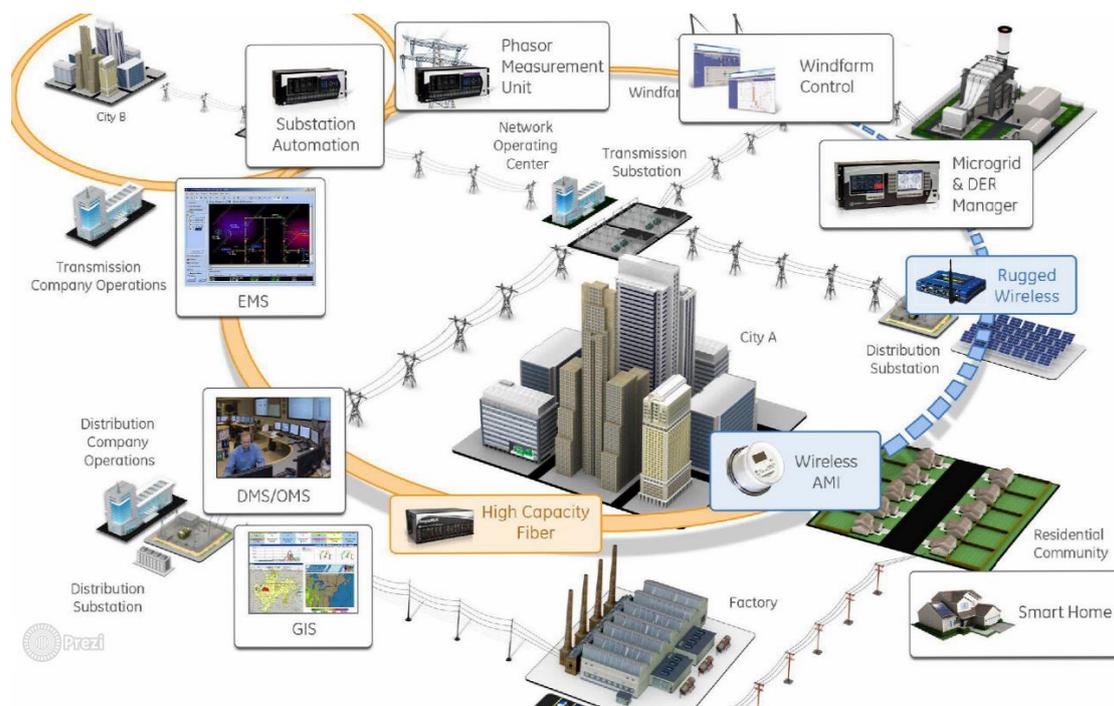


Figura 1- Ilustração de um possível smart grid para a distribuição de energia eléctrica (JBoss, 2015).

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos, de acordo com as abordagens de projecto adoptadas em cada um dos grandes blocos funcionais que constituem as soluções apresentadas, como a seguir se descreve.

No segundo capítulo, faz-se uma caracterização física das descargas eléctricas, bem como uma descrição de métodos e tecnologias para a sua detecção. Em particular, é analisado o método de detecção a desenvolver nesta dissertação, com base num sensor de ultrassons, e, após uma introdução teórica ao som e métodos de captação do mesmo, são apresentados os testes realizados para a escolha do microfone mais adequado para a aplicação da dissertação.

Num terceiro e quarto capítulo serão apresentadas as duas vertentes do sensor inteligente. No terceiro capítulo será discutido o sensor a utilizar em postes de transformação. Para o quarto capítulo é apresentada a segunda versão do sensor inteligente para a detecção de descargas parciais em transformadores de potência, em subestações. Nestes dois capítulos, são referidos os objectivos específicos do sensor para cada caso, bem como os factores condicionantes de projecto e as soluções

tecnológicas adoptadas. Em particular, são apresentadas as soluções de integração em diferentes redes de sensores pré-existentes e de alimentação em potência dos dispositivos.

Por fim, no quinto e último capítulo, é extraída uma conclusão sobre o desenvolvimento do projecto e aspetos de interesse que surgiram ao longo do mesmo. São, ainda, discutidas possíveis alterações futuras, para melhorar a eficácia da detecção de ultrassons, e que possam alargar o espectro de utilização destes dispositivos.

2. Detecção de descargas parciais em meios gasosos

2.1 Caracterização de descargas eléctricas

O estado de arte, na literatura e no mercado, apresenta diversas soluções para a monitorização em contínuo e consequente detecção de descargas. A análise crítica dos diferentes métodos e tecnologias exige um conhecimento da Física dos fenómenos de descargas eléctricas. Estas consistem na passagem de correntes entre dois condutores separados fisicamente, num curto período de tempo; a produção de uma faísca é uma das características mais conhecidas das descargas, já que produz luz de cor azul-violeta.

As descargas eléctricas podem-se dividir em diversos tipos, dependendo da sua origem, como, por exemplo descargas parciais, descargas de coroa, descargas electrostáticas e arcos eléctricos (Figura 2).

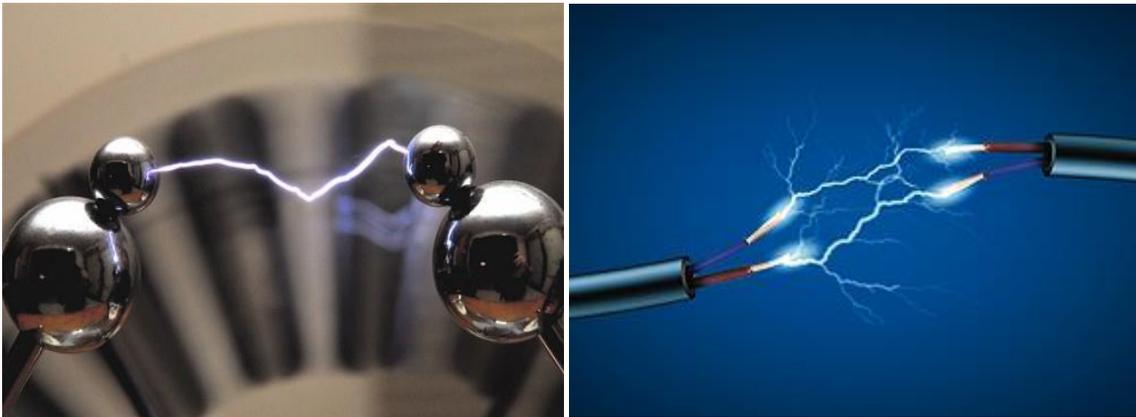


Figura 2-Ilustração exemplificativa de uma descarga electrostática e de um arco eléctrico (Gear Diary, 2013) (ATZonline, 2014);

Apesar de, na maior parte dos casos, o surgimento de uma descarga eléctrica ser indesejado e representar uma falha no sistema eléctrico, existem inúmeras aplicações industriais que recorrem à utilização de descargas, como na detecção de radiação: o detector Geiger-Muller, que detecta a radiação ionizante devido às micro descargas provocadas pelos electrões excitados pela radiação.

2.1.2 Descargas eléctricas em activos de distribuição de energia eléctrica

Para o caso de sistemas de distribuição de energia eléctrica, a ocorrência de uma descarga eléctrica não é, de todo, desejada, uma vez que pode danificar os equipamentos. Assim, estes sistemas encontram-se protegidos de forma a diminuir a probabilidade de tais descargas poderem ocorrer. Tais protecções, como já referido, são compostas por materiais isoladores e por sistemas de comutação.

Os isoladores são materiais que apresentam uma elevada constante dieléctrica, ou seja, apresentam uma elevada resistência à passagem de corrente eléctrica no seu meio. O isolamento dos activos de sistemas de energia eléctrica, de forma a proteger os sistemas a fenómenos de descarga eléctrica, pode ser considerado consoante se esteja a referir a transformadores de potência ou aos postos de transformação e órgãos de comutação:

1. Nos postos de transformação e, em geral, em órgãos de comutação, os materiais de isolamento encontram-se no estado gasoso, sendo, sobretudo, ar; em disjuntores de MT é cada vez mais frequente a utilização de SF₆;
2. Os transformadores de potência encontram-se imersos em óleo mineral, que, além do seu papel primordial como transmissor de calor, para refrigeração, também assegura o adequado isolamento eléctrico.

No entanto, apesar da utilização destes sistemas de protecção, podem ocorrer descargas eléctricas. Estas descargas ocorrem devido a diversos factores, tais como ^(EA Technology, 2015).

- Contaminação ou danificação do isolamento:
 - Fissuras em isolamentos sólidos;
 - Bolhas de gás em isolamentos líquidos;
 - Presença de partículas, como pó, ao redor de um isolante gasoso;
- Erosão do transformador, nas travessias ou junções do mesmo;
- Erosão do sistema de comutação:
 - Danificação da superfície do disjuntor;
 - Redução da distância entre pólos devido à degradação mecânica das molas;

2.1.2 Descargas Parciais

O tipo de descargas que é associado à degradação dos constituintes de uma subestação denomina-se descarga parcial ou descarga de coroa.

As descargas parciais são colapsos eléctricos que ocorrem, em meio gasoso, num material isolante, para tensões eléctricas elevadas. Denominam-se descargas parciais pois são localizadas dentro de uma massa do material isolante, isto é, não existe um curto-circuito entre condutores (Haddad & Warne, 2004). A Figura 3 demonstra uma descarga eléctrica devido a uma fissura no isolador.

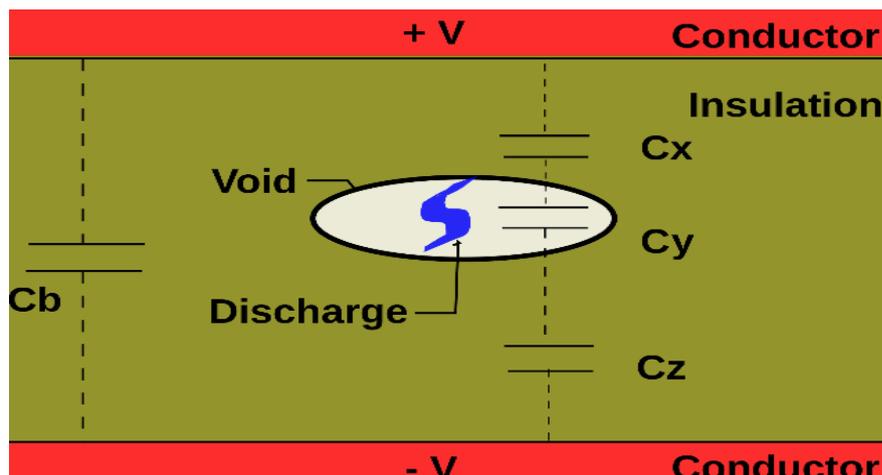


Figura 3-Illustração de uma descarga parcial numa fissura de um isolador sólido (Nafar, 2013).

As descargas parciais em transformadores e em disjuntores são ocorrências importantes a monitorizar em activos de distribuição de energia eléctrica. Tal deve-se ao facto de as descargas parciais, além de estarem directamente relacionadas com o estado de conservação dos equipamentos, também concorrerem para a degradação dos equipamentos (Haddad & Warne, 2004).

As descargas de coroa surgem de formas diferentes, caso se trate de isolamentos líquidos, sólidos ou gasosos. No entanto, em todas elas ocorre a degradação do meio devido à excitação de electrões e de iões.

2.1.2.1 Descargas parciais em sólidos

As descargas parciais em sólidos resultam da erosão e aparecimento de fissuras em isolamentos sólidos. As fissuras são preenchidas por ar, com uma constante dieléctrica muito menor, resultando num campo eléctrico no interior da fissura que é bastante superior ao existente em zonas não danificadas; este campo eléctrico equivale a

uma diferença de potencial bastante elevada no interior da fenda. A descarga parcial ocorre quando a diferença de potencial na fenda for tal que provoca a ionização das moléculas do ar, através da excitação dos electrões, junto ao ponto de maior potencial da fissura. Se o gradiente de tensão na fenda for suficientemente elevado para fornecer e

nergia suficiente aos electrões livres para ionizar outras moléculas, então ocorre a criação de um efeito de avalanche, que se propaga pela fissura. Esta propagação forma a descarga eléctrica, e a cor azulada característica da mesma é originada aquando da recombinação dos electrões com os iões, em que os electrões libertam energia na forma de fotões. Estes próprios fotões podem excitar novas moléculas, assim aumentando a intensidade da avalanche ^(Bartnikas, 1979).

Ao limite de tensão necessário para ocorrer o efeito de avalanche dá-se o nome de tensão de coroa ou *corona inception voltage (CIV)* e é dado pela lei de *Peek*, que enuncia que o valor da diferença de tensão entre dois pólos necessário para ocorrer uma descarga de coroa:

$$e_v = m_v g_v r \ln \frac{S}{r}$$

em que e_v corresponde à tensão de coroa, m_v o factor de irregularidade da fissura, r a grossura da fissura e S o diâmetro da fissura.

A ocorrência de apenas uma descarga parcial não gera energia necessária para a danificação do material. No entanto, a continuidade destes eventos pode levar ao aceleração do processo de desgaste, pelo bombardeamento contínuo de iões nas superfícies, provocando a remoção continuada de partículas do material ou criação de mais fissuras ^(Haddad & Warne, 2004). A Figura 4 demonstra o efeito de árvore devido a uma descarga:



Figura 4-Efeito de árvore na resina (University of Leicester , 2015).

Além do bombardeamento de iões, se a descarga se der na presença de oxigénio, formam-se partículas de ozono e nitratos de oxigénio no ar devido à ionização das moléculas de oxigénio através dos electrões livres criados pela descarga eléctrica (Lépine, 2008). A presença de ozono e de nitratos aumenta o processo de oxidação dos materiais metálicos do transformador.

2.1.2.2 Descargas parciais em isolamentos líquidos

No caso dos isolamentos com materiais líquidos, na sua grande maioria óleos minerais, a presença das descargas eléctricas ocorre devido ao surgimento de bolhas de gás no isolador, em resultado de descargas eléctricas nas fendas ou falhas nas paredes de encapsulamento. O motivo pelo qual a presença de uma bolha origina uma descarga de coroa é idêntico ao de uma fissura, uma vez que a constante dieléctrica na bolha é bastante inferior à do material isolador envolvente, e o campo eléctrico será muito mais intenso no interior da bolha. Se a tensão criada exceder um limite dado pela lei de *Peek*, então ocorre uma descarga parcial na bolha (Peek, 1929).

A ocorrência de descargas parciais numa bolha de gás provoca reacções químicas nas partículas no seu interior e nas partículas do isolante líquido ao redor da bolha, formando novas moléculas gasosas. As novas moléculas criam uma bolha adicional, que pode provocar uma nova descarga e criar uma avalanche de novas bolhas.

2.1.2.3 Descargas Parciais em isolamentos gasosos

Para o caso do isolante ser gasoso, a descarga parcial ocorre devido à contaminação do gás/ar com partículas, como pó, por exemplo. A presença destas partículas reduz as capacidades de isolamento do gás devido à diminuição da constante dieléctrica do isolador, assim facilitando a ocorrência de descargas de coroa.

2.1.2.4 Descargas Parciais e a relação com as condições ambientais

Estudos experimentais permitiram concluir que a ocorrência de descargas parciais atmosféricas está directamente relacionada com a temperatura e a humidade relativa do ar junto aos activos de distribuição de energia eléctrica, principalmente se os equipamentos já exibirem algum desgaste (Figura 5). No entanto, estas descargas não

indiciam o estado real do activo, levando a que os resultados obtidos possam ser mal interpretados e conduzam a uma má avaliação do estado do sistema (De Witte, 2013).

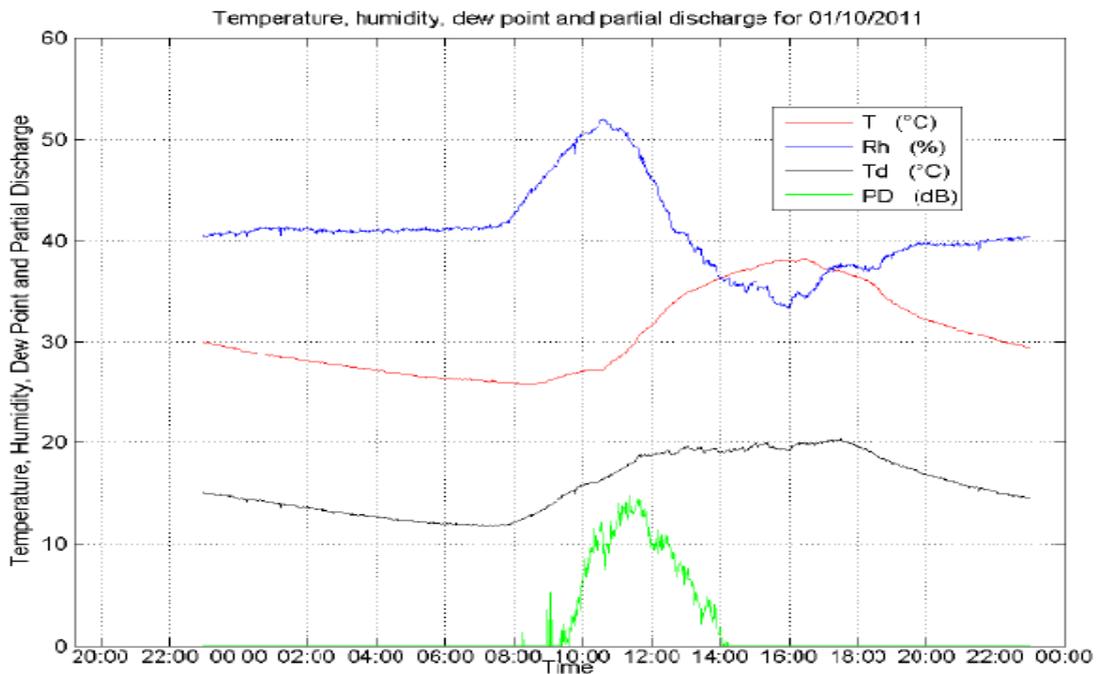


Figura 5-Relação entre a temperatura, humidade e a ocorrência de uma descarga eléctrica (De Witte, 2013).

Sendo assim, é recomendado que os equipamentos de detecção de descargas primários sejam utilizados em conjunto com sensores de temperatura e humidade, de modo que seja possível analisar e tirar conclusões mais fiáveis.

2.1.2.5 Conclusão

Concluindo, a ocorrência de descargas parciais acelera o processo de danificação dos equipamentos, uma vez que, tal como explicado anteriormente, uma descarga eléctrica cria condições ainda mais favoráveis para o surgimento de descargas adicionais e acelera o desgaste dos materiais.

A ocorrência continuada de descargas eléctricas diminui fortemente a capacidade de isolamento, podendo conduzir à ruptura do equipamento.

A avaria total de um transformador ou de um disjuntor pode levar a consequências bastante graves, tais como acidentes com operários devido à possibilidade de electrocução, ocorrência de incêndios no caso de um transformador ou explosões nos sistemas de comutação automática (Figura 6) (EA Technology, 2015).



Figura 6-Demonstração dos riscos associados às rupturas de sistemas de uma subestação de distribuição de energia eléctrica (Edvard, 2010); (EA Technology, 2015)

A total interrupção do sistema causa, igualmente, elevados danos materiais, além dos pessoais já citados. A interrupção do fornecimento de energia tem custos significativos, tanto para a empresa de distribuição, que necessita de efetuar a reparação ou substituição dos activos, como para os clientes consumidores, onde pode ocorrer a danificação de equipamentos ou paragem de processos que necessitem de energia eléctrica.

2.2 Estado de arte na detecção de descargas eléctricas em gases

Nesta secção é discutido o estado da técnica para a detecção de descargas eléctricas em activos de distribuição de energia eléctrica. Estes métodos recorrem à captação das várias formas de energia que uma descarga parcial liberta.

Os métodos de detecção mais comuns correspondem a:

- Sensor de transitório de tensão de terra (*Transient Earth Voltage Sensor*);
- TP-RF;
- Transformador de corrente para altas frequências;
- Detector de Ozono;
- Sensor de Ultrassons.

2.2.1 Sensor de transitório de tensão de terra

A Figura 7 representa a montagem de um sensor TEV num disjuntor.



Figura 7-Rede de sensores TEV montados em sistema de comutação nas estações de distribuição de energia eléctrica (EATechnology, 2015).

Como referido anteriormente, na ocorrência de uma descarga eléctrica ocorre a libertação de energia na forma de radiação electromagnética, i.e., de radiofrequência.

Caso a descarga ocorra no interior de um equipamento, as ondas electromagnéticas propagam-se ao longo dos vários componentes e, caso haja alguma abertura no sistema, as ondas propagam-se para o exterior. A incidência das ondas electromagnéticas com as paredes metálicas dos equipamentos induz impulsos de corrente nas superfícies ^(Yuyan, 2014) que, sendo de altas frequências, enfrentam uma impedância elevada na superfície do sistema devido à placa de metal ser um indutor.

Esta impedância faz com que haja uma tensão entre a parede e a terra. Esta tensão é transitória, daí ser referida como *Transient Earth Voltage (TEV)*, uma vez que se verifica em impulsos de tensão de frequência muito elevadas, na ordem dos MHz. Estes impulsos podem ser medidos com a utilização de um sensor capacitivo, que tem a capacidade de medir a tensão ^(Yuyan, 2014). A Figura 8 representa o princípio de funcionamento do sistema.

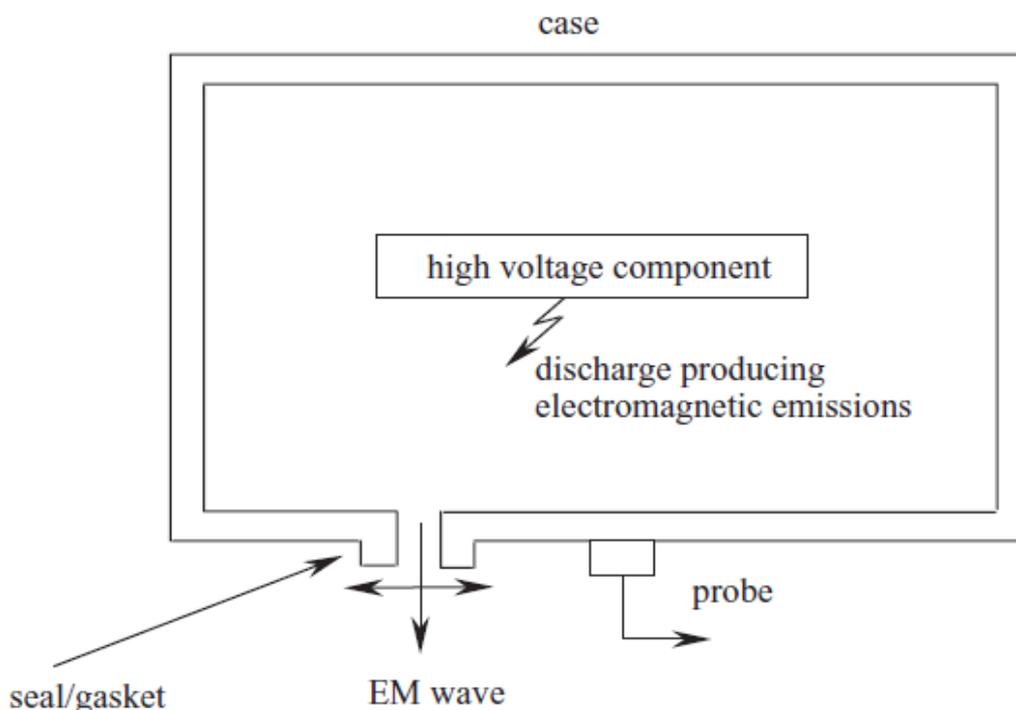


Figura 8-Diagrama exemplificativo do sensor TEV (Haddad & Warne, 2004)

A tecnologia referente ao sensor de regimes transitórios de tensão é bastante recente e a sua implantação no mercado ainda é baixa. No entanto, têm sido cada vez mais utilizados para a monitorização dos sistemas de comutação em subestações de distribuição de energia eléctrica, devido à maior facilidade de propagação das ondas electromagnéticas. Outra grande vantagem é o facto do mesmo não ser intrusivo, conduzindo a uma maior acessibilidade de instalação.

A desvantagem deste sensor decorre da sua capacidade para detectar interferências, i.e., sinais electromagnéticos alheios ao sistema monitorizado. Assim, é recomendada a utilização de vários sensores TEV distanciados entre si, de forma a comparar os sinais recebidos entre o sensor a monitorizar o activo e outro sensor colocado num sistema separado e alheio, para ser possível discriminar quais os sinais originados no exterior e quais os relativos a descargas no sistema (Haddad & Warne, 2004).

2.2.2 TP-RF (UHF)

Este método consiste na colocação de uma antena no interior do transformador, que detecta as ondas electromagnéticas criadas pela descarga. A frequência de detecção está na gama de UHF (*Ultra High Frequency*) que corresponde ao intervalo entre os 300 MHz e os 3 GHz, ou seja está no interior do intervalo de frequências de uma onda rádio.

Adicionalmente é utilizada esta gama de frequências de modo a ter um factor de qualidade elevado, uma vez que assim é retirada a maior parte das possíveis interferências que poderiam ser detectadas, visto que, neste ambiente de aplicação, não existem outras fontes de sinal de frequências comparáveis.

O sistema TP-RF, ao utilizar ondas de rádio frequência, consegue detectar, localizar, analisar e monitorizar descargas parciais de forma eficiente (Figura 9) (Baker, 2010).

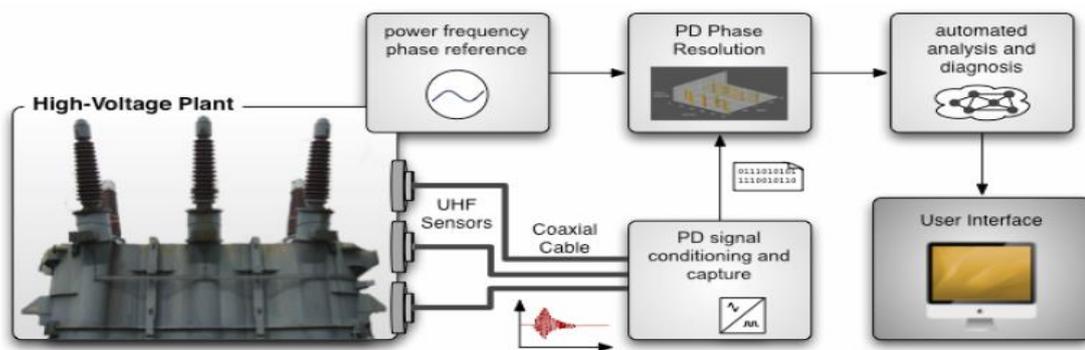


Figura 9 - Modo de funcionamento de um sistema TP-RF (Baker, 2010)



Figura 10 - Inserção de uma antena RF num transformador (Baker, 2010).

