



António Colaço de Almeida

# INTEGRAÇÃO DE SENSORES INTELIGENTES PARA A SUPERVISÃO REMOTA DE SUBESTAÇÕES SECUNDÁRIAS 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

Setembro de 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



# Integração de Sensores Inteligentes para a Supervisão Remota de Subestações Secundárias 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

**António Colaço de Almeida**

**Setembro 2016**

# Agradecimentos

Ao Professor e orientador Doutor Francisco José de Almeida Cardoso, pela disponibilidade e constante partilha de um vasto conhecimento.

À Eneida S.A, pela possibilidade de integrar um projecto industrial e enriquecedor.

A todos os colegas com quem me cruzei durante estes anos de universidade, que de forma directa ou indirecta influenciaram o meu percurso.

Em especial aos amigos Isaac Pires e Paulo Gomes, pela constante cooperação e entreaajuda.

**Por último mas mais importante, agradecer à minha família por todo o apoio e suporte prestado durante todo o meu percurso académico. Sem ele esta dissertação jamais seria possível.**

# Resumo

Este trabalho apresenta a discussão e o desenvolvimento de sensores inteligentes para implementação numa rede de sensores para monitorização do estado de funcionamento de componentes num PT.

São discutidas noções sobre sistemas distribuídos, incluindo mecanismos de comunicação para a integração, assim como propostas para um tratamento de dados que leve a uma melhor gestão de activos.

São, também, apresentados dois sensores inteligentes: (i) Detector e localizador de descargas parciais, com recurso a dois ou três microfones ultrasónicos e (ii) um multisensor para medição de temperatura e pressão do óleo no interior de um transformador. Em particular, a fonte de energia para este ultimo é um sistema de *Energy Harvesting* baseado no aproveitamento do diferencial térmico entre a cuba do transformador e o ar, com recurso a uma termopilha.

# Abstract

This work presents the discussion and design of intelligent sensors to integrate a wireless sensor network of sensors aiming at monitoring the condition of components in secondary substations of electricity distribution grids.

Fundamentals on distributed systems are presented, including communication mechanisms for systems integration, as well as hints on appropriate data handling for asset management purposes.

Also, two smart sensors are presented: (i) a detector and locator of partial discharges, with recourse to either two or three ultrasound microphones, and (ii) a multi sensing unit for both temperature and oil pressure inside distribution transformers. In particular, the power supply for this latter unit was based on the energy harvesting from the thermal difference between every transformer body and the ambient air, with recourse to thermopiles.

# Lista de Siglas e Acrónimos

<b>ADC</b>	-	<b>Analog to Digital Converter</b>
<b>BT/LV-</b>		<b>Baixa Tensão/Low Voltage</b>
<b>GPRS-</b>		<b>General Packet Radio Service</b>
<b>H2H</b>	-	<b>Human to Human</b>
<b>H2M</b>	-	<b>Human to Machine</b>
<b>IEC</b>	-	<b>International Electrotechnical Commission</b>
<b>IIoT</b>	-	<b>Industrial Internet of Things</b>
<b>IoT</b>	-	<b>Internet of Things</b>
<b>ISM</b>	-	<b>The industrial, scientific and medical</b>
<b>LTE</b>	-	<b>Long Term Evolution</b>
<b>M2M</b>	-	<b>Machine to Machine</b>
<b>MT/MV-</b>		<b>Média Tensão/Medium Voltage</b>
<b>PCB</b>	-	<b>Printed Circuit Board</b>
<b>PT</b>	-	<b>Posto de Transformação</b>
<b>PWM</b>	-	<b>Pulse-width modulation</b>
<b>QGBT-</b>		<b>Quadro Geral de Baixa Tensão</b>
<b>RF</b>	-	<b>Radio Frequency</b>
<b>RMS</b>	-	<b>Root Mean Square</b>
<b>RTD</b>	-	<b>Resistance Temperature Detector</b>
<b>SPI</b>	-	<b>Serial Peripheral Interface</b>
<b>WPAN-</b>		<b>Wireless Personal Area Network</b>
<b>WSN</b>	-	<b>Wireless Sensor Network</b>

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>1</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Lista de Siglas e Acrónimos</b> .....	<b>4</b>
<b>Índice</b> .....	<b>5</b>
<b>Índice de Figuras</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1. Objecto do Trabalho – Âmbito e Utilidade de Aplicação</b> .....	<b>9</b>
<b>1.2. Funcionalidades, Estrutura e Tecnologias</b> .....	<b>10</b>
<b>1.3. Estrutura da Dissertação</b> .....	<b>12</b>
<b>2. Gestão de Activos em Infra-estruturas Dispersas</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1. Objectivos Gerais</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.1. Elementos de um Posto de Transformação</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2. Âmbito Funcional em Redes Eléctricas de Baixa Tensão</b> .....	<b>18</b>
<b>2.3. Tratamento de Dados</b> .....	<b>18</b>
<b>2.4. Comunicação para a Integração</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5. Definição do Projecto</b> .....	<b>26</b>
<b>3. Arquitectura Geral do Sistema</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1. Estruturação do Sistema</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2. Mecanismos de Comunicação</b> .....	<b>30</b>
<b>4. Gateway/Unidade Concentradora</b> .....	<b>32</b>
<b>5. Novos Sensores</b> .....	<b>33</b>
<b>5.1. Localizador Sonoro de Descargas Parciais</b> .....	<b>33</b>
<b>5.1.1. Fundamento de Funcionamento</b> .....	<b>34</b>
<b>5.1.1.1. Montagem com Dois Microfones</b> .....	<b>34</b>
<b>5.1.1.2. Montagem com Três Microfones</b> .....	<b>37</b>
<b>5.1.1.3. Diferenças Assinaláveis</b> .....	<b>39</b>
<b>5.1.2. Componentes</b> .....	<b>40</b>

5.1.2.1. Microfone MEMS .....	40
5.1.2.2. Microfone Piezoelétrico .....	41
5.1.3. Circuito .....	42
5.1.4. Algoritmo .....	51
5.1.5. Resultados e Conclusões .....	52
5.2. Transformador: Pressão e Temperatura .....	54
5.2.1. Métodos de Sensorização .....	57
5.2.1.1. Temperatura .....	57
5.2.1.2. Pressão .....	59
5.2.2. Componentes .....	64
5.2.2.1. Medição de Temperatura .....	64
5.2.2.1.1. PT100/PT1000 .....	64
5.2.2.1.2. ADC .....	65
5.2.2.2. Medição de Pressão .....	67
5.2.3. Circuito e Diagramas .....	68
5.2.3.1. Alimentação .....	74
5.3. Comunicação .....	78
6. Conclusão .....	80
7. Trabalho Futuro .....	82
8. Anexos .....	83
9. Referências Bibliográficas .....	91



# Índice de Figuras

<b>Figura 2.1: Quadro de Gestão de Activos</b> .....	<b>16</b>
<b>Figura 2.2: Tipos de Fusão de Dados</b> .....	<b>22</b>
<b>Figura 2.3: Diferenças entre Protocolos</b> .....	<b>25</b>
<b>Figura 3.1: Topologia Mesh Parcial</b> .....	<b>29</b>
<b>Figura 3.2: Topologia em Estrela</b> .....	<b>30</b>
<b>Figura 5.1: Diferença Temporal entre Microfones</b> .....	<b>35</b>
<b>Figura 5.2: Hipérbole</b> .....	<b>35</b>
<b>Figura 5.3: Diferenças Temporais: Montagem de Três Microfones</b> .....	<b>38</b>
<b>Figura 5.4: Plano de Possíveis Posições Para Emissor</b> .....	<b>39</b>
<b>Figura 5.5: Cone de Possíveis Posições Para Emissor</b> .....	<b>40</b>
<b>Figura 5.6: Desequilíbrios de Carga por Falta de Simetria Central</b> .....	<b>41</b>
<b>Figura 5.7: Erro Temporal Associado a Polarização Invertida</b> .....	<b>42</b>
<b>Figura 5.8: Montagem inversora</b> .....	<b>43</b>
<b>Figura 5.9: Montagem Diferencial</b> .....	<b>44</b>
<b>Figura 5.10: Circuito Montado com Partes Condutoras Reduzidas</b> .....	<b>45</b>
<b>Figura 5.11: Resposta do Circuito Após Descarga</b> .....	<b>45</b>
<b>Figura 5.12: Zoom Sobre o Sinal Detectado</b> .....	<b>46</b>
<b>Figura 5.13: Resposta do Circuito Após Curto Circuito das Entradas</b> .....	<b>46</b>
<b>Figura 5.14: Circuito com Curto-Circuito</b> .....	<b>47</b>
<b>Figura 5.15: Montagem 1</b> .....	<b>48</b>
<b>Figura 5.16: Montagem 2</b> .....	<b>48</b>
<b>Figura 5.17: Montagem 3</b> .....	<b>48</b>

<b>Figura 5.18: Montagem 4</b> .....	<b>49</b>
<b>Figura 5.19: Resposta ao Impacto entre dois Elementos Metálicos</b> .....	<b>50</b>
<b>Figura 5.20: Diagrama de Funcionamento do Localizador de Descargas</b> .....	<b>51</b>
<b>Figura 5.21: Montagem com Dois Microfones</b> .....	<b>52</b>
<b>Figura 5.22: Montagem com Três Microfones</b> .....	<b>53</b>
<b>Figura 5.23: Tubo com Êmbolo Para Medição de Pressão</b> .....	<b>60</b>
<b>Figura 5.24: Tubo com Oito Sensores de Presença</b> .....	<b>61</b>
<b>Figura 5.25: Tubo Sensor de Hall</b> .....	<b>62</b>
<b>Figura 5.26: Curvas de Resistência de Vários Sensores de Temperatura</b> .....	<b>64</b>
<b>Figura 5.27: Ponte de Wheastone</b> .....	<b>66</b>
<b>Figura 5.28: Microfone MA40H1S-R</b> .....	<b>67</b>
<b>Figura 5.29: SPH0641LU4H-1</b> .....	<b>67</b>
<b>Figura 5.30: Esquema de Funcionamento Com Dois uC e Dois Módulos RF</b> .....	<b>69</b>
<b>Figura 5.31: Esquema de Funcionamento Com Um uC e Um Módulo RF</b> .....	<b>69</b>
<b>Figura 5.32: Esquema do Circuito para Medição da Pressão</b> .....	<b>70</b>
<b>Figura 5.33: Modos de Funcionamento do Microfone (Datasheet)</b> .....	<b>71</b>
<b>Figura 5.34: Esquema do Circuito para Medição da Temperatura</b> .....	<b>72</b>
<b>Figura 5.35: ADC0804 TI</b> .....	<b>72</b>
<b>Figura 5.36: Esquema do Circuito para o Multisensor</b> .....	<b>73</b>
<b>Figura 5.37: Pilha Eléctrica e Modo de Funcionamento</b> .....	<b>75</b>
<b>Figura 5.38: Tensão e Potência Debitada pela Termopilha</b> .....	<b>76</b>
<b>Figura 5.39: Esquema de Montagem de LTC3109</b> .....	<b>78</b>
<b>Figura 5.40: Esquema de Montagem de CC1101</b> .....	<b>79</b>

# 1. Introdução

## 1.1. Objecto do Trabalho – Âmbito e Utilidade de Aplicação

Nos dias de hoje, a grande maioria das actividades carecem de energia. Desta forma, as falhas nas redes de distribuição representam um grande problema, quer para a empresa distribuidora, na forma de custos de reparação e tempo gasto para a detecção dos locais onde estas ocorrem, quer para o utilizador, que simboliza privação e inactividade, ganhando ainda maior relevo, quando este utilizador se trata de uma fábrica, por exemplo. Existindo em Portugal, ao todo, cerca de 60.000 subestações de distribuição secundárias [1], a necessidade de modernização dos sistemas de detecção e diagnóstico é imperativa. Uma vez que a prática levada a cabo, até hoje, é de equipar os PT com elementos sobredimensionados para cada função, que é, de facto, uma prática de gestão de activos, embora inadequada. Está muito aquém do que, hoje, é necessário e possível fazer, pois, o crescente número de utilizadores tornará a compra de elementos sobredimensionados cada vez mais inviável. Assim, uma gestão que permita ter elementos mais ajustados às necessidades e com contínuo diagnóstico do estado, de cada elemento, permitirá trazer bastantes benefícios monetários em relação ao método mais primitivo. Por consequência desta prática, não existe, ainda, redes de distribuição com capacidade de detecção e análise, rápida, de falhas. Esta modernização, pressupõem, assim, a dotação das redes de maior automatização nos mecanismos de detecção, bem como, maior rapidez e precisão no diagnóstico por forma a permitir uma diminuição cabal das despesas de manutenção e um aumento da confiança no serviço, diminuindo o número de falhas.

Assim, esta dissertação tem em vista a proposta e desenvolvimento alguns protótipos de sensores para a dotação de uma maior capacidade de análise e diagnóstico do sistema de monitorização remota do estado de elementos críticos num posto de transformação (PT), com uma rede de sensores inteligentes não cablada.

Este sistema assenta sobre três pontos-chave da gestão: Detecção de falhas, manutenção preditiva e gestão de activos. Por um lado, procura-se detectar falhas e, por outro, diagnosticar avarias com prontidão, por forma a diminuir o tempo de todo o processo, entre a ocorrência da falha e a sua correcção. Permitir que seja possível prever, a partir de um historial e do desempenho de cada elemento, quando será a altura certa para se efectuar a manutenção, procurando evitar falhas. E gestão de activos, através da interpretação de um histórico de dados, para prever quando a substituição de elementos compensará mais que a sua manutenção.

Pretende-se que este seja um sistema (rede de monitorização) autónomo que leve a cabo a medição de variáveis que sejam representativas do estado de funcionamento de cada elemento. Permitindo, posteriormente, como referido, a criação de diagnósticos.

## **1.2. Funcionalidades, Estrutura e Tecnologias**

O objecto desta dissertação foca-se na criação de um sistema com inteligência operacional, reunindo vários aspectos relevantes, tais como:

- Inovação nas formas de sensorização;
- Rede sem fios de sensores inteligente com capacidade de armazenamento e tratamento de dados;
- Auto-suficiência com alimentação em potência.

Com vista à aplicação em PT, por forma a suprir a necessidade crescente de uma forma de monitorização mais automatizada que leve a uma gestão de activos mais apropriada.

É assim, necessário o conhecimento de um quadro abrangente de estados dos elementos monitorizados nos PT.

A rede de sensores inteligentes implementada em cada PT gerará um largo espectro de dados (temperatura, humidade, etc) que poderão, posteriormente, vir a ser utilizados para detecção e previsão de falhas. A utilização destes dados

para previsão e detecção de falhas requer um estudo prévio do estado de cada elemento para a criação de correlações entre dados gerados e evolução do estado de saúde dos mesmos. Procura-se assim a criação de um sistema de suporte à decisão.

Existirão dois elementos no sistema:

- “Nuvem” de sensores inteligentes;
- Unidade concentradora.

A “nuvem” de sensores inteligentes terá a função de medição de variáveis eléctricas e não eléctricas. Junto dos quais poderá ser efectuado parte do processamento e comunicação dos dados à unidade concentradora. A comunicação de dados será efectuada em períodos de tempo previamente determinados para sensores (não detectores), podendo equacionar-se o aumento da frequência de medição e comunicação de dados quando perante presença de variáveis de estado de magnitudes anómalas.

A unidade concentradora será o elemento responsável pela comunicação de dados e alarmes à unidade central. A análise feita por esta unidade será apenas de correlações de dados com limite temporal de um dia.

Consolidar-se-á um quadro abrangente de requisitos de funcionamento de um PT, para isso será necessário o conhecimento dos diversos problemas que podem ocorrer num posto de transformação (com maior ou menor frequência). Procura-se, assim, monitorizar todos os aspectos que permitam, em primeiro lugar, conhecer o estado de funcionamento de cada elemento por forma a possibilitar a tomada de medidas que permitam evitar possíveis futuras falhas e, uma vez ocorridas falhas, detectá-las e diagnosticar avarias com prontidão.

Com base em [1] eis os aspectos relevantes:

- Transformador: temperatura, padrões de vibração (sensor não intrusivo)
- Transformador: detecção de descargas parciais no circuito de input MV (sensor ultra-sónico 40khz, não intrusivo)

- Quadro de distribuição: informações de estado de todos os fusíveis e identificação em tempo real de fusíveis queimados.
- Quadro de distribuição: Aquisição de dados do valor RMS do fluxo da corrente em cada output LV nos circuitos de fase única.
- Condições ambientais:
  - Aquisição de dados de temperatura e humidade relativa para detecção de fogo ou diagnóstico de problemas de ventilação.
  - Detecção de inundações ou diagnóstico de problemas de bombeamento de água e alarmes.
- Alarme de intrusão: Detecção de intrusão por portas ou grelhas de ventilação.
- Detecção de tentativa de roubo de transformador do tipo poste.  
Detecção de escalada ao poste, detecção de operação do interruptor de desconexão do input-MV não autorizada e detecção de mudanças na posição dos transformadores.

### 1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos.

No primeiro é apresentada a problemática e quais os aspectos principais que esta dissertação pretende abordar.

No segundo capítulo é apresentado o conceito gestão de activos. De que forma este conceito influencia as estruturas nelas implementado e como um sistema de monitorização baseado numa rede de sensores *Wireless* pode trazer o seu contributo para uma melhor gestão de activos. Apresentando também algumas noções sobre o modo de funcionamento de sistemas de informação distribuídos e o modo de integração de elementos, quer no interior da rede de sensores, quer da integração da rede de sensores na rede pública. E, por fim, apresentando a definição do projecto.

No capítulo três discute-se qual a arquitectura do sistema mais apropriada para esta utilização. Assim como uma ideia geral de como se organizará a comunicação dos elementos integrantes do sistema.

O capítulo quatro descreve aquele que é o elemento central da rede de sensores, apresentando algumas noções de como os dados dos novos sensores serão utilizados para diagnóstico de estados.

Os sensores desenvolvidos no âmbito deste trabalho são por fim apresentados no capítulo cinco, (i) detector e localizador de descargas parciais e (i) sensor de temperatura e pressão no interior de um transformador. Apresentando várias formas possíveis de sensorização.

Nos capítulos seis e sete é apresentada a conclusão de todo o projecto e são apresentadas ideias de como este trabalho poderá ser melhorado no futuro.

Por fim, no capítulo oito e nove para anexos e referências bibliográficas.

## 2. Gestão de Activos em Infra-estruturas

### Dispersas

A actividade de manutenção requer recursos de reserva para substituição, trabalho humano, ferramentas, instrumentos e infra-estruturas.

Os recursos devem estar disponíveis no tempo certo e na quantidade certa. Ter excesso de recursos representa um custo, enquanto que o défice de recursos no tempo requerido, também não é desejável pois resulta num défice quer de produção, quer de manutenção. Gestão de activos é assim crítico para a gestão da manutenção de um sistema no seu todo.

Para levar a cabo uma gestão de activos apropriada é fundamental o conhecimento do estado dos elementos de cada infra-estrutura, que compõem o sistema distribuído (qualquer que seja o tipo de sistema). Pressupõe, assim, numa lógica de supervisão conjunta, a criação de uma rede inteligente para conhecimento das variáveis que são críticas em cada elemento.

#### 2.1. Objectivos Gerais

Como já referido, procura-se criar um sistema tecnológico que facilite o diagnóstico e previsão de falhas, por fim a criar uma mecânica de decisões, que leve a uma melhor gestão de activos, ou que, simplesmente, permita levar a uma gestão de activos, onde esta, antes, era básica. Que, por consequência, melhore a produtividade, aumente o tempo de vida útil de elementos do sistema monitorizado. Para, por fim, levar ao objectivo principal: minimizar os custos com estes elementos a longo prazo, não descurando a importância de levar a cabo o serviço, para o qual é predestinado, com a melhor performance.

A exploração de cada elemento de um sistema, disperso ou não, pressupõe duas dimensões:

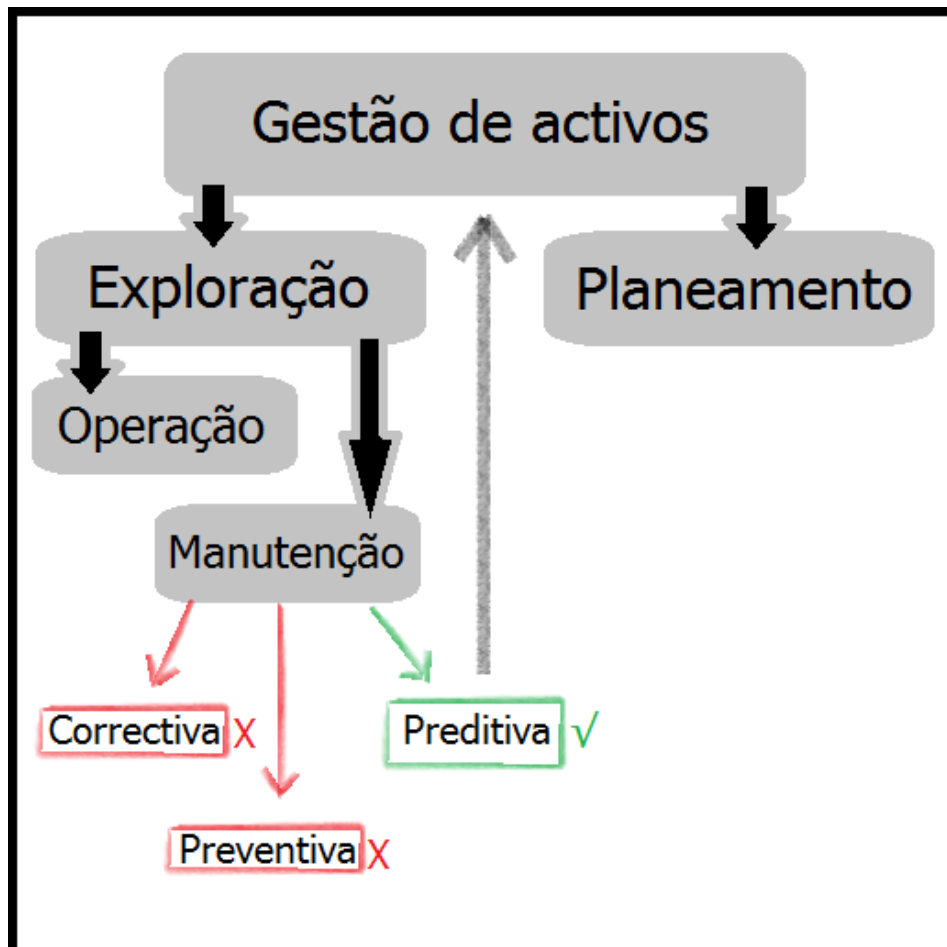
- A **operação**, em que o elemento desenvolve a função para a qual foi predestinado;



- E a **manutenção** que é o conjunto de acções que têm como objectivo manter o elemento em funcionamento da forma correcta. Existem três tipos de manutenção:
  - **Manutenção correctiva**, que pressupõe a acção de manutenção apenas após paragem ou caso o elemento esteja claramente em mau funcionamento. Resumindo, pressupõe a acção correctiva sobre o elemento apenas quando é registada uma falha. Não requerendo qualquer tipo de planeamento prévio ou acompanhamento constante do estado do elemento. Isto leva a um funcionamento imprevisível do sistema, diminuindo a fiabilidade do mesmo. [2]
  - **Manutenção preventiva**, é a acção de manutenção em que se pretende, com rotinas bem definidas no tempo, testar e ou substituir elementos para diminuir as falhas e a imprevisibilidade do sistema. No entanto, muitos elementos têm uma evolução na degradação superior a outros, e por vezes podem escapar à rotina de manutenção e acabar por apresentar uma falha antes do previsto, ou pelo contrário, o elemento pode estar ainda capaz de funcionar por mais tempo e acabar por levar a um excesso de manutenção ao ser substituído. [2]
  - **Manutenção preditiva**, é a acção de manutenção que leva à previsão de possíveis falhas com base na análise de dados. Este modelo de manutenção, assim como a preventiva levam a um aumento da vida dos elementos e à redução do tempo de inactividade. No entanto, em contraste com a anterior, esta possibilita a correcção ou substituição do elemento na altura correcta, evitando o deficit ou excesso de manutenção. [2]

Sendo principal foco uma rede inteligente que permita conhecer o estado de saúde do sistema para possibilitar a manutenção preditiva. Esta permitirá, criar um sistema de suporte à decisão, através de uma unidade central (unidade de nível hierárquico superior à unidade concentradora), que permitirá o cruzamento

de dados e análise estatística e levará a um planeamento aliado à exploração do sistema monitorizado. A isto dá-se o nome de gestão de activos.