No entanto, este dispositivo apresenta algumas desvantagens, tais como a necessidade de um grande poder de processamento para conseguir captar os sinais UHF. Esta necessidade de grande processamento obriga a que um sistema seja alimentado localmente, o que, aliado ao facto de ser intrusivo, aumenta de forma significativa a dificuldade da sua instalação, manutenção e reparação, tornando proibitiva a sua utilização em larga escala (Figura 10) (Baker, 2010). Outra desvantagem de grande

importância consiste na falta de equipamentos TP-RF economicamente viáveis, tendo os produtos actualmente disponíveis custos bastante avultados.

2.2.3 Transformador de corrente para altas frequências (HFCT)

Este sensor foi desenvolvido para detectar impulsos de corrente, com durações entre os nanossegundos e os milissegundos, portanto correspondendo a elevadas frequências, que surgem quando ocorre uma descarga parcial (Okubo, Hayakawa, & Matsushita, 2002). Os sensores HFCT baseiam-se na lei de Faraday, em que, quando a descarga parcial produz um impulso de corrente, esta corrente é conduzida pelos condutores, variando o campo magnético do mesmo. Caso esteja colocado um sensor HFCT (que consiste numa bobina ou espira) ao redor do condutor, esta variação de campo magnético induz uma tensão proporcional ao impulso de corrente, que pode ser medida (Ardila-Rey, 2014).



Figura 11-Ilustração de um High Frequency Current Transformer (IPEC, 2015)

Pela figura 11 é fácil de entender que este sensor é bastante fácil de instalar e tem a vantagem de ser não intrusivo, facilitando a sua instalação e integração num sistema de sensores. No entanto, estes dispositivos são mais indicados para a monitorização de cabos condutores, como nas travessias dos transformadores. Desta forma, a criação de um sistema fiável de monitorização do transformador pode não ser inteiramente garantida.

Outra desvantagem do HFCT consiste no seu elevado custo de aquisição, que dificulta ainda mais a sua adopção em larga escala.

2.2.4 Detector de Ozono

O detector de ozono é utilizado, maioritariamente, em postos de transformação uma vez que estes utilizam como material isolante o ar circundante.

O princípio de funcionamento deste sensor baseia-se na monitorização de concentrações de moléculas de ozono junto ao transformador. Para resultados mais conclusivos sobre a monitorização do sistema, a utilização de dois sensores, um localizado junto ao transformador e outro colocado num local mais afastado permite ter um nível de referência, para comparar as duas concentrações. A Figura 12 exemplifica um possível modelo de um detector de ozono.



Figura 12-Ilustração de um sensor de concentração de moléculas de ozono (Cole-Parmer, 2015).

O detector de concentração de ozono não é muito utilizado pois as alternativas disponíveis apresentam resultados mais conclusivos em relação às descargas eléctricas, por permitirem conhecer a frequência, amplitude ou a localização das descargas. O seu custo elevado é igualmente um factor que reduz a sua implantação neste mercado.

2.2.5 Sensor Ultrassons

Este tipo de sensores utiliza as propriedades sonoras de uma descarga eléctrica para a detecção das mesmas.

Actualmente a configuração mais utilizada para este sensor apresenta-se na forma de um equipamento portátil, de operação manual, para inspeção dos vários equipamentos de sistemas de distribuição de energia eléctrica, de forma a localizar a origem da descarga.

Este sensor é normalmente utilizado como ferramenta de suporte aos sensores de monitorização local, para o caso de um inspetor necessitar de se deslocar ao local, utilizando este equipamento como forma de analisar o transformador (Figura 13).



Figura 13-Utilização de um sensor de ultrassons para a análise local (UESystems, 2015).

Os sensores de ultrassons têm evoluído para permitir a monitorização local *online*, com a colocação dos sensores directamente nos sistemas, criando um sensor inteligente integrado numa rede de sensores.

2.3 Sensores de ultrassons

Nesta secção é feita uma introdução teórica sobre a natureza do som e os seus principais transdutores: microfones piezoeléctricos e microfones MEMS.

2.3.1 Som

O som consiste na propagação de uma onda mecânica em meios materiais, i.e., em materiais sólidos, líquidos ou gasosos. A propagação ocorre através das compressões e rarefacções do meio no percurso dos sinais, não provocando o movimento das partículas do meio mas apenas a vibração das mesmas em relação ao seu ponto de equilíbrio. Sendo a propagação das ondas longitudinal, as compressões e rarefacções permitem definir o som como um sinal sinusoidal em que picos de amplitude positiva correspondem às compressões e os picos de amplitude negativa às rarefacções.

O espectro de frequência do som é bastante extenso, sendo que o ouvido humano apenas têm sensibilidade para distinguir sons que tenham frequências no intervalo entre os 20 Hz e os 20 kHz (Figura 14).

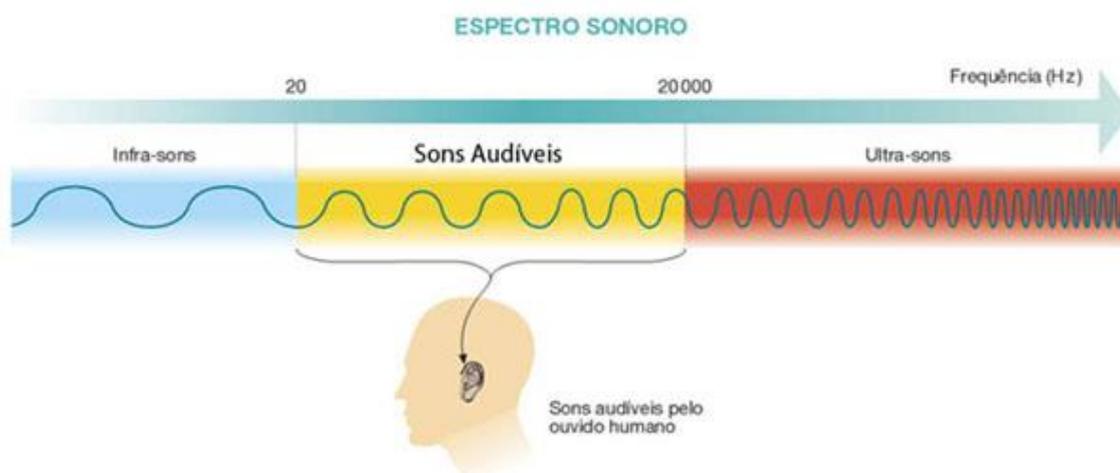


Figura 14- Espectro Sonoro (Cavaleiro, 2006)

Neste trabalho, a gama que revela mais interesse é a dos ultrassons, uma vez que, apesar das descargas eléctricas produzirem ondas sonoras tanto na gama sonora como na gama dos ultrassons, a captação das ondas desta gama de frequências permite eliminar uma grande parte das fontes sonoras existentes nas vizinhanças, que apenas produzem sons na gama do audível. Evitando a captação destas fontes sonoras, diminui-se fortemente a produção de interferências ao sinal desejado.

2.3.2 Captação de ondas sonoras

Um microfone é um transdutor que converte sinais sonoros em sinais eléctricos. Existem diversos tipos de microfones, com princípios de funcionamento diferentes. Os microfones utilizados na dissertação são microfones piezoeléctricos; o microfone de tecnologia MEMS utilizado tem, igualmente, como princípio de funcionamento o efeito piezoeléctrico.

2.3.2.1 Microfones Piezoeléctricos

O efeito piezoeléctrico consiste na produção de uma pequena diferença de potencial nas extremidades de um material piezoeléctrico aquando a ocorrência de distorção mecânica no mesmo. Este efeito é reversível, resultando em aplicações em que é aplicado um sinal variável no tempo ao material, para produzir uma deformação variável, como exemplificado na Figura 15 (Cardoso J. , 2012).

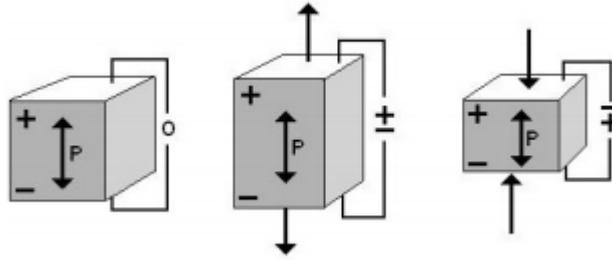


Figura 15-Exemplo ilustrativo do efeito piezoelétrico de um material (Cardoso J. , 2012)

Além desta característica os materiais piezoelétricos têm frequências de ressonância fixas, ou seja uma frequência para a qual o material piezoelétrico apresenta uma eficiência máxima, tanto para a conversão de um sinal elétrico em energia mecânica, como para a conversão no sentido contrário ^(APCInternational, 2015). A exploração do efeito piezoelétrico à frequência de ressonância faz com que os materiais piezoelétricos sejam bastante utilizados em aplicações que necessitem de uma frequência bem definida, como em circuitos digitais, onde são utilizados materiais piezoelétricos de forma a obter um circuito com uma frequência de funcionamento fixa, ou, igualmente, para a captação ou produção de sinais sonoros.

Resumindo, existe uma grande variedade de aplicações, que recorrem ao efeito piezoelétrico, tais como:

- Medidores de Pressão;
- Microfones e altifalantes para produção ou captação de sons;
- Alarmes;
- Relógios de precisão;
- Medição de distância de curto e longo alcance.

No caso de um microfone, o efeito piezoelétrico ocorre devido ao embate das ondas sonoras num diafragma, que oscila quando tal ocorre (Figura 16). Esta oscilação, sendo transmitida mecanicamente a uma peça de material piezoelétrico, causa a deformação deste, assim gerando uma tensão elétrica nas suas extremidades. Caso a frequência de ressonância esteja bem definida, a frequência de resposta do material piezoelétrica será muito maior para frequências de oscilação do diafragma iguais à da ressonância. Desta forma a utilização de um microfone piezoelétrico com frequência

de ressonância de 40 KHz permitirá, idealmente, que apenas seja produzida uma resposta mensurável caso o diafragma seja activado por ondas de 40 kHz.

No entanto, é esperado que o material piezoelétrico do microfone não tenha um factor de qualidade ideal e, por isso, é espectável que apresente respostas a sinais com frequências próximas dos 40 kHz. No entanto se for escolhido um microfone com elevado factor de qualidade, o erro de detecção pode ser bastante menor, não influenciando de maneira significativa os resultados obtidos.

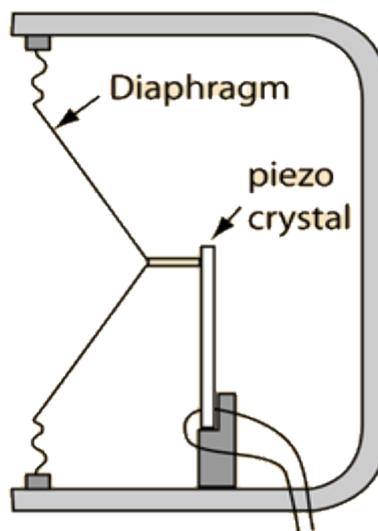


Figura 16-Illustração de um microfone piezoelétrico (White & White, 1980)

Os microfones piezoelétricos têm uma direccionalidade bastante acentuada, isto é, a captação das ondas sonoras ocorre para uma certa abertura angular definida, sendo que as outras ondas incidentes por outros ângulos são bastante atenuadas. Esta propriedade ajuda, ainda mais, à construção de um sistema de detecção fiável, por evitar a detecção de fontes sonoras na rectaguarda do microfone.

2.3.2.2 Microfone MEMS

Micro ElectroMechanical Systems, ou MEMS (como referido daqui em diante) é, como o nome indica, a junção de componentes electrónicos e mecânicos com dimensões micrométricas, como ilustrado na figura 17.

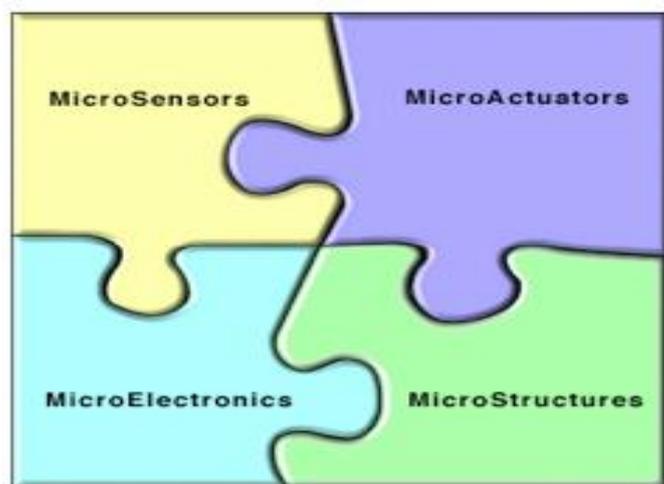


Figura 17-Componentes que constituem um dispositivo MEMS (MNX MEMS & Nanotechnology, 2015)

Estes dispositivos têm como principal vantagem o facto de, com dimensões tão reduzidas, estar integrado no mesmo componente um transdutor e os circuitos de condicionamento de sinal. Ao contrário dos sistemas com sensores tradicionais, em que o condicionamento do sinal dos sensores é realizado num circuito à parte, no caso de dispositivos de tecnologia MEMS, os sinais podem ser directamente aplicados numa típica cadeia de aquisição de dados incorporada num qualquer microcontrolador, ou, num número crescente de casos, mesmo integrando um microcontrolador. Devido a estas características, os sensores MEMS têm crescido muito rapidamente no mercado de electrónica, tanto de consumo como industrial, o que é especialmente visível no mercado dos *smartphones*, em que a maior parte dos sensores utilizados são MEMS (MNX MEMS & Nanotechnology, 2015).

No entanto, para o caso do microfone MEMS utilizado neste trabalho — *Knowles SPU0410LR4H-QB* —, o condicionamento de sinal não se encontra integrado, existindo apenas um pré-amplificador mas que precisa de ter o ganho configurado pelo utilizador, com a utilização de resistências. Adicionalmente, o microfone MEMS não apresenta uma frequência de ressonância bem definida, sendo considerado que este equipamento possui uma resposta “plana” em frequência. Desta forma, além da

configuração da pré-amplificação é necessário adicionar um circuito de filtragem aos sinais recebidos pelo microfone.

2.3.3 Testes aos microfones de ultrassons

Como anteriormente referido, para a elaboração do projecto foi inicialmente decidido que seriam utilizados microfones de ultrassons. Tal deve-se ao facto de que a utilização desta gama de altas frequências permitir evitar a detecção de ondas sonoras de frequência, na gama do audível, originadas por fontes sonoras em redor dos equipamentos monitorizados.

É importante referir que para sistemas de detecção sonora de descargas parciais ou de coroa, é recomendada a utilização de microfones com frequências na zona perto dos 40 KHz, devido ao facto de que para descargas eléctricas pouco intensas, como é o caso das descargas parciais em transformadores, a frequência para a qual a intensidade do som captado é maior é de 40 kHz, já que a atenuação do som emitido por uma fonte sonora é muito inferior para esta frequência ^(Bartnikas, 1979).

Desta forma, de maneira a estudar o microfone mais adequado para o desenvolvimento do projecto, foi necessário realizar de um conjunto de testes com recurso a um osciloscópio *Tektronix TDS 210*, a um DAQ da *National Instruments* e o *software* correspondente, o *NI Signal Express*. Os vários microfones foram testados nas mesmas condições, e o estudo dos resultados obtidos permitiu tirar conclusões sobre o tipo de resposta em frequência a descargas eléctricas.

O seguinte conjunto de microfones foi testado:

- *AOM 4542PR*;
- *Prowave 400PT160* e *Prowave 400SR10B*;
- Microfone MEMS *Knowles SPU0410LR4H-QB* associado a circuitos de alimentação em potência e condicionamento do sinal de saída.

As *datasheets* dos microfones *Prowave* e do microfone MEMS incluem os espectros típicos de resposta em frequência. Nestes documentos vem indicado que, para os microfones *Prowave* a frequência de ressonância situa-se nos 40 kHz, com um desvio de $\pm 1 \text{ kHz}$ ^{(Prowave, 2015); (Prowave, 2015)} Está igualmente presente nas *datasheets* dos microfones que eles apresentam uma resposta muito superior para ondas incidentes num intervalo

de $\pm 30^\circ$ em relação ao eixo do microfone, mostrando a elevada direccionalidade dos microfones piezoelétricos.

O dispositivo MEMS apresenta uma sensibilidade maior na banda de 25 - 30 kHz (Knowles, 2015). No entanto, é possível verificar que a sensibilidade continua a ser bastante elevada para frequências fora do intervalo indicado, demonstrando assim a necessidade de serem facultados sistemas de filtragem adicional a este tipo de microfones. Outra característica deste microfone MEMS facultada pela *datasheet* é que o microfone é omnidireccional, ou seja, capta ondas sonoras de todas as direções, ao contrário dos microfones piezoelétricos, que apresentam uma direccionalidade bem definida.

2.3.3.1 Primeira Fase de Testes

Numa primeira fase de testes efectuou-se a ligação directa dos pólos dos microfones a um osciloscópio e observou-se a forma de onda obtida. Para provocar uma resposta dos microfones utilizaram-se dois métodos diferentes. Num primeiro método, de forma a testar a qualidade da filtragem em frequência dos microfones, utilizou-se um gerador de sinais sinusoidais em conjunto com um altifalante.

Os resultados para o teste da filtragem com o gerador de sinais foram os seguintes:

Tabela 1- Resultados obtidos sobre a filtragem dos microfones.

Microfone	Frequência mínima para a ocorrência de resposta	Frequência máxima para a ocorrência de resposta	Frequência da tensão máxima
AOM 4542P-R	18 kHz	22 kHz	24 kHz
Prowave 400PT160	38.5 kHz	42 kHz	40 kHz
Prowave 400SR10B	36 kHz	39 kHz	38 kHz
MEMS	26 kHz	33 kHz	28 kHz

Analisando os resultados obtidos, é possível observar que os microfones da *Prowave* apresentam factores de qualidade bastante elevados, uma vez que apresentam intervalos bastante baixos entre os máximos e mínimos de resposta em frequência. No caso do microfone MEMS, o intervalo é bem maior, como esperado face aos dados da respectiva *datasheet*. Por fim, apesar do microfone *AOM* apresentar um factor de qualidade aceitável, este verifica-se para uma gama de frequências sem interesse, muito próxima dos 20 kHz, o que permitiria captar muitos sons ambientes parasitas.

Como anteriormente referido, é importante utilizar microfones de frequências de ressonância próxima dos 40 kHz, devido à baixa atenuação do som de uma descarga de coroa para esta frequência: deste modo, os microfones *Prowave* apresentam vantagem em relação aos outros.

2.3.3.2 Segunda Fase de Testes

No teste seguinte, com o osciloscópio, ligou-se o gerador *Van de Graaff* e analisaram-se os resultados obtidos na ocorrência de uma descarga.

Um gerador *Van de Graaff* é uma máquina de electrostática inventada pelo físico americano Robert J. Van de Graaff. Esta máquina permite gerar descargas eléctricas entre dois corpos esféricos condutores, através do ar, sempre que o campo eléctrico entre os condutores seja suficientemente intenso ^(Hellborg Ragnar, 2005). Assim, com recurso ao gerador de *Van de Graaff*, registou-se a resposta dos microfones na captação de descargas eléctricas, como a seguir se ilustra.

Os resultados obtidos para o microfone 400PT160 foram os seguintes:

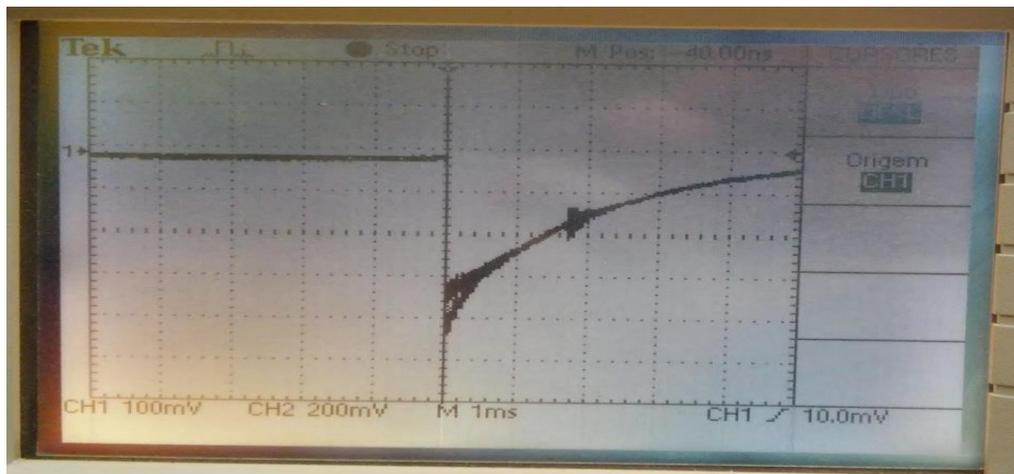


Figura 18-Forma de onda obtida no osciloscópio para o microfone 400PT160.

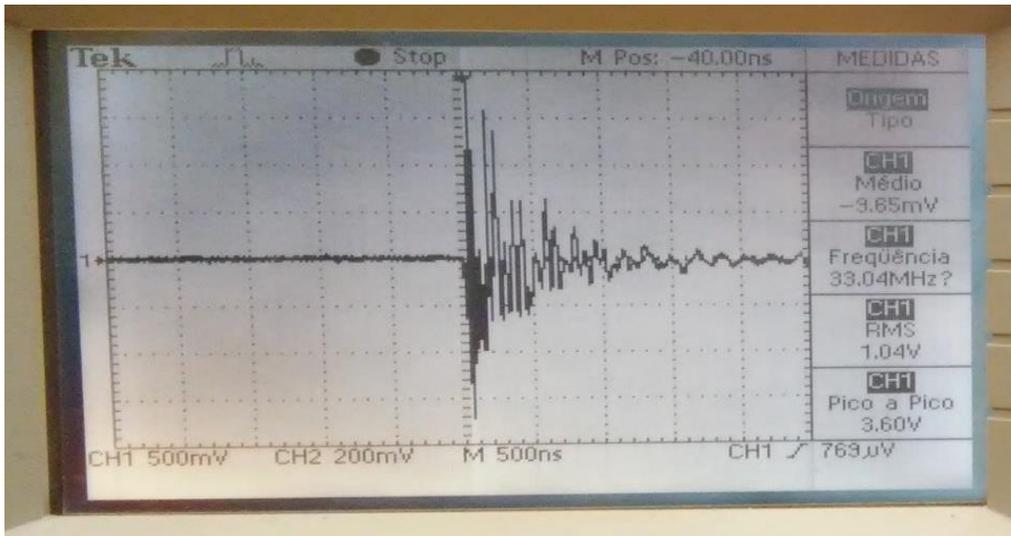


Figura 19- Onda referente ao pico no osciloscópio para o microfone 400PT160.

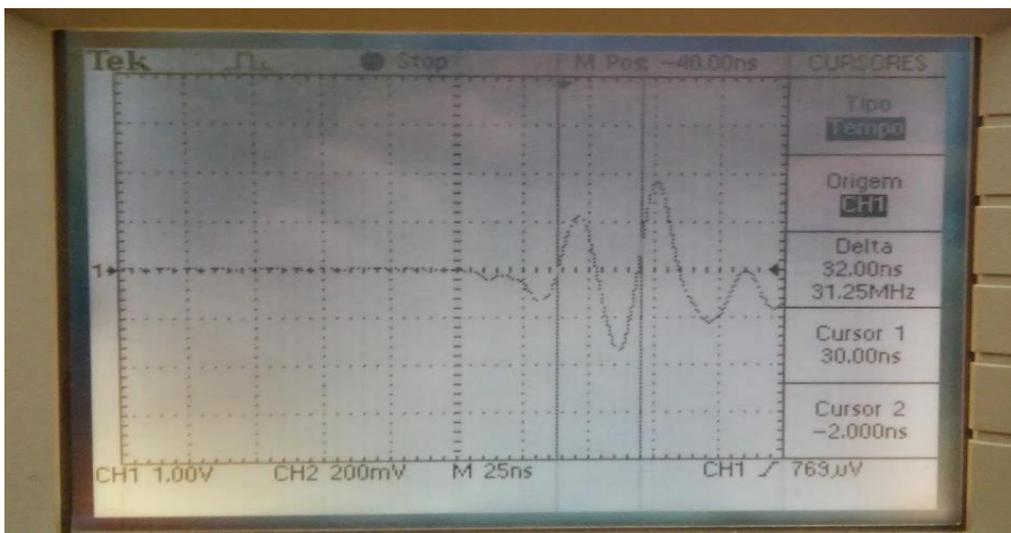


Figura 20- Primeiro harmônico do pico em conjunto com a sua frequência.

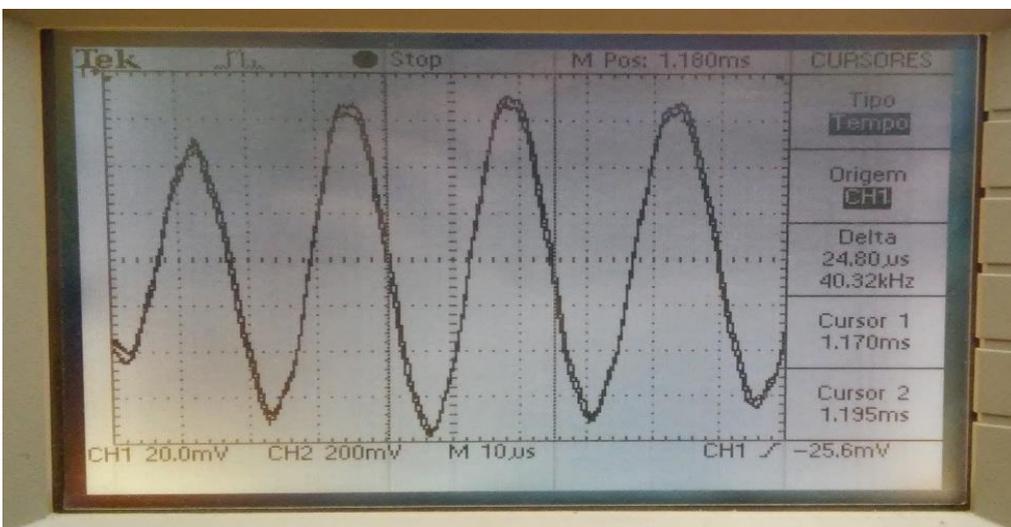


Figura 21-Onda secundária e respetiva frequência.

Tal como observado no osciloscópio, ressalta a presença de um pico de amplitude bastante elevado e de uma subida da tensão de saída. Ao realizar-se uma diminuição da escala temporal do osciloscópio, para a ordem dos nanossegundos, é possível observar que o pico antes observado corresponde, realmente, a uma onda de frequência muito elevada, como mostram as Figuras 19 e 20. A análise em frequência deste sinal mostra ter uma frequência bastante elevada, de aproximadamente 31 MHz. Esta frequência é bastante interessante, uma vez que os microfones deveriam apenas detectar frequências na ordem das dezenas de kHz. Também, com um atraso temporal, já durante a queda de tensão, é possível observar a existência de uma onda secundária, que se verifica ter uma frequência de 40 kHz, portanto correspondendo ao sinal ultrassónico esperado.

A seguinte tabela apresenta os resultados obtidos para o teste com o gerador de Van de Graff dos vários microfones testados, com o registo da tensão dos picos de tensão elevada, e da onda secundária detectada:

Tabela 2-Resultados referentes ao teste com o osciloscópio + Detector de Van der Graff.

Microfone	Presença do pico de tensão	Amplitude do Pico (V)	Presença da onda secundária	Amplitude da Onda (mV)
AOM 4542P-R	Sim	Baixa (0.2)	Não	-
Prowave 400PT160	Sim	Alta (1)	Sim	90
Prowave 400SR10B	Sim	Média-Alta (0.75)	Sim	60
MEMS	Sim	Muito Alta (>5)	Sim	500

É possível observar que o sensor AOM apresenta resultados inferiores aos outros três microfones, o que, aliado aos testes em frequência, permitiu eliminá-lo da lista dos microfones elegíveis para este trabalho. É, igualmente, importante referir que os microfones *Prowave* apresentam resultados semelhantes entre si, e que a maior tensão à saída do microfone 400PT160 é explicável pelas suas maiores dimensões em relação segundo microfone.

Os valores mais elevados de tensão obtida para o microfone MEMS devem-se à amplificação do sinal através do pré amplificador.

2.3.3.3 Terceira Fase de Testes

2.3.3.3.1 Análise dos sinais

A terceira fase de testes foi realizada de forma a estudar os microfones mais detalhadamente, com recurso ao sistema de aquisição de dados *NI MyDAQ* em conjunto com o *software* próprio *Lab View Signal Express for DAQ* da *National Instruments*.

Assim criou-se um novo modelo de teste, em que eram feitas aquisições dos sinais de saída aos terminais dos microfones. Para o caso dos microfones piezoelétricos, o sinal a medir é diferencial, enquanto que no MEMS o sinal de saída vem referido à terra. Desta forma, sendo que o interesse para a analisar o sinal adquirido reside nas frequências próximas dos 40 KHz, foi utilizada uma frequência de amostragem de 100 kHz, ainda com alguma margem em relação ao mínimo de 80 kHz correspondente ao critério de Nyquist.

Depois dos sinais adquiridos para os vários microfones, foi realizado um estudo sobre a resposta em frequência dos mesmos, com recurso ao método da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*).

O *software MatLab* disponibiliza funções que ajudam o utilizador a realizar análise de espectros de frequência de forma rápida e simplificada. A função *pwelch* consiste no método *Welch power spectral density estimate*, que utiliza as transformadas de Fourier para criar uma estimativa do espectro em potência dos sinais, representando a resposta em potência em relação à frequência, ou seja, $\frac{dB}{Hz}$ (Welch, 1967). Desta forma é possível conhecer o comportamento dos sinais à frequência, permitindo concluir quais as frequências de ressonância, ou seja, a que frequências os microfones apresentam melhores respostas (maiores rendimentos enquanto transdutores).

2.3.3.3.2 Testes

Amostrou-se o sinal de saída de cada microfone, analisando-se a sua resposta a uma descarga eléctrica. Obtiveram-se os seguintes espectros:

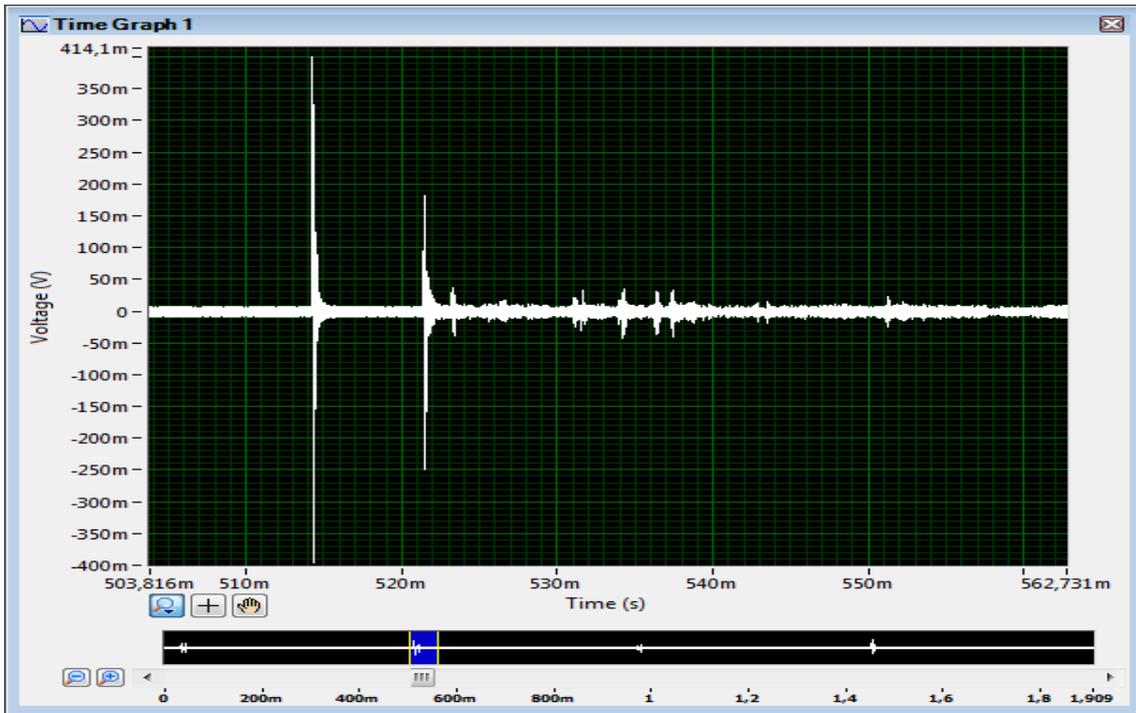


Figura 22 - Espectro obtido para o microfone MEMS na detecção de uma descarga eléctrica.

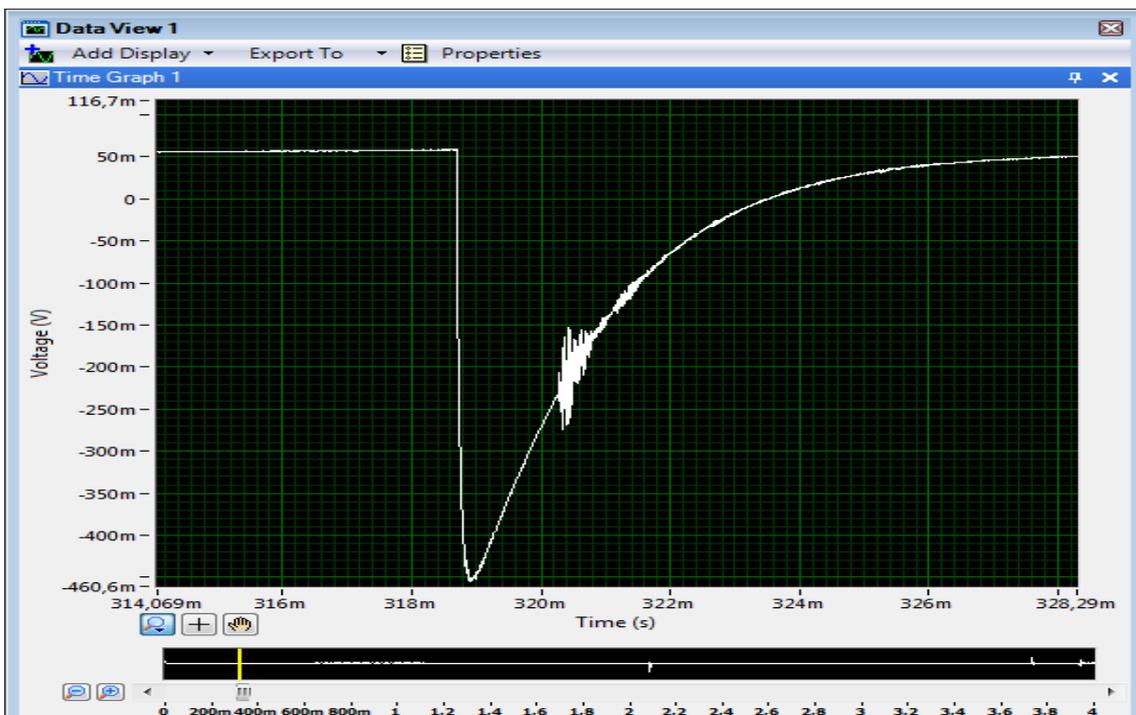


Figura 23 - Sinal obtido do microfone 400SR10B na captação de uma descarga eléctrica.

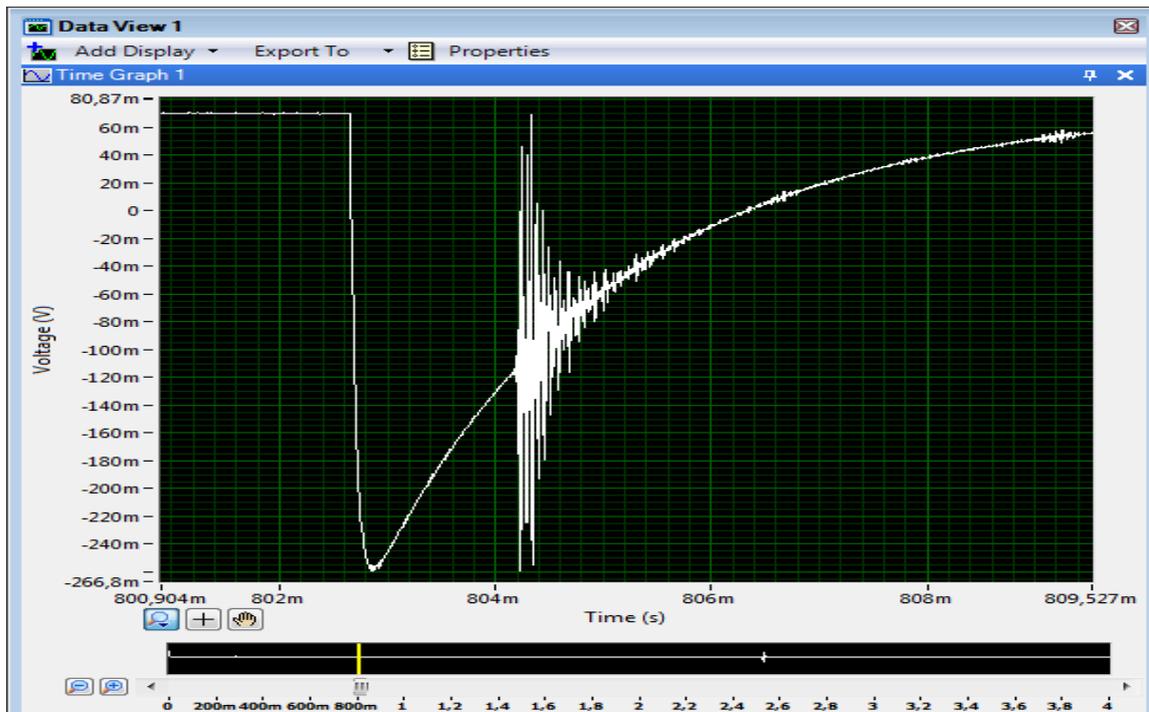


Figura 24- Sinal obtido para o microfone 400PT160 na captação de uma descarga eléctrica.

É importante notar que as amplitudes dos sinais não podem ser comparadas entre si, pois as sucessivas descargas de teste foram, naturalmente, diferentes, e, por outro lado, o sinal do microfone MEMS ser amplificado.

Nas Figuras 23 e 24, é possível observar que a primeira onda observada no osciloscópio (Figuras 18 e 19), quando obtida pelo *NIDAQ* surge somente como uma queda de tensão; isto resulta de, como observado no osciloscópio, a onda ser de uma frequência muito elevada e, com as limitações à frequência de amostragem do equipamento de aquisição, não ser capazmente digitalizada pelo sistema, surgindo somente o pico de tensão.

Com o objectivo de perceber o sinal do MEMS, uma vez que não ocorre a queda de tensão observável nos piezoeléctricos, captou-se simultaneamente o sinal daquele com o do microfone 400PT160, como mostrado na Figura 25.

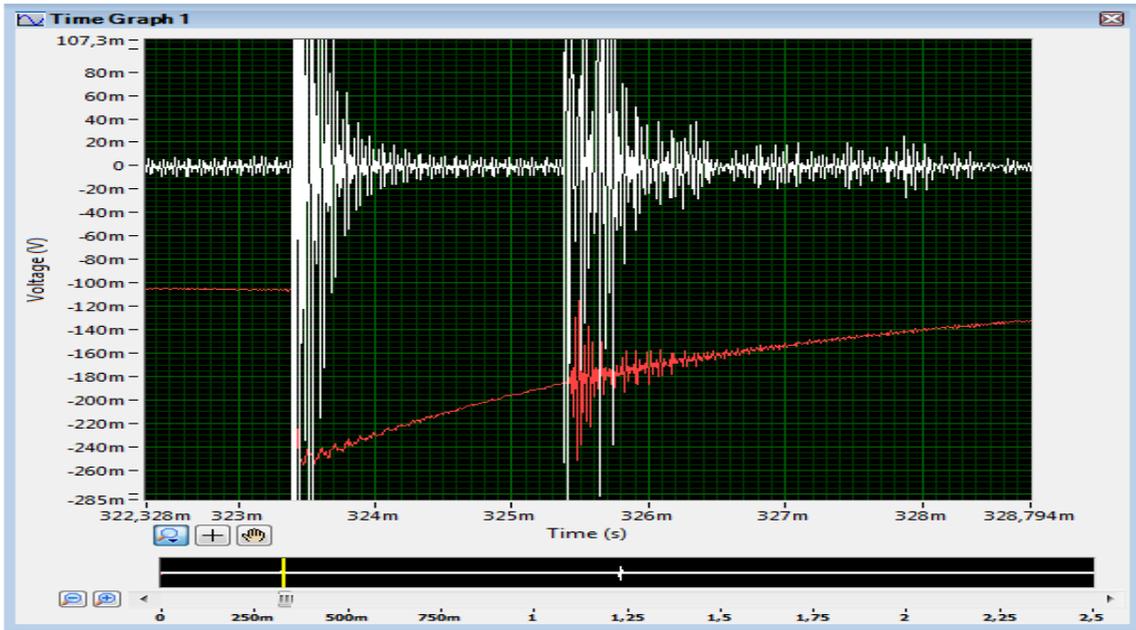


Figura 25- Análise simultânea dos sinais do microfone MEMS (branco) e do microfone 400PT160 (vermelho)

É possível concluir que as duas ondas de amplitude elevada do microfone MEMS são correspondentes ao pico e à segunda onda, respectivamente, captados pelo microfone piezoelétrico.

Foi de seguida realizada a análise FFT dos sinais, de forma a compreender a sua resposta em frequência (Figuras 26-28):

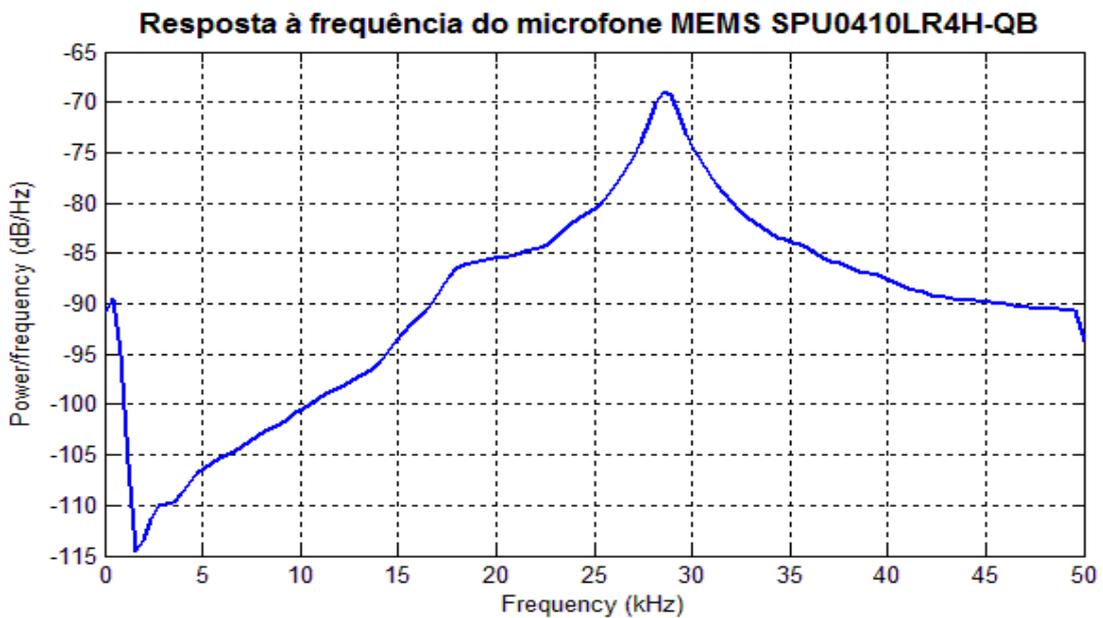


Figura 26- Espectro em potência do microfone MEMS

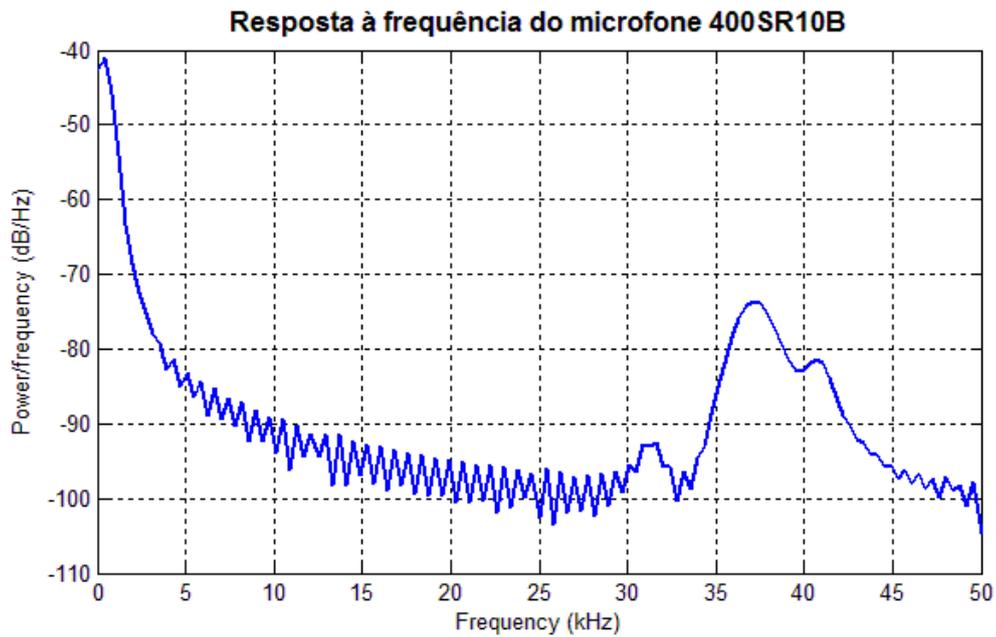


Figura 27 - Espectro em potência do microfone 400SR10B

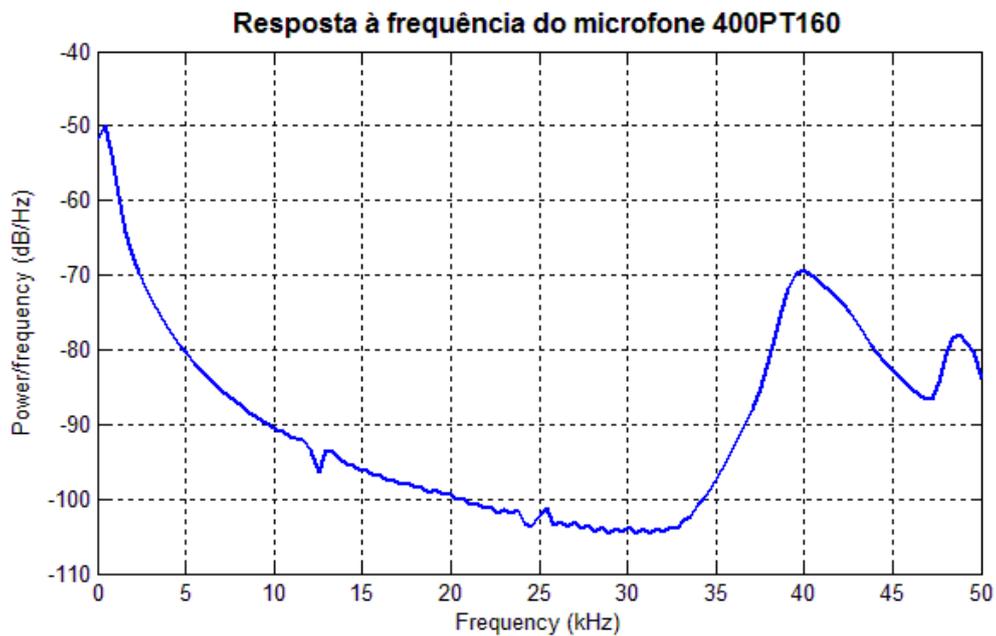


Figura 28 - Espectro em potência do microfone 400PT160

Os gráficos obtidos permitem tirar algumas conclusões: (i) todos os espectros obtidos correspondem aos esperados pela análise das *datasheets* dos respectivos dispositivos, (ii) é possível observar a existência de um pico nas regiões de baixa frequência, e (iii) um espectro de potência do sinal de saída na ausência de descarga mostra um pico na mesma frequência que nos espectros obtidos em situações de descargas captadas (Figura 29).

Comparação do espectro em potência do sinal de descarga do microfone 400PT160 com o ruído

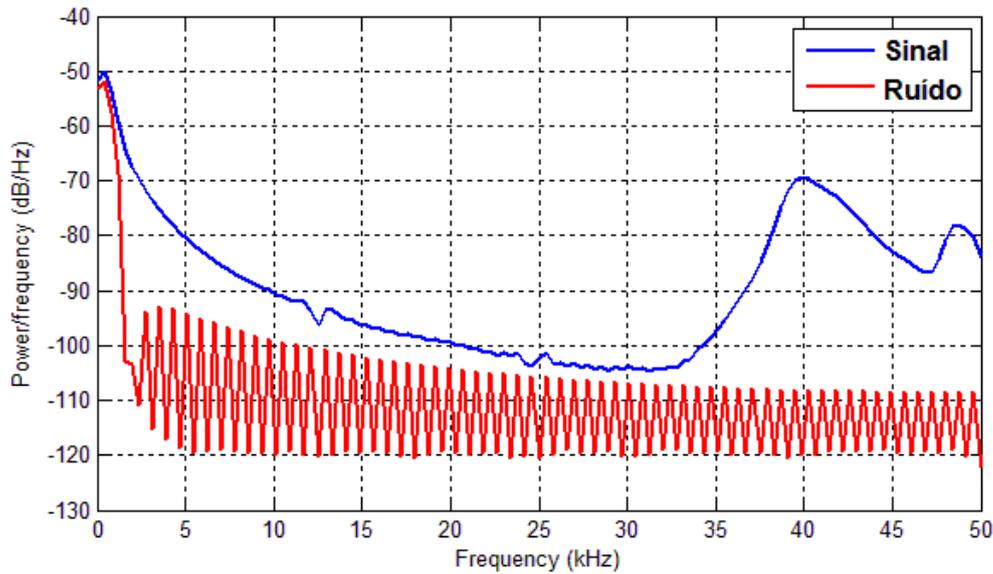


Figura 29- Espectro de potência do ruído em comparação com o sinal do microfone.

Desta forma, é possível concluir que o pico de potência nas baixas frequências presentes nos espectros é referente a ruído. A colocação de um filtro passa-baixo entre o microfone e o sistema de aquisição de dados não revelou nenhuma alteração nos resultados, indicando que o ruído se deve à aquisição de dados ou ao computador.

Outra análise que pode ser feita aos sinais obtidos é a de confirmar se o pico de tensão tem influência nos espectros de potência dos sinais. Assim, através da função *pwelsh*, decompôs-se o sinal do microfone em duas partes, uma só referente à queda de tensão e outra com apenas a onda de 40 kHz, como ilustrado na Figura 30.

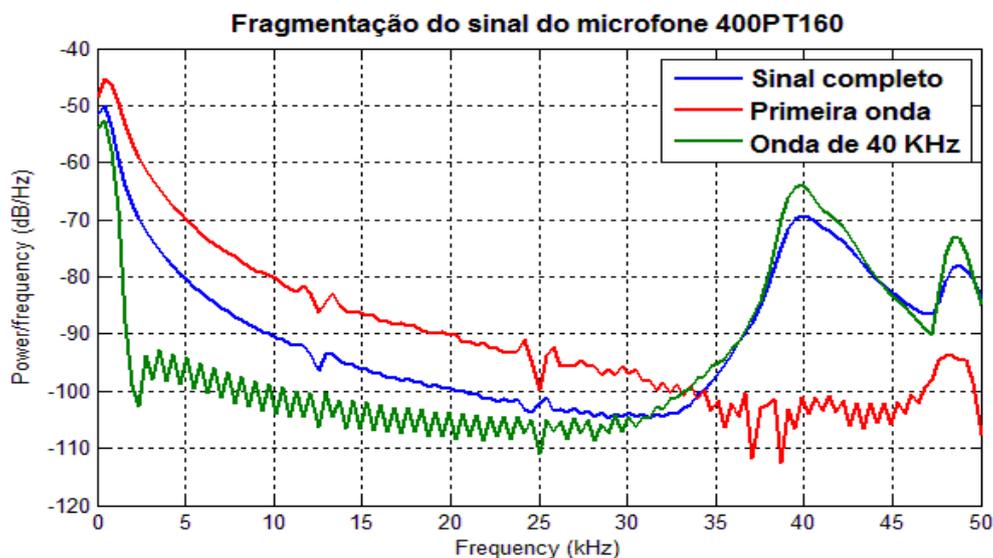


Figura 30 - Fragmentação do sinal do microfone 400PT160.