**Figura 2.1: Quadro de Gestão de Activos**

Como ponto de partida, a manutenção preditiva parece trazer uma melhoria em relação à manutenção correctiva na prestação do serviço, dado que a fiabilidade seria maior com a diminuição da imprevisibilidade das falhas. Assim como vantagem económica, evitando que falhas de um componente causem danos em componentes vizinhos, que antes poderiam estar em funcionamento correcto, evitando deslocações e mão de obra extra. Tem, também, vantagem económica em relação à manutenção preventiva, uma vez que evitaria o excesso de manutenção. É importante não descurar o facto da manutenção preditiva ser a única que requer a aquisição de um sistema de monitorização, o que representará um custo extra em relação ao requerido nos restantes processos

de manutenção. No entanto, sendo um investimento que representa apenas um custo inicial, este acaba por se diluir ao longo do tempo, levando a que os benefícios compensem o investimento.

Como para a gestão de activos é fulcral o conhecimento do estado dos elementos é, assim, importante o conhecimento do funcionamento de um PT e dos seus elementos críticos, sobre os quais se pretende efectuar a monitorização e consequente gestão de activos. Apesar de se ter como alvo as redes eléctricas, este modelo de rede inteligente é aplicável a qualquer outro sistema.

### **2.1.1. Elementos de um Posto de Transformação**

Na rede eléctrica os Postos de Transformação (PT) são a ponte entre a baixa e média tensão. Em Portugal converte, tipicamente, dos 10 kV, 15 kV ou 30 kV (valores típicos para média tensão) para baixa tensão, cujo valor típico é de 230 V fase/neutro e 400 V fase/fase. [3]

No PT pode ser feita uma divisão dos elementos por categorias:

-Conversão MT/BT: É levada a cabo por transformadores, que pode ser, apenas um ou mais (dependendo da capacidade de cada transformador e da potência eléctrica solicitada). [4]

-Segurança: Como categoria mais abrangente, engloba os elementos responsáveis por ventilação e drenagem de água. Assim como, elementos de segurança em domínio de sistemas eléctricos. Estes são, disjuntores, com o objectivo de proteger o circuito de intensidades superiores às requisitadas provocando uma abertura de circuito, e fusíveis de corte, para protecção dos circuitos de média tensão. [4]

Distribuição: Esta engloba os interruptores e seccionadores que são elementos com capacidade de corte quando detectada alguma anomalia e, naturalmente, o quadro de distribuição que é composto, também, pelos elementos anteriormente citados nesta categoria e na de segurança. [4]

Como é possível perceber, existe uma vasta gama de elementos a serem monitorizados. Pressupõe, assim, a necessidade de uma, dispersa, rede de sensores para fim de monitorização das diferentes grandezas representativas dos diferentes estados de funcionamento de cada elemento em causa.

## **2.2. Âmbito Funcional em Redes Eléctricas de Baixa Tensão**

O sistema de monitorização aqui descrito é muito abrangente, pois, qualquer sistema que detenha elementos cujo estado de funcionamento exiba uma ou mais características que possam ser quantificadas (por exemplo, temperatura) é passível de ser monitorizada, por um sistema com lógica de monitorização idêntica. Pois, é, geralmente, possível associar uma mudança nestas características a uma mudança no seu estado de funcionamento. Sendo necessário na grande maioria das vezes o cruzamento de dados, já que uma variável física não é, por vezes, suficiente para determinar um estado.

É natural a aplicação de um sistema de monitorização em redes eléctricas de baixa tensão. Pois são redes com bastantes elementos passíveis de falhas, tais como o transformador (Protecção dos enrolamentos, buchas, cablagens, etc), fusíveis, isoladores, ventiladores, bombas de drenagem de água.

## **2.3. Tratamento de Dados**

O sistema distribuído concebido e anteriormente desenvolvido é composto por sensores inteligentes. Como o nome indica, o objectivo foi de haver um processamento de informação distribuído por todo o sistema, tentando sempre que possível diminuir o fluxo de informação entre elementos constituintes do sistema. O processamento de dados, que não tem finalidade estatística, será, assim, tratado no interior deste sistema. Deste modo, como referido em [1]:

Existem vários elementos que se considera importante monitorizar.

Começando pelo transformador que, embora seja dos elementos que mais raramente apresenta problemas, é um elemento basilar.

### **Transformador: temperatura, padrões de vibração (sensor não intrusivo)**

Assim, pretende-se com o controlo da temperatura do transformador e dos padrões de vibração prever possíveis falhas futuras. O transformador apresenta diversos padrões de vibrações durante o seu funcionamento, padrões provenientes de várias fontes. Geralmente, os padrões de frequências mais baixas são atribuídos a ventiladores e bombas de óleo (abaixo dos 100Hz). Enquanto as vibrações mais altas (superiores a 1kHz) consideram-se, também, extrínsecas ao transformador, não podendo ser consideradas para a análise da integridade. [5]

As vibrações intrínsecas são, geralmente, provenientes dos enrolamentos e do núcleo do transformador. Acredita-se que as vibrações provenientes do núcleo do transformador, de materiais ferromagnéticos, são geradas dada a excitação deste quando exposto ao fluxo magnético, que gera um processo magnetorestritivo. Enquanto as vibrações provenientes dos enrolamentos são causa das forças de Lorentz. [5]

Estas vibrações ocorrem no intervalo dos 50Hz até aos 1kHz, em múltiplos de 50Hz, fazendo deste o intervalo relevante para análise da integridade do transformador. [5]

É, assim, possível abranger um vasto leque de possíveis falhas que possam ocorrer, já que grande parte provoca deformações nos enrolamentos do transformador e consequente alteração dos seus padrões de vibração, iniciais. O controlo da temperatura permite também detectar falhas frequentes, tais como curto circuitos entre os enrolamentos e a cuba do transformador, resultando assim num aumento de temperatura que pode ser detectado, que consequentemente, dado o aumento de temperatura, haverá também, alterações no isolamento que causará, de novo, uma mudança nos padrões de vibração. [5]

**Transformador: detecção de descargas parciais no circuito de input MV (sensor ultra-sónico 40khz, não intrusivo)**

A detecção das descargas parciais são um aspecto fundamental para o diagnóstico da integridade do isolamento do transformador. As descargas parciais são mais frequentes, quanto menor for a rigidez dielétrica do isolamento. [6] O aumento da ocorrência destes casos, em condições meteorológicas idênticas, é, assim, um indicador de deterioração do isolamento da bucha.

**Quadro de distribuição: informações de estado de todos os fusíveis e detecção em tempo real de fusíveis queimados.**

Os fusíveis são componentes que se sacrificam com o intuito de proteger os circuitos de correntes altas. No entanto, quando o fusível se queima, apesar de evitar o problema maior, que seria a danificação de componentes mais importantes. O circuito, no qual o fusível se encontra, ficará inutilizado até que o fusível seja repostado e corrigido o, possível, problema que levou ao corte providenciado pelo fusível, entretanto queimado.

Assim, a detecção com brevidade de fusíveis queimados é importante por forma a diminuir o tempo de inactividade, e um indicador importante da potencial origem do problema.

**Quadro de distribuição: Aquisição de dados do valor RMS do fluxo da corrente em cada output LV nos circuitos de fase única.****Condições ambientais:**

- Aquisição de dados de temperatura e humidade relativa para detecção de fogo ou diagnóstico de problemas de ventilação.
- Detecção de inundações ou diagnóstico de problemas de bombeamento de água e alarmes.

**Alarme de intrusão:** Detecção de intrusão por portas ou grelhas de ventilação.

**Detecção de tentativa de roubo de transformador do tipo poste. Detecção de escalada ao poste, detecção de operação do interruptor de desconexão do input-MV não autorizada e detecção de mudanças na posição dos transformadores.**

Também, entre os dados gerados por sensores de humidade e temperatura, haverá um cruzamento de dados levado a cabo pela unidade concentradora sempre que é detectada uma descarga parcial, a fim de saber se a descarga pode ou não ser considerada grave, dependendo da temperatura e da humidade no instante e da localização da descarga. Desta forma, apenas em caso de alarme, haverá uma comunicação imediata do sucedido à unidade central que por sua vez comunicará a ocorrência, e possivelmente armazenará a ocorrência para fins estatísticos.

Os dados que poderão ser utilizados para determinar estados de degradação do equipamento, tais como a frequência das descargas parciais ou características de vibração do transformador terão de ser comunicados à unidade central onde será feito um armazenamento da informação para o devido tratamento estatístico. Esta informação será utilizada quer para manutenção preventiva quer para a gestão de activos.

Enquanto, unidade concentradora funcionará como uma unidade integradora. Esta será, a ponte entre toda a nuvem de sensores existente no PT e o exterior (unidade central). Esta detém, também, a capacidade de armazenamento para um dia, processamento de dados (principalmente cruzamento de dados) ou fusão de dados (vulgarmente referido como Data Fusion), e integração do sistema na rede exterior. Esta unidade tem, portanto, um papel importante na interpretação do estado geral de toda a rede eléctrica.

Como rede de sensores que detém uma larga gama de recolha de dados, a fusão de dados surge como a disciplina que se responsabilizará pela organização e interpretação dos mesmos. A Fusão de dados define-se por um conjunto de regras que agrega os dados provenientes de determinadas fontes a fim de produzir um output bem definido.

Existem vários tipos de Fusão de Dados:

-Complementar, é a fusão dos dados recolhidos de sensores que são independentes entre si, mas que combinados formulam um quadro de estado mais abrangente. Um exemplo simples é o conhecimento de dados de dois PT. Os dados recolhidos no PT nº1 não servirão para determinar estados de funcionamento de elementos no PT nº2. No entanto, o conhecimento dos dados provenientes dos dois permitirá criar um quadro mais abrangente. Pois conhecer-se-á o estado de dois PT e não apenas um. [7]

-Redundante, baseia-se na aquisição de dados de igual natureza que servem para aumentar a confiança na informação recolhida e no conhecimento do estado. Ou seja, um segundo conjunto de dados geralmente não trás informação nova, apenas um aumento de confiança nos medidos anteriormente; [7]

- Cooperativa, como o nome indica é a interpretação de um estado baseado em mais de um dado. Quando apenas um dado ou conjunto de dados não é suficiente para definir a condição. Um exemplo simples dá-se quando há uma descarga parcial. Haver uma descarga não significa, necessariamente, que haja necessidade de agir. Logo, para perceber a gravidade da ocorrência é necessária a cooperação de mais dados, tais como humidade e temperatura. [7]

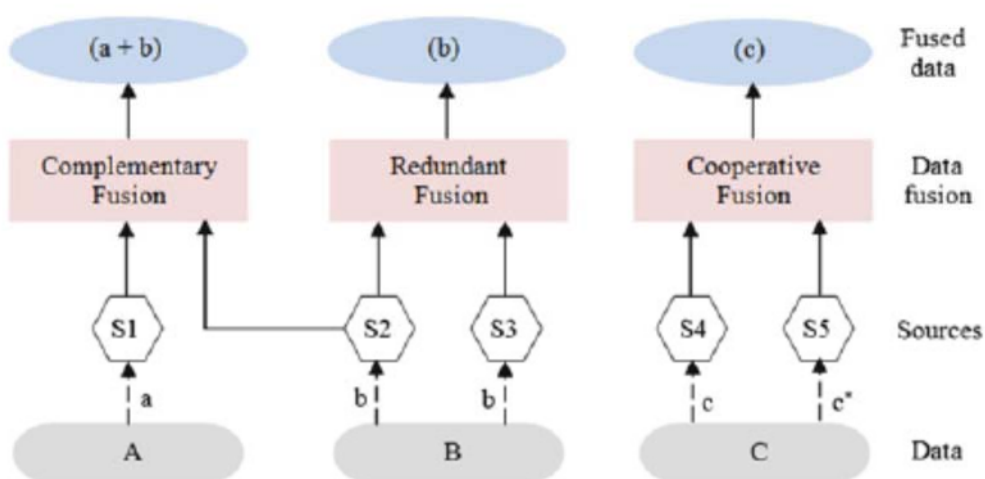


Figura 2.2: Tipos de Fusão de Dados [7]



Convém, também, referir que o processamento de informação que tornará este num sistema de suporte à decisão será, não na totalidade, mas, maioritariamente levada a cabo pela unidade central.

A lógica utilizada neste sistema dá-se pelo nome de lógica difusa, mais vulgarmente conhecida como *Fuzzy Logic*. À semelhança das logicas booleanas haverá um conjunto de inputs e apenas um output. No entanto, ao contrário da lógica booleana, os valores de input e output têm mais que dois estados possíveis.

Um exemplo aplicado a este projecto é o definir do nível de alarme, após a detecção de uma descarga parcial, dependendo da humidade. Onde verde é sem gravidade apenas sinalizando uma ocorrência, amarelo indica que algo poderá não estar bom estado de funcionamento e vermelho simboliza urgência. Assim, uma vez detectada uma descarga parcial este é o processo:

```
IF humidity IS high THEN alarm is green
IF humidity IS medium THEN alarm is yellow
IF humidity IS low THEN alarm is red
```

Os níveis de humidade *low/medium/high* são meramente representativos não simbolizando qualquer valor em específico, podendo ser programados pelo utilizador.

## 2.4. Comunicação para a Integração

Os meios de comunicação têm sofrido uma rápida mudança de paradigma. Dadas as vantagens de possuir uma rede global que interliga sistemas (dotando-os de uma comunicação mais rápida e maior facilidade no intercâmbio de dados entre diferentes dispositivos) o repto foi lançado: A compatibilidade. A padronização tem sido o principal caminho na procura da compatibilidade. Com base nesta ideia de padronização, criaram-se protocolos de comunicação que são hoje utilizados pela grande maioria dos serviços de comunicação (tais como IEC 104).

Com esta ideia, de uma rede geral que interligue todos os dispositivos e redes de menor dimensão, surge o nome *Internet of Things* (IOT). Que aplicado ao contexto industrial se dá pelo nome *Industrial Internet of Things* (IIOT) [9].

Existe, no entanto, duas realidades diferentes entre o contexto industrial e o exterior a este. No contexto industrial o objectivo é que os processos sejam acompanhados em quase tempo real, portanto existe uma preocupação com a velocidade e ainda a procura pela diminuição de gastos energéticos, não esquecendo que por vezes a comunicação é intermitente. Enquanto, no exterior do contexto industrial muitos dos utilizadores são humanos, que por preferência própria, a prioridade é permitir ao utilizador sentir-se familiarizado com a informação recebida, onde há, conseqüentemente, a necessidade de uma largura de banda maior que em redes onde a comunicação se dá máquina com máquina (M2M), não havendo tanta preocupação com os gastos energéticos. Um exemplo são as videochamadas, cuja largura de banda ultrapassa largamente o requerido numa comunicação M2M. Logo, existe aqui uma diferença cabal entre aquilo que é uma rede predestinada a interacções H2M (Humano/Máquina) ou H2H (Humano/Humano) e M2M.

Portanto, neste projecto, como planeamento inerente à gestão de activos, será lógica a criação de uma rede entre os elementos não humanos (sensores inteligentes), uma vez que estes não necessitarão de comunicar directamente com o humano, permitindo poupar em largura de banda e equipamento desnecessário e sobredimensionado para o efeito, não descurando a procura pela autonomia energética. Esta rede será fechada entre sensores e a Unidade Concentradora que, como já referido, também servirá de ponte para o exterior.

Por fim, como produto de engenharia que se pretende criar, não é desejada que este sistema se isole em termos de capacidade em relação aos demais produtos. Isto é, não convém menosprezar nenhum aspecto que possa pôr em causa o seu funcionamento. Assim, a comunicação assume um papel crítico neste aspecto. Dada a imensa utilização de determinados protocolos e a tão grande oferta de produtos, não recorrer aos protocolos mais utilizados poderá aumentar enormemente a resistência no mercado, pois colocaria o utilizador perante

problemas de compatibilidade. Posto isto, conclui-se que os protocolos de comunicação para integração de um sistema deste tipo deverão ser os mais utilizados.

### **Integração no sistema interno:**

Pretende-se que a rede de sensores *wireless* (WSN/WPAN) detenha uma capacidade de autoconfiguração e de fácil integração de novos componentes na rede (escalabilidade). Ou seja, uma rede expansível para quando haja a necessidade de acrescentar ou remover componentes do posto de transformação, haja uma forma fácil e rápida de acrescentar ou remover.

Existe, no entanto, a necessidade de reconfiguração da unidade central quando um sensor diferente dos já existentes é acrescentado, pois necessitará de um tratamento de dados diferente.

A comunicação interna está baseada em ZigBee pois apresenta várias vantagens em relação aos concorrentes Wi-Fi e Bluetooth, sendo a de maior a compatibilidade e mais frequentemente utilizado em M2M.

	Bluetooth	ZigBee	Wi-Fi 802.11
Data rate	1 Mbit/s	20, 40, and 250 kbits/s	11 and 54 Mbits/s
Range	10 m	10 to 100 m	Up to 100 m
Networking topology	Ad-hoc, small networks	Ad-hoc, peertopeer, star, or mesh	Point to hub
Frequency	2.4 GHz	868 MHz (Europe), 900 to 928 MHz (North America), 2.4GHz(worldwide)	2.4 and 5 GHz
Power consumption	Low	Very low	High
Typical applications	Inter-devicewirelessconnectivity, e.g., phones, PDAs,laptops,headsets, cameras, printers, serial cable replacements	Industrial control and monitoring, sensor networks, buildingautomation, toys, games	Wireless local-area network (WLAN) connectivity, broadbandInternet, security cameras

**Figura 2.3: Diferenças entre Protocolos [9]**

### **Integração do sistema na rede externa:**

A integração na rede externa é feita através da unidade central que deterá um modem GPRS para o efeito.

## **2.5. Definição do Projecto**

Esta dissertação engloba-se no projecto da Eneida, citado em [1]. O projecto apresentado foi de um sistema de diagnóstico completo baseado numa rede de sensores inteligentes, *wireless*, escalável, de monitorização de subestações secundárias. Esta dissertação procura abarcar parte dos tópicos e apresentar propostas, que são: desenvolvimento de um sensor sonoro de detecção e localização de descargas com vista em facilitar o diagnóstico do problema causador das mesmas. O dispositivo DGPT2, cujo nome deriva de: *Discharge of gases, Pressure and Temperature (2 thresholds)*, foi criado para a detecção de gases, medição de pressão e duas temperaturas (O funcionamento mais detalhado deste dispositivo poderá ser lido em [10]. É, no entanto, um dispositivo passivo cujo *output* é binário com base em contactos secos. Apresenta-se, assim, uma proposta para um sensor capaz de substituir o DGPT2 (apresentando as devidas vantagens), através da medição da temperatura e da pressão do óleo dentro do transformador.

Assim como falar sobre algumas noções sobre sistemas de monitorização com arquitecturas fortemente distribuídas.

O sensor sonoro de localização e de detecção de descargas parciais terá dois/três microfones que permitirão medir diferenças temporais entre a recepção do sinal. Assim, permitirá discriminar a origem sonora. Para permitir distinguir entre 4 potenciais origens:

- Travessias MT (na carcaça do transformador);
- Disjuntor MT (Entrada no PT);
- Quadro geral BT;

- Entrada de cabos de MT (no quadro).

Este sensor em conjunto com um microfone que estará colocado junto da cuba do transformador permitirá também discriminar descargas provenientes do interior do transformador.

O sensor responsável pela medição da temperatura e pressão do óleo representará uma alternativa mais económica aos sistemas mecânicos anteriormente utilizados, que não possuem capacidade de comunicação de dados. A temperatura seria medida no interior do transformador junto à parte superior.

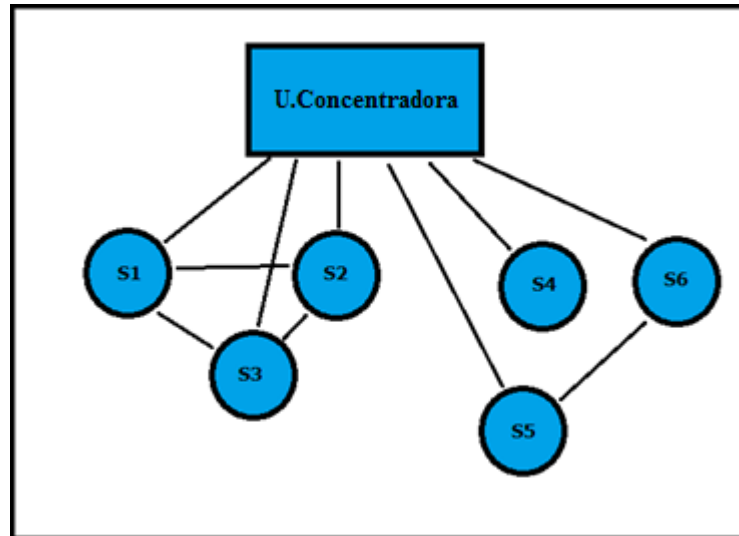
## 3. Arquitectura Geral do Sistema

### 3.1. Estruturação do Sistema

Sendo este sistema projectado para a monitorização de um posto de transformação, não haverá necessidade de troca de grandes quantidades de informação e estará confinado a um espaço relativamente pequeno (geralmente um PT cabinado tem dimensões na ordem dos: 4m x 3m x 3m).