É possível observar que a onda relacionada com a queda de tensão não influencia o espectro de potência do sinal, certamente devido à elevada frequência daquela. O ligeiro pico nos 47 kHz pode ser explicado através da análise ao sinal obtido na Figura 24 em que é possível observar algumas ondas no início da subida da tensão captadas pelo microfone.

Concluindo, os resultados obtidos foram os seguintes:

Tabela 3- Resultados obtidos para a 3ª Fase de testes.

Microfone	Frequência da onda ultrassónica	Frequências de ondas secundárias
MEMS	28 kHz	Variadas
Prowave 400SR10B	38 kHz	41 e 47 kHz
Prowave 400PT160	40 kHz	47 kHz

2.3.3.4 Quarta Fase de Testes

Outra configuração para o teste com o *MyDAQ* foi a alteração da distância dos microfones com o gerador *Van de Graaff*. Este teste foi realizado, sobretudo, para perceber a sensibilidade na detecção de descargas dos microfones com o a distância. Os resultados apurados em relação à amplitude das ondas, numa avaliação média de diversos sinais, encontram-se sistematizados na Tabela 4.

Tabela 4-Resultados referentes ao teste dos microfones com o aumento da distância.

Microfone	Distância	Presença da Primeira onda	Amplitude da 1ª onda (mV)	Presença da segunda onda	Amplitude da 2ª onda (mV)
MEMS	Perto (20 cm)	Sim	600	Sim	450
	Média (1.m)	Sim	300	Sim	120
	Longe (4 m)	Sim	100	Sim	55
Prowave 400SR10B	Perto (20 cm)	Sim	450	Sim	80
	Média (1 m)	Sim	60	Sim	30
	Longe (4 m)	Não	-	Sim	8
Prowave 400PT160	Perto (20 cm)	Sim	350	Sim	160
	Média (1 m)	Sim	200	Sim	80
	Longe (4 m)	Não	-	Sim	15

Os resultados obtidos permitiram verificar que, como esperado, a distância entre a fonte sonora e o microfone afeta a eficiência da captação das ondas sonoras. Tal pode ser verificado pela grande diminuição de amplitude com o aumento da distância.

Para o caso da primeira onda, verificou-se que deixava de ser detectada para grandes distâncias, mesmo quando ainda era possível captar ondas de frequência de 40 kHz. Desta forma aumentou ainda mais a dúvida sobre a origem específica desta onda.

Foi igualmente realizado a análise do espectro em potência dos microfones com a variação da distância (Figuras 31-33).

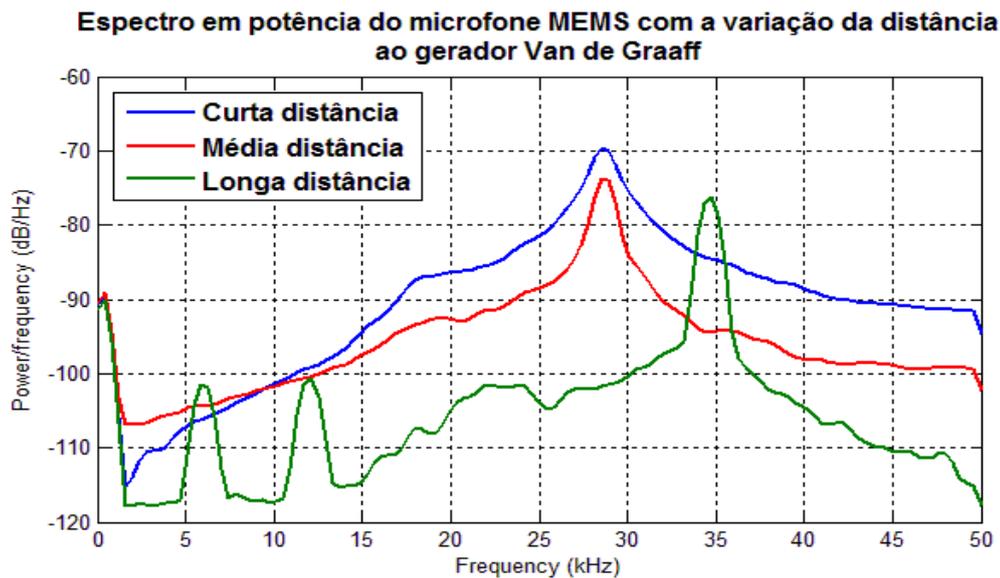


Figura 31-Análise do espectro em potência do microfone MEMS com a distância.

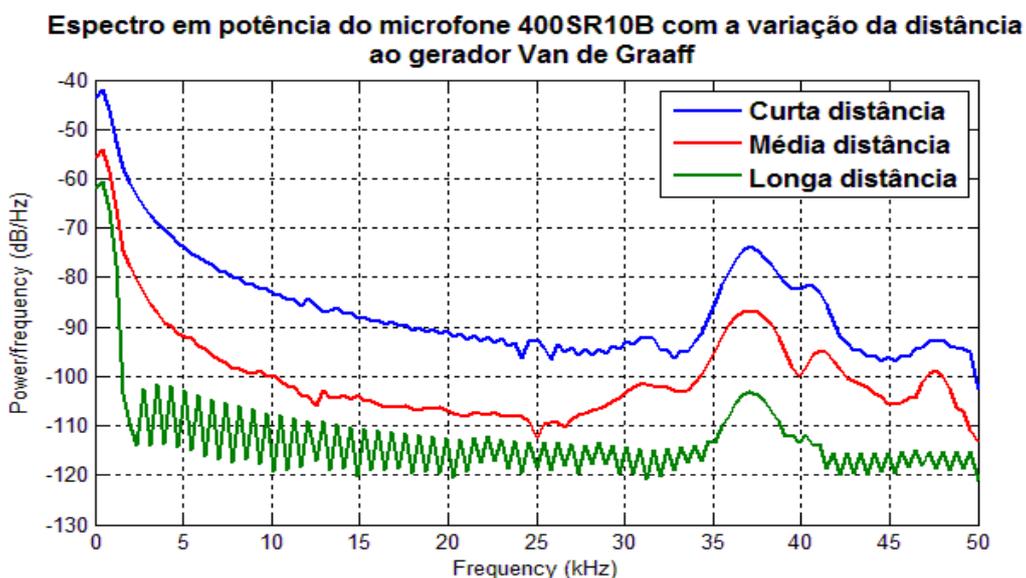


Figura 32- Análise do espectro em potência do microfone 400SR10B com a distância.

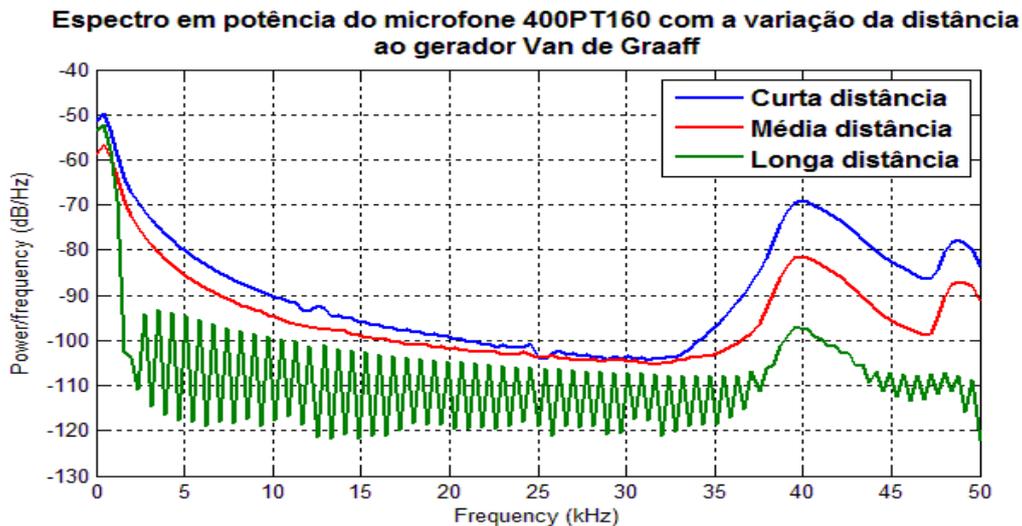


Figura 33- Análise do espectro em potência do microfone 400PT160 com a distância.

A grande discrepância relativa aos resultados obtidos com o microfone MEMS em relação à longa distância e as distâncias médias e curtas pode ser explicado pela captação de uma grande quantidade de ondas reflectivas nas paredes da sala de testes. Os microfones piezoelétricos apresentam a atenuação da potência esperada com o aumento da distância.

2.3.3.5 Quinta Fase de testes

Para esta fase de testes, embateram-se dois metais de forma a produzir ruído. As ondas sonoras captadas pelos microfones foram novamente registadas com recurso ao *NIDAQ* e o *DAQ Assistant*, tendo-se verificado que eram despromovidos do pico de tensão elevado sempre registado na captação de descargas eléctricas, como ilustrado na Figura 34.

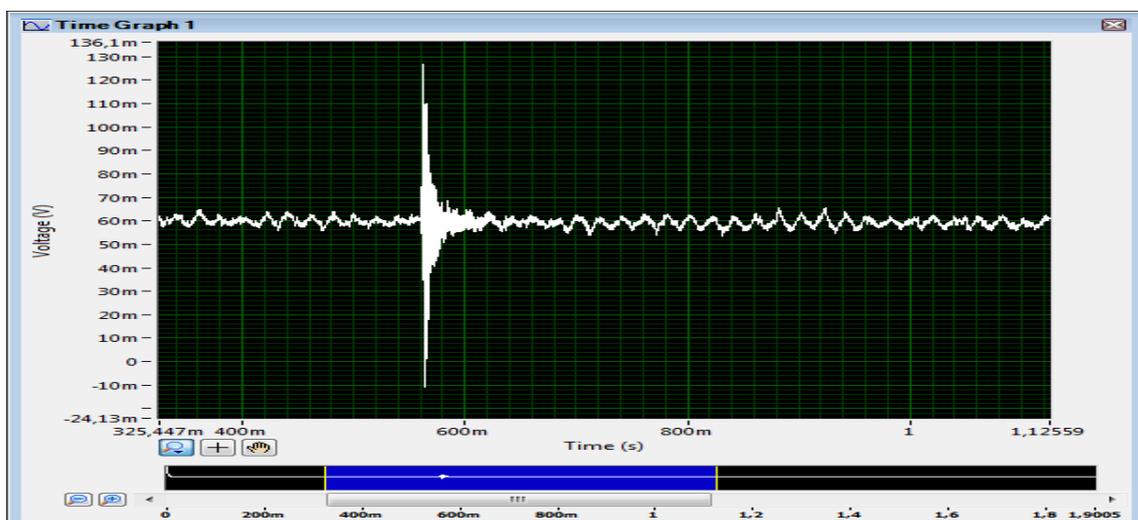


Figura 34-Sinal adquirido na captação de um embate de metal com metal pelo microfone 400PT160.

Realizou-se de seguida uma análise FFT aos sinais obtidos, de forma a perceber se os microfones apresentam uma resposta diferente em casos não relacionados com descargas eléctricas. Assim, foi analisada a diferença entre o espectro em potência dos microfones na captação de uma descarga com a captação do embate de um metal com um metal (Figuras 35-37).

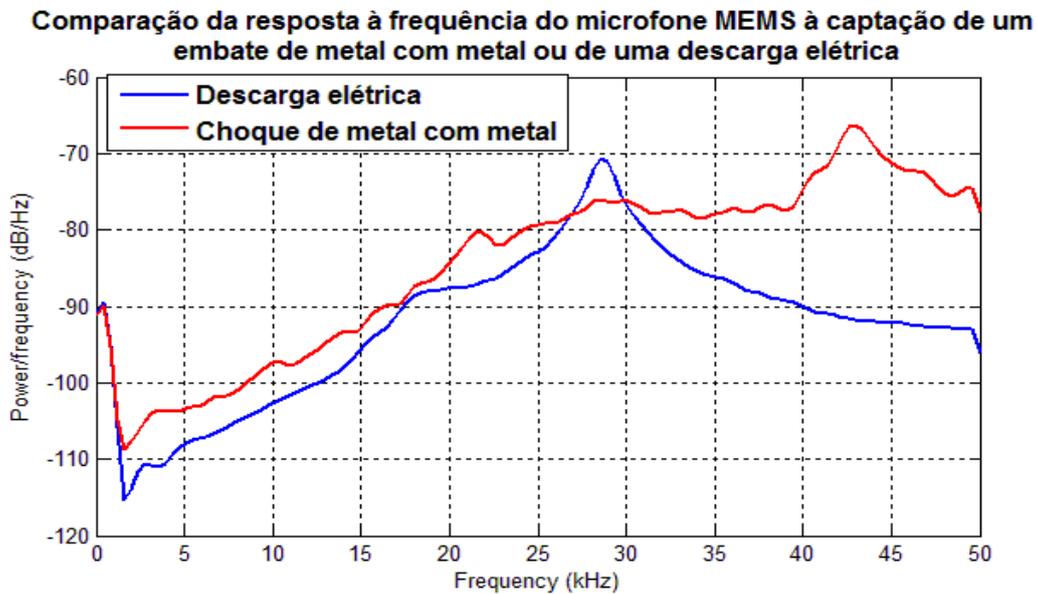


Figura 35 - Espectro em potência para a captação de um embate de metal com metal e para a captação de uma descarga eléctrica pelo microfone MEMS.

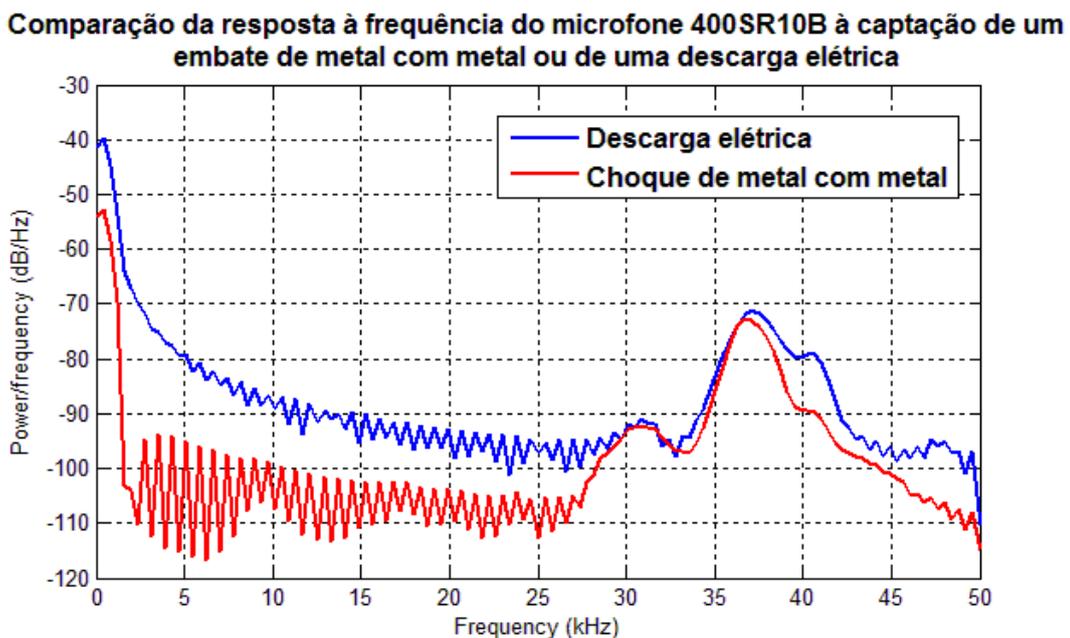


Figura 36- Espectro em potência para a captação de um embate de metal com metal e para a captação de uma descarga eléctrica pelo microfone 400SR10B.

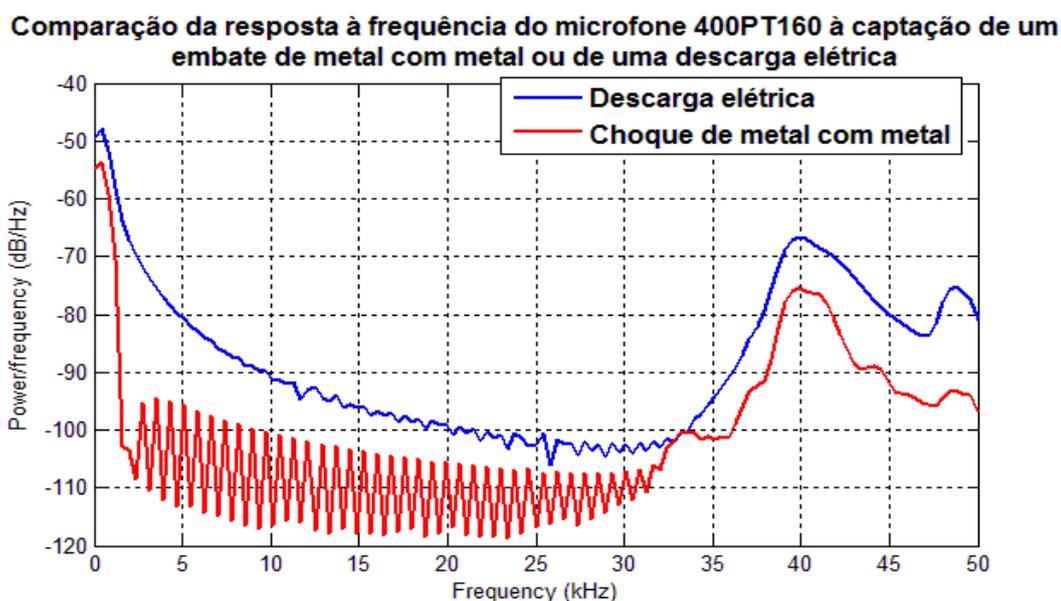


Figura 37- Espectro em potência para a captação de um embate de metal com metal e para a captação de uma descarga eléctrica pelo microfone 400PT160.

A comparação dos espectros de potência permite observar que existe uma diferença significativa na filtragem intrínseca dos microfones, principalmente no MEMS, em que o pico de sensibilidade máxima sofre uma alteração drástica, passando de um máximo nos 27 kHz para os 43 kHz. Esta alteração revela a baixa qualidade de filtragem deste microfone, tal como verificado no teste da atenuação.

2.3.3.6 Sexta Fase de testes

Foram igualmente realizados testes para determinar se a resposta dos microfones é afectada pela colocação de uma placa de fibra de vidro nas suas superfícies de captação, a fim de perceber se os microfones podem ser utilizados em caixas totalmente fechadas, satisfazendo coeficientes elevados de IP (*Ingress Protection*), para serem classificáveis como à prova de água, pós, etc.. A fibra de vidro simulava o material da caixa, que atenua bastante as ondas sonoras. Foram realizados testes em duas situações: (i) com a frente do microfone totalmente coberta pela placa, e (ii) havendo rasgado um furo na placa, frente ao microfone, visando facilitar a passagem das ondas sonoras. Os resultados obtidos encontram-se sistematizados nas Figuras 38-40.

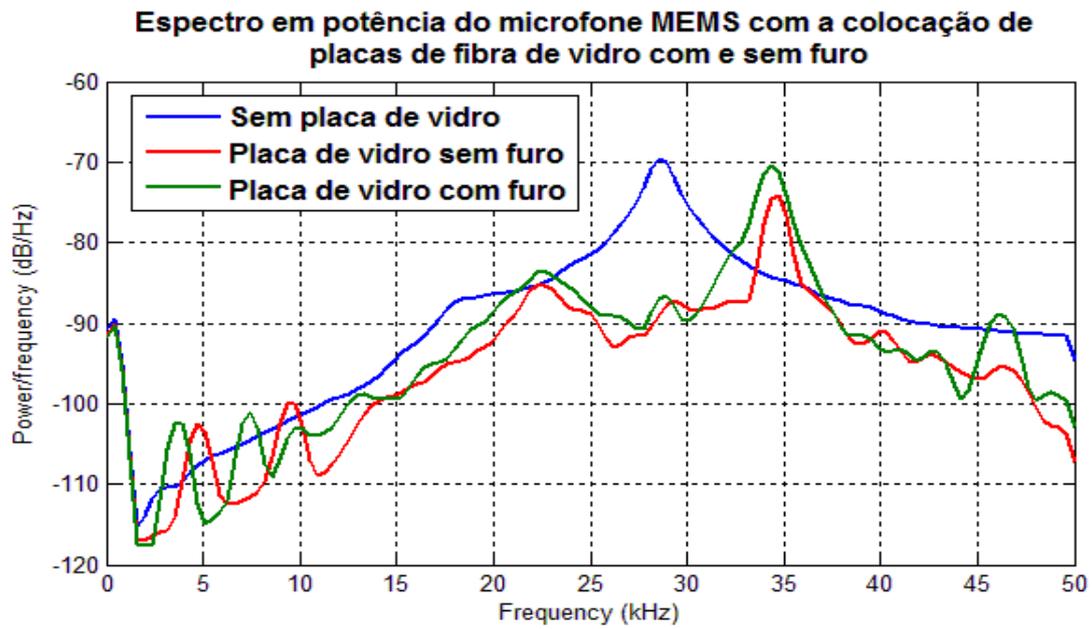


Figura 38 -Atenuação do sinal do microfone MEMS com a colocação de uma placa de fibra de vidro.

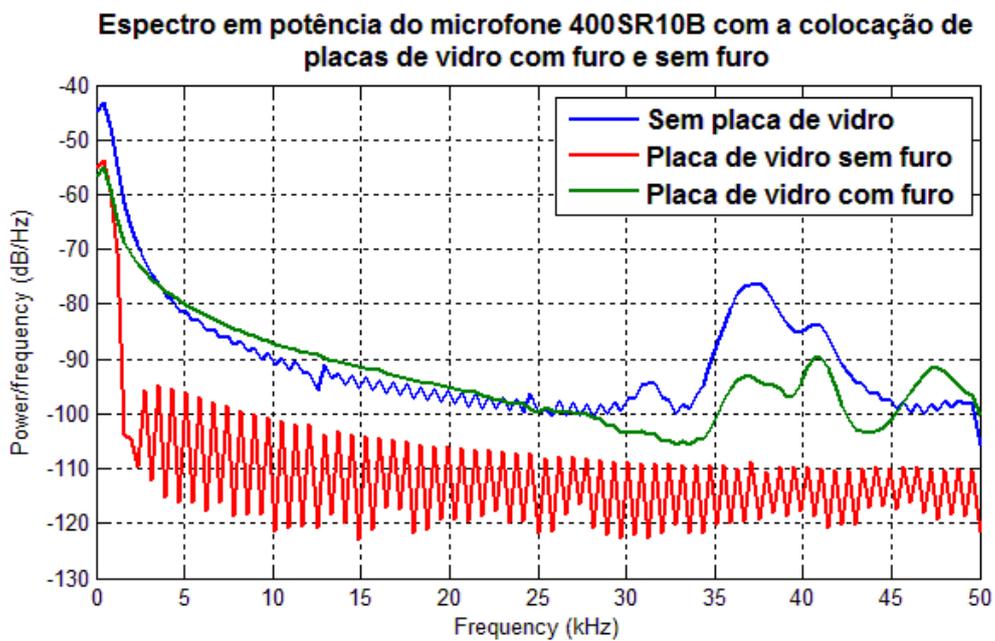


Figura 39 -Atenuação do sinal do microfone 400SR10B com a colocação de uma placa de fibra de vidro.

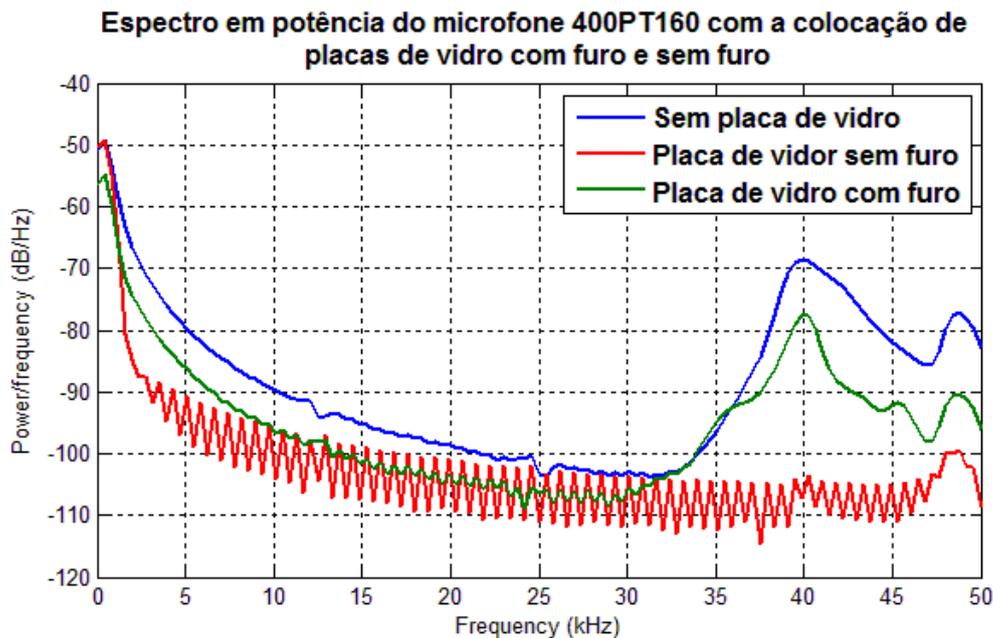


Figura 40 -Atenuação do sinal do microfone 400SR10B com a colocação de uma placa de fibra de vidro.

Os resultados obtidos permitem verificar que a atenuação sentida no microfone MEMS é muito baixa. Tal facto está de acordo com o esperado, uma vez que na *datasheet* é indicado que o microfone é omnidirecional (SPU0410). No entanto, é possível observar uma variação do pico de sensibilidade do MEMS de 27 kHz para 35 kHz e uma muito maior variação na resposta em frequência do que sem a placa de fibra de vidro colocada. Esta variação da resposta em frequência do microfone MEMS está de acordo com as outras variações observadas nos outros testes.

Já para os microfones piezoelétricos, a colocação da placa de fibra de vidro causou uma grande diminuição na captação de ondas sonoras, principalmente com placa sem furos, caso em que os microfones deixaram de apresentar resposta às ondas sonoras. Esta atenuação é explicada pela direccionalidade dos microfones piezoelétricos, em que a resposta dos mesmos é bastante influenciada pelo ângulo de incidência: por reflexão e alguma absorção, a placa diminui (para o caso da placa com furo) ou remove completamente (na placa sem furo) a incidência de ondas sonoras no microfone.