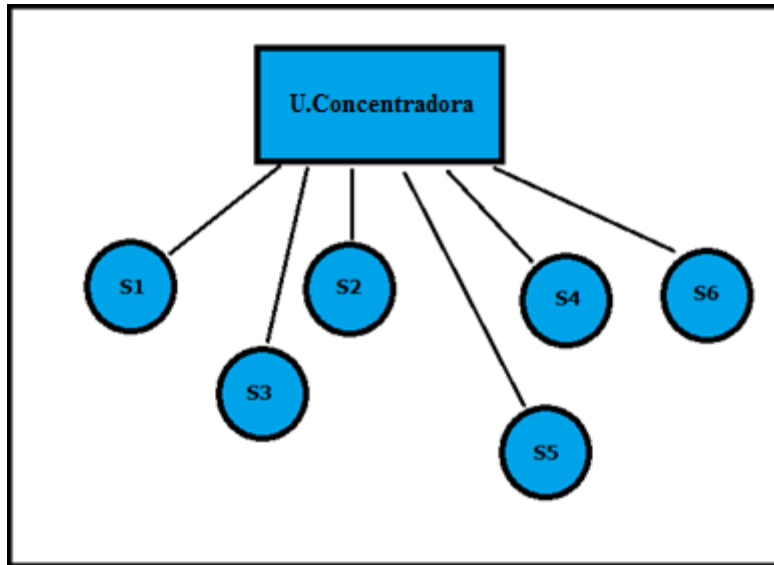
Inicialmente, foram discutidos dois tipos de topologias que, à partida, seriam as mais indicadas. Partindo do princípio que a unidade concentradora é a unidade que gere a rede e o ponto de ligação entre a rede pública e a rede interior ao sistema de monitorização, surgiram dois tipos possíveis: A topologia *Mesh* Parcial e a topologia em estrela.

A topologia *Mesh* Parcial foi equacionada com o intuito de diminuir o numero de vezes que os sensores comunicavam com a unidade concentradora, apenas quando isso fosse imperativo (isto é, para alarme e para actualizar a informação conhecida pela unidade). Assim, caso houvesse uma ocorrência que fosse ou de risco muito baixo ou risco nulo (falso alarmo), os sensores não chegariam sequer a dar conhecimento à unidade concentradora. Resultando numa rede em que parte dos sensores comunicariam entre si, consoante as necessidades já pré-estabelecidas e necessárias para cada diagnóstico. A esta topologia acrescenta-se o termo “Parcial” pois, diferindo da topologia *Mesh*, nem todos os elementos comunicariam entre si, visto que não haveria necessidade para tal.



**Figura 3.1: Topologia *Mesh* Parcial**

A topologia em Estrela, que foi a primeira sugestão, acabou por prevalecer como a escolha final, visto que todos os sensores, de tempo a tempo, teriam de informar a unidade central quanto aos valores das grandezas que mediam (isto para os sensores que medem variáveis como humidade, temperatura, etc.) e visto que, praticamente, todas as grandezas medidas não são de mudança repentina, faz com que seja desnecessário comunicar entre sensores. Pois, esta unidade já tem um conhecimento prévio de todas as variáveis (com alguma confiança poderá tomar o último valor recebido como válido, caso ainda não tenha sido, novamente, actualizado pelo sensor) e, assim, comunicando com esta evitar-se-ia a replicação de informação enviada, a fim de otimizar o sistema.



**Figura 3.2: Topologia em Estrela**

A topologia *Mesh* parcial poderia ainda assim ser a mais viável caso fosse aplicada uma lógica de actualização, em que cada sensor (excepto os sensores que são reactivos, que detectam ocorrências tais como o sensor de descargas) só necessitaria de informar a unidade quando houvesse um novo máximo ou mínimo, e enviando à unidade central ao final de 24h a média de valores.

Desta forma, permitiria criar um sistema que gastaria muito menos energia em comunicação permitindo, necessariamente, que houvesse troca de informação entre sensores quando houvessem determinados tipos de ocorrências, tais como as descargas parciais.

### **3.2. Mecanismos de Comunicação**

Com a utilização da topologia de estrela, pretende-se criar uma rotina de actualização para a unidade concentradora, que funciona como unidade integradora. Isto é, dependendo das grandezas que cada sensor mede, determinar-se-á qual será o intervalo de tempo ao fim do qual o sensor efectuará nova medida e informará a unidade da mesma. Logicamente, o sensor de descargas parciais representará uma modalidade diferente, pois, uma vez que este detecta a existência de descargas, não lhe serão associadas quaisquer



rotinas. Não caberá, assim, a cada sensor determinar se os valores que mede representam qualquer tipo de alarme ou necessidade de manutenção. Toda essa análise será feita na unidade concentradora, avaliando quer temperaturas, humidades, assim como correlacionando-as, e criando padrões de frequência (mais para o caso das descargas) a fim de verificar se existem tendências que indiquem degradação dos elementos monitorizados. Isto permite eliminar dos sensores a necessidade de comunicar frequentemente, dada a necessidade de correlação de dados e permitindo também afastar a necessidade de maior capacidades de processamento nos sensores inteligentes, o que não seria muito económico, pois os sensores de um sistema de monitorização podem encontrar-se em grande número e equipá-los com capacidades de processamento superiores para que fossem capazes de levar a cabo este tipo de tarefas resultaria num aumento do custo do sistema, e consumo energético. São dois factores que se pretendem reduzir ao mínimo, em seja qual for o projecto de engenharia (custo e consumo energético).

Como já referido anteriormente, dadas as dimensões reduzidas do PT, não existe necessidade de aposta numa rede de comunicação de maior alcance. Sendo suficiente qualquer rede de baixa potência (embora qualquer rede de baixa potência seja suficiente para efectuar o serviço requerido, este não é o requisito único para a escolha do tipo de comunicação), sendo também suficiente uma largura de banda relativamente “estreita”. É, assim, um dado adquirido que o mais correcto será a implementação de uma rede de curto alcance e baixa potência.

A comunicação entre a unidade concentradora e o exterior seria feita através de uma rede de dados móvel já amplamente utilizada, GPRS. Apesar de ser hoje a aposta mais correcta, haverá a possibilidade de num futuro próximo haver uma transição para LTE, na sua totalidade. Podendo até ser aplicável uma rede LTE Low Power para a comunicação entre sensores e Unidade concentradora.

## 4. Gateway/Unidade Concentradora

Esta rede de sensores é projectada para que os sensores não processem a informação por eles gerada. Isto é, os sensores inteligentes como elementos constituintes da rede têm apenas a função de receber o estímulo físico, processar o sinal, quantificar a grandeza física que medem e comunicá-la. Existe, no entanto, o sensor localizador de descargas parciais que terá de processar alguma informação e posteriormente comunicar, como será explicado no capítulo 5.

Existe, assim, a necessidade de processamento da informação comunicada por estes sensores, a fim de realizar diagnósticos. Neste projecto a Unidade Concentrador tem o papel de agregar todos os dados e de realizar análises quer por base de comparação com patamares definidos, quer por análise estatística para percepção de evoluções no desgaste de elementos monitorizados assim como análise de repetição de ocorrências.

Tem também a função de comunicar dados relevantes à unidade central, onde as análises estatísticas serão feitas baseadas em intervalos de tempo superiores às feitas por esta unidade.

## 5. Novos Sensores

Neste capítulo pretende-se apresentar propostas para dois sensores inteligentes a fim de serem aplicados neste sistema de monitorização, com o intuito de aprofundar o âmbito de o diagnóstico.

Primeiro, o localizador de descargas, que será projectado para estar no interior de um Posto de Transformação cabinado, a fim de discriminar entre as possíveis origens de descargas parciais, aquando da sua detecção.

E, por fim, uma proposta para um sensor múltiplo, a ser embebido nos transformadores, para monitorizar a temperatura e pressão na cuba de óleo, com vista em apresentar melhorias em relação ao, até hoje, utilizado, DGPT2 [10], procurando trazer melhorias na gestão destes activos.

### 5.1. Localizador sonoro de descargas parciais

Este sensor inteligente tem como objectivo indicar a direcção de descargas parciais quando estas ocorrem. Sendo um sensor sonoro procura-se detectar a existência de descarga parcial na detecção de uma perturbação mecânica.

As descargas emitem som em grande parte da gama de frequências sonora, incluindo a zona audível, no entanto, para as descargas de pequena intensidade, dada a maior atenuação que os sinais sonoros sofrem para frequências maiores [10], as pequenas descargas tornam-se, praticamente, indetectáveis com o aumento da distância, enquanto nas frequências onde existe menos atenuação, geralmente são frequências que apresentam muito ruído. Assim, é aconselhável que se utilize um microfone para frequências na casa dos 40 kHz, que se localiza nos ultra-sons (gama relativamente silenciosa), sendo das frequências ultra-sónicas que menos atenuação sofre.

No entanto, na possibilidade de haver outro tipo de fontes emissoras de som na frequência de 40 kHz, este sensor estará equipado com um pequeno condutor que terá o efeito de antena e que permitirá descartar detecções de ruído sonoro

não relevante. Isto porque, geralmente o ruído sonoro proveniente de uma descarga parcial é precedido de uma perturbação electromagnética e, assim, qualquer que seja a detecção sonora não sequente a uma perturbação electromagnética será ignorada.

Pretende-se, neste trabalho, averiguar dois possíveis localizadores de descargas, um baseado na utilização de dois microfones e outro com três. O funcionamento deste localizador baseia-se na medição da diferença temporal entre os dois ou três microfones, sendo posteriormente possível saber, com os cálculos indicados, o ângulo que descreverá a direcção da fonte sonora, a fim de se conseguir discriminar, em duas dimensões, entre várias fontes possíveis de descargas parciais, qual a responsável por cada descarga detectada.

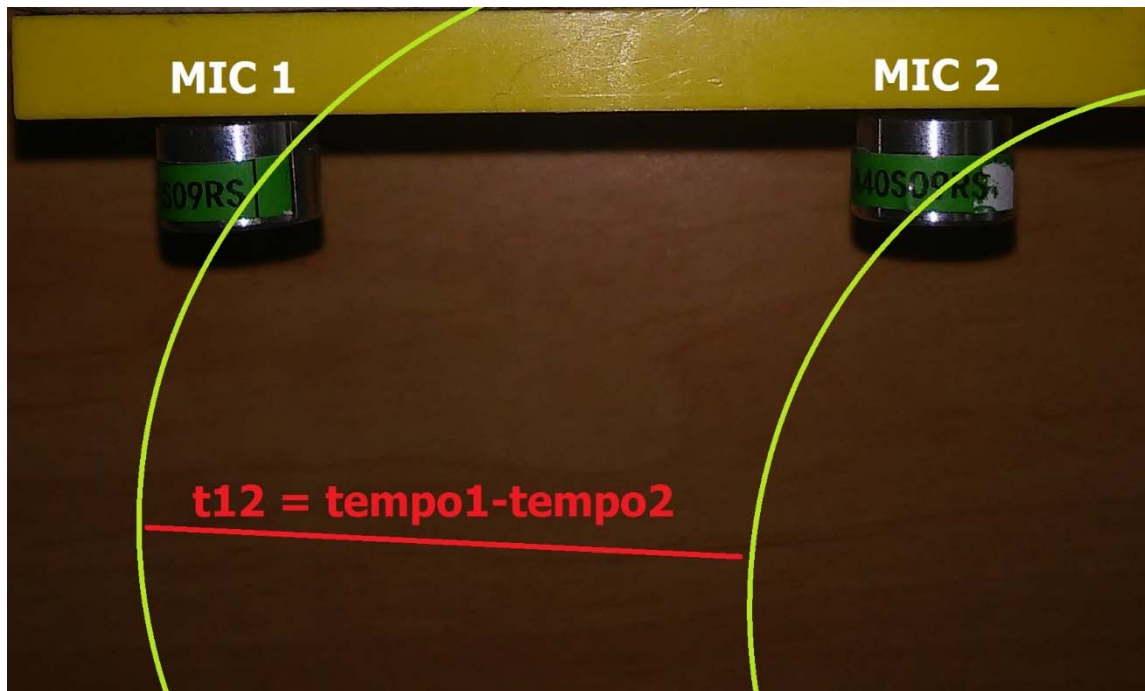
### **5.1.1. Fundamento de Funcionamento**

#### **5.1.1.1. Montagem com dois Microfones**

Este sensor inteligente começa por medir a diferença temporal entre a passagem da mesma onda sonora pelo microfone 1 e pelo microfone 2.

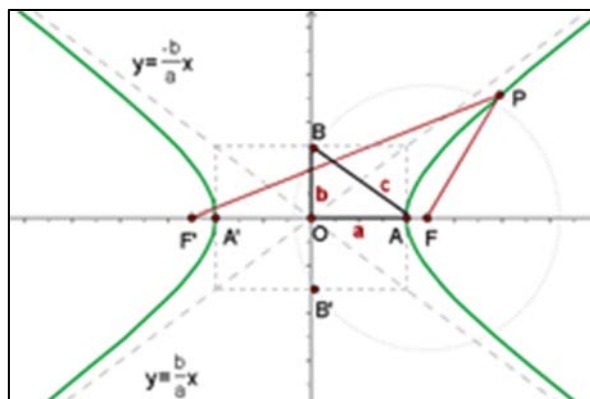
Os microfones 1 e 2 estão indicados na figura seguinte como MIC1 e MIC2, respectivamente.

A diferença temporal já referida e identificada na figura como “ $t_{12}$ ” permite, através de tratamento matemático, obter um ângulo que será a direcção da fonte emissora do som. Que à partida será produzido pela descarga parcial.



**Figura 5.1: Diferença Temporal entre Microfones**

Baseando estas relações em conhecimento matemático, existe aqui uma relação hiperbólica. Ou seja, como podemos observar na figura seguinte:



**Figura 5.2: Hipérbole [11]**

São bem conhecidas as relações seguintes::

$$\begin{aligned} \overline{PF} - \overline{PF'} &= 2a \\ c^2 &= a^2 + b^2 \\ \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} &= 1 \end{aligned}$$

Assim, considerando que os microfones são os focos da parábola podemos afirmar segundo as leis já conhecidas que, sendo P, o local de emissão de som:

$$|\overline{E MIC1}| - |\overline{E MIC2}| = \pm 2a$$

Considerando que o ponto central do segmento que une os microfones é a origem ox, e que o segmento tem comprimento de  $2l$ , MIC1 estaria na posição  $(l, 0)$  e MIC2 na posição  $(-l, 0)$  e os vértices da parábola em  $v1 = (-a, 0)$  e  $v2 = (a, 0)$ .

Assim, dados  $a$  e  $c(=l)$ , a equação da hipérbole será dada por:

$$b^2 = l^2 - a^2$$

$$a = \pm \frac{t_{12}}{2}$$

Portanto:

$$\frac{x^2}{\frac{t_{12}^2}{4}} - \frac{y^2}{l^2 - \frac{t_{12}^2}{4}} = 1$$

Esta equação deduzida da hipérbole diz-nos o conjunto exacto de pontos possíveis no espaço, onde uma fonte emissora ao emitir uma onda sonora provocaria uma medição de um certo  $t_{12}$ .

No entanto, é possível simplificar esta forma e obter uma fórmula que nos dirá o ângulo que será aproximadamente o correspondente ao real.

Como se pode observar na Figura 5.2 existe uma assíntota para a qual a hipérbole tende ao afastar do centro do plano.

Como o local onde este instrumento será implementado é dentro de um PT onde as distâncias entre o localizador de descargas e as potenciais fontes geradoras de descargas parciais (Transformador, Quadro Geral de Baixa Tensão – QGBT, e Disjuntor de Média Tensão) se localizam a distâncias bem maiores que a distância entre microfones, o erro entre a assíntota para a qual a hipérbole tende e a própria hipérbole é mínimo. Logo, a opção será simplificar quando o erro é irrelevante.

Assim, obteremos uma equação para a recta (assíptota) que descreverá o conjunto de pontos possíveis, aproximados, para a posição da fonte sonora.

$$y = \pm \frac{b}{a} x$$

Que resulta em:

$$y = \pm \frac{\sqrt{l^2 - \frac{t_{12}^2}{4}}}{\frac{t_{12}}{2}} x$$

Assim o ângulo que a esta recta fará com o segmento que une os Microfones será:

$$\alpha = \tan^{-1} \pm \frac{\sqrt{l^2 - \frac{t_{12}^2}{4}}}{\frac{t_{12}}{2}}, \text{ para } t_{12} \neq 0$$

$$\alpha = 90, \text{ para } t_{12} = 0$$

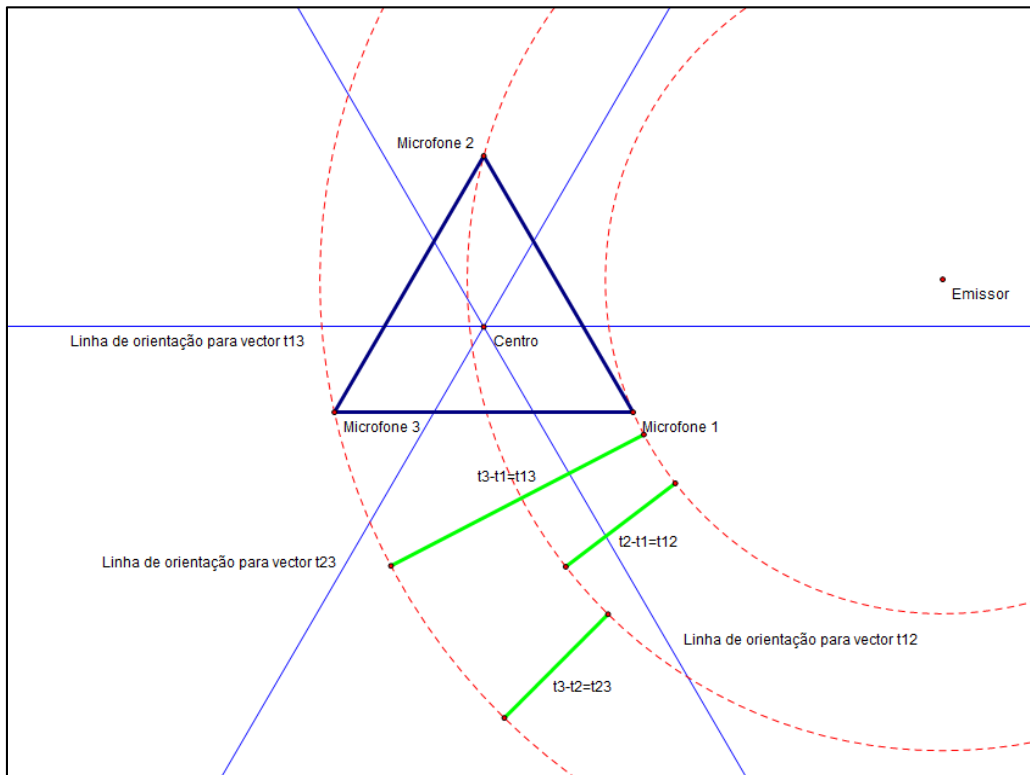
Vale a pena referir que, apesar de  $t_{12}$  ser referido, constantemente, como uma medida temporal, todos os  $t_{12}$  referidos nas fórmulas representam a distância percorrida pelo som em  $t_{12}[\text{s}]$ :

$$t_{12}[\text{m}] = v_{\text{som}}[\text{m/s}] \cdot t_{12}[\text{s}]$$

Assim, será possível relacionar geometricamente a posição dos microfones com a orientação do emissor.

### 5.1.1.2. Montagem com três Microfones

A montagem com três microfones tem uma abordagem um pouco mais simples, apesar de poder levar um tratamento matemático igualmente complexo, através da correlação de hipérbolas, como explicado anteriormente.



**Figura 5.3: Diferenças Temporais: Montagem de Três Microfones [12]**

Como se pode observar na Figura obter-se-ão três diferenças temporais. A partir da abordagem mais complexa, e que levaria a requisitos de processamento bastante elevados, passaria pela intersecção das três hipérboles resultantes das três diferenças temporais, ou seja, passaria pela resolução de um sistema de três equações cujo resultado final requereria bastante esforço de processamento. Teria, no entanto, e naturalmente, as suas vantagens em relação ao modelo que aqui se apresenta, pois, através da resolução do sistema de três hipérboles, não só se obteria a orientação como a distância do emissor aos microfones. Ou seja, ficar-se-ia a saber a posição exacta. No entanto, para esta aplicação, tal não é necessário, pois a posição das possíveis fontes geradoras de descargas parciais tem posições fixas no espaço, que são conhecidas, bastando a discriminação da orientação da propagação do som para saber qual a fonte que o emitiu.

A abordagem matemática aos dados temporais recolhidos por este sistema passa pela simples soma vectorial de cada vector temporal.



$$v_x = \frac{1}{2}(t_{12} + t_{23}) + t_{13};$$

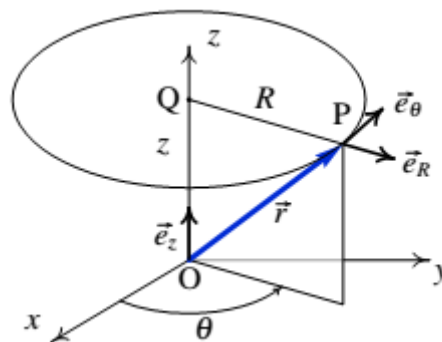
$$v_y = \frac{\sqrt{3}}{2}(t_{23} - t_{12});$$

Assim o ângulo de orientação é obtido a partir de:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v_y}{v_x};$$

### 5.1.1.3. Diferenças Assinaláveis

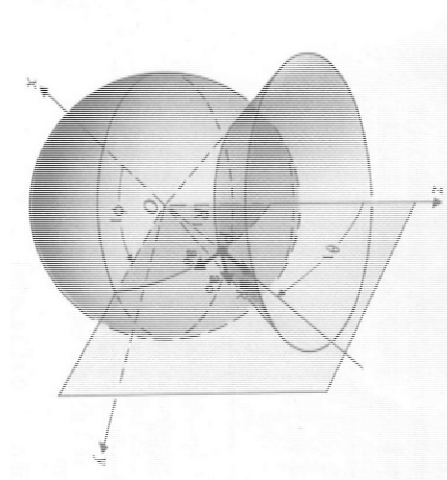
A montagem de três microfones é apenas válido para um plano, de duas dimensões. No entanto, dado a simplificação com uma abordagem vectorial, diminuirá os erros que possam estar relacionados com a altura do emissor em relação ao plano de duas dimensões em que este actua. O sistema de coordenadas cilíndrico será o mais apropriado para a representação do ângulo indicado por esta montagem.



**Figura 5.4: Plano de Possíveis Posições Para Emissor [14]**

Onde a definição do ângulo  $\theta$  resultará num plano de posições possíveis.

A montagem de dois microfones permite saber o ângulo que a fonte emissora faz com o eixo que une os dois microfones. Isto significa que qualquer que seja a posição do emissor no espaço, não haverá erro associado à posição.



**Figura 5.5: Cone de Possíveis Posições Para Emissor [14]**

Nesta montagem, após a definição do ângulo  $\theta$ , surge um cone de posições possíveis. Este cone é no entanto limitado, uma vez que o ângulo de abertura necessário é menor que  $180^\circ$  graus.

### **5.1.2. Componentes**

Para o efeito de captação de ondas ultra-sónicas, existem duas opções principais. De seguida apresentam-se as mesmas e a razão pela escolha que foi feita.

#### **5.1.2.1. Microfone MEMS**

Os dispositivos MEMS destacam-se, principalmente, pelas dimensões reduzidas. São dispositivos com partes mecânicas e, geralmente, com electrónica integrada. [15]

Para este sensor inteligente (localizador), as reduzidas dimensões seriam uma grande vantagem, dado a necessidade de encurtar a distância entre microfones: com a abordagem matemática explicada anteriormente, quanto menor a distância entre os microfones, menor será a relação (Distância entre microfones/Distância entre sensor e fonte), o que acarreta um aumento da

exactidão. Um microfone MEMS permitiria diminuir bastante essa distância em relação a qualquer outro microfone, uma vez que tem dimensões bastante mais reduzidas. Dada a também reduzida dimensão da entrada sonora deste tipo de microfones, aproximando-se do microfone teórico (pontual), seria possível diminuir possíveis erros associados à dimensão do microfone.

Estes microfones têm, no entanto, algumas desvantagens, que os deixam fora de opção. A primeira desvantagem é o ângulo de abertura reduzido que impossibilitava a utilização do microfone para este fim.

A segunda e terceira, é uma desvantagem já natural aos microfones MEMS: o preço, que é mais elevado, e a amplitude da resposta mais reduzida que os Piezoelétricos, necessitando de uma maior amplificação.

### 5.1.2.2. Microfone Piezoelétrico

Os microfones piezoelétricos são compostos por materiais que quando expostos a perturbações mecânicas geram uma diferença de potencial. Quando um cristal é formado por átomos em geometrias que não apresentam simetria central, ao haver uma deformação mecânica cria-se um desequilíbrio de cargas, manifestando-se numa diferença de potencial. Como podemos observar na seguinte Figura.

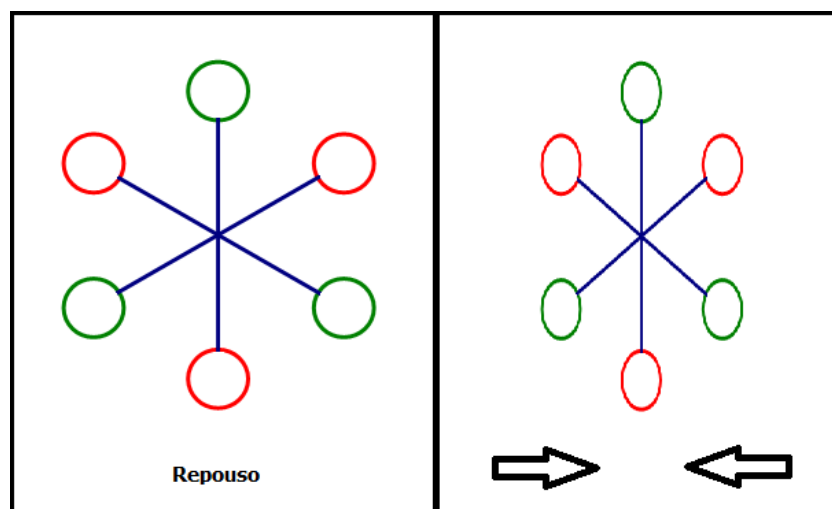


Figura 5.6: Desequilíbrios de Carga por Falta de Simetria Central

Como a Figura exemplifica, a deformação criou um desequilíbrio de cargas no espaço, resultando na criação de um dipolo eléctrico.

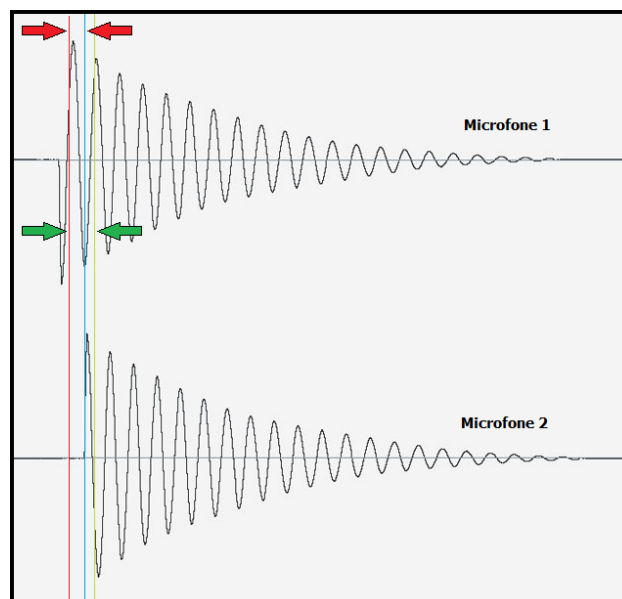
O inverso ocorre quando aplicado uma diferença de potencial.

A desvantagem deste microfone para o uso no sensor inteligente está apenas na sua dimensão, que obriga a que a distância entre microfones aumente por forma a diminuir possíveis erros associados à dimensão da superfície que pode ser estimulada por ondas mecânicas.

### 5.1.3. Circuito

Inicialmente apostou-se na criação de um circuito de amplificação inversora, com um ganho de 100, e um comparador.

Dado o facto de se saber a polarização do microfone, não existe a necessidade da rectificação do sinal proveniente do microfone com uma ponte de díodos, permitindo, assim, simplificar o circuito final. Caso a polarização fosse desconhecida, não se saberia se as mesmas ondas recebidas nos microfones seriam captadas invertidas, o que originaria erros de medida como a próxima Figura exemplifica:

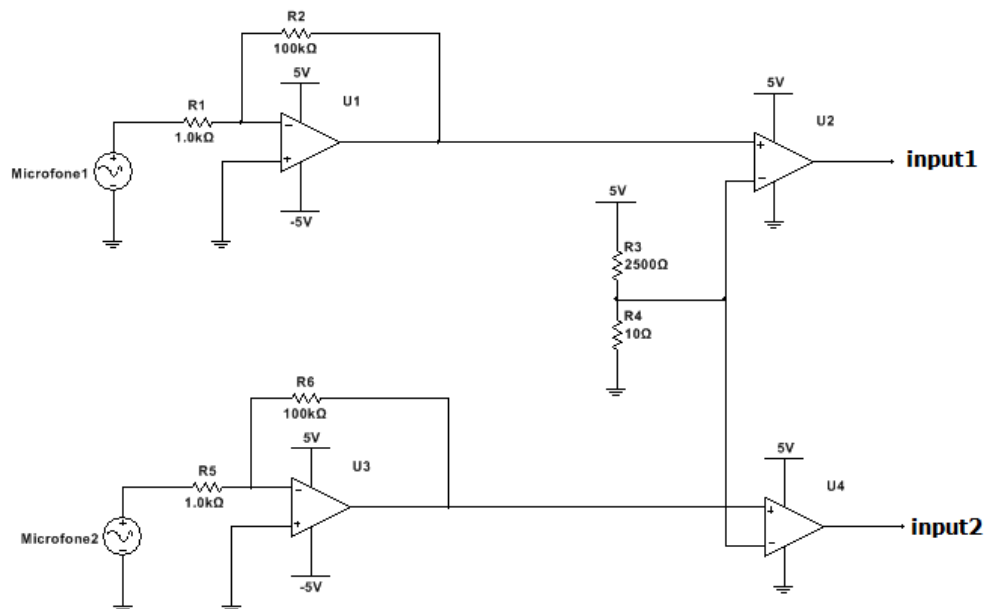


**Figura 5.7: Erro Temporal Associado a Polarização Invertida**

Como é possível perceber pela Figura, caso não se soubesse a polarização do microfone, a possibilidade de haver ondas invertidas resultaria na medição de atrasos temporais errados entre os sinais sonoros, enquanto um dispararia o comparador no primeiro impulso o outro só o dispararia no segundo impulso da mesma onda, obrigando à utilização de rectificadores.

Uma vez descartada esta necessidade, por conhecimento da polarização, bastou depois da amplificação do sinal, colocar apenas a secção de comparação que estará ligado a um pino digital de um Arduino Leonardo actuando um *interrupt*.

O primeiro esboço resultou no circuito da Figura 5.8:



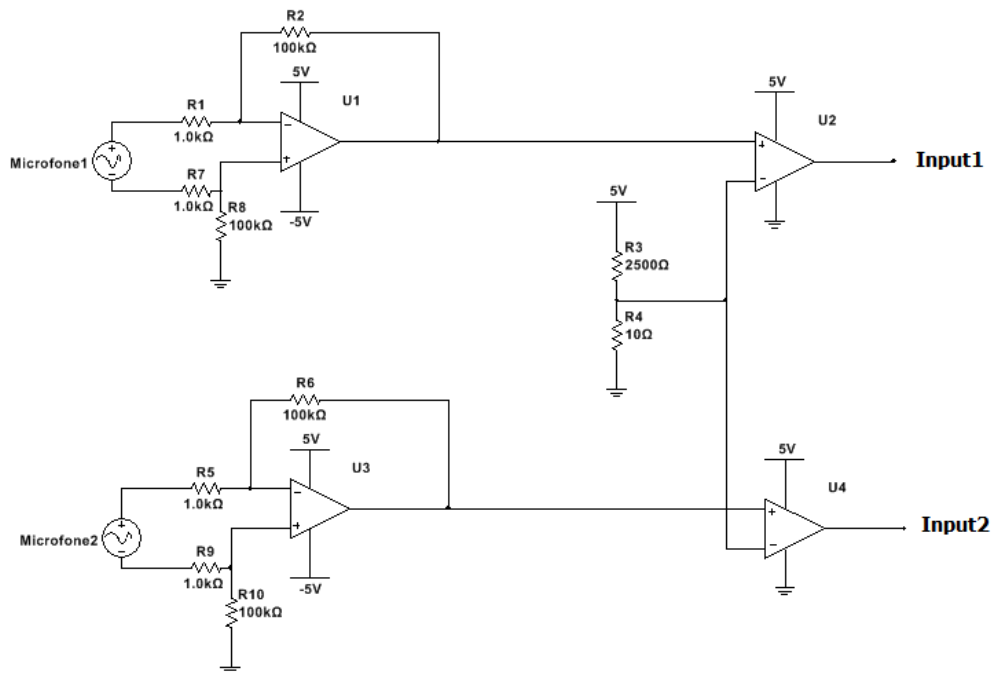
**Figura 5.8: Montagem Inversora**

Para testar o circuito utilizou-se um gerador de Van de Graaff. Era, no entanto, já sabido e esperado que as perturbações electromagnéticas provenientes de uma descarga parcial seriam captadas pelos fios de interligação no circuito.

Para isso, dimensionou-se um filtro passivo, passa baixo, com uma frequência de corte de 80 kHz para colocar entre o microfone 1 e 2 e as resistências R1/R5 do primeiro ampop, assim como à saída do mesmo. Este filtro, apesar de atenuar

um pouco o sinal da perturbação electromagnética, não foi suficiente para o eliminar na totalidade.

Posteriormente, descartou-se este tipo de montagem, uma vez que com uma montagem diferencial será teoricamente mais fácil a eliminação deste tipo de perturbações uma vez que a perturbação absorvida pelas duas entradas do ampop serão aproximadamente iguais.



**Figura 5.9: Montagem Diferencial**

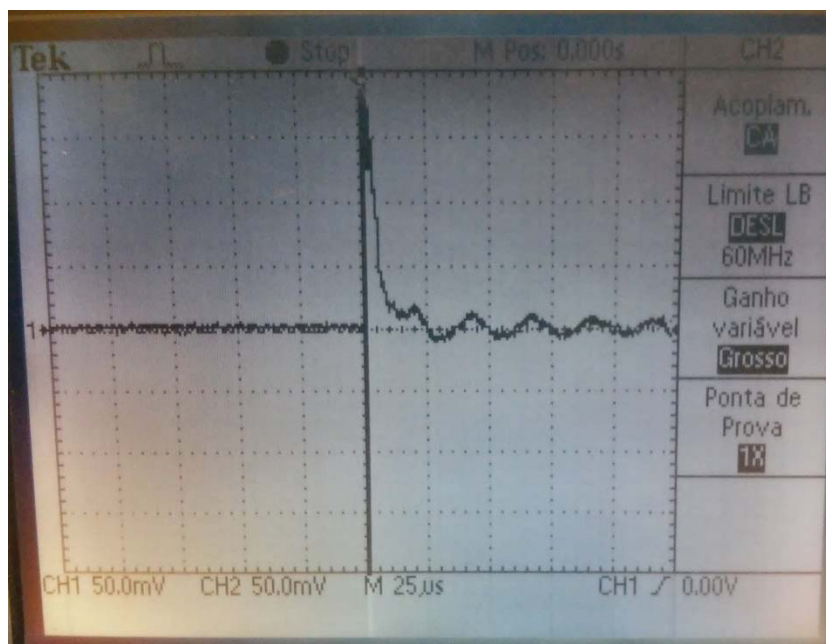
Ainda assim, verificou-se uma melhoria, mas não o suficiente para eliminar o sinal electromagnético.

Supôs-se, assim, que através da diminuição das partes condutoras do circuito pudesse haver uma melhoria maior, o que não foi significativo após cortar os filamentos condutores das resistências e condensadores, a fim de diminuir o efeito de antena.



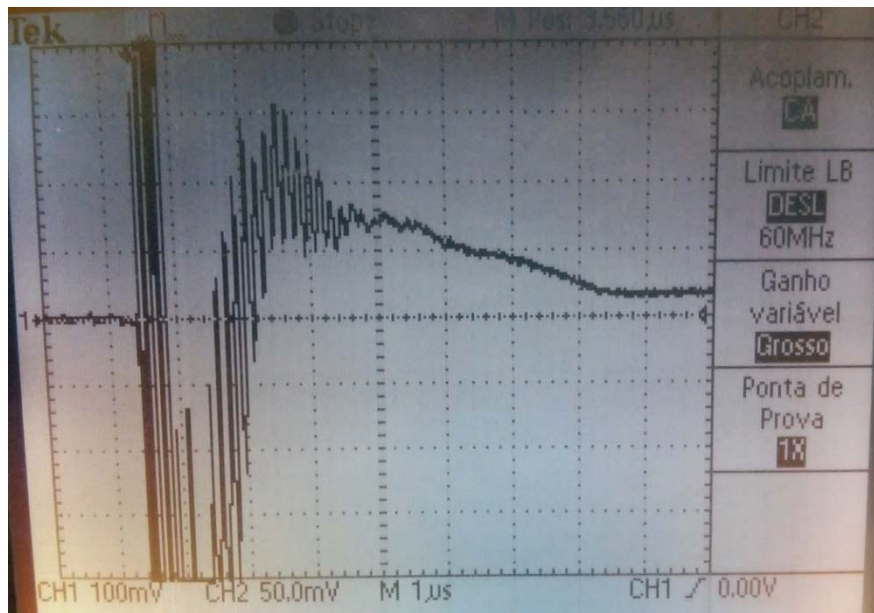
**Figura 5.10: Circuito Montado com Partes Condutoras Reduzidas**

Após esta intervenção, a perturbação continuou presente como podemos observar:



**Figura 5.11: Resposta do Circuito Após Descarga**

É possível nesta figura vislumbrar duas vibrações, de diferentes naturezas. O primeiro pico, bastante alto, é proveniente da perturbação electromagnética, e a onda sinusoidal que se vê de seguida corresponde ao sinal sonoro com a frequência de 40 kHz, aproximadamente. Embora, seja apenas possível perceber na Figura seguinte, o pico é constituído por frequências bastante superiores.

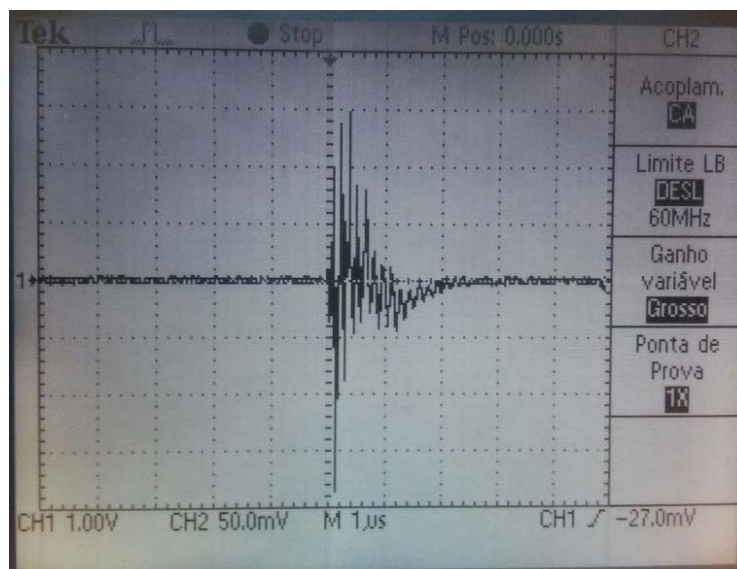


**Figura 5.12: Zoom Sobre o Sinal Detectado**

Este pico é constituído por frequências da ordem de 30MHz.

Para um último teste, eliminando a hipótese de que o problema resida, também, no microfone, fez-se um curto-circuito entre os pontos a montante das resistências R1/R7 e R5/R9 e a terra, a fim de testar se o sinal estaria a ser inserido pelo microfone.

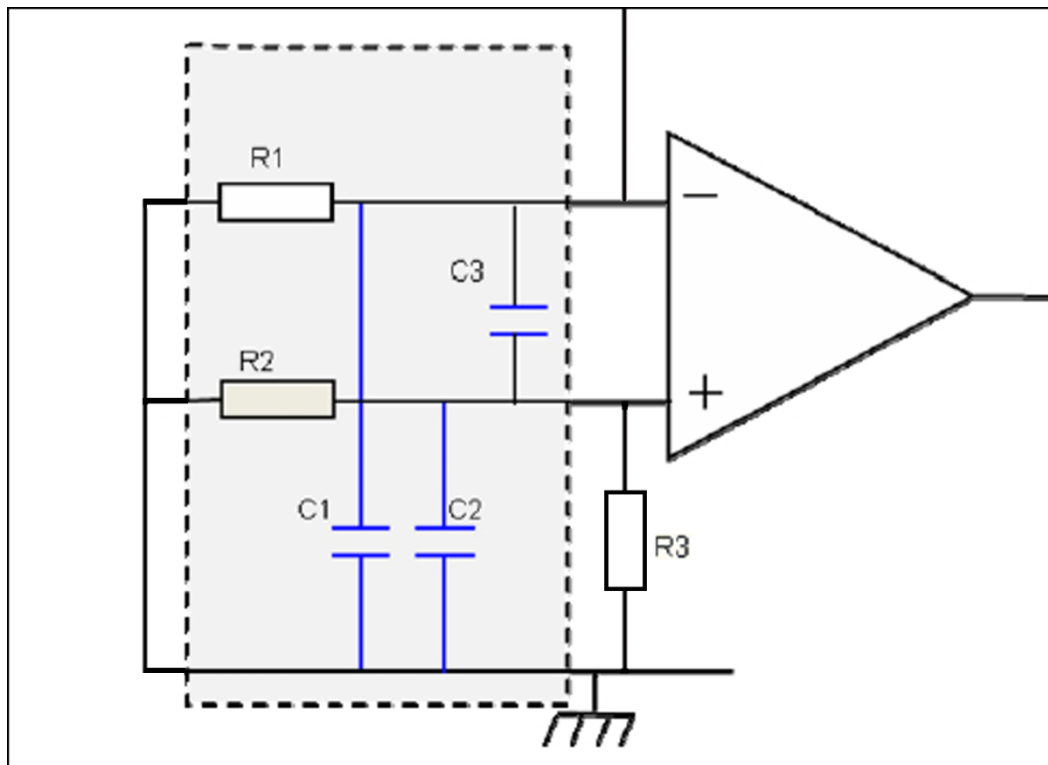
E, como é perceptível pela Figura seguinte, a alteração, se existente, é pouca:



**Figura 5.13: Resposta do Circuito Após Curto Circuito das Entradas**



De seguida foram experimentadas diferentes montagens diferenciais, como ilustra a figura:



**Figura 5.14: Circuito com Curto-circuito [17]**

Sabendo que a largura de banda de modo diferencial varia segundo a fórmula:

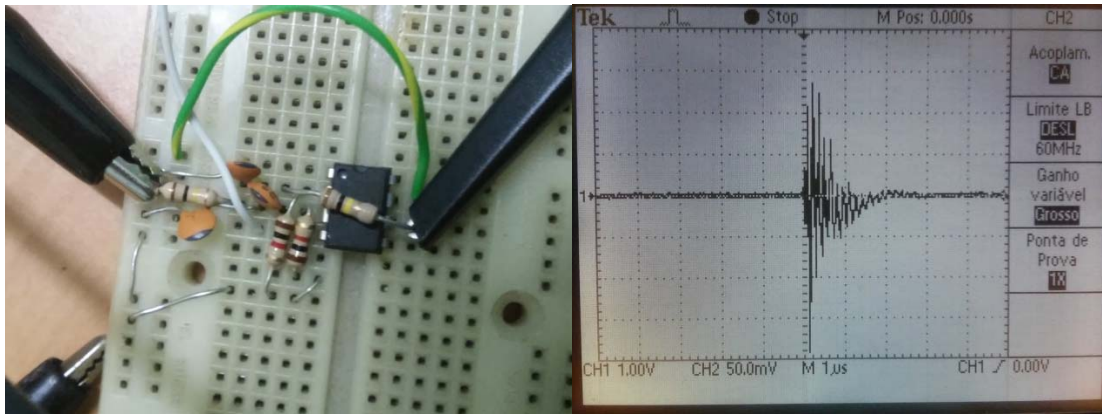
$$BW_{DM} = \frac{1}{2\pi(R_1 + R_2)(2C_3 + C_2 \parallel C_1)}, [17]$$

Fez-se variar o valor dos condensadores para fins experimentais, verificando se existiria alguma variação ou atenuação da perturbação magnética.

Utilizaram-se diferentes conjuntos de condensadores, numa lógica  $C_1=C_2$  e  $C_3 \gg (C_1=C_2)$  assim como  $C_3 \ll (C_1=C_2)$  e  $C_1=C_2=C_3$ .