2.3.3.7 Sétima Fase de Testes

Alguns testes específicos foram idealizados e realizados, com o objectivo de conseguir determinar a origem da onda correspondente aos picos de tensão observados:

- O computador ao qual está ligado o *MyDAQ* ser apenas alimentado pela bateria do mesmo, de forma a descobrir se o pico corresponde a uma descarga à terra pela alimentação do computador;
- Colocar inicialmente o *MyDAQ* e o microfone a uma distância em que o pico não ocorre e apenas aproximar o microfone, verificando se o pico de tensão elevada surge, procurando concluir se o pico é gerado no microfone ou surge devido ao sistema de aquisição de dados ou ao computador;
- Apenas ligar o sistema de aquisição de dados e registar os dados obtidos, de forma a verificar se o pico de tensão ocorre sem nenhum microfone ligado.

No âmbito do primeiro teste, verificou-se que não ocorreu nenhuma alteração nos resultados obtidos, estando o computador ligado à bateria ou a uma fonte ac/dc. Assim, excluiu-se a possibilidade da onda ser provocada por uma descarga à terra através da ligação do computador à tensão do sector.

No caso do segundo teste, os resultados obtidos foram bastante interessantes uma vez que, ao aproximar o microfone e mantendo o *MyDAQ* na posição inicial, se verificou o surgimento da onda à medida que o microfone se aproximava do gerador *Van de Graaff*, indicando que o pico de tensão poderia ter origem no microfone.

Por fim, o terceiro teste é bastante esclarecedor sobre a origem do sinal, uma vez que sem qualquer microfone, o sistema de aquisição de dados detecta um pico de tensão sempre que ocorre uma descarga eléctrica, sendo, no entanto, menos intenso do que com um microfone presente.

O facto de este pico surgir sem qualquer microfone sugere que o mesmo seja relacionado com alguma propriedade da descarga que não o som: a explicação mais plausível é a de o pico ser referente a uma tensão comparável com a tensão TEV anteriormente referida, em frequência (na banda superior de UHF), e de antecipar a chegada do som, por se propagar a velocidade muito maior.

Deste modo, o pico de sinal observado resulta da recepção e captação numa “antena” de um sinal de radiofrequência emitido por cada descarga eléctrica, e, uma vez que surge unicamente devido a descargas eléctricas, é possível criar um sistema de detecção de descargas altamente fiável, i.e., assinalando todas as descargas e sem originar falsos alarmes. Contudo, como testado, este pico deixa de surgir para distâncias de captação superiores a cerca de 5 m, em casos de descarga eléctricas de muito baixa intensidade (tipicamente não audíveis).

Para aplicação em transformadores, será necessário realizar uma bateria de testes para averiguar a sua viabilidade na detecção de descargas parciais ocorridas na massa de óleo, de intensidade inferior às descargas atmosféricas e com a carcaça do transformador a blindar a propagação de radiofrequência. Assim, neste caso de aplicação, estima-se que o pico de sinal não seja captado, sendo a detecção de descargas conseguida através da captação de ultrassons, na banda de 40 kHz.

2.3 Conclusão

Ao longo dos vários testes efectuados, foi possível verificar que a filtragem do microfone MEMS é bastante rudimentar, o que não se verifica com os microfones piezoeléctricos. Ainda, a sensibilidade dos MEMS permite, ao contrário dos microfones piezoeléctricos, que sejam detectadas variadas fontes de ruído indesejadas, como estalos, palmas ou outros sinais possíveis de ocorrer junto de um subsistema, em resultado da presença humana.

Os microfones piezoeléctricos apresentam, além de uma resposta em frequência bem definida e com um factor de qualidade bastante elevado, sensibilidades muito apreciáveis para as frequências de ressonância, gerando sinais de amplitude considerável em resposta a descargas eléctricas. Sendo assim, a amplificação necessária para estes microfones é muito menor do que a requerida para o microfone MEMS. Estes resultados podem ser comprovados pela análise da Tabela 4, em que os piezoeléctricos apresentam bons resultados para as várias distâncias de captação.

A conjugação da filtragem e sensibilidade superior leva a que a seleção de um microfone piezoeléctrico pareça claramente mais vantajosa. No entanto, é necessário ter em atenção que os microfones piezoeléctricos sofrem de bastante atenuação quando é colocado algum obstáculo entre o microfone e a fonte sonora, devido à elevada direcionalidade dos mesmos. Para resolver este problema na fase de desenvolvimento

de produto, este poderá ter uma tampa de um material fino e pouco absorvente e/ou com uma entrada de som na sobre o microfone, sem prejuízo do grau de protecção em relação aos agentes ambientais adequado.

Também, os microfones piezoeléctricos apresentam uma vantagem importante em relação aos MEMS: não necessitam de ser alimentados, ao contrário dos MEMS; esta característica permite que, mais facilmente, sensores inteligentes possam dispensar fios para a sua alimentação, assim sendo constituídos como nós de redes de sensores sem fios.

Concluindo: a utilização de um microfone piezoeléctrico é mais vantajosa tanto pela facilidade de integração num circuito eléctrico devido a não requerer alimentação, filtragem ou uma elevada amplificação. A própria frequência de ressonância dos piezoeléctricos, nos 40 kHz é uma vantagem em relação ao microfone MEMS, uma vez que, para descargas pouco intensas, a menor atenuação do som no ar dá-se nessa frequência, como referido anteriormente.

3. Detecção de descargas parciais em subestações MT/BT

3.1 Objectivos específicos:

Nos postos de transformação, grande parte das descargas que ocorrem nos transformadores surgem, devido à erosão e envelhecimento, nas suas travessias, por defeitos nas peças de regularização de campo eléctrico (isoladores de passagem) na área de inserção dos cabos. Também junto da entrada de cabos de AT, existem dispositivos de protecção, os descarregadores de sobre-tensões.

Como forma de protecção adicional do transformador, existem órgãos de comutação automática (disjuntores) para proteger os circuitos e os activos eléctricos em casos de sobrecorrentes. Nos disjuntores, podem ocorrer descargas entre os seus pólos devido à erosão das molas de suporte ou igualmente na zona de corte, quando ocorre a abertura do circuito. Para a zona de corte é muito frequente ser utilizado o gás isolante SF₆. A Figura 41 ilustra os isoladores de passagem e disjuntores:



Figura 41- Travessias de um transformador e respectivos descarregadores e disjuntor com isolamento a gás SF₆ (EDP Distribuição, 2010) (Efacec, 2015)

A necessidade de monitorização de descargas eléctricas em postos de transformação decorre da efectiva existência de descargas na entrada do transformador e no disjuntor, que aceleram o processo de degradação do sistema, obrigando a mais acções de manutenção. Em casos limites, podem ocorrer explosões do transformador ou do disjuntor, colocando em risco a vida de trabalhadores e de transeuntes.

3.2 Mecanismo de Integração:

Esta unidade de sensor inteligente foi projectada para ser integrada numa rede de sensores, que enviam dados para um sistema de informação central, onde a informação é armazenada e organizada para ser presente e processada por um *software* SCADA. É,

assim, necessário definir a forma como esta integração será realizada e como a informação será transmitida.

Como referido na introdução, a ideia corrente para o desenvolvimento dos mais variados equipamentos, seja para fins de uso pessoal, comercial ou industrial tem como referência a *Internet of Things*, ou seja a criação de sistemas embebidos que se integrem numa rede sem fios inteligente com outros sistemas (Reiter, 2014).

As redes eléctricas inteligentes (*smart grids*) possibilitam, para fins relacionados com a monitorização de sistemas, a criação de mecanismos de larga escala de gestão e manutenção dos activos, assim aumentando a qualidade do sistema de distribuição de energia. A integração de uma tecnologia sem fios para a criação das redes inteligentes é preponderante para o bom funcionamento de uma rede inteligente, tanto por facilitar a integração de novos activos na rede, como pela comunicação de longo alcance que suporta.

No mercado actual existem diversas tecnologias sem fios disponíveis para suportar a necessária capacidade de comunicação remota com outros sistemas. A Figura 42 ilustra as características fundamentais das tecnologias mais divulgadas no mercado:

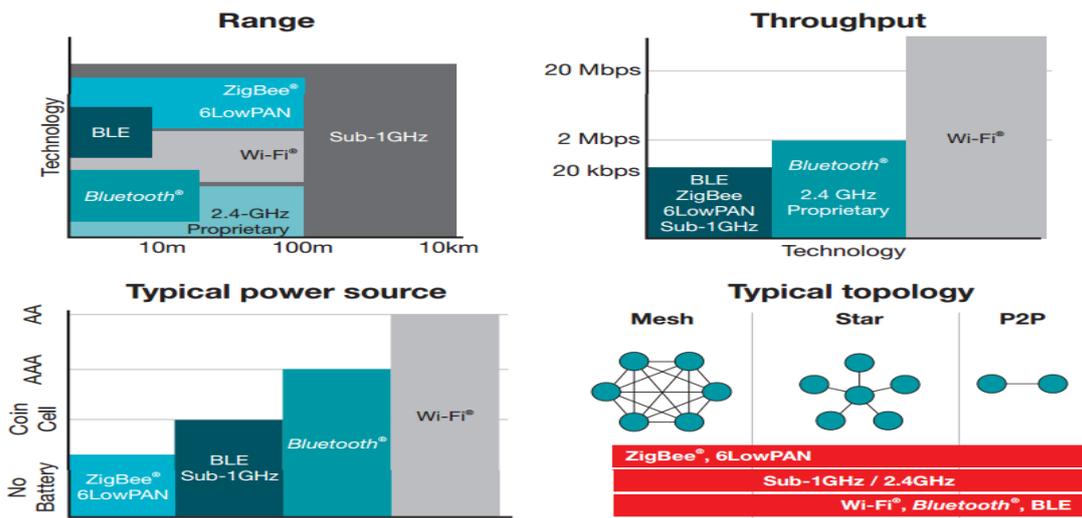


Figura 42- Características das várias tecnologias de comunicação sem-fios (Reiter, 2014).

A tecnologia ZigBee permite comunicar com uma relativamente baixa taxa de transferência, baixo consumo energético, baixo custo, suportando arquitecturas de topologia emalhada. A maioria das aplicações no mercado para o ZigBee estão integradas em soluções de energia inteligente, automatização do lar e controlo de sistemas. O ZigBee é, na actualidade, a tecnologia de comunicação remota de sistemas

embebidos mais utilizada no mercado industrial, muito contribuindo para suportar a relação directa entre peças de equipamento (Machine-to-Machine, M2M). Adicionalmente, o baixo consumo permite que os sistemas sejam alimentados através de tecnologias diversas de captação de energia do meio envolvente (energy harvesting), aumentando ainda mais a capacidade de utilização remota de dispositivos com este tipo de tecnologia de comunicação. (Reiter, 2014). A conformidade na utilização de um protocolo de comunicação é um passo fundamental para o processo de integração de sistemas em redes: a escolha da tecnologia de comunicação ZigBee permite aumentar a compatibilidade do sensor a desenvolver, facilitando o processo de integração em redes e protocolos já existentes (Cardoso F. , 2014).

No entanto, o alcance-rádio médio da tecnologia *ZigBee* impede que, directamente, seja transmitida informação a longas distâncias, até ser recebida por um sistema central. Como a finalidade destes sistemas consiste na monitorização dos muitos activos de distribuição de energia eléctrica espalhados pelo País, é necessário conceber uma solução que permita a comunicação de todos os sistemas dispersos para um sistema central remoto. Desta forma, a solução adoptada consistiu em recorrer a uma *gateway*, que recebe os dados de vários módulos localizados na sua vizinhança em protocolo *ZigBee* e os envia, por GPRS, para o sistema central.

Esta *gateway* não serve, apenas, para receber e enviar os dados de forma “transparente”, mas permitirá concentrar os dados de vários sensores, associá-los e reduzi-los (fusão sensorial) e organizar a comunicação com a unidade de hierarquia superior, no sistema central. Deste modo, o volume de informação e a frequência de comunicação serão controlados, através de critérios programados relativos a taxa de ocorrência de descargas e respectivas intensidades, evitando assim o envio de uma grande quantidade de dados desnecessários que iriam sobrecarregar a base de dados e atrasar a análise no sistema SCADA.

Desta forma a possível rede do sistema global a implementar está referido na Figura 43:

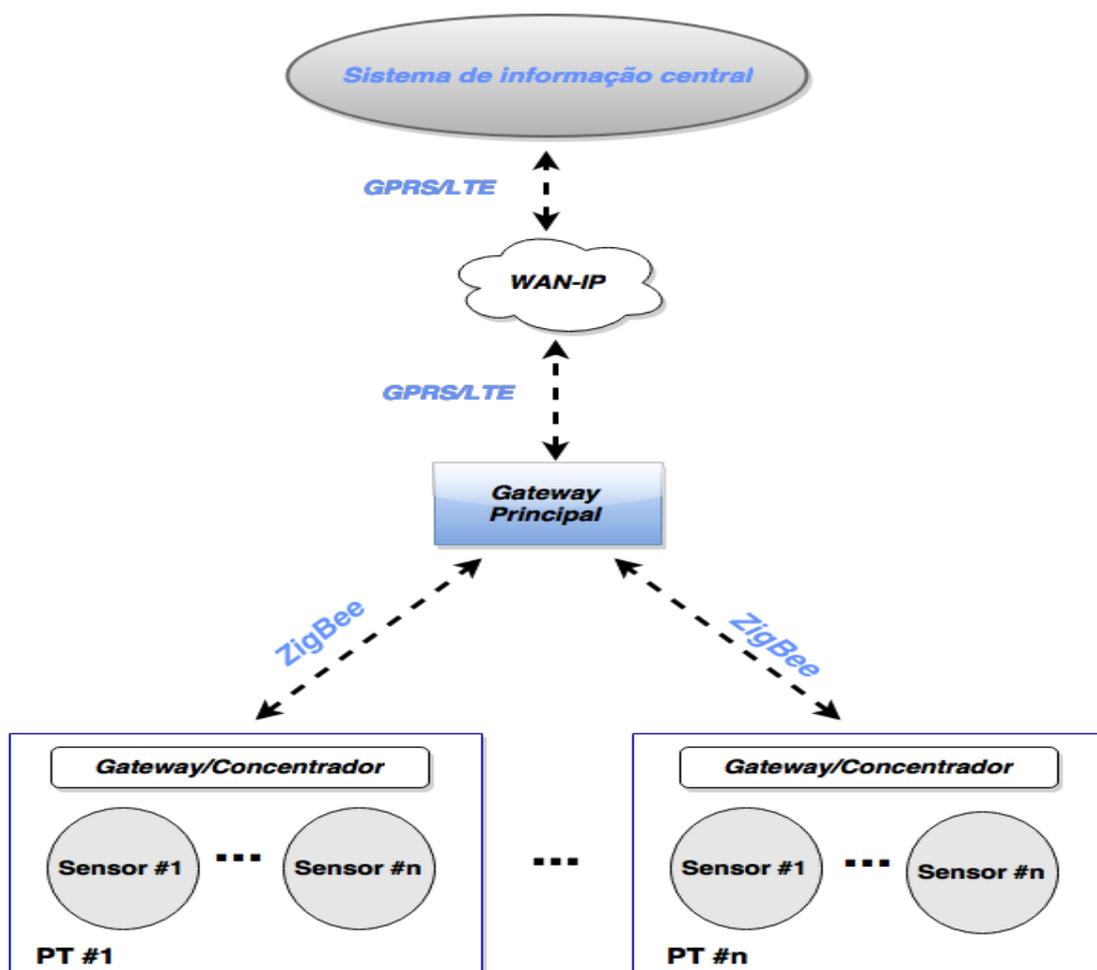


Figura 43-Arquitetura geral do sistema.

3.4 Características do sistema

O sistema global é constituído por unidades hierarquicamente relacionadas, para a realização das funções seguintes:

- Sensor inteligente:
 - Sensorização;
 - Aquisição e tratamento de dados;
 - Comunicação;
 - Alimentação.
- Sistema central:
 - Armazenamento e organização dos dados recebidos, para análise em sistema SCADA;

A Figura 44 ilustra o possível esquema de monitorização local num posto de transformação:

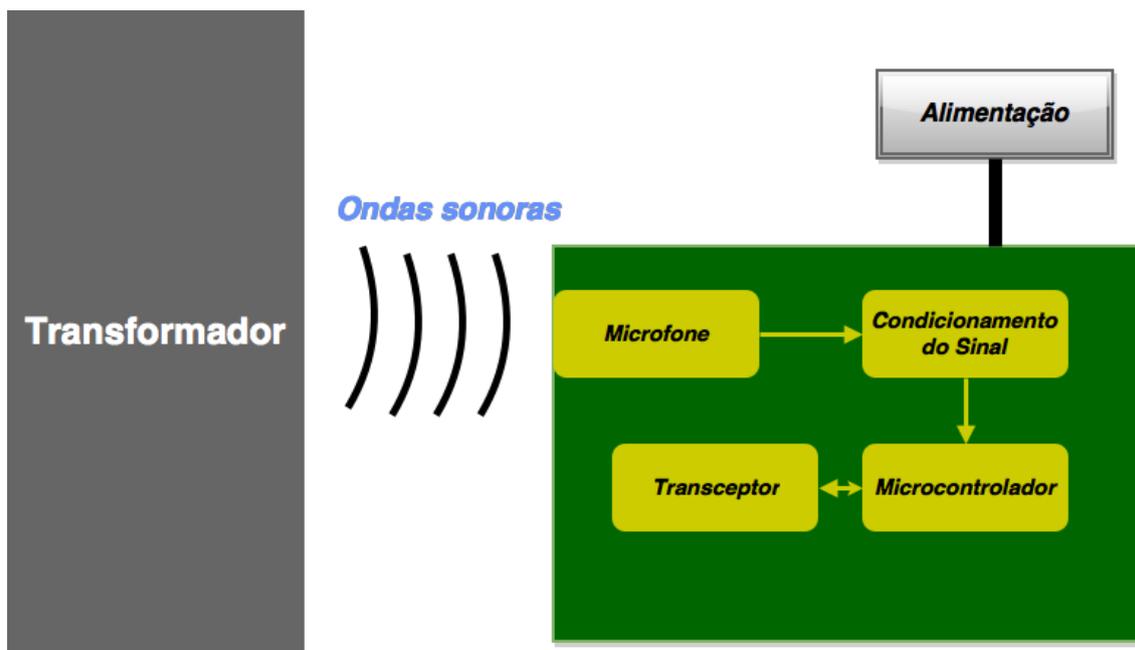


Figura 44-Sistema de monitorização num posto de transformação.

3.4.1 Sensorização

A sensorização é realizada através do microfone de ultrassons com melhores resultados no capítulo anterior, o microfone *Prowave 400PT160*. Nos postos de transformação, a unidade deverá estar afastada do transformador para que o microfone possa captar as ondas sonoras provocadas pelas descargas nas travessias. Devido ao ângulo de abertura do microfone ser de $\pm 30^\circ$, existe a possibilidade de apenas um microfone ter a capacidade de captar as descargas tanto dos transformadores como dos disjuntores, uma vez que, em geral, se encontram próximos um do outro. Caso não seja possível deverá ser utilizado um microfone adicional para a detecção das descargas apenas nos órgãos de comutação.

Os sinais de saída do microfone são tratados por um circuito de interface adequado. O circuito de terminação e condicionamento de sinal é constituído por quatro fases: amplificação diferencial, rectificação de precisão, detecção de pico de amplitude máxima de precisão, comparação do pico com três tensões de referência diferentes e recurso a três acopladores ópticos para isolamento do circuito.

3.4.2 Condicionamento do sinal - detecções de ocorrências

3.4.2.1 Amplificação

A amplificação do sistema será realizada com base no seguinte circuito desenhado em *MicroCap*:

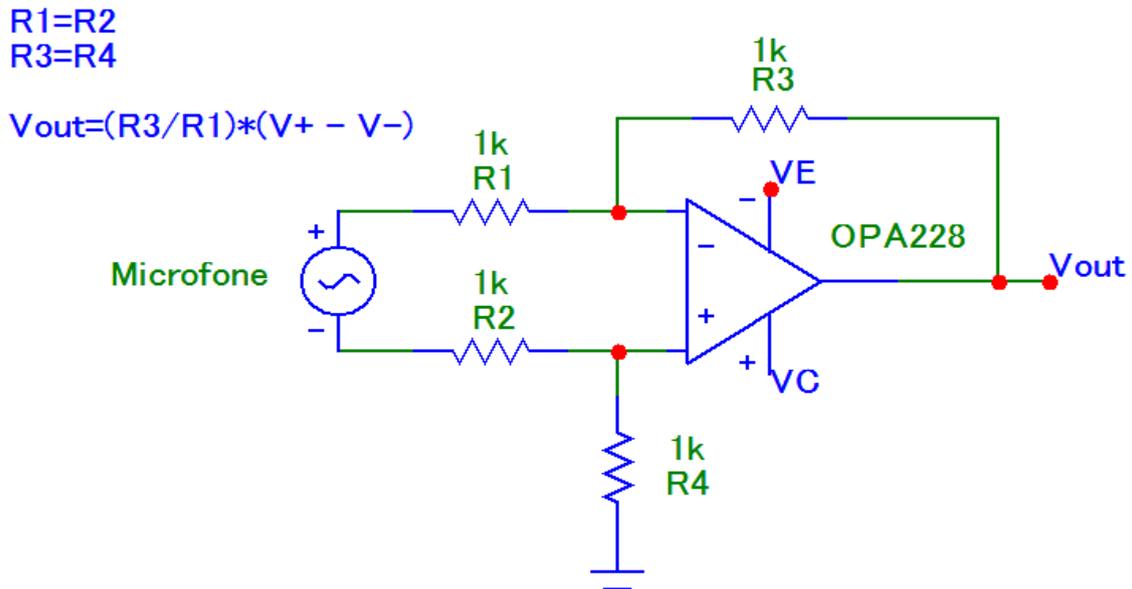


Figura 45-Circuito de amplificação diferencial do sensor inteligente.

A terminação de sinal é realizada com recurso a um amplificador em montagem diferencial, resultando um sinal de saída referido à terra, com uma boa relação sinal/ruído. Para tal, foi seleccionado um amplificador com boas características de baixo ruído, baixas correntes de polarização, elevadas *slew rate* e impedância de entrada, e baixos *offset* e sua deriva térmica.

O amplificador escolhido para esta aplicação foi o amplificador de precisão OPA228P da *Texas Instruments*, que, sendo de baixo custo, é muito usado em aplicações de áudio devido à boa performance que apresenta para os parâmetros mais importantes para este tipo de aplicações (Texas Instruments, 2015).

3.4.2.2 Rectificador de Precisão

A Figura 46 ilustra o circuito de rectificação a utilizar no sensor inteligente:

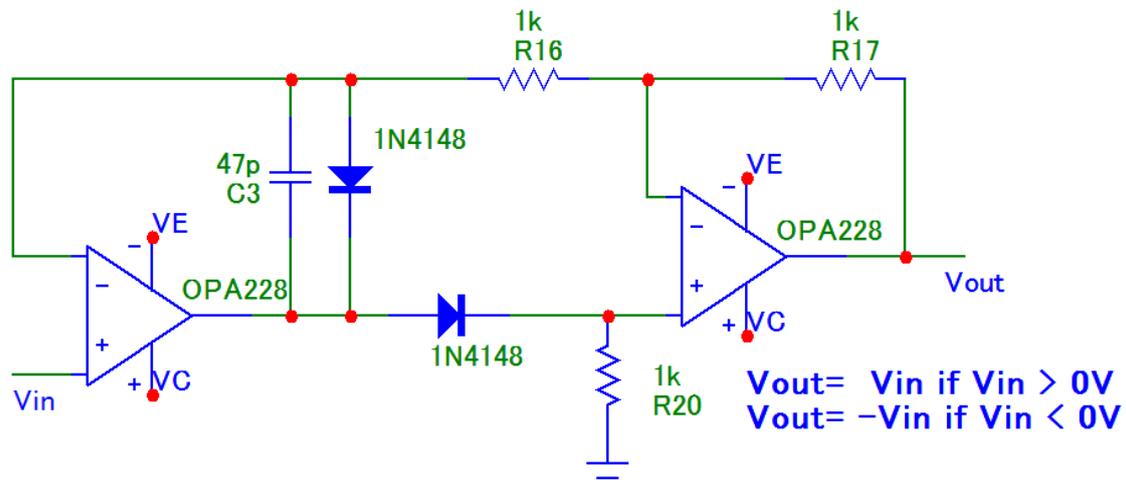


Figura 46- Circuito de rectificação do sensor inteligente.

A rectificação de precisão permite obter um sinal de saída sinusoidal positivo, ao retificar a tensão negativa de um sinal sinusoidal de entrada para uma tensão simétrica mas positiva. O circuito de rectificação, visto que o detector de pico apenas apresenta resposta para sinais positivos, permite criar um dispositivo mais fiável, pela possibilidade de existirem sinais com excursões de tensão negativa superiores às arcadas positivas, em resultados de atenuação progressiva no tempo.

O circuito de rectificação apresentado baseou-se no circuito proposto pela *Texas Instruments* para circuitos de precisão (Ye, 2013). Para o caso do rectificador de precisão em questão, é aconselhada a utilização de componentes rápidos, precisos e com pouco ruído, de forma a ser possível obter um sinal de saída com uma qualidade elevada para altas frequências. Em relação ao díodo, escolheu-se o díodo “rápido” 1N4148, devido à sua elevada velocidade de transição, baixos valores de queda de tensão, de capacidade e de corrente de fuga, permitindo obter elevada linearidade e excelente resposta em frequência. Foram utilizados amplificadores de precisão OPA228, tal como no andar diferencial de terminação de sinal, uma vez que o baixo ruído, baixa distorção harmónica, elevada *slew rate* e elevada largura de banda são características adequadas para os resultados pretendidos. Os componentes passivos, resistências e condensador, permitem obter uma saída em tensão igual à de entrada e diminuir a distorção do sinal nas zonas de transição, assim é recomendado a utilização de resistências com 0,1% de tolerância.