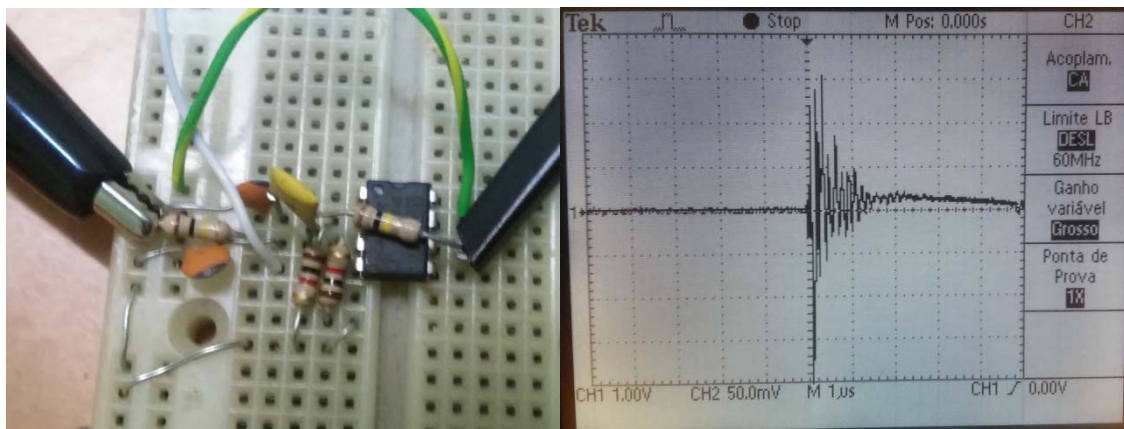
Assim  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  adquiriram valores de 33pF e 4700pF.

Primeiro para  $C_1=C_2=C_3=33\text{pF}$ :



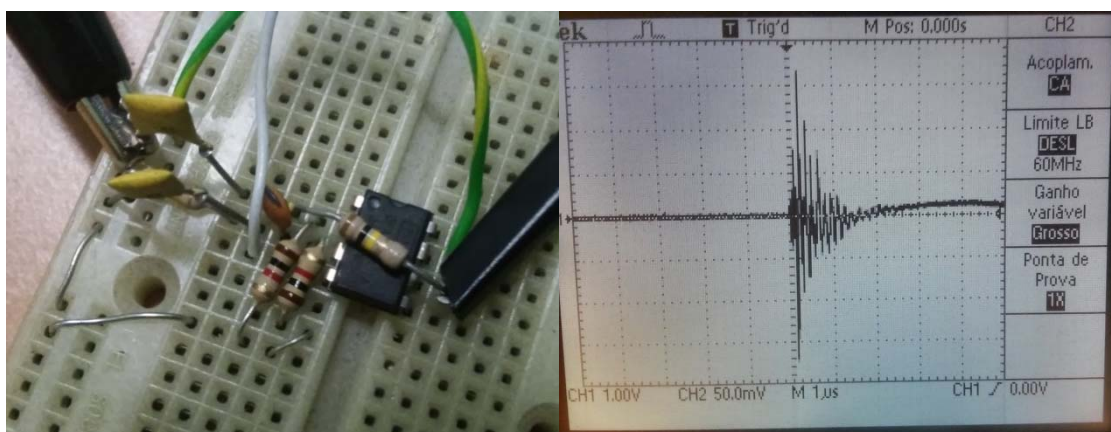
**Figura 5.15: Montagem 1**

Para  $C_1=C_2=33\text{pF}$  e  $C_3=4700\text{pF}$ :



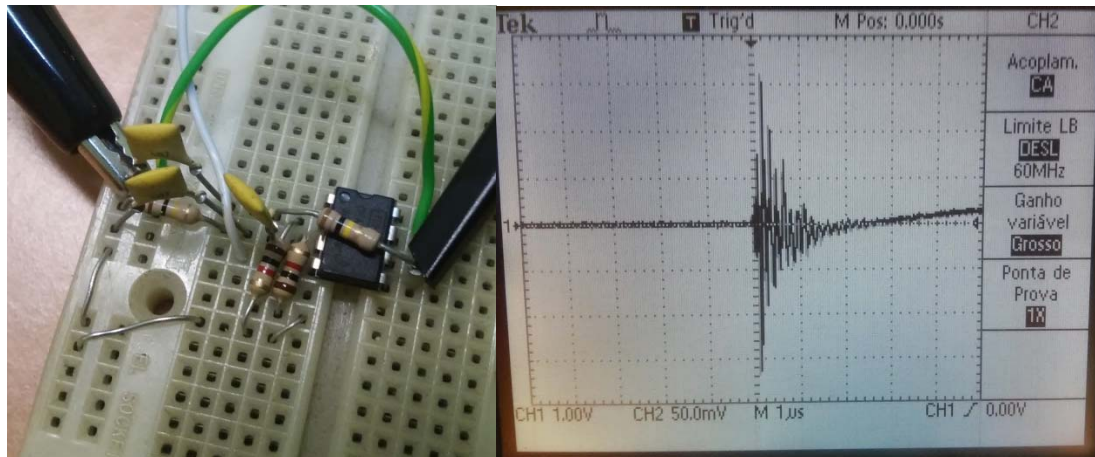
**Figura 5.16: Montagem 2**

Para  $C_1=C_2=4700\text{pF}$  e  $C_3=33\text{pF}$ :



**Figura 5.17: Montagem 3**

E por fim, para  $C1=C2=C3=4700\text{pF}$



**Figura 5.18: Montagem 4**

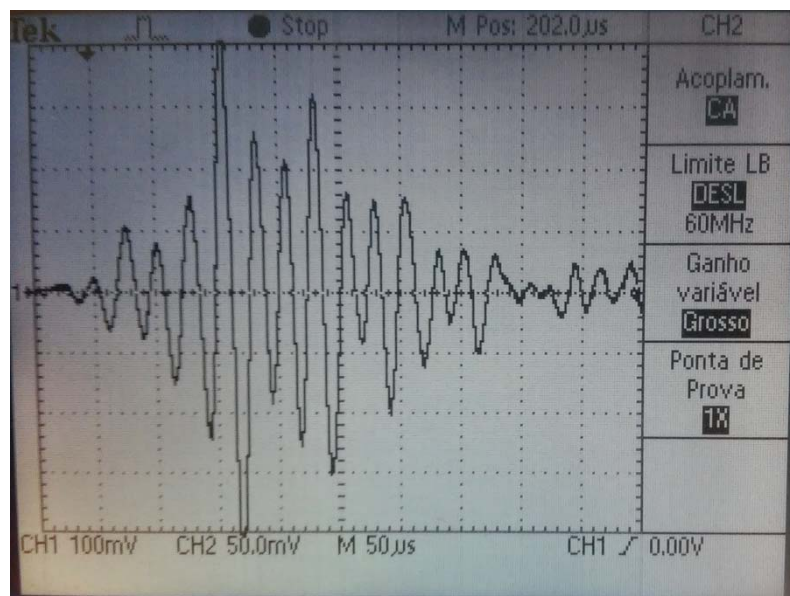
Por fim, verificou-se que a diferença entre montagens com condensadores variou muito pouco entre elas mesmas, assim como em relação ao circuito sem qualquer tipo de filtro. No entanto, estes testes foram indispensáveis, pois teoricamente, com um filtro simples, o problema já se deveria encontrar resolvido utilizando um filtro passa-baixo com uma frequência de corte de 80 kHz, bastante inferior à frequência de 30 MHz da radiação electromagnética gerada pela descarga parcial. No entanto, em contacto com a realidade física existem muitos outros factores que podem interferir. Assim, para perceber as possíveis influências que estas montagens poderiam ter, foi necessário inserir uma grande variação entre montagens, ao testar o circuito com e sem filtro, e com condensadores relativamente pequenos e grandes entre eles. Ficando, assim, provado que foram infrutíferas as tentativas de eliminar a perturbação electromagnética numa placa de alvéolos com simples filtros passivos.

Concluiu-se, assim, que as placas de alvéolos utilizadas estavam a ser o elemento determinante na introdução de uma perturbação electromagnética no circuito, devido aos seus barramentos condutores, que agem como antenas, sendo que essas perturbações, já de si de amplitude bastante superior à gerada pelo microfone, acaba também por ser amplificada, pois existe um barramento ligado a cada entrada do ampop.

A solução para este problema passará pela blindagem do circuito, através da criação de um PCB que esteja organizado de forma a diminuir distâncias entre componentes. Pelo menos entre os componentes que constituem os filtros e a entrada do Ampop, e, de preferência, inserindo o PCB no interior de uma caixa metálica que funcionará como Gaiola de Faraday.

Este problema não causa, no entanto, um impasse ao teste do instrumento e da sua finalidade utilizando uma placa de alvéolos para teste como protótipo laboratorial, pois é possível testar o sistema utilizando uma fonte de ultra-sons puramente mecânica, gerando sinais acústicos através do choque entre duas peças metálicas.

Assim, através do impacto entre dois elementos metálicos verificou-se a eficácia do circuito na captação do sinal sonoro:

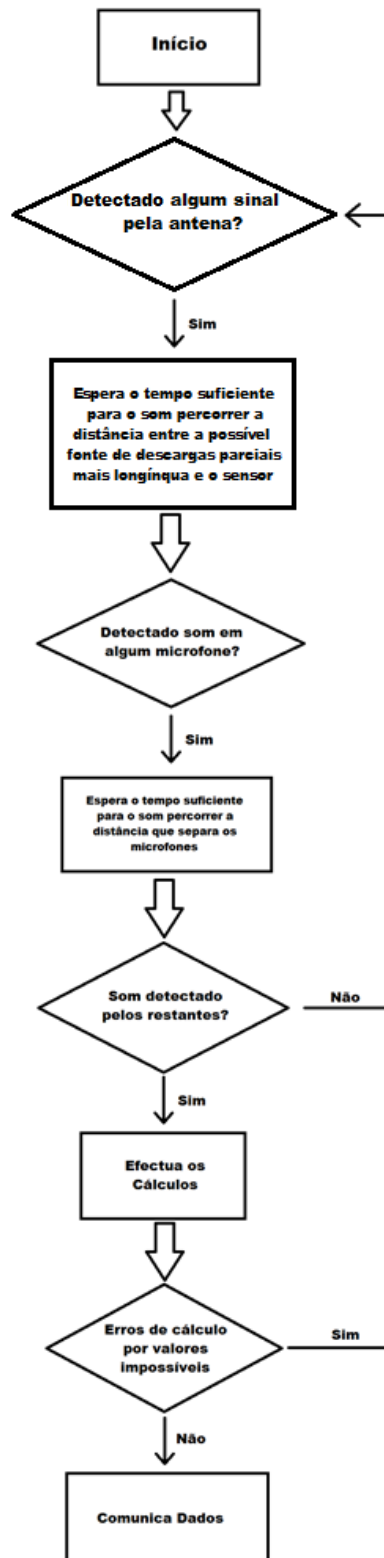


**Figura 5.19: Resposta ao Impacto entre dois Elementos Metálicos**

Foi, portanto, escolhido como circuito final, para teste de protótipo laboratorial, a montagem diferencial representada anteriormente, não necessitando de filtro passa baixo e com um ganho diferencial de 100, assim como um comparador dimensionado para sinais superiores a 20 mV.

Convém referir que este foi o circuito utilizado apenas para teste laboratorial. A proposta para o protótipo industrial será apresentada mais à frente no capítulo 7.

### 5.1.4. Algoritmo



**Figura 5.20:**  
**Diagrama de**  
**Funcionamento do**  
**Localizador de**  
**Descargas**



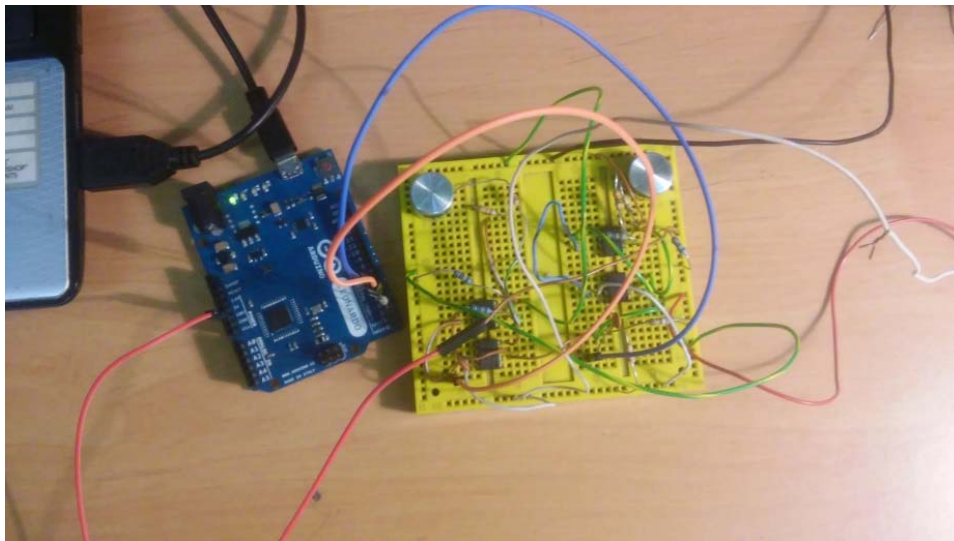
O Algoritmo utilizado é igual para os dois tipos de montagem diferindo apenas no modo de cálculo da orientação.

Fica também em aberto a possibilidade de comunicação quando existe uma repetição elevada de ocorrências de detecção de som por apenas 1 ou 2 microfones (apenas para a montagem de três), assim como a possibilidade de comunicação quando se dão erros de cálculo por valores impossíveis, pois estas ocorrências representam mau funcionamento do sistema.

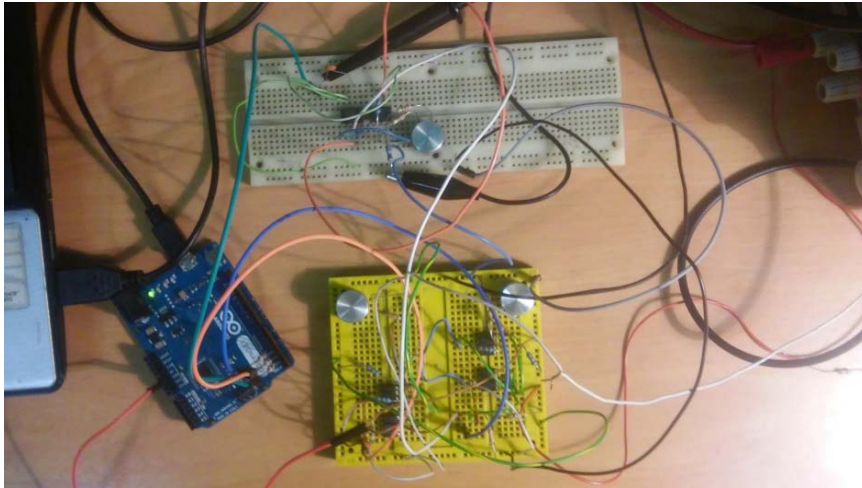
### 5.1.5. Resultados e Conclusões

Para a simulação deste sistema foi utilizado um Arduino Leonardo, como ilustrado nas Figuras 5.21 e 5.22.

Após teste das duas montagens:



**Figura 5.21: Montagem com Dois Microfones**



**Figura 5.22: Montagem com Três Microfones**

As seguintes notas de montagem merecem ser descritas.

As montagens foram feitas com 6,9cm de distância entre microfones. Para a montagem de dois microfones, considerando a velocidade do som como sendo 343m/s, isto resulta numa variação máxima de tempos de -209us até 209us, correspondentes a 180° e 0°, respectivamente.

No entanto, o intervalo de tempo menor que o Arduino é capaz de medir é de 16 us, e, frequentemente, não inferior a 32 us, de que resulta, na melhor das hipóteses, uma estratificação do intervalo [0°;180°] em 26 níveis possíveis.

Verificou-se experimentalmente, no entanto, que mais frequentemente o intervalo mínimo seria de 32 us, resultando, assim, numa estratificação de cerca de 13 níveis, correspondendo a uma precisão relativamente baixa, de cerca de 14°.

Este número de níveis pode facilmente ser aumentado, aumentando a distância entre microfones; no entanto, não é uma decisão que se pretenda tomar, uma vez que aumentará o erro associado à simplificação matemática utilizada para este sistema, como explicado anteriormente. Assim, passará pela utilização de um microcontrolador rápido, que facilmente levará a uma precisão bastante mais elevada.

A montagem de três microfones, utilizando o mesmo Arduíno, revelou-se mais precisa, permitindo ainda ter um intervalo angular superior  $[0;360^\circ]$ .

Dado o facto de os lados do triângulo estarem em orientações diferentes, apesar de cada lado ter apenas 13 valores possíveis para diferença temporal, isto resulta, num conjunto de valores possíveis superior ao dobro dos valores possíveis da montagem de 2 microfones, enquanto o intervalo do ângulo apenas duplica. Logo resulta numa precisão superior.

Perante algumas incapacidades demonstradas pelo Arduino para cálculo, por vezes não conservando todos os algarismos significativos, e alterando, mesmo, alguns valores, tomou-se a decisão de comunicar os valores de imediato para o computador, após a medição, sendo qualquer tipo de cálculo efectuado no computador. Será possível ver os códigos utilizados em anexo.

Por fim, apesar de dadas as limitações impostas pelo Arduíno, o conceito ficou provado, pois o instrumento, apesar da estratificação do intervalo angular, demonstrou ser sensível à posição. No entanto, os ângulos obtidos nos testes feitos flutuaram sempre em torno do valor real do ângulo.

Conclui-se, assim, que com uma velocidade de medição inferior, o sistema de 3 microfones é mais viável. Mas, uma vez utilizando um microcontrolador rápido o suficiente, a montagem de dois microfones pode facilmente ser a opção mais viável para a aplicação num PT, uma vez que não é necessário um ângulo superior a  $180^\circ$  graus e, mais importante, a montagem de dois microfones permitirá diminuir em quase um terço o preço do instrumento.

## **5.2. Transformador: Pressão e Temperatura**

Dentro dos postos de transformação encontra-se um elemento crítico: o transformador. Estes elementos têm uma utilização diária cíclica, registando máximos e mínimos geralmente pelas mesmas horas do dia. Regista posteriormente uma segunda variação cíclica de período já bastante maior, ao



longo do ano. Por fim, há uma terceira variação não cíclica proporcional ao crescimento demográfica de cada zona.

Assim, a temperatura do óleo do transformador apresenta ao longo destes ciclos uma tendência de variação proporcional à potência fornecida. Dada a pequena velocidade de variação de temperatura, este sensor não requererá, à semelhança de todos os outros, uma medição muito frequente. Crê-se que um dado por hora será o mais indicado, e, em dias normais, sem ocorrências, a comunicação do valor mínimo, máximo e média diária da temperatura à unidade concentradora será suficiente para deter um controlo fidedigno do estado do transformador.

O conhecimento dos padrões de variação de temperaturas permitirá fazer uma análise algo precisa da condição do transformador. Assim, conhecendo os valores de temperatura do óleo para valores de potência fornecida, se houver um registo de aumento de temperatura ao longo do tempo para esses mesmos valores de potência, considerando as temperaturas do ar do PT equivalentes, isto será um indicador forte de degradação do transformador.

Ao longo dos anos, caso haja um aumento de utilização e a isso corresponda um aumento de temperaturas significativo, pode estar-se perante um sinal de excesso de consumo para a capacidade daquele transformador, ou, pelo contrário, se o aumento não for significativo, pode concluir-se que o transformador ainda estará em condições apropriadas para manter a operação.

O aumento brusco para temperaturas não habituais, com o transformador em cargas já conhecidas anteriormente, simbolizará uma urgência que poderá ter várias razões: uma delas é a degradação do óleo, que se dá ao longo do tempo, e poderá levar à sua combustão, o que se caracterizará por um aumento anormal da temperatura, tendo em conta a carga de utilização. Com o sensor de pressão será possível, com a avaliação da pressão do óleo, detectar a possível existência de bolhas de gás que são claro sinal de degradação e, assim, perceber o nível de qualidade do óleo. Estas bolhas são frequentemente criadas por descargas parciais junto dos enrolamentos, tomando um comportamento de avalanche,

uma vez que uma descarga parcial, aumentará o número de bolhas de ar, que por sua vez aumentará a condutividade do óleo e facilitará a existência de mais descargas [18]. Uma outra razão poderá ser a ventilação deficiente do PT, pois a dissipação de energia térmica pela carcaça do transformador será tão menor quanto maior for a temperatura envolvente..

Para a monitorização do seu estado, existe a necessidade de fazer duas medidas: da temperatura junto da tampa do transformador e da pressão do óleo. Geralmente, a medição da temperatura do óleo dos transformadores faz-se junto à tampa e junto aos enrolamentos, algo que permite diagnósticos um pouco mais elaborados. De facto, com duas temperaturas é possível ter uma temperatura (medida junto dos enrolamentos) mais aproximada ao esforço que o transformador está a ter no momento, enquanto a temperatura junto da tampa já é um valor de temperatura que leva em conta outro tipo de factores, tais como a refrigeração do transformador. É, realmente, algo crucial quando se tratam de transformadores utilizados em subestações primárias, onde cada transformador está responsável por abastecimento de áreas muito maiores que um transformador de um PT, assumindo assim um papel de órgão mais crítico, e dada a necessidade de transformação de potências muito elevadas detêm um sistema de refrigeração activo que será possível e necessário avaliar através do conhecimento destas duas temperaturas. A temperatura junto dos enrolamentos poderá também ter papel de alarme, pois caso a refrigeração esteja a ser levada a cabo correctamente a temperatura junto da tampa não seria, assim, tão precisa na avaliação de mudanças bruscas quanto à medição da temperatura junto dos enrolamentos.

Os transformadores dos PT são transformadores de dimensão e potência bastante mais reduzidas, não tendo, em geral, necessidade de um sistema de refrigeração activo, pelo que a medição de duas temperaturas em transformadores dos PT perde relevância. Em suma, dada a sua dimensão reduzida, qualquer alteração brusca de temperatura junto dos enrolamentos seria detectada com prontidão, bastando medir junto da tampa, dado o efeito de

convecção. A medição da pressão será feita através do bужão onde é inserido o sensor de temperatura.

## 5.2.1. Métodos de Sensorização

### 5.2.1.1. Temperatura

Para a medição de temperatura, surgiram várias hipóteses de sensores. Para isso há que considerar todas as vantagens, desvantagens e requisitos que ajudarão na escolha do sensor a utilizar. As hipóteses são:

- **Termopares:** são sensores activos, apenas consistindo numa junção de dois condutores distintos, sem qualquer alimentação. São, também, relativamente baratos.

Para a gama de temperaturas aqui em causa ( $\leq 100$  °C) a amplitude do sinal de saída é sempre baixa, da ordem dos mV, pelo que requer uma interface analógica mais elaborada, sobretudo por razões de compatibilidade electromagnética.

- **RTD** (Resistance Temperature Detector) são sensores passivos, cuja resistência interna varia proporcionalmente com a temperatura, na razão directa (PTC). É um sensor feito com metais, geralmente de platina, podendo também ser de níquel ou cobre.

Estes tipos de sensores resistivos necessitam de uma alimentação em potência, geralmente uma tensão aplicada. A sua implementação é, na grande maioria dos casos, a partir da sua integração numa ponte de Wheatstone, que resultará numa diferença de potencial proporcional à resistência do RTD e, por consequência, proporcional à temperatura do óleo. Sendo necessário ter alguns cuidados extra, pois sendo este um sensor intrusivo e sendo percorrido por uma corrente, existe através do efeito de joule a possibilidade de auto aquecimento, o que levaria a uma alteração da sua resistência e que acabaria por não reflectir a temperatura do meio que se pretendia medir [19]. Isto tem, no entanto, uma solução

simples, que será a utilização de uma ponte de Wheatstone composta por resistências maiores, o suficiente para não permitir que as correntes sejam elevadas o suficiente para gerar aquecimento [19].