3.4.2.3 Detector de pico de precisão

A Figura 47 demonstra a detecção de pico do sensor:

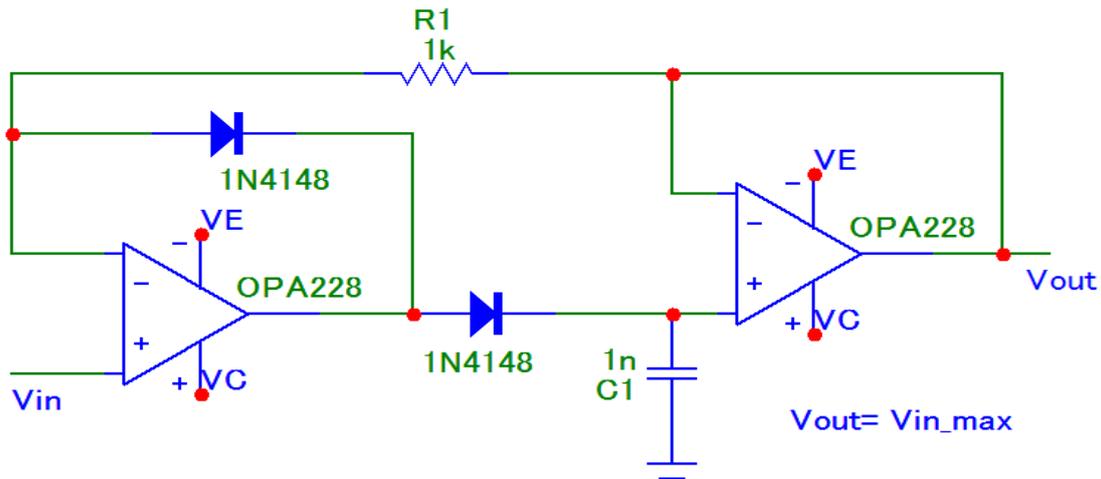


Figura 47- Circuito de detecção de pico do sensor inteligente.

O detector de pico permite obter um sinal de tensão constante equivalente ao pico de tensão máximo do sinal à saída do rectificador. O primeiro amplificador tem como objectivo criar uma tensão de saída igual à tensão de entrada. O condensador carrega e atinge um valor de tensão igual à tensão do amplificador. Quando ocorre uma queda de tensão na saída do amplificador o condensador mantém o nível de tensão devido ao diodo utilizado.

A utilização do diodo à saída do primeiro amplificador impede que haja a passagem de corrente do condensador, evitando a descarga do mesmo. Impede, assim, que ocorra uma queda de tensão no condensador quando o sinal de saída do amplificador desce, mantendo o valor do pico de tensão máxima. O segundo diodo aumenta a estabilidade do circuito de detecção, permitindo a sua utilização em ambientes de elevada frequência, uma vez que previne a oscilação do amplificador nas zonas de transição (EEVblog, 2013).

O circuito de detecção de pico é baseado no programa de estudo sobre circuitos de precisão da Universidade de *Ottawa* no Canadá. Este circuito permite manter a tensão de pico durante um tempo bastante superior do que num detector de pico simples, devido à utilização de um amplificador secundário para realimentar o condensador (Habash, 2010). Os componentes para a criação de um detector de pico de precisão necessitam de ter características semelhantes às do rectificador de precisão e ao amplificador diferencial, de forma a não ocorrerem distorções do sinal. Por

consequência, é natural escolher os amplificadores OPA228 e o diodo 1N4148 também para o circuito de detecção de pico.

3.4.2.4 Comparadores

A parte de comparação do circuito é baseada na seguinte montagem para os três comparadores na Figura 48:

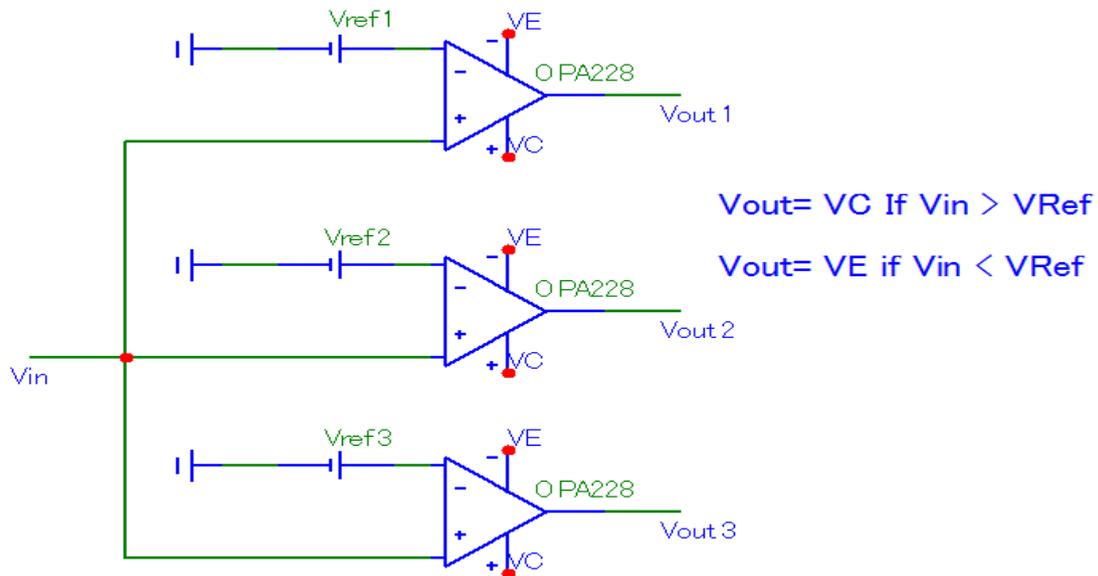


Figura 48-Circuito de comparação do sensor inteligente.

À saída do detector do pico estão presentes três comparadores, em que o sinal de saída varia consoante a tensão do sinal do detector de pico em relação à tensão de referência utilizada. Podem ocorrer dois casos: (i) a tensão do sinal do detector ser inferior à tensão de referência, em que a tensão na saída do comparador é igual à tensão de alimentação negativa, e (ii) a tensão de saída do detector ser superior à tensão de referência, em que a saída do comparador iguala a tensão de alimentação positiva.

Para o circuito comparador foram utilizados os OPA228, como nos restantes circuitos, tanto devido à sua performance como pelo facto de ser mais fácil e económica a sua integração no circuito. Como opção alternativa poderiam ter sido utilizados disparadores de *Schmitt*, para tirar partido da sua histerese, como ilustrado na Figura 49.

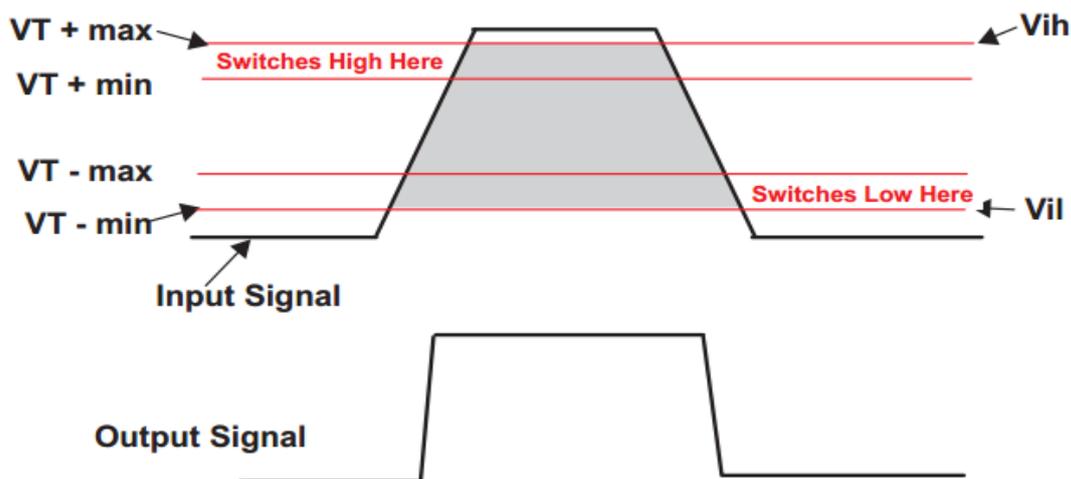


Figura 49- -Princípio de operação de um disparador Schmitt (Cockrill, 2011).

De facto, os disparadores de *Schmitt* são bastante usados para sinais com bastante ruído ou para sinais muito rápidos, permitindo obter um maior intervalo de tempo para a possível análise do comparador (Cockrill, 2011). Uma vez que o sinal tratado é um sinal dc, de baixo ruído e que mantêm o seu valor durante um intervalo de tempo apreciável (~ 500 ms), a utilização deste tipo de comparador não é necessária.

3.4.2.5 Acopladores ópticos

A Figura 50 representa o circuito dos acopladores ópticos do sensor inteligente:

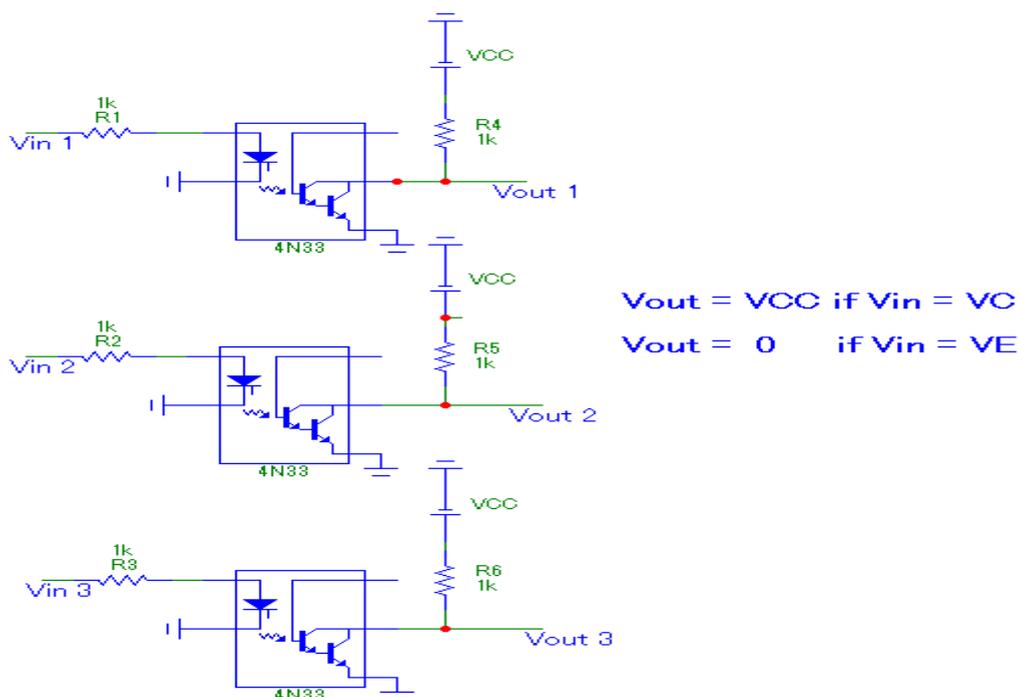


Figura 50- Circuito dos acopladores ópticos do sensor inteligente.

Na saída de cada um dos comparadores está ligado um acoplador óptico, que é utilizado para isolar o microcontrolador do circuito eléctrico de entrada, protegendo-o. Tal como no caso dos comparadores, podem ocorrer dois regimes à saída do coletor do transístor, conforme a tensão de saída do comparador: (i) a tensão de entrada ser positiva, em que o LED acende e o transístor satura, e (ii) a tensão de entrada ser negativa, caso em o LED está apagado e o transístor está ao corte, sendo a queda de tensão na resistência nula.

3.4.2.6 Simulação do circuito e resultados

A Figura 51 ilustra o circuito completo do condicionamento de sinal do sensor:

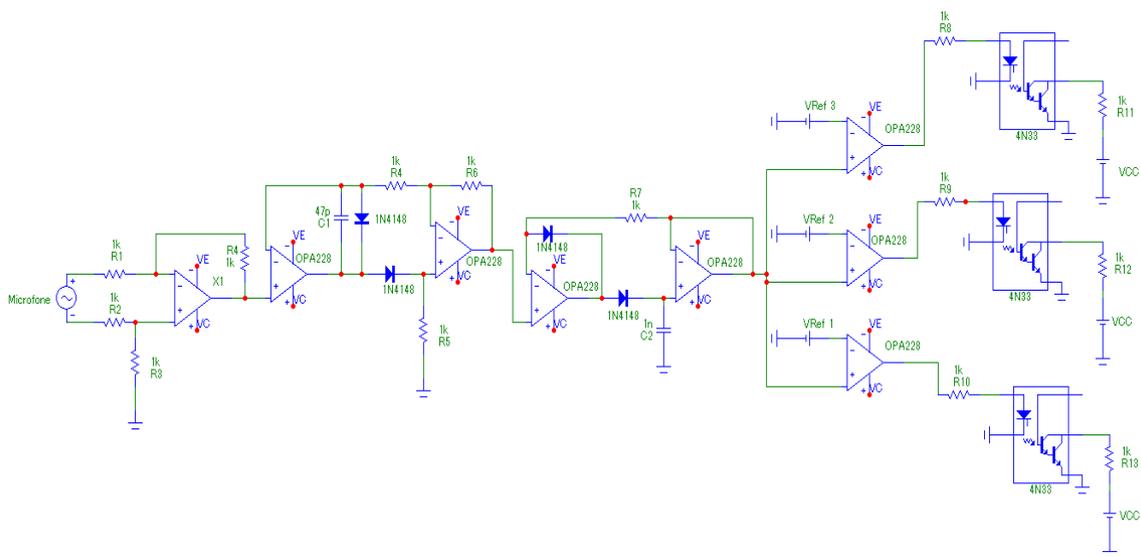


Figura 51- Circuito de condicionamento de sinal completo.

O circuito foi desenhado no *software MicroCap 10*, de forma a realizar uma simulação dos resultados expectáveis. Desta forma, simulou-se um sinal sonoro com pico de aproximadamente 400 mV e com uma frequência de 40 kHz, para simular a resposta do sistema. Não se considerou amplificação do sinal, e foram seleccionadas três tensões de referência diferentes, 100 mV, 200 mV e 300 mV. Os seguintes resultados foram obtidos, como ilustrado na Figura 52:

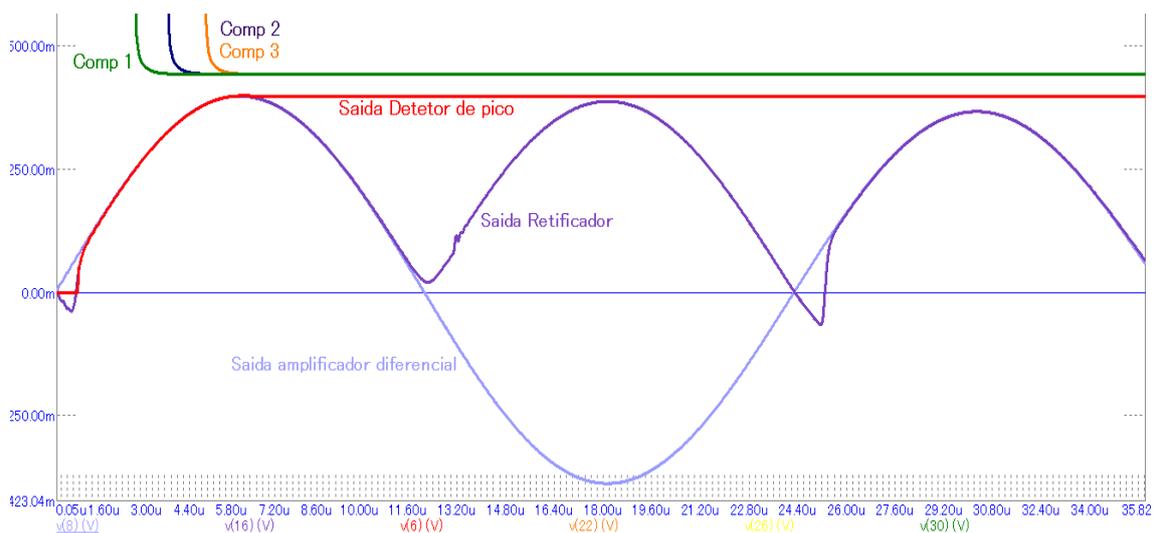


Figura 52- -Resultados da simulação do circuito desenhado em MicroCap.

Os resultados obtidos permitem verificar que o circuito responde da forma esperada, uma vez que os sinais à saída, tanto do retificador como do detector de pico, correspondem ao esperado. Os três acopladores sofrem igualmente uma queda de tensão de 5 V para aproximadamente 0,5 V, o que não é muito perceptível devido à escala de representação utilizada. Esta queda é esperada, uma vez que o pico de tensão máximo é superior às três tensões de referência.

Apesar dos resultados obtidos, é possível observar uma ligeira distorção do sinal do retificador de precisão nas zonas de transição do sinal. Tal ocorre devido à elevada frequência do sinal e sua baixa amplitude: este resultado é esperado com os componentes utilizados (Ye, 2013). De forma a eliminar ou diminuir esta distorção seria necessário utilizar componentes com melhor qualidade, principalmente em relação à velocidade de resposta e distorção harmónica dos amplificadores. No entanto, estas deformações de onda não afectam a obtenção do pico de tensão e, por esse motivo, podem ser menosprezadas, evitando a utilização de componentes de custo mais elevado.

Realizou-se uma segunda simulação, para conhecer a resposta do sistema para um sinal em que a tensão máxima não corresponda ao primeiro pico, de forma a averiguar se o primeiro pico detectado pode sofrer alterações, caso surja uma tensão mais elevada posteriormente. Adicionalmente, diminuiu-se a tensão máxima do sinal de entrada, de forma a testar a resposta dos comparadores, sendo expectável que apenas dois comparadores sofram uma alteração na resposta. Desta forma, a onda tem uma tensão máxima de 250 mV e os comparadores têm tensões de referência de 100, 200 e 300 mV. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 53.

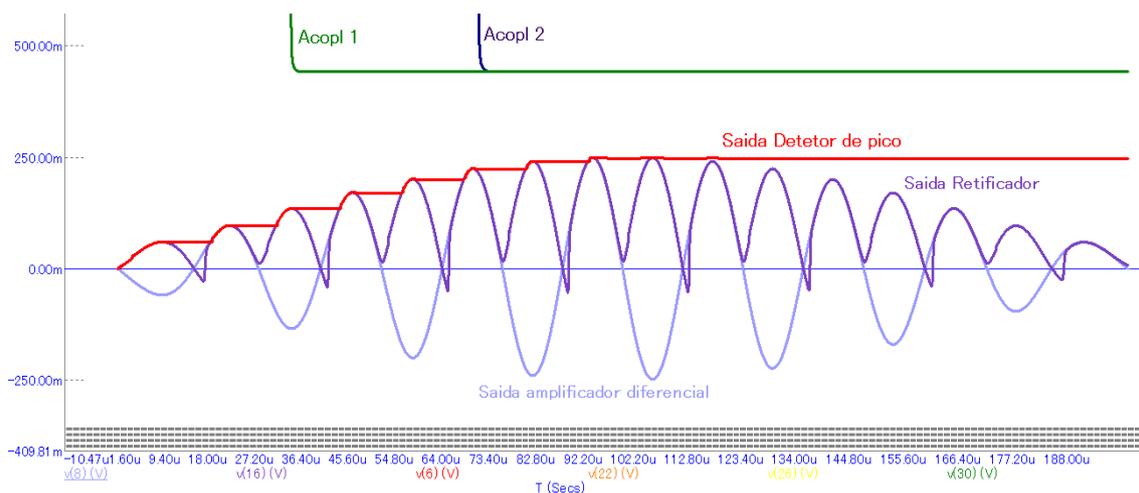


Figura 53- Resultados da 2ª Simulação do circuito desenhado em MicroCap.

A simulação permitiu verificar que o pico de uma primeira detecção varia de acordo com sinal de entrada, mesmo que um primeiro pico tenha sido detectado. Verifica-se que os comparadores funcionam conforme esperado, uma vez que o terceiro acoplador não sofre queda de tensão.

3.4.2.7 Montagem do circuito, testes e resultados

Com os resultados obtidos, verificou-se que o circuito de condicionamento respondia da forma desejada. Desta forma, procedeu-se à montagem do circuito numa *breadboard*, procurando confirmar os resultados das simulações (Figura 54).

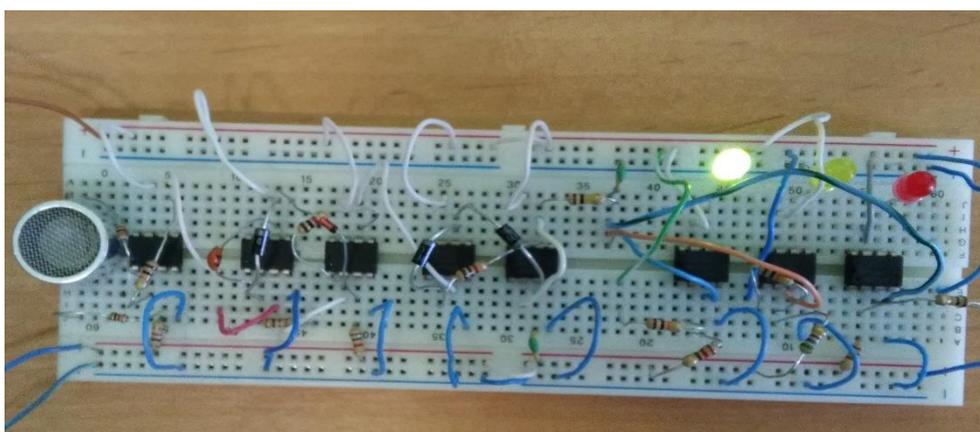


Figura 54- Montagem do circuito.

Para a montagem do circuito, não foram incluídos os acopladores ópticos, uma vez que não eram essenciais para o teste; no entanto, foram utilizados três LED para observar a resposta do circuito com a variação da intensidade da descarga. De igual modo, não foi possível utilizar díodos 1N4148, tendo sido utilizado díodos 1N4007. Estes díodos apresentam características inferiores aos 1N4148, principalmente na

velocidade de transição, em que este é superior por duas ordens de grandeza (4 ns, no máximo, para o díodo 4148, e 500 ns no caso do 4007 (Digikey, 2015) (NXP Semiconductors, 2009).

Desta forma, é esperado que os resultados obtidos sejam inferiores aos simulados, principalmente na capacidade de atingir o pico de tensão máxima. No entanto, não deixa de ser importante verificar se o sistema se comporta como esperado, enaltecendo o teste realizado.

3.4.2.7.1 Primeira Fase de Testes

No primeiro teste, analisou-se a resposta do sistema a um sinal de frequência variável, com recurso a um gerador de sinal sinusoidal e a um osciloscópio. Neste teste, foi possível observar que o sistema responde como esperado para frequências inferiores a 1 kHz. No entanto, à medida que a frequência é aumentada, o sinal de saída apresenta um valor inferior ao da amplitude máxima do sinal de entrada, certamente pelos díodos utilizados, que apresentam tempos de transição muito longos.

3.4.2.7.2 Segunda Fase de Testes

De seguida, comparou-se a resposta do sistema a uma descarga eléctrica e a um choque metálico, sendo analisada a tensão à saída do amplificador diferencial e à saída do detector de pico. Utilizou-se um ganho de 10 para a montagem diferencial. Os resultados obtidos para verificar a resposta do sistema foram analisados com recurso ao sistema de aquisição de dados MyDAQ da National Instruments, em conjunto com o *software* NI Signal Express.

No caso de descarga eléctrica, os testes realizados permitiram observar a presença do pico de tensão que já surgia nos testes do capítulo anterior, pela captação da radiação electromagnética produzida pela descarga (Figura 55).

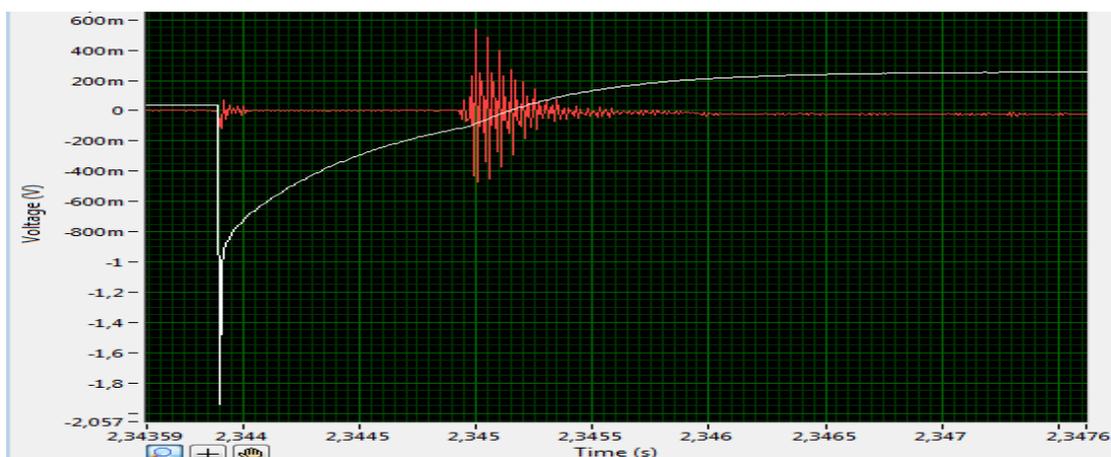


Figura 55-Sinais obtidos na captação de uma descarga. A vermelho está o sinal à saída do amplificador diferencial. A branco o sinal à saída do detector de pico.

Quando este pico ocorre, verifica-se uma queda brusca da tensão na saída do detector de pico, para valores negativos elevados. É, igualmente, observada uma subida para o valor de referência, logo após a queda, mas muito mais lenta.

Seguindo o sinal de radiofrequência captado, surge o sinal relativo à onda sonora de 40 kHz captada pelo microfone, verificando-se que a filtragem se realiza com elevado factor de qualidade (Figura 56).