**-Termístor**, são sensores passivos à semelhança dos RTD, com resistência que varia com a temperatura, embora na razão inversa (NTC), sendo feitos de materiais semicondutores, cerâmicos ou polímeros. Têm, no entanto, menor linearidade que os PTC, necessitando de maiores factores de correcção [20].

Sendo os termístores geralmente semicondutores, apresentam uma estabilidade média podendo necessitar de recalibrações, obrigando a uma mais constante verificação do estado de funcionamento. Apresentam também problemas de auto aquecimento. E a possibilidade de serem utilizados numa ponte de Wheatstone, à semelhança dos RTD.

Optou-se pelo RTD (PT100 ou PT1000), estes têm um intervalo de valores bastante largo, aproximadamente de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $650^{\circ}\text{C}$  sendo, no entanto, apenas necessário no intervalo dos  $25^{\circ}\text{C}$  aos  $100^{\circ}\text{C}$ . Apesar deste intervalo ser bastante grande em comparação com o utilizado, este acabará sendo uma boa opção, uma vez que a zona de  $25^{\circ}\text{C}$  aos  $100^{\circ}\text{C}$  é praticamente linear, e dada a sua constância e estabilidade, não haverá necessidade de recalibrações ao longo do tempo. É importante, também, a utilização de um dispositivo resistivo cuja resistência aumente com a temperatura ao fim de evitar o auto aquecimento. Assim, quando existe um aumento de temperatura a resistência aumenta e diminui a corrente que nele passa, estabilizando. Enquanto, os sensores de temperatura que apresentam uma relação inversa resistência/temperatura criariam um efeito cíclico, pois quanto maior fosse a temperatura do óleo do transformador, maior seria a temperatura no sensor diminuindo a sua resistência, o que levaria a um aumento na corrente que o atravessa, aumentando ainda mais a sua temperatura interna e diminuindo a resistência.

A instalação deste sensor é relativamente simples, não necessitando de qualquer cablagem especial nem referências de temperatura.

Para o cálculo da temperatura, sabendo a variação da resistência do PT100/PT1000 com temperatura (considerando o valor da variação como  $v_{pt100}$  e  $v_{pt1000}$ ) e tendo em conta a boa linearidade e o intervalo limitado de temperaturas relevantes para a aplicação (0°C a 150°C):

Correspondendo a resistência destes a 0°C é igual a 100Ω e 1000Ω, respectivamente. Assim, obtêm-se as seguintes fórmulas:

$$\text{Para PT100: } R = 100 + v_{pt100}T[^\circ C] \Rightarrow T[^\circ C] = \frac{R-100}{v_{pt100}}$$

$$\text{Para PT1000: } T[^\circ C] = \frac{R-1000}{v_{pt1000}}$$

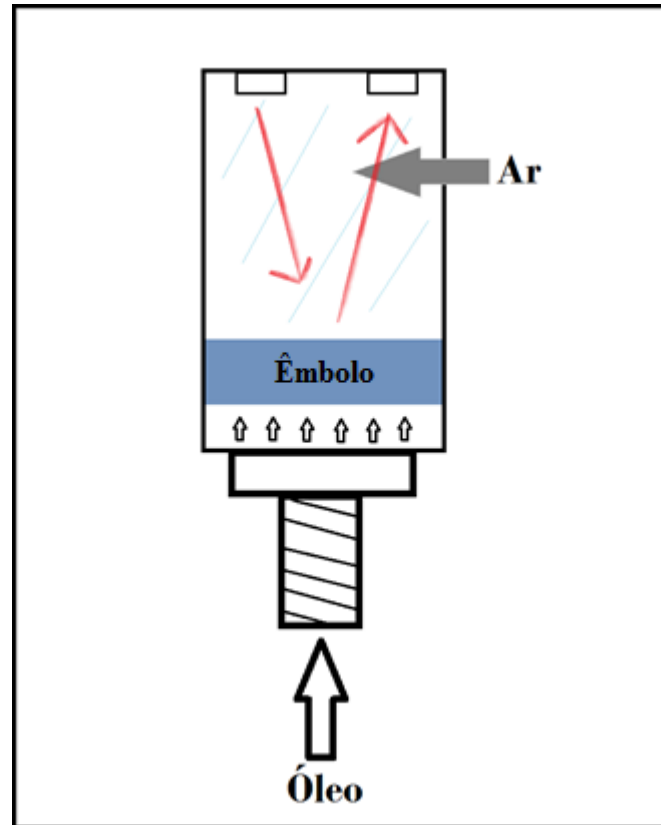
Para o conhecimento da resistência do PT100 ou PT1000 necessita-se de uma implementação numa ponte de Wheastone, que resultará numa diferença de potencial proporcional à resistência.

### 5.2.1.2. Pressão

Existem três mecanismos possíveis para a medição da pressão do óleo que se pretende considerar para este sistema.

Os três requerem um tubo que irá comunicar com o óleo através do bujão do transformador, onde está também inserida a sonda para medição da temperatura.

O primeiro seria através da inserção de um tubo com pistão no interior do óleo.



**Figura 5.23: Tubo com Êmbolo Para Medição de Pressão**

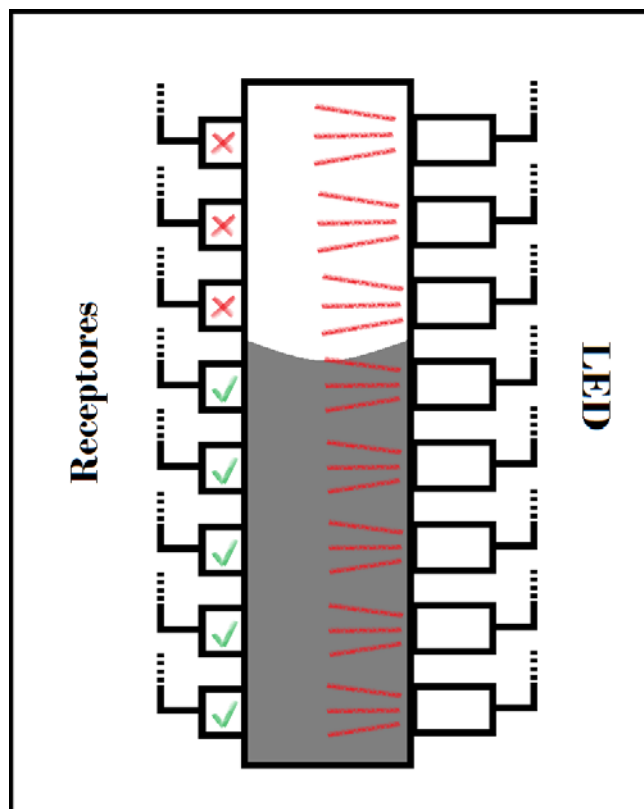
O funcionamento deste dispositivo representado na Figura tem como base o conhecimento do tempo de voo do sinal, e conseqüentemente a distância do êmbolo ao tecto do tubo. Por fim, relacionando esse dado com a constante elástica do ar que pode ser facilmente conhecida.

$$P = F/A,$$

$$F = Kx,$$

Este sensor permite uma boa precisão na medição, oferecendo também uma forma fácil de conhecer valores concretos de pressão.

O segundo mecanismo para medição da pressão seria o representado pela seguinte figura:



**Figura 5.24: Tubo com Oito Sensores de Presença**

Este método é algo simples, detendo apenas sensores de presença (sensor de presença pressupõe emissor e receptor) e resulta num instrumento com oito níveis, num tubo de 5cm de comprimento.

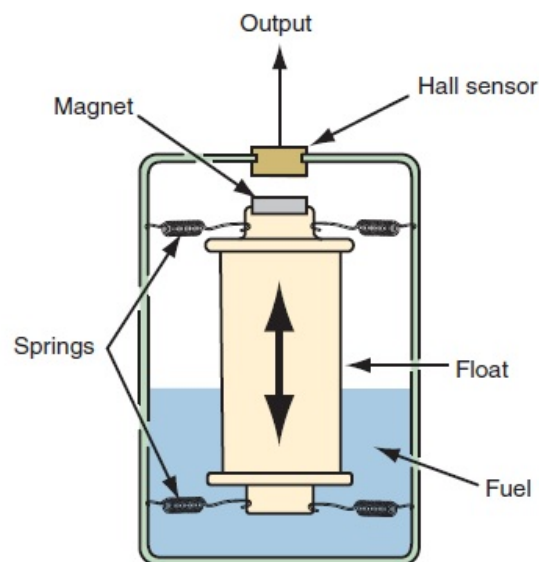
Sabendo que as características ópticas do óleo diferem das do ar, será possível saber através do sinal recebido se existe presença de óleo entre cada par Led/receptor. Este método poderá não dar valores concretos de pressão, mas permitirá estabelecer limites que se considerem críticos para a pressão com base na relação de pressão/nível do óleo. Requer, no entanto, um conhecimento prévio sobre quais os níveis que podem ser críticos.

Este sensor pode ter enganos de medição devido à criação de menisco junto das paredes do tubo, caso exista uma descida do nível do óleo. Este problema pode ser resolvido ao adicionar um êmbolo, tal como o utilizado no primeiro método.

O êmbolo, nos dois métodos anteriores, apesar de não ser necessário, terá as suas vantagens. Sabendo que a pressão varia com a temperatura do óleo, mas

em maior escala pela criação de gases, ter um instrumento de medição de pressão, desta natureza, sem êmbolo, pode levar à infiltração de gases no instrumento, misturando os gases que se pretendiam medir com os gases inseridos dentro do tubo, que têm a função de actuar como órgão elástico. Com a mistura desses gases, a constante elástica do gás presente alterar-se-ia e os valores de pressão recolhidos passariam a não ser fidedignos. Assim, com a existência de um êmbolo será possível garantir a separação de gases inseridos no tubo, como elemento cooperativo à medição, com gases gerados dentro do transformador, que são um elemento que se pretende detectar. O êmbolo tem por sua vez algumas desvantagens, tais como o atrito nas paredes do tubo, que adicionará alguma histerese quando há variação da pressão (que não é alarmante dada a baixa necessidade de precisão) assim como poderá ter alguma dificuldade em isolar o óleo do ar.

Por último, surge a possibilidade de implementação de um sensor de efeito de Hall, que como todos os restantes funciona com base na relação do nível de óleo com a pressão interna.



**Figura 5.25: Tubo Sensor de Hall [21]**

O sensor de Hall apresentará uma tensão aos seus terminais proporcional à proximidade do ímã, que é igual à variação da altura do óleo.



Este sensor apresentará, possivelmente, um circuito de maior complexidade, pois, a implementação deste sensor necessitará do uso de um ADC [22] ou de um conjunto de comparadores. O número de comparadores variaria com o número de níveis pretendido. Enquanto, que com o ADC seria possível obter uma medida mais precisa para a pressão do óleo, algo que será provavelmente dispensável para esta aplicação.

Por fim, comparando o primeiro método ao segundo: O primeiro método pode funcionar através da utilização de um LED e um receptor, mas iria requerer electrónica muito rápida e cara. Portanto, seria mais viável a utilização de um microfone de ultra-sons direccional, assim como um receptor, também direccional (MEMS, por exemplo). Para ter capacidade de medição de 8 níveis em 5cm, como o segundo método apresentado, necessitaria de conseguir medir tempos menores que 36,4us. O que é algo fácil para muitos microprocessadores relativamente baratos. Assim o primeiro resulta como a solução mais barata e viável, permitindo facilmente precisões mais altas que o segundo, e menos electrónica. Uma vez que o segundo método necessitaria ou de uso de no mínimo 8 comparadores ou um ADC.

Assim a primeira opção resulta como a mais apropriada para esta utilização, sendo de mais baixo custo e facilmente das mais precisas.

Como debatido, anteriormente, as descargas parciais inserem perturbações nos circuitos eléctricos que se encontram não blindados. Este sensor seria um deles, pois não possuirá qualquer tipo de blindagem e qualquer descarga poderá interferir com o mesmo. Não é, no entanto, um problema pois no caso deste sensor sabe-se quando o sinal sonoro será emitido, e caso, algum sinal, seja detectado num intervalo de tempo anormal será ignorado, ou será indicação de que o sistema não se encontra a funcionar correctamente. Qualquer uma das hipóteses anteriores é facilmente diagnosticada, pois tem-se a possibilidade de saber se houveram descargas no intervalo em que houve a recepção de um impulso. Sabendo isso, será possível eliminar qualquer tipo de lapso. Da mesma forma, o sinal deste microfone nunca será entendido como descarga parcial pois os sensores de descargas parciais deste sistema “saberão” que foi emitido um

sinal por este microfone, assim como também “saberão” que não houve perturbação electromagnética. Portanto, este modo de funcionamento nunca colocará em causa o funcionamento do resto do sistema, e reciprocamente.

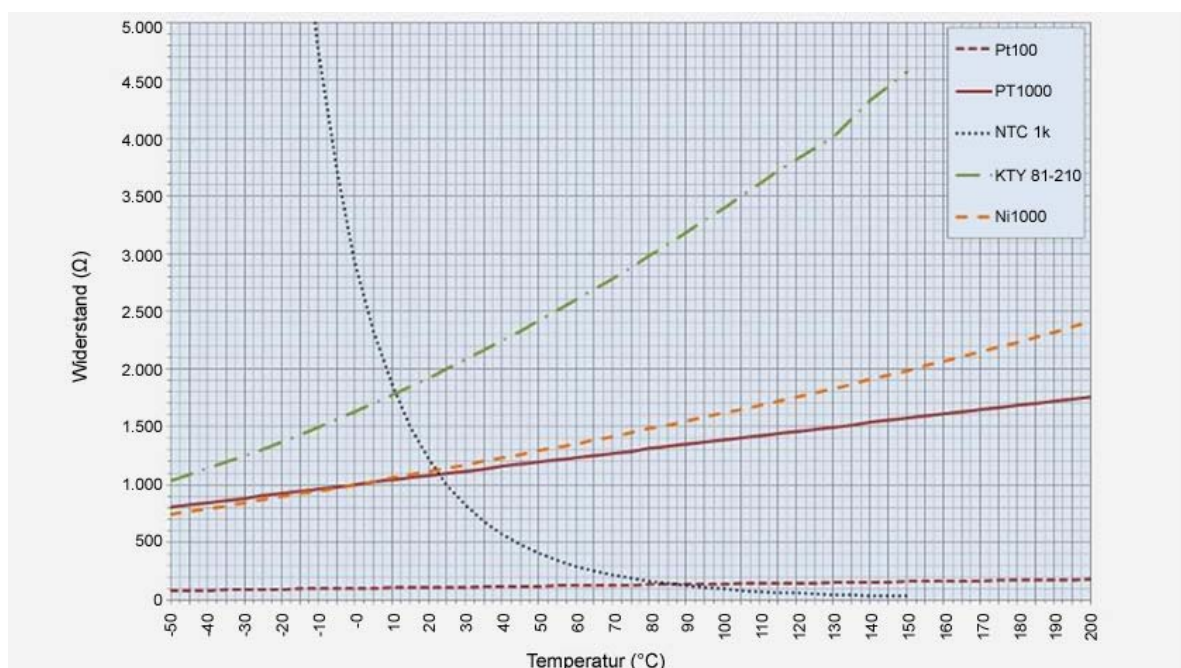
## 5.2.2. Componentes

### 5.2.2.1. Medição de Temperatura

#### 5.2.2.1.1. PT100/PT1000

Para este sensor discute-se a utilização de um PT100 ou PT1000.

Na figura seguinte é possível observar a linearidade dos dois RTD assim como a comparação entre o seu declive e outros sensores:



**Figura 5.26: Curvas de Resistência de Vários Sensores de Temperatura**

[23]

Como referido anteriormente, o PT100/PT1000 são sensores bastante lineares, e com boa estabilidade e bom comportamento em ciclos de temperatura, o que faz destes dois sensores as principais escolhas para este projecto. No entanto,

é importante debater a escolha entre o PT100 e PT1000, pois têm algumas diferenças relevantes.

Observando a Figura anterior é preciso perceber que a linearidade dos dois sensores é bem suficiente para que nesta aplicação não sejam necessárias quaisquer correcções às aproximações lineares. No entanto, apresentam um declive bastante distinto. Como o nome indica PT100 é um sensor cuja resistência ao 0° C corresponde a 100Ω, enquanto a resistência correspondente ao PT1000 é de 1000Ω.

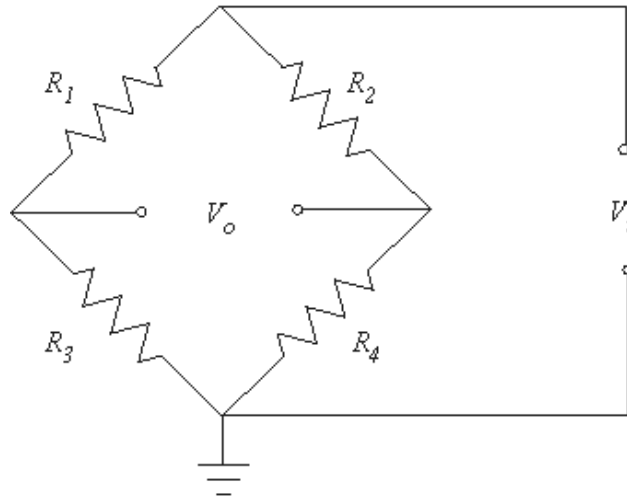
Para este sistema, tendo em conta que a sua alimentação será feita através de um diferencial térmico, há maior necessidade de construir um sistema cujos gastos energéticos sejam minorados. Assim, uma vez que qualquer uma das duas hipóteses será implementada da mesma forma, será mais viável a utilização do PT1000, já que apresenta uma resistência sempre superior ao PT100. Isto resultará numa diminuição da corrente que o atravessa, diminuindo a potência dissipada e diminuindo o aquecimento por efeito joule.

#### **5.2.2.1.2. ADC**

Para a quantização do valor de tensão obtido na ponte de Wheastone e para posterior conversão à sua temperatura correspondente é necessário a utilização de um ADC.

O intervalo de temperaturas relevante será de 0°C a 150°C com uma resolução de 1°C. Assim, necessita-se de um ADC com, no mínimo, 8 bits.

Utilizando uma ponte de Wheastone:



**Figura 5.27: Ponte de Wheastone [24]**

$$V_o = \left( \frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) V_i$$

Considerando que R1, R2 e R4 são todas resistências de 1kΩ, e R3 o PT1000.

Sendo que a variação resistência/temperatura do PT1000 é de cerca de 3.6Ω/°C, isto significa que haverá um intervalo de resistências de 1000 Ω até 1540 Ω.

Como a fórmula acima indica, esta variação corresponde a um intervalo de tensões de:

$$V_o = 0 V, \text{ até}$$

$$V_o = 0.1 V$$

Utilizando os típicos 5V ou 3.3V resultaria em intervalos de [0V;0.5V] e [0;0.33V], respectivamente. Esta tensão terá posteriormente de ser amplificada ajustando-as às tensões de referência do ADC.

A aquisição da temperatura nesta aplicação será feita no mínimo de hora em hora. Assim, não existe qualquer necessidade de utilização de ADCs com grandes taxas de conversão.

### 5.2.2.2. Medição de Pressão

Por uma questão de diâmetro da entrada do bujão do transformador, que é de cerca de 24 mm, convém que, caso o tubo do protótipo seja imerso dentro do óleo, tenha menos que 24 mm de diâmetro, uma vez que, também, é necessário encaixar o PT1000 no mesmo bujão. Assim, o microfone e altifalante a utilizar terão de ser de dimensões reduzidas.

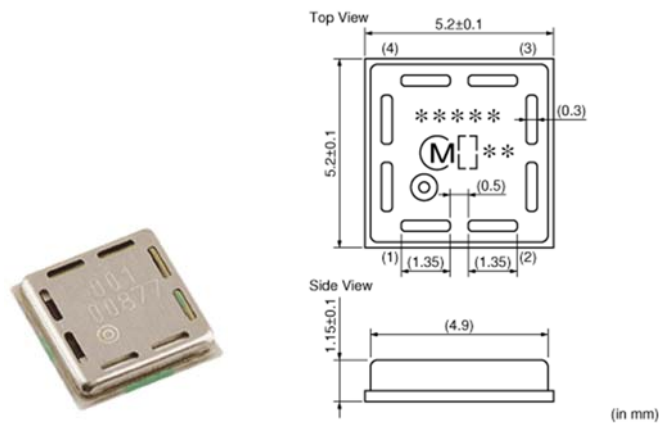


Figura 5.28: Microfone MA40H1S-R [25]

Acima temos representado um exemplo de um altifalante ultra-sónico (40kHz), de cerca de 5,2 mm de lado, que pode encaixar-se bem neste sistema. Altifalante modelo MA40H1S-R. Deve, também, escolher-se um microfone de preferência MEMS, como o representado na seguinte Figura.

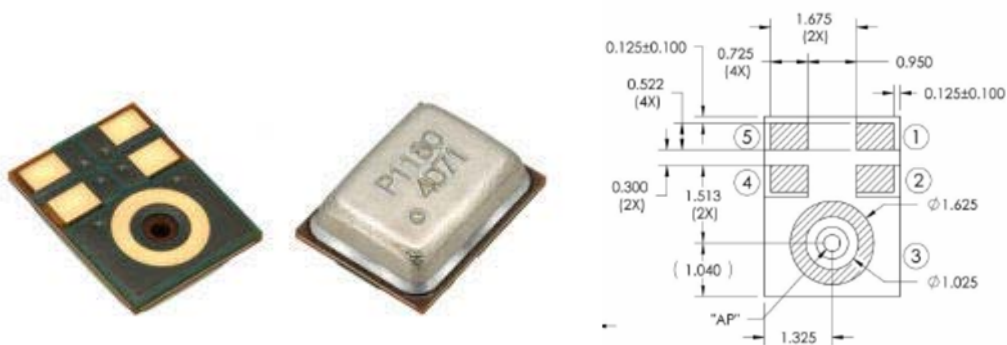


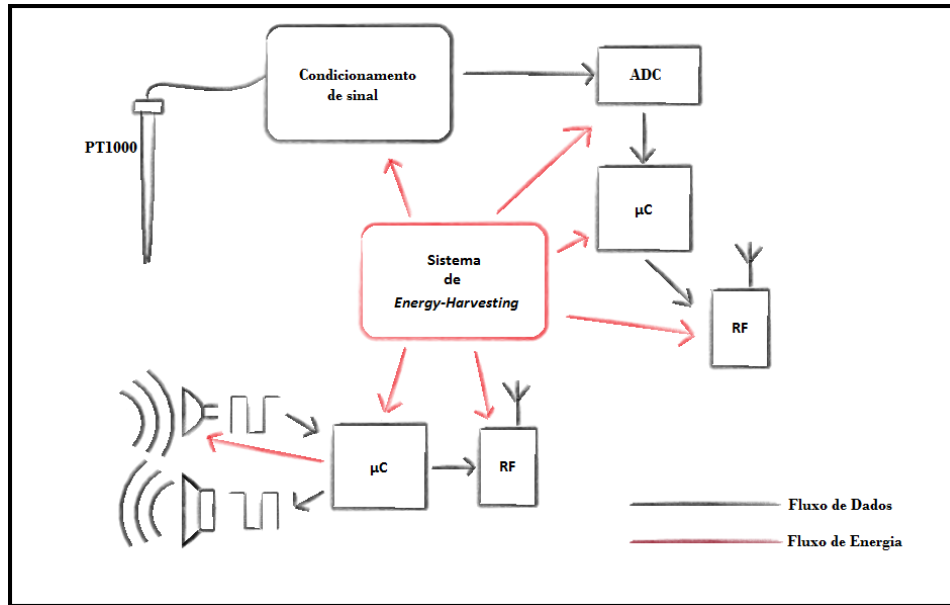
Figura 5.29: SPH0641LU4H-1 [26]

Microfone de modelo SPH0641LU4H-1, com 3,5 mm de altura e 2,65 mm de largura. Este modelo da Knowles apresenta uma resposta com largo espectro, isto é, é sensível para qualquer frequência até aos 80 kHz. Requer, assim, uma filtragem, sendo suficiente um passa-alto com uma frequência de corte aos 10/20 kHz.