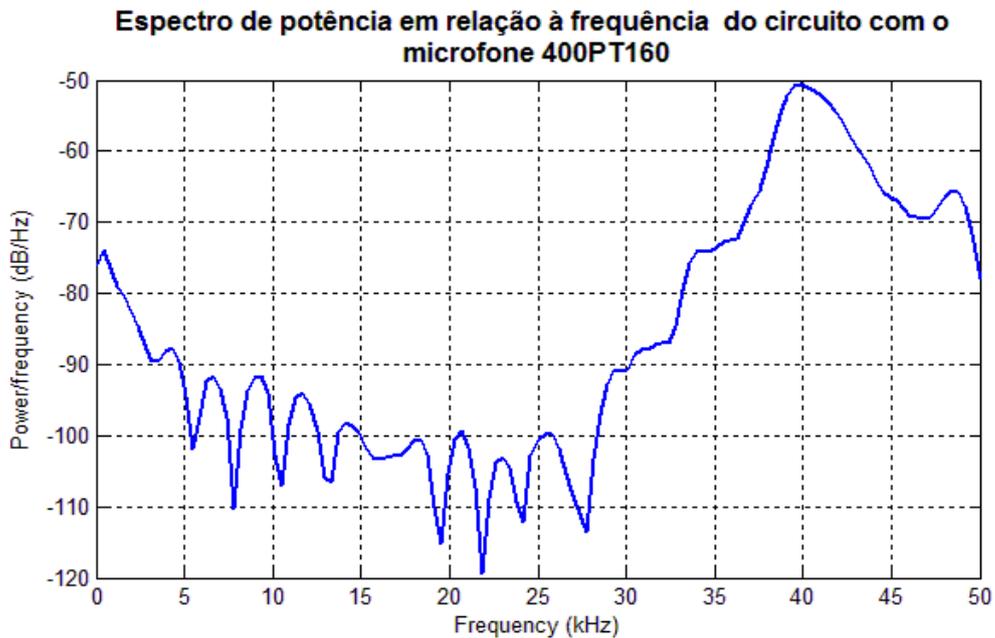


Figura 56- Espectro de potência do circuito.

A tensão à saída do detector de pico aumenta com o surgimento da onda, com o objectivo de igualar o pico de tensão máximo do sinal de 40 kHz. No entanto, como verificado no primeiro teste, o sistema não tem a capacidade de detecção de pico para frequências elevadas devido aos díodos utilizados, atingindo um valor substancialmente inferior ao de tensão máximo.

No caso da detecção de um choque de metal com metal, verificou-se que não ocorre a queda de tensão no detector de pico nem está presente o sinal de radiofrequência. Este resultado já era esperado, uma vez que o choque de metal, ao contrário de uma descarga eléctrica, não origina ondas electromagnéticas (Figura 57).

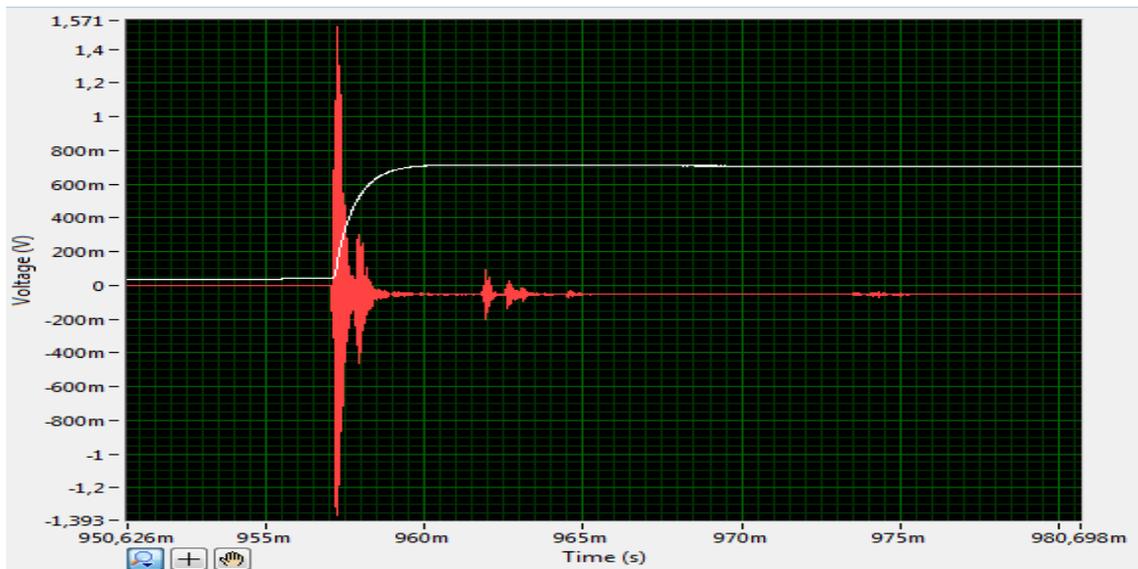


Figura 57- Sinais obtidos na captação de um choque de metal. A vermelho está o sinal à saída do amplificador diferencial. A branco o sinal à saída do detector de pico.

Assim, a única onda presente no sinal corresponde a 40 kHz, sendo possível observar que, novamente, o detector de pico não apresenta um sinal de saída com a mesma intensidade da entrada.

3.4.2.7.3 Terceira Fase de Testes

As descargas nas travessias dos postos de transformação e nos disjuntores são semelhantes às geradas pelo gerador *Van de Graaff*, uma vez que ocorrem em meios gasosos, facilitando a propagação das ondas sonoras e principalmente das ondas electromagnéticas. Deste modo, como observado nos testes, devido ao facto de apenas choques eléctricos provocarem emissão de radiofrequência, optou-se por modificar o circuito projectado inicialmente para a detecção de descargas nos postos de transformação, passando de um foco na detecção de ondas sonoras para a detecção das quedas de tensão provocadas pela recepção de radiofrequência.

Foi testada a relação de dependência desta queda de tensão com a distância, variando-se a separação entre o circuito e o gerador, havendo-se verificado que não existe diferença significativa entre os valores das tensões para os vários testes. Verificou-se, ainda, que, mesmo sem o detector de pico ou o rectificador, ocorre a referida queda de tensão, sendo, assim, pouco relevante a presença dos dois componentes no circuito.

Deste modo, o novo circuito para a detecção de descargas será composto apenas pelo amplificador diferencial e um comparador. Tanto o amplificador diferencial como

o comparador têm as mesmas funções que no circuito inicial, sendo que o comparador é utilizado para registrar o momento em que ocorre a descarga eléctrica através da alteração do sinal de saída. Para o teste, foi mantido o LED na saída do comparador, de forma a verificar visualmente que o circuito detecta as descargas (Figura 58). Não foram efetuadas medidas no circuito, tanto através do osciloscópio como do *MyDAQ*, para não interferir com o circuito e, assim, realizar de forma realista a detecção de descargas eléctricas no ar, em postos de transformação.

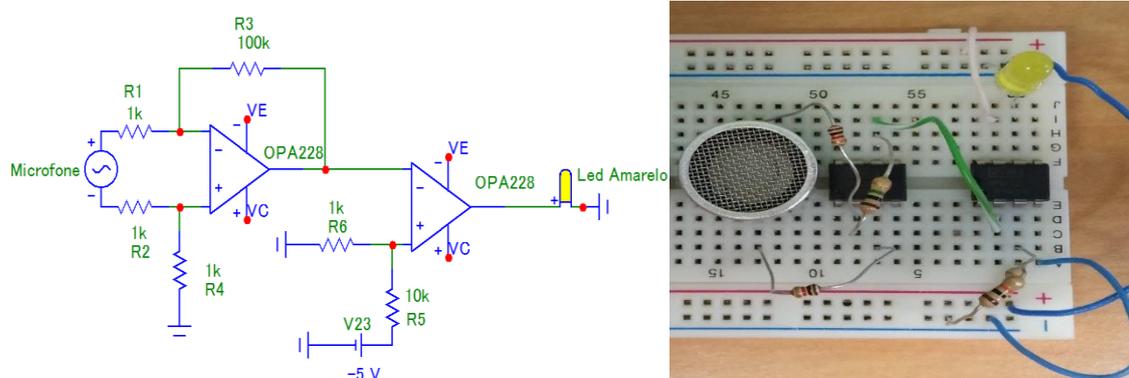


Figura 58-Desenho e montagem do circuito final.

Os testes permitiram verificar que o sistema comportou-se como esperado, uma vez que ocorria o LED sinalizou todas, e apenas, as descargas eléctricas provocadas. Como a variação da tensão de sinalização (queda e subida) é muito rápida, a iluminação do LED era fugaz, apagando-se rapidamente. Verificou-se que, aumentando o ganho do amplificador diferencial a intensidade luminosa era maior, devido ao tempo de queda e da subida da tensão serem superiores.

3.4.7.4 Conclusão sobre os testes

Com estes resultados, é possível verificar que o circuito construído permite realizar uma monitorização de descargas eléctricas muito fiável, com interferências virtualmente nulas.

No entanto, para transformadores de potência esta solução não é adequada, pois, ocorrendo as descargas em bolhas gasosas imersas no óleo de refrigeração, a atenuação das ondas electromagnéticas será muito acentuada por absorção na massa de óleo e, sobretudo, pela blindagem electromagnética da carcaça do transformador.

3.4.3 Aquisição e tratamento de dados

O tratamento de dados do sensor inteligente compreende a análise de dados e a tomada de decisões, consoante os valores obtidos.

Microcontrolador

As saídas dos comparadores são ligadas a entradas GPIO de um microcontrolador TI MSP430F5418A, através de interfaces de acoplamento óptico, que suavizam as transições de estado harmonizam os diferentes níveis de tensão representativos dos estados lógicos. A sinalização, por interrupção, das variações de estado permite determinar as ocorrências de descargas eléctricas, reportando-as com indexação temporal. Esta informação, podendo ser correlacionada na unidade *gateway* com os dados de humidade e temperatura obtidos de outro sensor, permite avaliar quão críticas são as descargas observadas e, assim, graduar as consequentes mensagens de alerta e alarme a transmitir superiormente, como referido capítulo dois.

3.4.4 Comunicação

Para suportar a comunicação entre o sensor e a *gateway*, no interior de postos de transformação, foram utilizados controladores ZigBee CC2530, da *Texas Instruments*, de baixo consumo e baixo custo.

Uma perspectiva global dos mecanismos de comunicação necessários para articular as diferentes partes do sistema, integrando-o, encontra-se ilustrada na Figura 59.

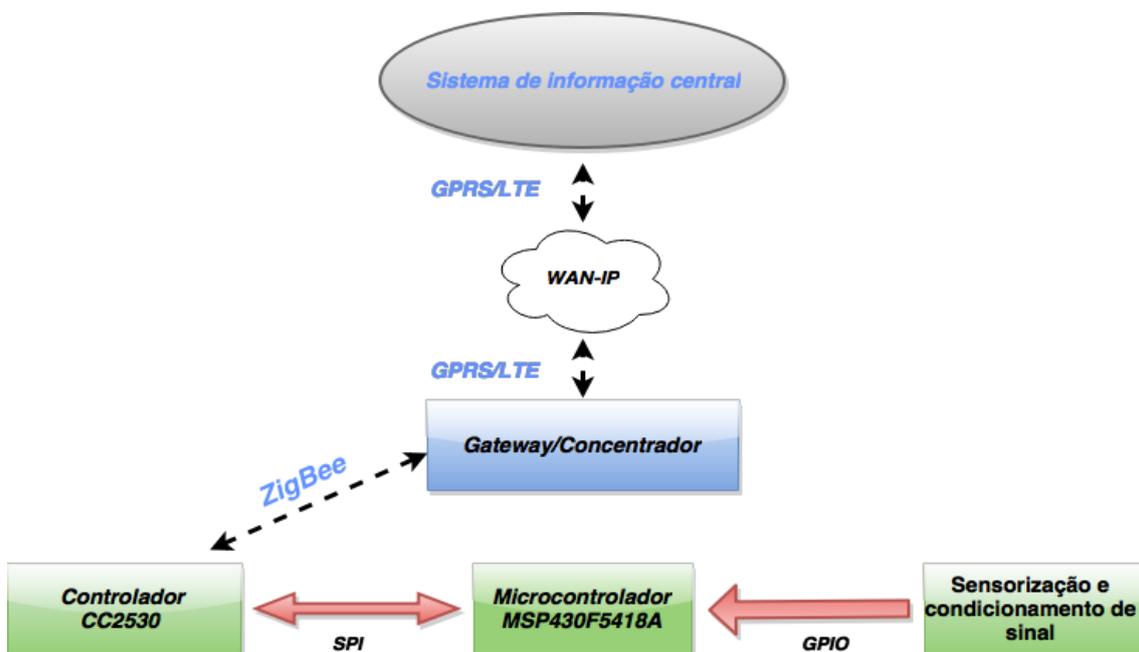


Figura 59- Esquema de comunicação do sistema.

A sensorização e condicionamento de sinal do sensor transmite os dados por entradas GPIO do microcontrolador TI MSP430F5418A, que comunica com o controlador ZigBee TI CC2530 através de SPI (*Serial Peripheral Interface*). A comunicação entre o sensor e a unidade concentradora/*gateway* faz-se por *ZigBee*, e, finalmente, a *gateway* enviará as suas mensagens através de uma rede pública sem fios, por, GPRS ou LTE, para um sistema de informação central — a referência à tecnologia LTE representa uma perspectiva evolutiva dos sistemas de telegestão, com aquela tecnologia a impor-se duplamente, técnica e economicamente.

A informação transmitida pela unidade concentradora/*gateway* sobre a Internet, é recebida por um sistema de controlo central, que a arquiva em bases de dados, a processa e representa graficamente, no âmbito de um sistema *SCADA*.

3.4.5 Alimentação

A alimentação do sensor é realizada na forma tradicional, isto é, com recurso à tensão do sector naturalmente disponível no local.

Com o baixo consumo energético do sensor, dado que o microfone seleccionado não carece de alimentação em potência e, sobretudo, pelo baixo consumo dos restantes componentes utilizados, poderá vir a ser adoptada uma forma de alimentação com recurso a *energy harvesting*, isto é, à recolha de energia ambiente circundante; uma vez que estes sensores se destinam a ser aplicados em postos de transformação cabinados, essa captação de energia deverá ser feita de campos electromagnéticos. Desta forma, por maior facilidade de integração e instalação, manteve-se a opção por alimentação cablada, utilizando uma fonte compacta ac/dc.

3.5 Conclusão

A figura 60 ilustra uma possível montagem em placa de circuito impresso do sensor inteligente foi realizada com recurso ao *software* Altium Designer, estando assinalado a localização da fonte compacta e do dissipador de calor.

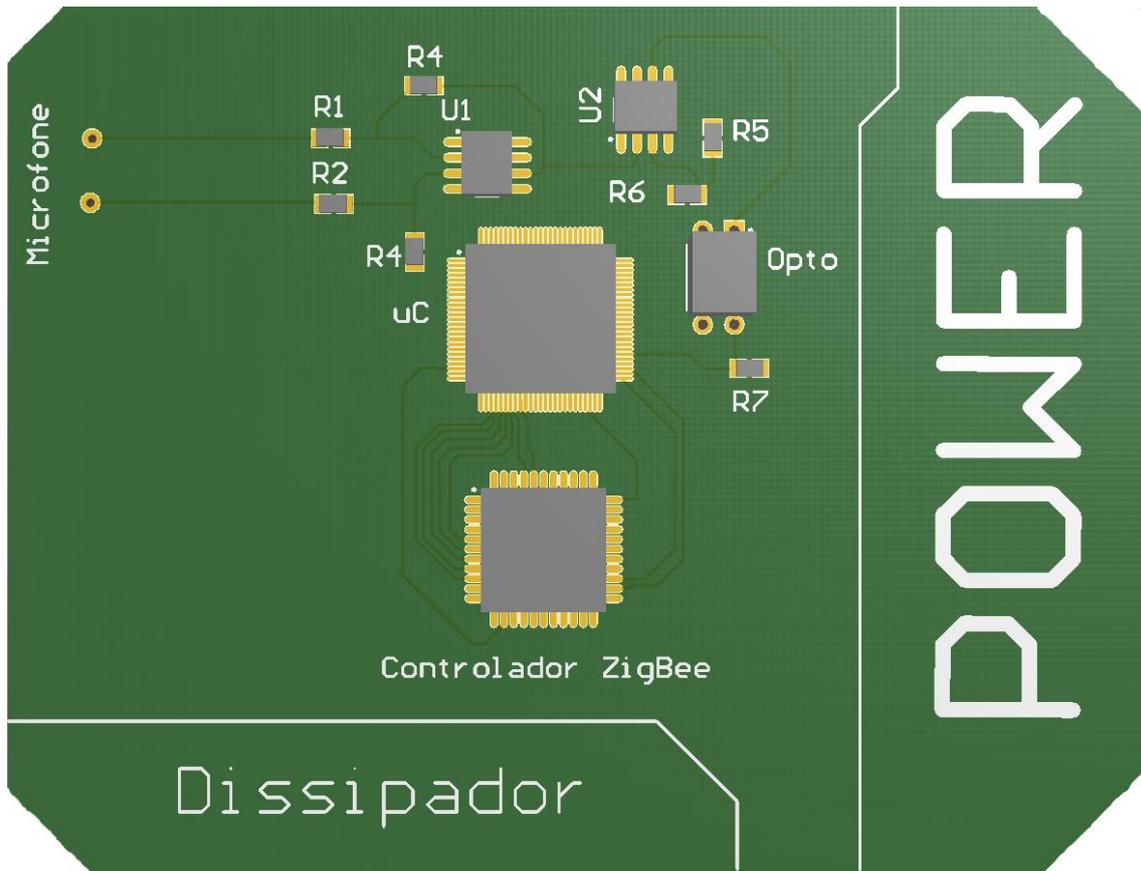


Figura 60- Montagem exemplificativa do sensor inteligente.

4. Detecção de descargas parciais em transformadores de potência de subestações primárias

4.1 Objectivos Específicos

As subestações primárias são sistemas de distribuição de energia eléctrica compostos por vários activos, sendo que os principais são os transformadores de potência, linhas de transmissão e sistemas de comutação/disjuntores. Para este projecto, o objectivo principal consiste na detecção de descargas eléctricas em transformadores de potência e em disjuntores. Como a detecção de descargas em disjuntores já foi tema de discussão no capítulo anterior, aqui será dada ênfase à detecção de descargas em transformadores de potência.

Os transformadores de potência são equipamentos de elevadas dimensões e que têm sistemas de protecção, para impedir/minimizar a existência de sobretensões, de sobrecorrentes e de sobreaquecimento (Figura 61). Em particular, para evitar o sobreaquecimento, os enrolamentos dos transformadores são imersos em óleo mineral, com boas propriedades isoladoras. Como referido no segundo capítulo, podem surgir bolhas de gás no interior do óleo, que facilitam a existência de descargas eléctricas através do gás.



Figura 61- Subestação AT/MT. Transformador de potência e linhas de transmissão (Wind Farm Construction, 2015).

A ocorrência persistente destas descargas pode danificar significativamente as propriedades isoladoras do óleo, causando a passagem de elevadas correntes em componentes do transformador que não estão preparados para essa condução. Tal ruptura do sistema pode provocar grandes incêndios que podem causar graves acidentes.

A monitorização de um sistema de distribuição de energia eléctrica é muito importante para a entidade responsável, devido ao elevado valor económico que os activos representam, assim como pelos seus custos de reparação ou substituição e, ainda, pelos tempos de interrupção do sistema e pela gravidade dos acidentes pessoais que pode provocar.

Deste modo o sensor inteligente de descargas parciais em transformadores de potência, para subestações, tem como objectivo a detecção de descargas no interior do transformador de potência, de forma a monitorizar em contínuo a condição do óleo isolador.

4.2 Mecanismo de Integração

Presentemente, os transformadores de potência já podem dispor de vários sensores para a sua monitorização e gestão, que são interligados numa rede CAN (*Controller Area Network*), um tipo de rede cablada que apresenta vantagens de simplicidade, robustez, boa performance e baixo custo de integração. Com topologia *bus*, os cabos da rede também permitem uma fácil distribuição da alimentação em potência (em 24 vdc), através de um segundo par.

A rede CAN tem como princípio de funcionamento a transmissão de um sinal diferencial num par de fios designados como CANH e CANL. Na recepção de uma mensagem, o transceptor (*transceiver*) funciona como um amplificador diferencial, transformando o sinal diferencial que recebe das linhas CAN num sinal referenciado à terra. Este sinal é transmitido para um controlador CAN, que formata as mensagens de acordo com o protocolo aí programado. As mensagens são, então, transmitidas para o microcontrolador hospedeiro, que as analisa. Na transmissão, dá-se o processo contrário, em que o controlador formata as mensagens em cadeias de bits (*data frames*), que são enviadas ao transceptor para inserção na linha de transmissão CAN (Corrigan, 2008).

A Figura 62 apresenta um exemplo ilustrativo de uma rede CAN e as suas ligações.

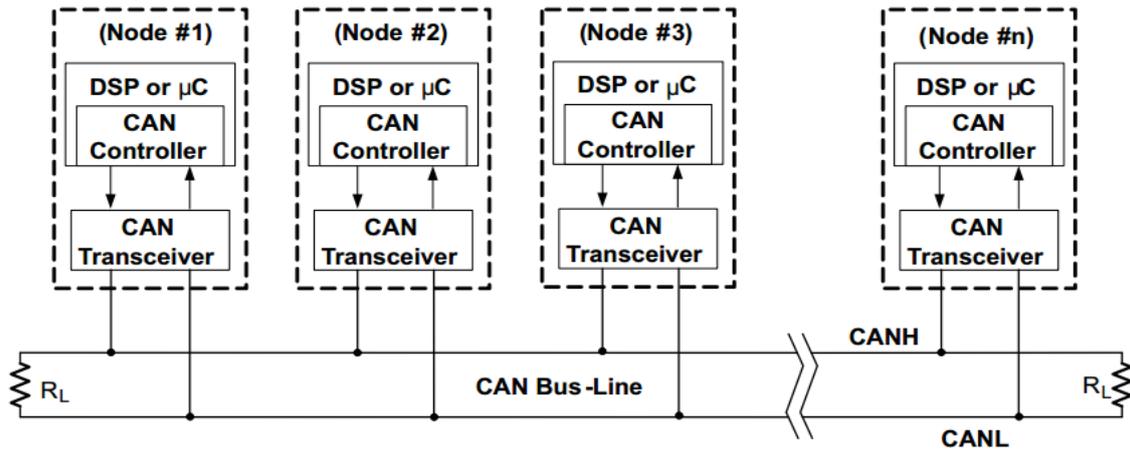


Figura 62-Exemplo de uma rede CAN (Corrigan, 2008).

Tratando-se de uma rede de topologia *bus*, os sinais transmitidos na linha CAN são recebidos por todos os nodos da rede, sendo que o controlador permite discernir se a mensagem recebida é para o seu nodo ou não. Os vários sensores que são nodos de um segmento CAN comunicam com uma *gateway*, que permite a continuidade da comunicação, para fora dessa “ilha” CAN, sobre uma rede sem fios *ZigBee* (Gomes, 2010). Diversas “ilhas” de sensores agrupados por redes CAN comunicam através de *ZigBee* com uma unidade concentradora de informação, que produz informação reduzida, de mais alto nível. Desta forma previne-se o envio de informação desnecessária e reduz-se a quantidade de dados armazenados nas bases de dados do sistema de informação, e facilitando a análise num sistema SCADA.

Este sistema funciona como uma unidade de controlo de uma subestação, com características de uma máquina PLC, de um servidor Web e de nodo de comunicação por WAN-IP (através do *GPRS ou LTE*) (Cardoso F. , 2014). A arquitectura do sistema apresentada na Figura 63 é baseada em (Gomes, 2010).

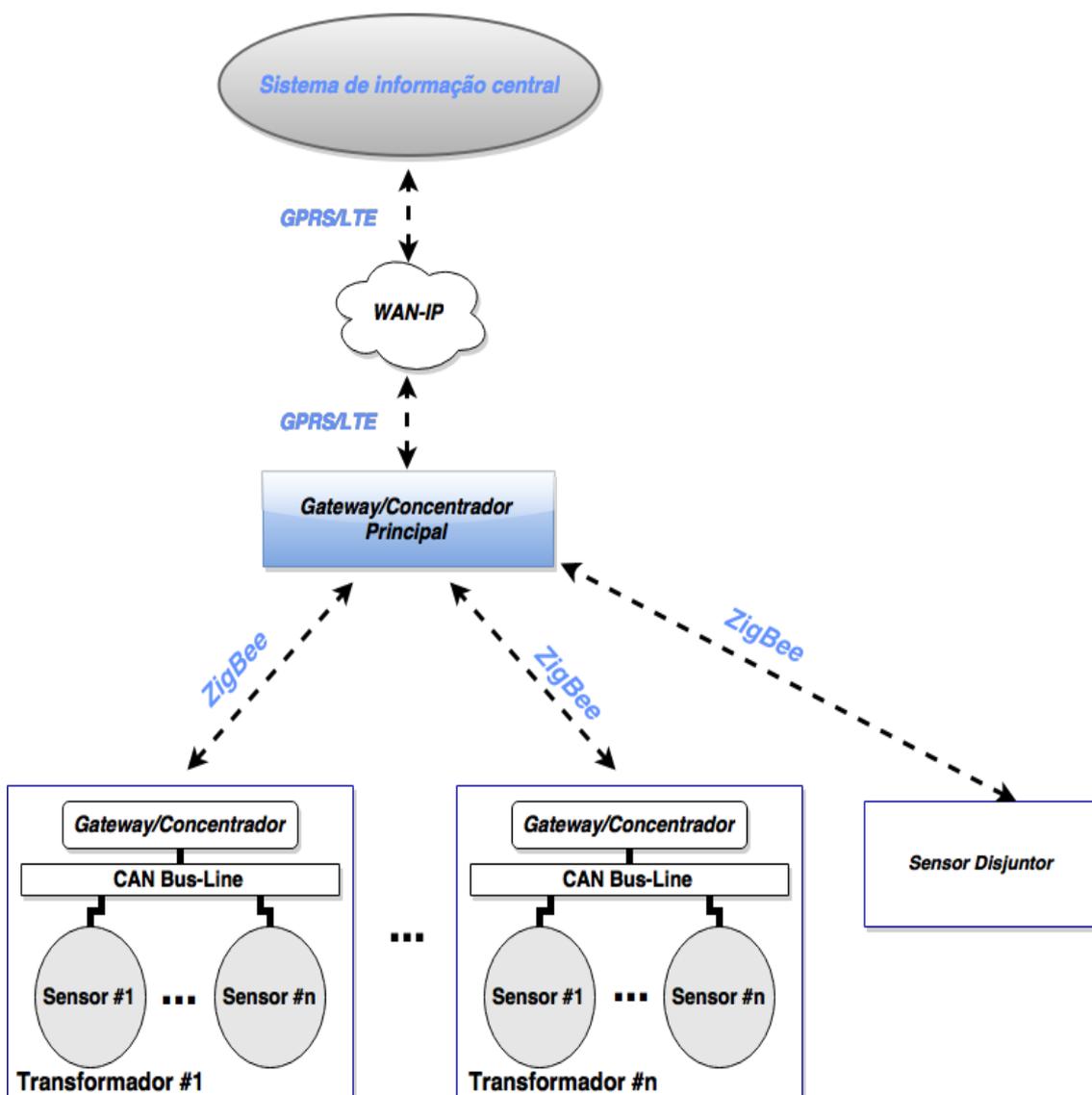


Figura 63-Rede de comunicação remota do sistema.