São componentes com elevada direccionalidade, o que representa uma vantagem para esta aplicação, ao contrário do localizador de descargas parciais, onde era necessário usar microfones com um angulo aberto, pois seria necessário abranger a máxima área possível. Nesta aplicação, convém que exista um confinamento dos feixes emitidos e recebidos, por forma a evitar provocar reflexões nas paredes do tubo e, uma vez provocadas, procurar diminuir a sensibilidade a reflexões e evitar receber ruídos vindos do exterior.

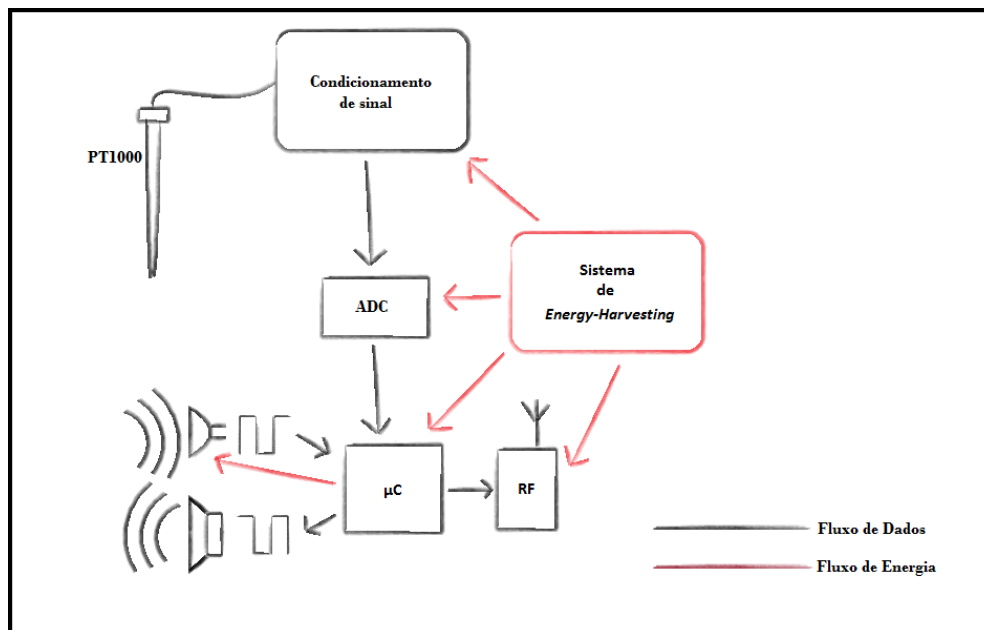
### **5.2.3. Circuitos e Diagramas**

As hipóteses equacionadas para este sistema foram duas: ou a utilização de dois módulos de comunicação RF e dois microcontroladores para a medição de temperatura e pressão, tal como representado no seguinte esquema, ou a partilha de um microcontrolador e de um módulo de comunicação que será o mais apropriado para a esta utilização específica, tendo como vantagem o mais baixo consumo que se poderá alcançar e o mais baixo custo do sensor, devido ao menor número de componentes utilizados.



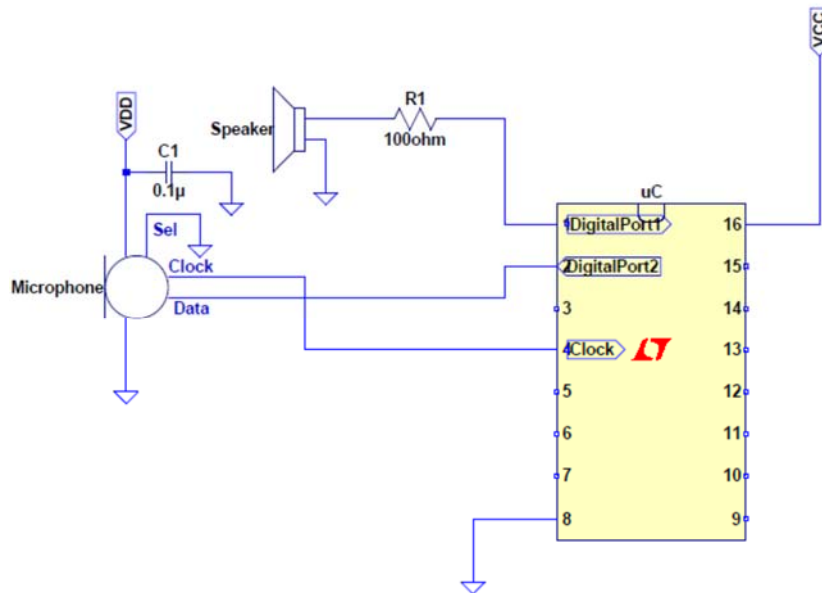
**Figura 5.30: Esquema de Funcionamento Com Dois uC e Dois Módulos RF**

Dado o facto de não ser necessário o processamento de informação em paralelo, não existindo grandes exigências em termos de tempo para efectuar medições e processamento de informação, a melhor opção recai sobre a utilização do esquema mostrado na Figura seguinte.



**Figura 5.31: Esquema de Funcionamento Com Um uC e Um Módulo RF**

Na Figura seguinte está representado o esquema do circuito-base para o medidor de pressão. O esquema do microcontrolador nesta figura é meramente representativo.

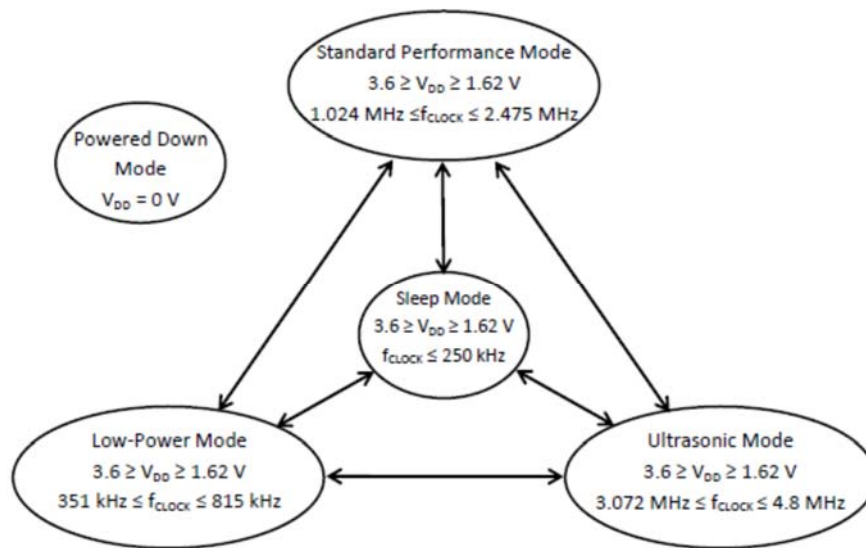


**Figura 5.32: Esquema do Circuito para Medição da Pressão**

O microfone SPH0641LU4H-1 é um microfone digital, assim dispensa qualquer tipo de circuito de amplificação e comparação, bastando que seja ligado a um pino digital programado para input do microcontrolador, onde se utilizará, esse mesmo pino como *interrupt*. Como microfone digital, este necessita obrigatoriamente de uma alimentação VDD e de um sinal de *clock*. Convém referir que o pino SEL (*Select*) permite escolher diferentes modos de funcionamento, havendo sido ligado à terra, para funcionar num modo de baixa potência.

Para funcionamento em regime ultra-sónico, a frequência de *clock* deverá de ser:  $3,072 \text{ MHz} \leq f_{\text{CLK}} \leq 4,8 \text{ MHz}$ , pelo que foi de 4 MHz. Na Figura seguinte ilustram-se os regimes de funcionamento deste microfone:



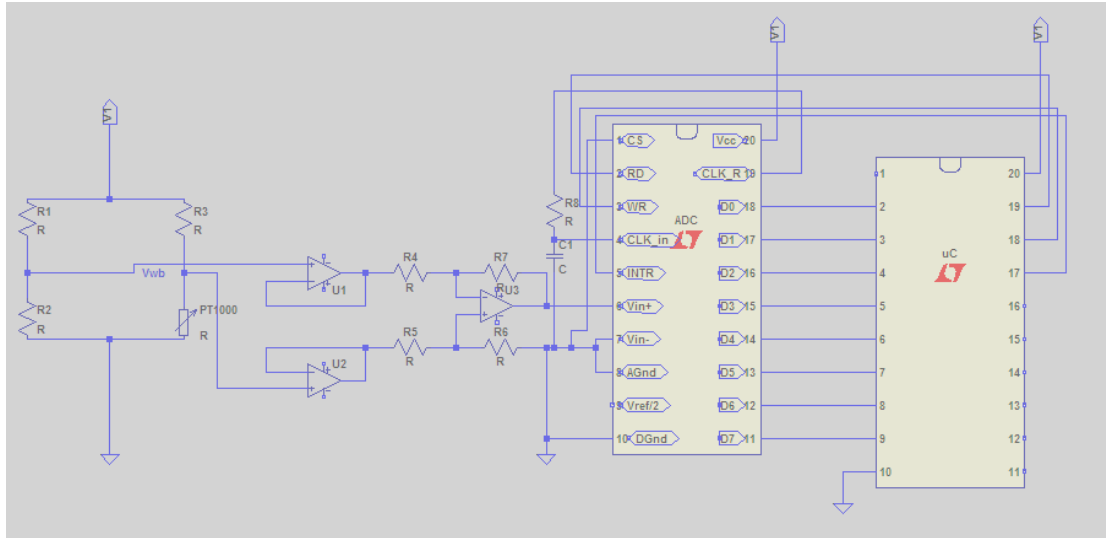


**Figura 5.33: Modos de Funcionamento do Microfone (Datasheet) [27]**

O altifalante MA40H1S-R é ligado a um pino digital programado para *output*. Esta montagem poderá dispensar um DAC, uma vez que será possível criar um sinal sinusoidal de 40 kHz utilizando PWM, directamente no altifalante.

Basta, assim, que o microcontrolador tenha os requisitos mínimos referidos anteriormente, para ser aplicável neste sistema. A partir da programação do mesmo, é possível medir a diferença temporal entre o envio do impulso sonoro e a detecção para, com o tratamento matemático já referido, permitir o cálculo da pressão.

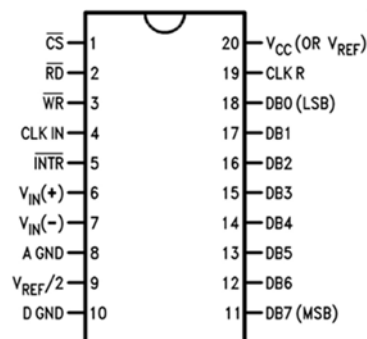
Para adquirir o valor da temperatura requer-se o seguinte circuito (também com um  $\mu\text{C}$  meramente representativo):



**Figura 5.34: Esquema do Circuito para Medição da Temperatura**

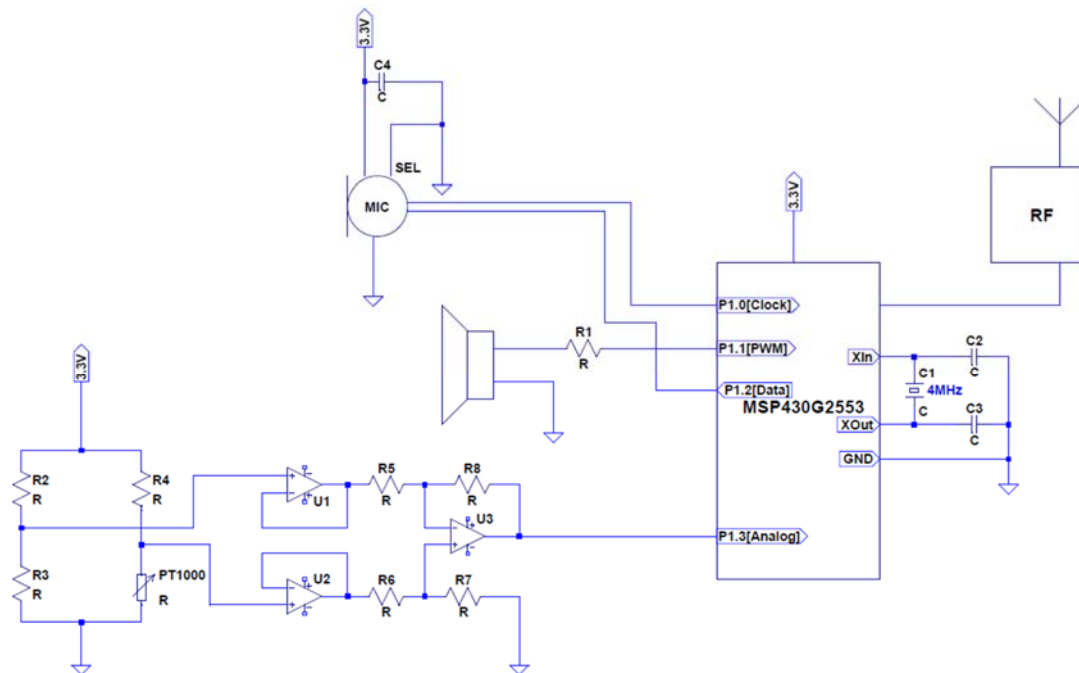
Na figura anterior encontra-se explicada a configuração de um circuito para extracção da tensão da ponte de Wheastone. Este esquema foi desenhado para ilustrar uma montagem com um microcontrolador genérico, que possa não dispor de ADC. Com uma amplificação diferencial que terá de ser dimensionada com base nos valores de referência do ADC, esta seria a abordagem mais correcta para diminuir custos, dimensionando o sistema com componentes adequados à satisfação dos requisitos mínimos.

A configuração utilizada para este ADC foi baseada no ADC0804 da (Texas Instruments):



**Figura 5.35: ADC0804 TI [28]**

No entanto, pretende-se desenhar um sistema mais simples por uma questão de convenção tal como o microcontrolador MSP430F5529 (Texas Instruments). Microcontrolador, que já incorpora um ADC de 10 bit, o que representa uma resolução excessiva para a sensibilidade do transdutor utilizado (PT1000), uma vez que o erro do PT1000 no intervalo de temperaturas 0°C aos 150°C está na casa dos  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ .



**Figura 5.36: Esquema do Circuito para o Multisensor**

Na Figura anterior está representado o circuito final, para o instrumento de medição de temperatura e pressão do óleo.

Para o funcionamento do microfone num regime ultra-sónico foi escolhido um cristal de 4MHz por forma a preencher esse requisito de funcionamento.

Como é possível perceber a montagem do sensor fica bastante simplificada quando o microcontrolador possui um ADC interno.

Os pontos de tensão 3.3V são referentes à tensão fornecida pelo sistema de *Energy Harvesting* discutido no capítulo seguinte.

A implementação do módulo RF utilizado neste sensor será idêntica ao utilizado no detector de descargas. Assim, será discutido no capítulo 5.3 o modelo escolhido e a respectiva implementação.

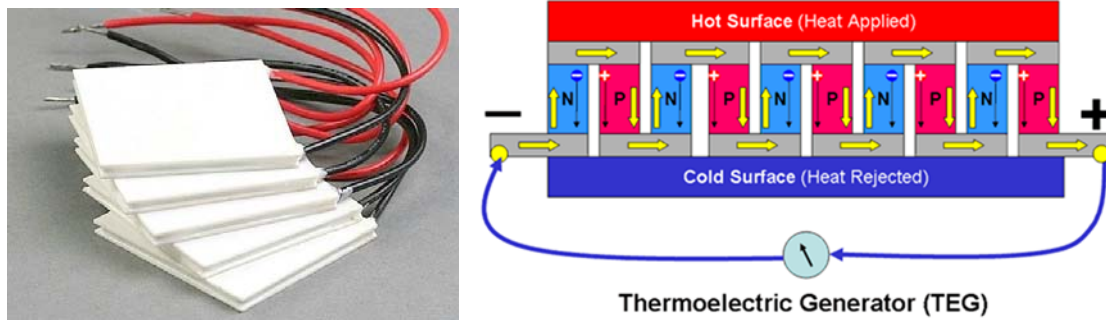
### **5.2.3.1. Alimentação**

O transformador é um elemento que durante o período de funcionamento apresenta, naturalmente, uma temperatura superior à do ar envolvente. Assim, surge a oportunidade de captação de energia baseada no diferencial térmico entre a carcaça do transformador e o ar envolvente, para alimentação do sensor de temperatura e de pressão do óleo no interior do transformador.

A capacidade de fornecimento de potência desta forma de alimentação dependerá, naturalmente, da temperatura ambiente e da carga do transformador. Surge, assim, a questão de como será o sensor inteligente de temperatura e pressão, alimentado em dias quentes, em situações de baixo consumo da rede eléctrica, pois este diferencial poderá vir mesmo a ser insuficiente para a alimentação dos sensores. No entanto, deveremos considerar duas situações: (i) o diferencial térmico não é suficiente, porque existe alguma anomalia na ventilação do PT (caso que já é avaliado por este sistema de monitorização, como descrito em capítulos anteriores), ou (ii) a carga do transformador será tão baixa que não representará sequer algum perigo, pois a temperatura estará logicamente baixa.

Pretende-se, assim, sabendo que existem ciclos de carga variáveis ao longo de cada dia, que este sensor inteligente tenha um supercondensador que permitirá ao sistema ser alimentado durante algumas horas, quando em regime de diferencial térmico insuficiente.

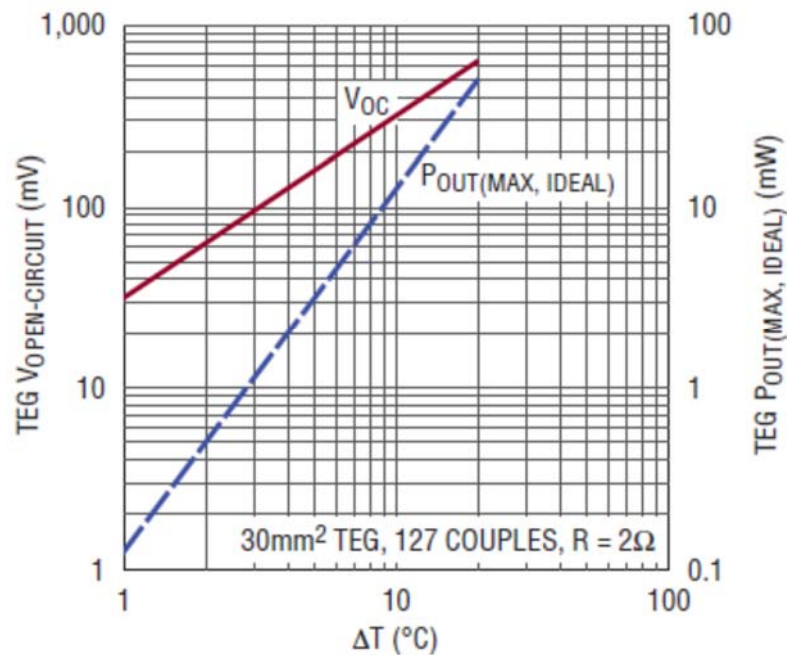
A conversão do diferencial térmico para energia eléctrica foi feita utilizando uma termopilha.



**Figura 5.37: Pilha Eléctrica e Modo de Funcionamento [29] [30]**

Como se pode verificar na figura acima, a termopilha é constituída por vários termopares em série (podendo em casos, mais raros, encontrarem-se em paralelo). Como já explicado anteriormente, funcionam com base no efeito de Seebeck.

Para este sistema de alimentação, convém ter presente que as variações de temperatura de um transformador serão lentas e de pouca amplitude. Considera-se que um transformador num dia de verão em baixa actividade apresentaria o valor mínimo de diferencial térmico entre a carcaça e o ar. Enquanto o valor máximo será no Inverno quando em alturas de maior esforço. Assim, considera-se um valor mínimo típico de 10°C e 25°C para o valor máximo de diferencial térmico. Convém assim perceber se, para o valor mínimo, a potência gerada pela termopilha será suficiente para alimentar as necessidades do sistema.



**Figura 5.38: Tensão e Potência Debitada pela Termopilha [31]**

Como é possível ver na Figura a potência fornecida pela pilha termoelétrica será de cerca de 10mW.

Com base num estudo já anteriormente levado a cabo [32], utilizando a termopilha de modelo PT8.12.F2.4040.TA.W6 do fabricante Laird Technologies, com um sistema de conversor *step-up* para baixas tensões e gestão de potência, LTC3109 de Linear Technology, e seguindo os equipamentos aconselhados para implementação do mesmo, utiliza-se um transformador LPR6235-752SML com relação de transformação de 1:100 [32].

Tendo em conta que o sistema tem três elementos que gastam mais:

- Microcontrolador;
- Circuito analógico, ponte de Wheastone;
- Módulo RF.

O microcontrolador será alimentado por uma tensão de 3.3V e terá, no máximo, 5mA de consumo quando se encontra em modo activo, a 4MHZ, modo activo

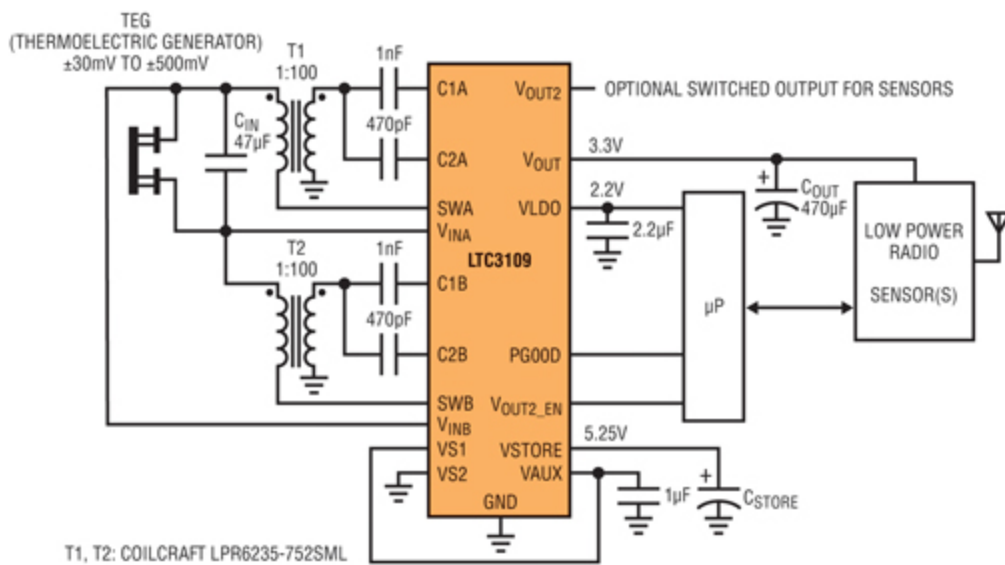
que durará, no máximo o tempo de medição da temperatura (10 ms), mais o tempo de comunicação (100 ms) e 160us durante o envio e recepção do som na medição de pressão, perfazendo um total de 110,16ms de funcionamento no modo activo. Sendo que a corrente no modo *standby* é de 0,5uA a 3,3V, o consumo neste regime é desprezável.

Para o circuito eléctrico analógico, existe a necessidade de lhe fornecer uma tensão de cerca de 3,3V durante cerca de 10ms, para haver estabilização, já que se trata de um circuito analógico, com um consumo de 3,5mA a 3.3V.

O Módulo RF (CC1101) terá um consumo de 16 mA em modo activo, durante 100ms, também a 3,3V, e apresenta uma corrente de 200nA em modo *standby*, o que , também, é desprezável.

Portanto, considerando que são efectuadas medições e comunicação dos valores de hora a hora, a energia consumida corresponde a uma potência média de consumo de cerca de 1,93 uW, muito abaixo do débito de potência desta termopilha.

Assim o a montagem a utilizar será a semelhante à descrita na Figura seguinte.



**Figura 5.39: Esquema de Montagem de LTC3109 [31]**

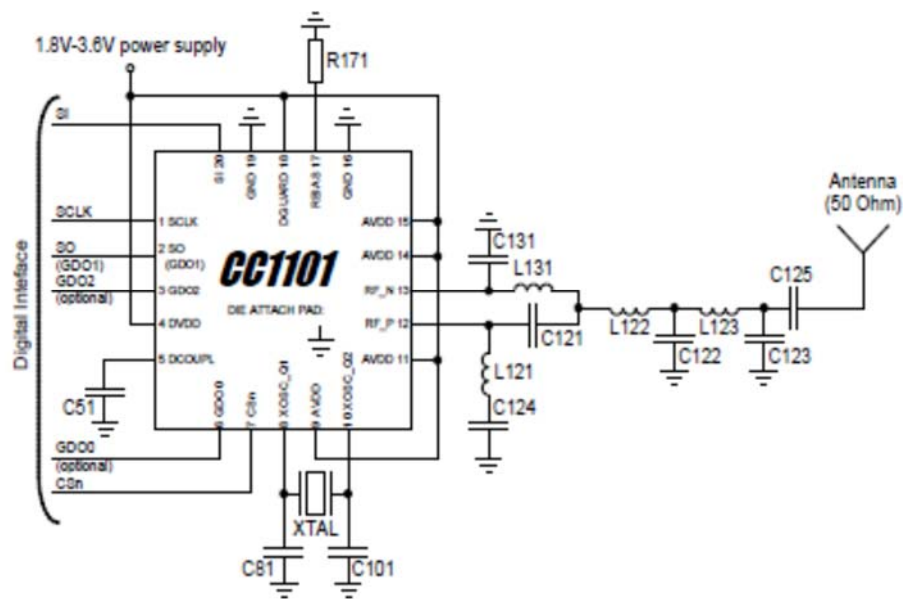
Por fim,  $C_{store}$  seria um condensador de  $0,22F @5,2V$ , que só seria utilizado em casos extremos, já que o diferencial térmico mínimo de  $10^{\circ}C$  seria suficiente pra alimentar este sistema.

### 5.3. Comunicação

Para a comunicação foi pensado para este sensor um módulo RF (CC1101) nos 433MHz, de baixa potência.

A sua montagem está indicada abaixo na Figura obtida na *datasheet* do módulo.





**Figura 5.40: Esquema de Montagem de CC1101 [33]**

A comunicação deste módulo RF com o microcontrolador é efectuada com base numa interface serie síncrona SPI.

Este sistema comunica com a unidade concentradora com um protocolo próprio, na banda de frequência ISM de 433 MHz. É, no entanto, possível a reapreciação do modo de comunicação utilizado, uma vez que os *standards* de mercado, neste domínio de aplicações, apontam para uma utilização generalizada de Zigbee para comunicação M2M.

Seria, assim, de uma perspectiva de mercado, mais seguro a aposta em Zigbee, a fim de facilitar, com o aumento do espectro de compatibilidade, a incorporação de outros sistemas que com comuniquem com esse protocolo, operando na banda ISM 2,4 GHz [1].

## 6. Conclusão

Na engenharia existe o confrontar da teoria com a realidade física. A realidade física, embora, não questione a veracidade de um modelo teórico, por vezes leva a que o modelo teórico falhe quase por completo, quando aplicado por si só. O desenvolvimento do sensor localizador de descargas parciais é um exemplo cabal pois, inicialmente projectado com o intuito de ser apenas sensível a perturbações sonoras, acabou sendo ainda melhor na detecção de perturbações electromagnéticas (30MHz), inutilizando completamente o protótipo quando eram realizadas descargas. Mesmo após a aplicação de um filtro que, teoricamente, seria suficiente para eliminar aqueles sinais, com uma frequência de corte de 80 kHz, não apresentou qualquer influência sobre o sinal gerado pela radiação electromagnética, em resultado da utilização de placas de alvéolos, as quais, sendo muito úteis para prototipagem, são desadequadas face a sinais de RF, caso o objectivo não seja de captar esses sinais.

Com o desenvolvimento destes dois protótipos laboratoriais (localizador com montagem de dois e três microfones), foi possível provar o conceito através de uma abordagem diferente: ultra-sons gerados por choque entre duas peças metálicas. Obteve-se resultados muito interessantes, tais como o aumento significativo da precisão do instrumento, utilizando a mesma plataforma de prototipagem, após adicionar um microfone extra (passando de montagem de dois para três microfones), aumentando, ainda, o ângulo de acção de 180° para o dobro, 360°.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, houve contacto com diversas abordagens para a resolução de cada problema. Mas, mais importante que perceber que existem muitas formas de resolução para cada problema, é perceber que em engenharia tem que haver uma decisão racional sobre que solução aplicar, baseando sempre em critérios de aplicabilidade, económicos e de oportunidade.

Foi possível, também, perceber que características de componentes podem constituir grandes vantagens ou desvantagens, dependendo da aplicação. Um

microfone com boa direccionalidade é o perfeito para a abordagem escolhida para medição da pressão do óleo, diminuindo bastante a influência de ruídos circundantes, ao passo que uma boa direccionalidade comprometeria completamente o funcionamento de um localizador de descargas, onde a omnidireccionalidade é uma característica essencial.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu o contacto com um projecto industrial em curso, dando oportunidades de propostas para a sua melhoria, o que se revelou bastante enriquecedor, e criou a oportunidade de ter contacto com a produção de tecnologia, com critério.

## 7. Trabalho Futuro

Como protótipo laboratorial, foram obtidos os resultados pretendidos. Isto é, foi provado o conceito. Assim a próxima fase será a criação de um protótipo industrial, que terá em vista várias aspectos chaves:

- Antes do seguinte passo, seria necessário o teste das duas montagens. Com a utilização de um microcontrolador mais rápido, com objectivo de perceber se a utilização da montagem de dois microfones acabaria por ser precisa o suficiente para a aplicação em vista, e consequentemente resultando na aposta mais correcta para esta utilização. Dado o seu custo, quase 1/3 inferior.
- Criação de um PCB, permitindo diminuir distâncias entre componentes a fim de diminuir o efeito antena das linhas condutoras.
- Inserção do circuito dentro de uma caixa metálica a fim de criar um efeito de blindagem (gaiola de Faraday).
- Tendo em conta que os microfones terão de se encontrar no exterior, o microfone deverá ser envolto numa malha metálica que estará conectada à terra.
- Como o circuito se encontrará isolado, passará a não haver detecção da perturbação electromagnética. No entanto, como descrito anteriormente, é do interesse deste sensor saber se houve perturbação electromagnética a fim de eliminar erros. Assim, pressupõe a incorporação de um simples, corpo, condutor no exterior da caixa para posteriormente amplificar o sinal recebido.

Para o multisensor de temperatura e pressão, o trabalho futuro passará por fazer testes num transformador a fim de verificar a viabilidade do sistema eléctrico e mecânico, e posteriormente dar início à produção de um protótipo industrial.

## 8. Anexos

### Código para arduino, montagem de dois microfones:

```
#include <math.h>

// mic2 e mic3 sao as variaveis boolianas que dirão se houve um som detectado
volatile bool mic2=false; // ""
volatile bool mic3=false; // ""
volatile int countmic1=0;
volatile int countmic2=0;
volatile int countmic3=0;

double tempomorto = 1; // ms, tempo morto é o tempo que o instrumento espera até que
todos os microfones detectem o som

// time2 e time3 é o tempo em que cada microfone detecta o som
double time2; // ""
double time3; // ""

// the setup routine runs once when you press reset:

void setup() {
  // initialize serial communication
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial); // needed for Leonardo (uses a USB a Communications Device Class (CDC)
                  // protocol that supports asynchronous serial communication (must close
                  // first the one already opened by the downloader and open a new one as
                  // serial ports can only be controlled by one program at a time).
  Serial.println("passou");
  // initialize the digital pin as an output.

  // interruptions in pin 3
```

```
attachInterrupt(0, interrupt3, RISING);
attachInterrupt(1, interrupt2, RISING);
// External interrupts in Leonardo: 0 (on digital pin 3) and 1 (on digital pin 2).
//attachInterrupt(1, interruptor, RISING);
}
// must be available in loop(), used in the interrupt routine
// can be altered in a not "normal" sequence due to the interrupt
volatile int countInterrupts = 0;

int count =0;

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  while((mic2==false) && (mic3==false)){};
  delay(tempomorto);
  if ((mic2 == true) && (countmic2==1) && (mic3 == true) && (countmic3==1)){

  Serial.println(time2);
  Serial.println(time3);
  }
  delay(1000);
  countmic2=0;
  countmic3=0;
  mic2=false;
  mic3=false;
}
// interrupt routine
void interrupt2(void)
{
```

```

if (mic2==false){
  time2=micros();
  countmic2++;
}
mic2=true;
}
void interrupt3(void)
{
  if (mic3==false){
    time3=micros();
    countmic3++;
  }
  mic3=true;
}

```

### **Código para arduino, montagem de três microfones:**

volatile bool mic1=false; // mic1, mic2 e mic3 sao as variaveis booleanas que dirão se houve um som detectado

volatile bool mic2=false; // ""

volatile bool mic3=false; // ""

volatile int countmic1=0;

volatile int countmic2=0;

volatile int countmic3=0;

float tempomorto = 1; // ms, tempo morto é o tempo que o instrumento espera até que todos os microfones detectem o som

float time1=time1\*1.0; // time1, time2 e time3 é o tempo em que cada microfone detecta o som

float time2=time1\*1.0; // ""

float time3=time2\*1.0; // ""

**// the setup routine runs once when you press reset:**

```
void setup() {  
  // initialize serial communication  
  Serial.begin(9600);  
  while (!Serial); // needed for Leonardo (uses a USB a Communications Device Class (CDC)  
    // protocol that supports asynchronous serial communication (must close  
    // first the one already opened by the downloader and open a new one as  
    // serial ports can only be controlled by one program at a time).  
  Serial.println("passou");  
  // initialize the digital pin as an output.  
  
  // interruptions in pin 3  
  attachInterrupt(0, interrupt3, RISING);  
  attachInterrupt(1, interrupt2, RISING);  
  attachInterrupt(3, interrupt1, RISING);  
  // External interrupts in Leonardo: 0 (on digital pin 3) and 1 (on digital pin 2).  
  //attachInterrupt(1, interruptor, RISING);  
}  
  
// must be available in loop(), used in the interrupt routine  
// can be altered in a not "normal" sequence due to the interrupt  
volatile int countInterrupts = 0;  
int count =0;  
  
// the loop routine runs over and over again forever:  
void loop() {  
  while((mic1==false) && (mic2==false) && (mic3==false)){};  
  delay(tempomorto);  
  if ((mic1 == true) && (countmic1==1) && (mic2 == true) && (countmic2==1) && (mic3 ==  
true) && (countmic3==1)){  
    Serial.println(time1);
```



```
Serial.println(time2);
Serial.println(time3);

delay(1000);
countmic1=0;
countmic2=0;
countmic3=0;
mic1=false;
mic2=false;
mic3=false;
}
// interrupt routine
void interrupt1(void)
{
  if (mic1==false){
    time1=1.0*micros();
    countmic1++;
  }
  mic1=true;
}
void interrupt2(void)
{
  if (mic2==false){
    time2=1.0*micros();
    countmic2++;
  }
  mic2=true;
}
void interrupt3(void)
```

```

{
  if (mic3==false){
    time3=1.0*micros();
    countmic3++;
  }
  mic3=true;
}

```

### Código Matlab, para montagem de dois microfones:

```

clear all
clc
format long

lado=0.069/2; %Lado

velsom=0.000343;

arduino=serial('COM18','BaudRate',9600);

fopen(arduino);

cont=1;

while cont~=0

    time2=fscanf(arduino,'%f');
    time3=fscanf(arduino,'%f');

    t23=time3-time2
    t23=t23*velsom;
    if t23==0;
        angulo=90;
    end
    if t23>0;
        angulo=atan(sqrt(lado.^2-t23.^2/4)/(t23/2));
        angulo=angulo*90/(pi/2);
    end
    if t23<0;
        angulo=atan(sqrt(lado.^2-t23.^2/4)/(t23/2));
        angulo=angulo*90/(pi/2);
        angulo=180+angulo;
    end
    angulo
    prompt='Quer continuar? [y/n]';
    str=input(prompt,'s');

```

```

    if str=='n';
        cont=0;
    end

end

delete(INSTRFIND);
clear all
clc

```

## Código Matlab, para montagem de três microfones:

```

clear all
clc

lado=0.069; %Lado do triângulo
velsom=0.000343;

arduino=serial('COM18','BaudRate',9600);

fopen(arduino);

cont=1;

while cont~=0

    t12=fscanf(arduino,'%f');
    t23=fscanf(arduino,'%f');
    t13=fscanf(arduino,'%f');

    t12=t12*velsom; % converter os tempos em distâncias
    t23=t23*velsom;
    t13=t13*velsom;

    Vdx= 0.5*(t12+t23)+t13;
    Vdy= 0.5*sqrt(3)*(t23-t12);

    if (Vdx==0) % esta codigo de seguida visa colocar o
        angulo numa escala de -180 a 180
            if(Vdy >= 0)
                angle=90;
            end
            if (Vdy < 0)
                angle=-90;
            end
        end
    if Vdx~=0
        angle=atan(Vdy/Vdx);
        angle=angle*180/pi;

        if ((Vdx/Vdy) >= 0)
            if(Vdx>0)
                end
            end
        end
    end
end

```

```
        if(Vdx<0)
            angle=angle - 180;
        end
    end
    if((Vdy/Vdx)<0)
        if(Vdx>0)
            end
        if(Vdx<0)
            angle = angle + 180;
        end
    end
end

%Obtido o ângulo, no intervalo -180 até 180
angle
prompt='Quer continuar? [y/n]';
str= input(prompt,'s');
if str=='n';
    cont=0;
end

end

delete(INSTRFIND);
clear all
clc
```

## 9. Referências Bibliográficas

- [1] F. Cardoso, M. Cordeiro, N. Rocha, L. Oliveira e S. Faria, "Using Smart Sensors In The Remote Condition Monitoring Of Secondary Distribution Substations," em *CIREC*, Rome, 2014.
- [2] G. Palem, "CONDITION-BASED MAINTENANCE USING SENSOR," *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT)*, vol. 3, 2013.
- [3] EDP, "Rede de Distribuição de Energia Eléctrica," Energias de Portugal, [Online]. Available: <http://www.edp.pt/pt/fornecedores/seguranca/redededistribuicao/Pages/RededeDistribui%C3%A7%C3%A3o.aspx>.
- [4] prof2000, "Posto de Transformação," prof2000, [Online]. Available: [www.prof2000.pt/users/lpa/POSTO%2520DE%2520TRANSFORMA%25C3%2587%25C3%2583O.ppt](http://www.prof2000.pt/users/lpa/POSTO%2520DE%2520TRANSFORMA%25C3%2587%25C3%2583O.ppt).
- [5] P. Ibarguengoytia, R. Liñan e E. Betancourt, "Transformer Diagnosis Using Probabilistic Vibration Models," *MICAI*, 2009.
- [6] I. F. Pires, *Sensores Inteligentes para o Diagnóstico de Isoladores em Linhas Aéreas de Alta e Muito Alta Tensão*, Coimbra, 2015.
- [7] A. Abdelgawad e M. Bayoumi, "Data Fusion in WSN," em *Resource-Aware Data Fusion Algorithms for Wireless Sensor Networks*, Springer, 2012, pp. 17-35.
- [8] Inductive Automation, "The Industrial Internet of Things (IIoT)," [Online]. Available: <https://inductiveautomation.com/what-is-iiot>.
- [9] mobiledevdesign, "Bluetooth Moves Beyond The Earpiece To Rule Other Applications," [Online]. Available: <http://mobiledevdesign.com/learning-resources/bluetooth-moves-beyond-earpiece-rule-other-applications>.
- [10] Schneider-electric, *Automation2000 - Standard DGPT2*.
- [11] D. P. Massa, "Choosing an Ultrasonic Sensor for Proximity or Distance Measurement Part 1: Acoustic Considerations," 1 Fevereiro 1999. [Online]. Available: <http://www.sensormag.com/sensors/acoustic-ultrasound/choosing-ultrasonic-sensor-proximity-or-distance-measurement-825>.
- [12] Vitutor, "Ecuación de la hipérbola," [Online]. Available: <http://www.vitutor.net/1/34.html>.

- [13] A. Almeida, "Detector Sonoro de Posição," Coimbra, 2015.
- [14] Universidade do Porto, "Movimento Curvilíneo," [Online]. Available: [https://def.fe.up.pt/dinamica/movimento\\_curvilineo.html](https://def.fe.up.pt/dinamica/movimento_curvilineo.html).
- [15] Equipe IGM, "Coordenadas em três dimensões," 7 Janeiro 2010. [Online]. Available: [http://www.igm.mat.br/aplicativos/index.php?option=com\\_content&view=article&id=286%3Acoor-desfericas&catid=54%3Acoor-deadas3&Itemid=74](http://www.igm.mat.br/aplicativos/index.php?option=com_content&view=article&id=286%3Acoor-desfericas&catid=54%3Acoor-deadas3&Itemid=74).
- [16] MNX MEMS & Nanotechnology, "What is MEMS Technology?," MEMS-Exchange, 2015. [Online]. Available: <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>.
- [17] J. Freeman, "Techniques to enhance op amp signal integrity in low-level sensor applications," National Semiconductor Corp, 18 Dezembro 2008. [Online]. Available: <http://www.embedded.com/print/4010333>.
- [18] G. J. FitzPatrick, THE DETECTION OF PARTIAL DISCHARGES IN TRANSFORMER OIL, New Jersey, 1983.
- [19] Labfacility, "Temperature Handbook- A practical guide to temperature measurement, control and calibration using thermocouples and resistance thermometers," pp. 31-32.
- [20] Minco, "RTD, Thermocouple, or Thermistor?," Minco, [Online]. Available: [http://www.minco.com/components/~media/WWW/Sensors/FAQs/Minco\\_SensorsDesignGuide%2010.ashx?la=en](http://www.minco.com/components/~media/WWW/Sensors/FAQs/Minco_SensorsDesignGuide%2010.ashx?la=en).
- [21] autosystempro, "Position and Motion Detection Sensors," [Online]. Available: <http://autosystempro.com/position-and-motion-detection-sensors/>.
- [22] Texas Instruments, "Reference Design for Interfacing Current Output Hall Sensors and CTs With Differential ADCs/MCUs," [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/tidua57a/tidua57a.pdf>.
- [23] R. Sachs, "Pt100, Pt1000 or NTC – which is the right measuring element?," Wika, 12 Outubro 2015. [Online]. Available: <http://blog.wika.com/knowhow/pt100-pt1000-or-ntc-which-is-the-right-measuring-element/>.
- [24] F. ... e B. ..., "Strain Gages and Force Measurement," [Online]. Available: <http://archive.cnx.org/contents/da31d8d7-0eb6-4673-94e3-e448c3f59779@1/strain-gages-and-force-measurement>.
- [25] muRata, "MA40H1S-R," [Online]. Available: <http://www.murata.com/en-us/products/productdetail?partno=MA40H1S-R>.
- [26] Knowles, "New product: Ultrasonic MEMS Microphone," [Online]. Available: <http://www.knowles.com/eng/Newsroom/New-product-Ultrasonic-MEMS-Microphone>.

- [27] Knowles, "SPH0641LU4H-1," [Online]. Available: [www.knowles.com/jpn/content/download/5990/105795/version/1/file/SPH0641LU4H-1.pdf](http://www.knowles.com/jpn/content/download/5990/105795/version/1/file/SPH0641LU4H-1.pdf).
- [28] D. Raja, "Introduction to ADC0804," Circuitdigest, [Online]. Available: <http://circuitdigest.com/electronic-circuits/adc0804-introduction>.
- [29] Woodbank Communications Ltd, "Direct Conversion of Heat Energy to Electrical Energy," [Online]. Available: <http://www.mpoweruk.com/thermoelectricity.htm>.
- [30] everredtronic, "Thermoelectric Generator/ Seebeck generator-TEG Modules," [Online]. Available: <http://www.everredtronic.com/thermoelectric.generator.html>.
- [31] D. Salerno, "Ultra-Low Voltage Energy Harvester Uses Thermoelectric Generator for Battery-Free Wireless Sensors," Digi-Key, 12 Dezembro 2011. [Online]. Available: <http://www.digikey.hk/en/articles/techzone/2011/dec/ultra-low-voltage-energy-harvester-uses-thermoelectric-generator-for-battery-free-wireless-sensors>.
- [32] J. Faria, Monitorização e Diagnóstico Automático de Purgadores em Linhas de Vapor Industriais através de Sensores Inteligentes Sem Fios, Coimbra, 2014.
- [33] Texas Instruments, "Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver," [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf>.