4.3 Características do sistema

O sensor desenvolvido para a detecção de descargas em transformadores de potência é semelhante ao desenvolvido para aplicação em postos de transformação, a única diferença estando no facto de, aqui, o sensor ser directamente aplicado na superfície exterior da carcaça do transformador (Figura 64).

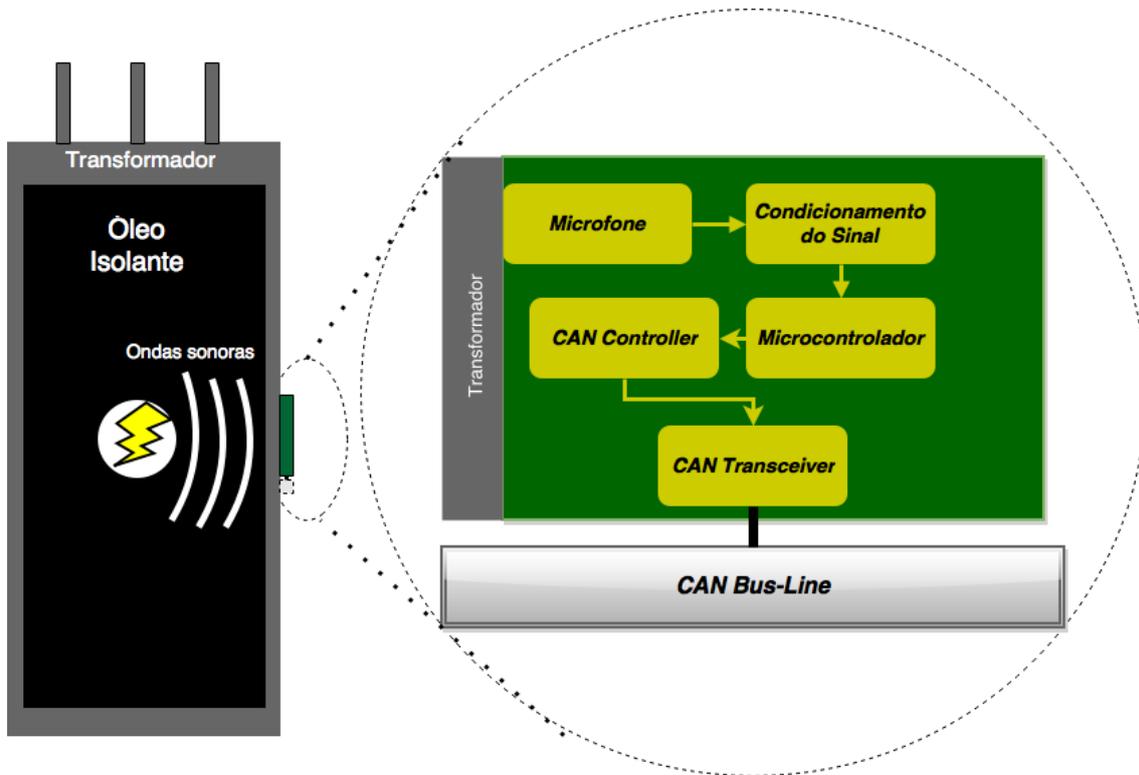


Figura 64- Esquema do sistema local para um posto de transformação.

4.3.1 Sensorização e Tratamento de Dados

Como discutido no capítulo anterior, o facto de as descargas ocorrerem no interior do transformador muito contribui para atenuar a propagação das ondas electromagnéticas criadas. Assim, o circuito de tratamento de sinal eléctrico do sensor inteligente é análogo ao que, inicialmente, foi discutido no capítulo anterior.

Desta forma, a sensorização baseia-se num microfone 400PT160 e o condicionamento de sinal é realizado através de um amplificador diferencial, um retificador de precisão, um detector de pico e de uma comparação com três comparadores, tal como discutido no capítulo anterior.

À saída dos comparadores estarão ligados três acopladores ópticos, cujas saídas são ligadas a três entradas digitais (GPIO) de um microcontrolador. Na ocorrência de uma descarga, dar-se-á uma variação de estado em cada uma destas entradas em que a amplitude do sinal gerado seja superior à tensão de referência do comparador respectivo, permitindo discriminar as situações em que um som captado teve uma intensidade superior a cada uma das três tensões de referência. Desta forma podem ser aferidos três níveis de intensidade, conforme exemplificado na Tabela 5.

Tabela 5- Avaliação dos níveis de intensidade de uma descarga

Intensidade da Descarga	Tensão de Saída dos comparadores	Saída do acoplador	Varição do sinal das entradas do microcontrolador	Avaliação da descarga
Elevada	Positiva	Baixa	Detectada	Intensidade Elevada
	Positiva	Baixa	Detectada	
	Positiva	Baixa	Detectada	
Média	Negativa	Alta	Não-Detectada	Intensidade Intermédia
	Positiva	Baixa	Detectada	
	Positiva	Baixa	Detectada	
Baixa	Negativa	Alta	Não-Detectada	Baixa Intensidade
	Negativa	Alta	Não-Detectada	
	Positiva	Baixa	Detectada	

Adicionalmente, o sistema tem a capacidade de calcular a taxa de ocorrência de descargas. Pode ser configurado para quais os valores limiares da taxa de ocorrências e da intensidade das descargas eléctricas deverá haver comunicação por parte da unidade, representando condições de alerta/alarme sobre o estado do transformador.

O microcontrolador a utilizar pelo sensor inteligente é o MSP430F5418 da Texas Instruments, tal como no sensor do posto de transformação descrito no anterior capítulo. Para suportar a comunicação do microcontrolador com a rede CAN, é necessário utilizar dois componentes: um *CAN controller* e um *CAN transceiver*.

É utilizado como controlador CAN o circuito integrado MCP2515 e como transceptor o MCP2551, ambos da MicroChip. Estes dispositivos foram escolhidos pelo seu baixo custo, contribuindo para que o sistema seja economicamente competitivo.

4.3.2 Comunicação

A Figura 65 ilustra o mecanismo de comunicação do sistema.

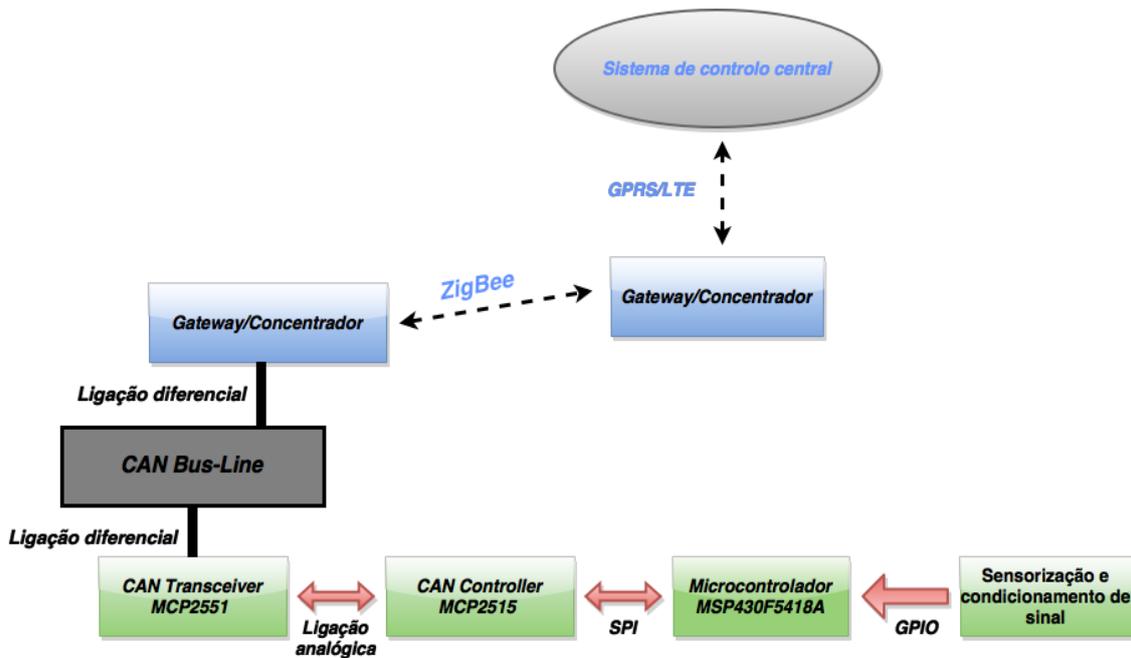


Figura 65- Esquema de comunicação do sistema.

A comunicação entre o microcontrolador MSP430F5418 e o controlador CAN MCP 2515 é realizada por SPI. O controlador troca cadeias de bits de sinalização CAN com o transceptor, que os converte em sinais diferenciais para transmissão sobre o cabo de rede CAN.

Enquanto unidade de “fronteira” entre redes diversas, a *gateway* é um nodo em cada uma das redes CAN e ZigBee, com recurso aos mesmos dispositivos utilizados nos sensores. Também, uma unidade concentradora de dados/*gateway* recebe, através da rede *ZigBee*, informação oriunda de várias redes CAN correspondentes aos diversos transformadores presentes na subestação, bem como os dados do sensor inteligente de monitorização do disjuntor. Os resultados do processamento local de toda esta informação destinam-se a ser enviados para um sistema de informação central, através de uma rede pública sem fios (GPRS ou LTE), para armazenamento numa base de dados e análise com recurso a *software* SCADA.

4.3.4 Alimentação

A cablagem da rede CAN pode ser utilizada para alimentar em potência os nodos a ela ligados, utilizando um segundo par de condutores nos cabos, a uma tensão de 24 Vdc. Desta forma, este sensor inteligente utiliza a alimentação fornecida pela rede CAN, utilizando um conversor dc/dc para gerar as tensões de serviço na unidade: ± 5 V para alimentar os componentes analógicos e 3,3 V para os acopladores ópticos e os componentes do sistema digital.

4.4 Conclusão

A Figura 66 ilustra uma possível montagem numa placa de circuito impresso para o sensor de ultrassons num transformador de potência. O desenho foi realizado com recurso ao *software* Altium Designer, estando assinalada a localização do conversor dc/dc e do dissipador de calor.

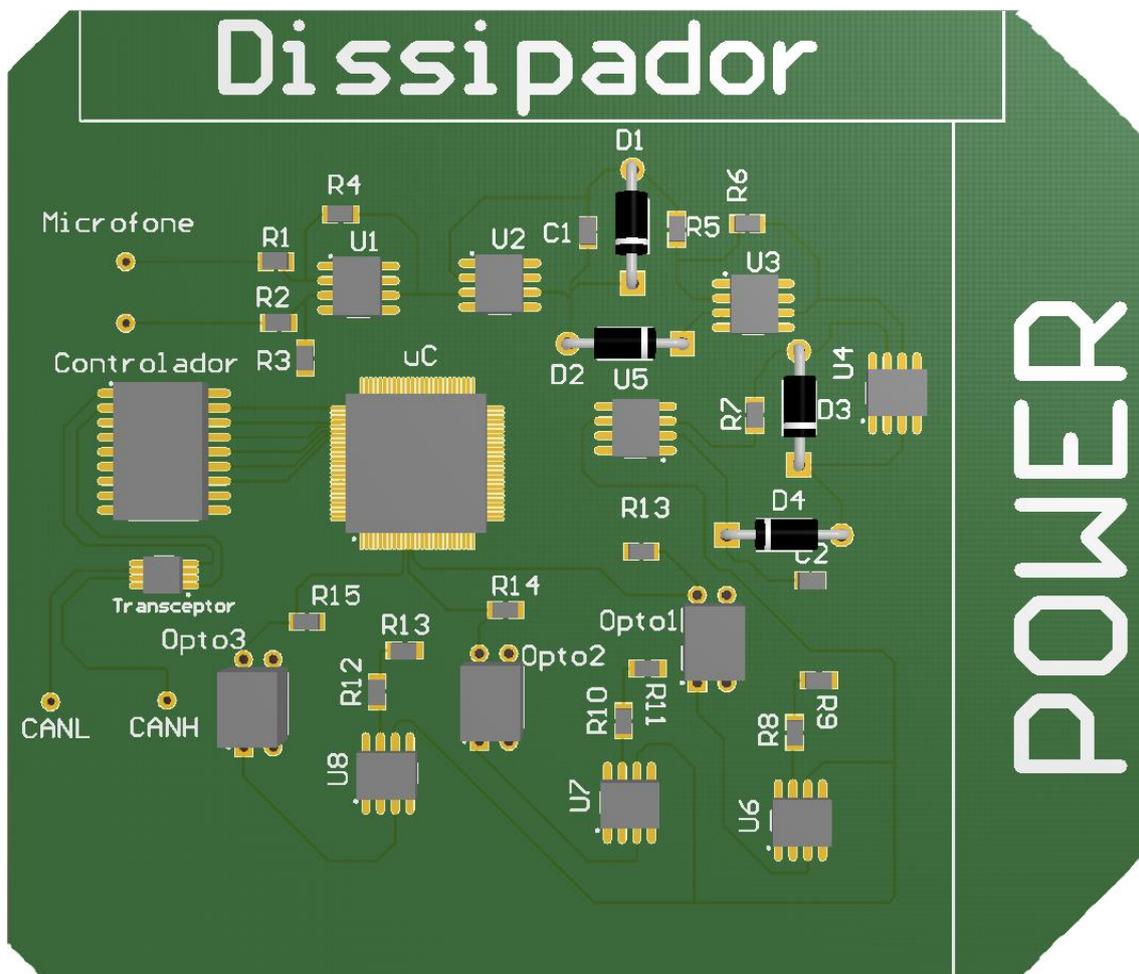


Figura 66- Montagem exemplificativa do sensor inteligente.

5. Conclusão

O sensor inteligente desenvolvido durante o projecto para a detecção de descargas em activos de distribuição eléctrica atingiu os objectivos propostos. A capacidade de criar um sistema de baixo custo e consumo, sendo bastante fiável e de elevada qualidade era a finalidade principal do dispositivo a desenvolver. Outro importante objectivo alcançado requeria potencializar o sensor com capacidades de comunicação remota, de forma a integrar-se numa rede inteligente melhorando os processos de monitorização dos activos actualmente disponíveis.

O estudo efectuado sobre os microfones para a sensorização do sensor revelou resultados bastante interessantes, entre quais uma muito maior fiabilidade que um microfone piezoeléctrico apresenta em relação a um microfone MEMS. Tais resultados demonstram as melhorias necessárias na tecnologia MEMS para aumentar o nível de qualidade deste novo tipo de sensores de forma a existir uma integração ainda maior no mercado industrial.

A alteração do circuito na montagem num posto de transformação necessita de um estudo no local de forma a realizar testes para concluir se as descargas têm uma potência suficiente para induzirem corrente no microfone devido à propagação de ondas electromagnéticas. Um estudo mais acentuado sobre as induções de correntes causadas por uma descarga eléctrica revela-se como um tema a desenvolver com bastante interesse, devido à fiabilidade quase perfeita que apresenta e pela baixa quantidade de dispositivos no estado de arte actual que operam com base neste fenómeno (Sensor de transitório de tensão de terra).

A facilidade de integração nas mais variadas aplicações engrandece o interesse num sensor de ultrassons. Sendo assim, o projecto realizado revela-se como uma base para uma pesquisa futura de forma a expandir a aplicabilidade do sensor.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário compreender e estudar todas as partes que compõem um sensor inteligente: sensorização, comunicação e alimentação. A colaboração com a Eneida permitiu obter as bases e conhecer os recursos utilizados para a comunicação e alimentação de um sensor inteligente, permitindo avançar mais rapidamente na realização destas partes. Os tópicos referentes

à sensorização e condicionamento do sinal analógico tiveram, assim, um maior foco de estudo e de análise de dados.

Em conclusão, é necessário citar algumas alterações ou melhorias que poderão ser realizadas no futuro de forma a aumentar a qualidade do sensor de ultrassons para a detecção de descargas eléctricas. Tais melhorias são: (i) Passagem para um microfone MEMS de melhor qualidade. (ii) Desenvolver um sistema de vários sensores ultrassons no mesmo transformador permitindo detectar a origem de uma descarga e aumentar a fiabilidade no cálculo da intensidade do choque eléctrico. (iii) Utilização de sensores de humidade e temperatura em conjunto com o microfone.

Referências Bibliográficas

- APCInternational. (2015).** *Determining Resonance Frequency*. Obtido de American Piezo: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/determining-resonance-frequency.html>
- Ardila-Rey, J., & Rojas-Moreno, M., & Martínez-Tarifa, J., & Robles, G. (2014).** Inductive Sensor Performance in Partial Discharges and Noise Separation by Means of Spectral Power Ratios. *Sensors*, 3408-3427.
- ATZonline. (19 de Fevereiro de 2014).** *Operating Safety for 48 V Wiring System - Electric Arc under control*. Obtido de ATZonline: <http://www.atzonline.com/Artikel/3/17748/Operating-Safety-for-the-48-V-Wiring-System-%E2%80%93-Electric-Arc-under-Control.html>
- Baker, P., & Judd, M., & McArthur, S. (2010).** A frequency-based RF partial discharge detector for low-power wireless sensing. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on (Volume:17, Issue: 1)*.
- Bartnikas, R. (1979).** Corona Discharge Processes in Voids. Em R. Bartnikas, & E. McMahon, *Engineering Dielectrics Volume 1: Corona Measurement and Interpretation* (pp. 22-69). ASTM.
- Cardoso, F., & Cordeiro, M., & Rocha, N.; & Oliveira, L., & Faria, S. (2014).** Using Wireless Sensors in the Remote Condition Monitoring of Secondary Distribution Substations. *CIREC Workshop*, Paper 292.
- Cardoso, J. (2012).** *Instrumentação e Sistemas de Aquisição de Dados; Interfaces e Sistemas de Aquisição de Dados*.
- Cavaleiro, N. (2006).** *FQ8 Sustentabilidade na Terra*. ASA.
- Chase, J. (2013).** *The Evolution of the Internet of Things*. Obtido de Texas Instruments: <http://www.ti.com/lit/ml/swrb028/swrb028.pdf>
- Cockrill, C. (Setembro de 2011).** *Understanding Schmitt Triggers*. Obtido de Texas Instruments: <http://www.ti.com/lit/an/scea046/scea046.pdf>
- Cole-Parmer. (2015).** *Eco sensors EZ-1X Ozone Monitor*. Obtido de Cole-Parmer fluid handling and analysis: http://www.coleparmer.com/Product/Eco_Sensors_EZ_1X_Ozone_Monitor_continuous_duty/EW-86316-20
- Corrigan, S. (Julho de 2008).** *Introduction to the Controller Area Network (CAN)*. Obtido de Texas Instruments: <http://www.ti.com/lit/an/sloa101a/sloa101a.pdf>
- De Witte, M., & Tits, Y., & Arens, M., & François, A., & Van den Berg, M., & Van Slycken, J. (10-13 de Junho de 2013).** Partial Discharge Monitoring on MV Switchgear. *CIREC 22nd International Conference on Electricity Distribution*.
- Digikey. (2015).** *1N4007 datasheet*. Obtido de Digikey: <http://www.diodes.com/datasheets/ds28002.pdf>
- EA Technology. (2015).** *Partial Discharge Causes*. Obtido de The Partial Discharge Academy: <http://www.partial-discharge-academy.com/partial-discharge-causes>
- EA Technology. (2015).** *Partial Discharge Effects*. Obtido de The Partial Discharge Academy: <http://www.partial-discharge-academy.com/partial-discharge-effects>

- EATechnology. (2015).** *Partial Discharge Monitoring*. Obtido de The Partial Discharge Academy:
<http://www.partial-discharge-academy.com/partial-discharge-monitoring>
- EDP. (2015).** *Relatórios e Contas 1º Trimestre 2015*. Obtido de EDP:
http://www.edp.pt/pt/investidores/publicacoes/relatorioecontas/2015/Relatrios%202015/RC1T2015_PT.pdf
- EDP Distribuição. (Maio de 2010).** *Postos de transformação em cabina baixa-Instalação de sobre-carregadores de sobre-tensões*. Obtido de EDP Distribuição:
<http://www.edpdistribuicao.pt/pt/profissionais/Lists/EDPDocumentosNormactivos/Attachments/880/DRE-C13-901N.pdf>
- EDP Distribuição. (2014).** *Relatório da Qualidade de serviço 2014*. Obtido de EDP Distribuição:
<http://www.edpdistribuicao.pt/pt/qualidade/Relatrio%20Qualidade%20Servio%202013/Relat%20da%20Qualidade%20de%20Servi%C3%A7o%202014%20Final.pdf>
- Edvard. (Dezembro de 26 de 2010).** *Substation Fire Protection*. Obtido de Electrical Engineering Portal: <http://electrical-engineering-portal.com/substation-fire-protection>
- EEVblog. (29 de Junho de 2013).** *EEVblog #490 - Peak Detector Circuit*. Obtido de EEVblog Electronics Community Forum: <http://www.eevblog.com/forum/blog/eevblog-490-peak-detector-circuit/>
- Efacec. (2015).** *Diflu disjuntor de SF6*. Obtido de Efacec:
http://www.efacec.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/CatalogoOnline/Aparelhagem/DIFLU%20%20Disjuntor%20de%20SF6%20at%203%20A%2036%20kV%202500%20A%2025%20kA%20_%20SF6%20Circuit%20breaker%20up%20to%2036%20kV%202500%20A%2025%20kA.pdf
- Gear Diary. (1 de Fevereiro de 2013).** *Everything you Need to Know About Electrostatic discharge*. Obtido de Gear Diary: <http://geardiary.com/2013/02/02/everything-you-need-to-know-about-esd-in-one-funny-video/esd/>
- Gomes, R., & Cardoso, F., & Oliveira, J. (2010).** Integrating Zigbee and CAN Networks in Industrial Applications. *Distributed Computing in Sensor Systems Workshops, IEEE International Conference*.
- Habash, R. (2010).** *Precision Rectifier Circuits*. Obtido de University of Ottawa:
<http://www.site.uottawa.ca/~rhabash/ELG4135L8.pdf>
- Haddad, A., & Warne, D. (2004).** *Advances in High Voltage Engineering*. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology.
- IPEC. (2015).** *High Frequency Current Transformer*. Obtido de IPEC:
<http://www.ipec.co.uk/product/high-frequency-current-transformer-hfct/>
- JBoss. (2015).** *Examples of JBoss projects*. Obtido de JBossDeveloper:
<http://www.jboss.org/iot/products/>
- Knowles. (2015).** *SPU0410LR5H-QB datasheet*. Obtido de Knowles Surface Mount MEMS:
<http://www.knowles.com/kor/content/download/5755/91802/version/3/file/SPU0410LR5H-QB+revH.PDF>
- Lépine, L., & Lessard-Déziel, D., & Bélec, M., & Guddemi, C., & Nguyen, D. (2008).** *Using Ozone Measurements to Diagnose Partial Discharge in Generators*. Obtido de HydroWorld.com:
<http://www.hydroworld.com/articles/hr/print/volume-27/issue-7/technical-articles/using-ozone-measurements-to-diagnose-partial-discharge-in-generators.html>

- MNX MEMS & Nanotechnology. (2015).** *What is MEMS Technology?* Obtido de MEMS-Exchange: <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>
- Nafar, M. (2013). Partial Discharge Behavior in Solid Insulation. *Journal of Novel Applied Sciences*, 641.
- NXP Semiconductors. (2009).** *Product data sheet High-speed diodes 1N4148; 1N4448.* Obtido de NXP Semiconductors: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/1N4148_1N4448.pdf
- Okubo, H., Hayakawa, N., & Matsushita, A. (2002).** The Relationship Between Partial Discharge Current Pulse Waveforms and Physical Mechanisms. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 38-45.
- Peek, F. W. (1929).** *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering.* McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Prowave. (2015).** *400PT160 datasheet.* Obtido de Prowave Air Ultrasonic Ceramic Transducers: <http://www.prowave.com.tw/english/products/ut/ep/40pt16.htm>
- Prowave. (2015).** *400SR10B datasheet.* Obtido de Prowave Air Ultrasonic Ceramic Transducers: <http://www.prowave.com.tw/english/products/ut/open-type/400s100.htm>
- Reiter, G. (2014).** *Wireless connectivity for the Internet of Things.* Obtido de Texas Instruments: <http://www.ti.com/lit/wp/swry010/swry010.pdf>
- Texas Instruments. (2015).** *OPAx22x High Precision, Low Noise Operational Amplifiers datasheet.* Obtido de Texas Instruments: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa228.pdf>
- UESystems. (2015).** *Ultrasonic Electrical Inspection.* Obtido de UESystems, Inc The ultrasound approach: <http://www.uesystems.com/applications/electrical-inspection#frontpage-slideshow>
- University of Leicester . (2015).** *Industrial Electrical and Power Engineering.* Obtido de University of Leicester: <http://www2.le.ac.uk/departments/engineering/research/electrical-power/images/Electrical%20Tree.jpg>
- Welch, P. D. (1967).** The Use of Fast Fourier Transform for the Estimative of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. *IEEE Trans. Audio and Electroacoustics Vol 15*, 70-73.
- White, H. E., & White, D. H. (1980).** *Physics and Music.* Saunders College.
- Wind Farm Construction. (2015).** *MV HV wind farm substation transformer.* Obtido de Wind Farm Construction: <http://www.windfarmbop.com/wind-farm-substation-an-overview/mv-hv-wind-farm-substation-transformer/>
- Ye, T. (2013).** Precision Full-Wave Rectifier, Dual-Supply. *TI Precision Design: Verified Design.*
- Yuyan, M., & al, e. (2014).** Simulation Analysis of Transient Earth Voltages Aroused by Partial. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 97-104.
- Zpryme Smart Grid Insights. (Março de 2012).** *China: State Grid Corporate Profile.* Obtido de Clean Development Mechanism: http://cdm.unfccc.int/filestorage/m/n/ZLAKFVJ73GYIM5SP4XOECT0BW9HR62.pdf/Attachment-2_State%20Grid%20Corporation%20of%20China%20Profile.pdf?t=Vkt8bnJscHRpfDAQBuJO7HUTiY7it1TV8vv2

Texas Instruments. (2015). *MSP430F5418A datasheet*. Obtido de Texas Instruments:
<http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=msp430f5418a&fileType=pdf>

Texas Instruments. (2015). *CC2530 datasheet*. Obtido de Texas Instruments
<http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=cc2530&fileType=pdf>

Microchip. (2015). *MCP2515 datasheet*. Obtido de Microchip:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21801d.pdf>

Microchip. (2015). *MCP2551 datasheet*. Obtido de Microchip:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21667f.pdf>