



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Carolina Soares da Conceição

ROBÔS PARA DETEÇÃO DE INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS

Dissertação no âmbito do Mestrado em Segurança aos Incêndios Urbanos orientada pelo Professor Doutor Lino José Forte Marques e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Setembro de 2019

Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

ROBÔS PARA DETEÇÃO DE INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS

Carolina Soares da Conceição

Dissertação no âmbito do Mestrado em Segurança aos Incêndios Urbanos orientada pelo
Professor Doutor Lino José Forte Marques e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da
Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Setembro de 2019



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador Lino Marques, que desde o primeiro momento se dispôs a colaborar comigo neste trabalho, por toda disponibilidade e apoio ao longo deste projeto.

Quero agradecer também a todos aqueles que contribuíram para que esta dissertação fosse realizada. Em especial aos colegas do Laboratório de Sistemas Embebidos da Universidade de Coimbra.

Também quero deixar uma palavra de agradecimento aos meus amigos, os que estão próximos e aqueles distantes, que me incentivaram e acreditaram em mim.

Por fim, mas não menos importante quero agradecer a Cecília pelo carinho, amizade, incentivo e paciência demonstrada durante todo o mestrado. Muito obrigada.

RESUMO

Esta dissertação estudou a possibilidade de utilizar robôs móveis como meio complementar à detecção automática de incêndios em edifícios. O trabalho desenvolvido utiliza um robô móvel com capacidade de patrulhar ambientes internos em busca de focos de incêndios. O robô pode mover-se de forma autónoma, definindo o seu trajeto num mapa a partir de um conjunto de pontos de passagem ou ser operado remotamente por um operador. O sistema de detecção de incêndios analisa os produtos provenientes da combustão, nomeadamente CO, CO₂, materiais particulados (PM₁, PM_{2,5} e PM₁₀) e temperatura, e, com base num algoritmo de fusão sensorial, decide se existe um incêndio ou não no local.

A programação do robô é realizada com base numa camada de software intermédia chamada de Robot Operating System (ROS). O ROS dispõe de ferramentas para visualização do modelo do robô, dados dos sensores e ambiente gráfico em 3D, sendo a aplicação RViz a escolhida para desenvolvimento da visualização gráfica neste trabalho.

Os resultados do trabalho foram testados em dois ambientes distintos: um laboratório e um piso completo do DEEC-UC para avaliação do robô em relação a capacidade de navegação e de detecção de incêndios. O sistema automático de detecção de incêndios de fabricação da GE Security, modelo 2X-F1, foi instalado no local dos ensaios para avaliação do tempo de acionamento do alarme de incêndio.

Por fim foram realizados ensaios experimentais para avaliação do módulo de sensores acoplado ao robô móvel. Os resultados obtidos demonstram que a detecção dos produtos da combustão por uma plataforma robótica foi mais eficaz que o sistema de detecção tradicional utilizado. É possível verificar que as concentrações medidas nos ensaios com fumo são substancialmente maiores do que as medidas em condições normais, constatando a eficácia do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Segurança; Incêndio; Detecção; Robô; Patrulhamento

ABSTRACT

This dissertation studied the possibility of using mobile robots as a complementary means to the automatic fire detection in buildings. The work developed uses a mobile robot capable of patrolling indoor environments searching for fire spots. The robot can move autonomously by defining its path on a map from a set of waypoints or being operated remotely by an operator. The fire detection system analyses combustion products, namely CO, CO₂, particulate matter (PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀) and temperature, and, based on a sensory fusion algorithm, decides whether or not there is a fire on site.

Robot programming is based on an intermediate software layer called the Robot Operating System (ROS). The ROS has tools for visualization of the robot model, sensor data and 3D graphic environment, being the RViz application chosen for the development of graphic visualization in this work.

The results of the work were tested in two different environments: a laboratory and a full floor at DEEC-UC for validation of the robot's navigation and fire detection capabilities. The GE Security Model 2X-F1 automated fire detection system was installed at the testing site to assess the fire alarm trigger time.

Finally, experimental tests were performed to evaluate the sensor module coupled to the mobile robot. The results show that the detection of combustion products by a robotic platform was more effective than the traditional detection system used. It is possible to verify that concentrations measured in the smoke tests are substantially higher than those measured under normal conditions, noting the effectiveness of the system.

KEYWORDS: *Safety; Fire; Detection; Robot; Patrolling.*

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE QUADROS	ix
ABREVIATURAS	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	5
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
2 DETECÇÃO DE INCÊNDIOS.....	7
2.1 CARACTERÍSTICAS DA COMBUSTÃO.....	8
2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS SISTEMAS DE DETECÇÃO.....	12
2.3 ROBÔS MÓVEIS	16
2.3.1 ROBÔS DE EMERGÊNCIA	21
2.3.2 ROBÔS NA SEGURANÇA AO INCÊNDIO	23
3 MÉTODOS E MATERIAIS.....	29
3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA.....	29
3.2 ESTRUTURA FÍSICA DO ROBÔ	30
3.3 SENSORES	31
3.3.1 SISTEMA DE DETECÇÃO DE INCÊNDIO	33
3.4 ROBOT OPERATING SYSTEM	36
4 IMPLEMENTAÇÃO	38
4.1 DESCRIÇÃO DA PROGRAMAÇÃO.....	38
4.2 DEFINIÇÃO DOS AMBIENTES DE TESTE	40
4.3 FUSÃO SENSORIAL PARA DETECÇÃO DO INCÊNDIO.....	42
4.4 AMBIENTE DE TELE OPERAÇÃO	45

5 ENSAIOS DEMONSTRATIVOS.....	48
5.1 APLICAÇÃO	48
5.2 RESULTADOS	51
6 CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – PERFORMANCE DOS DETETORES DE FUMO DE 2012 A 2016	3
FIGURA 2.1 – CURVA TEMPERATURA-TEMPO DE UM INCÊNDIO REAL.....	7
FIGURA 2.2 – TEMPO DE DETECÇÃO.....	8
FIGURA 2.3 – DETETOR TÉRMICO HOCHIKI ABC-EW, DETETOR ÓTICO HOCHIKI ALN-EN E DETETOR COM MULTI-TECNOLOGIA HOCHIKI ACC-EN.....	13
FIGURA 2.4 – SHAKEY, O PRIMEIRO ROBÔ MÓVEL.....	17
FIGURA 2.5 – AIBO [25], ROOMBA S9+.....	19
FIGURA 2.6 – ROBÔ DE SEGURANÇA K5 E ROBÔ ANYMAL	20
FIGURA 2.7 – ROBÔ DRC-HUBO	22
FIGURA 2.8 – FORMAÇÃO DO GRUPO DE ROBÔS	24
FIGURA 2.9 – ROBÔ AUTÔNOMO DE COMBATE A INCÊNDIOS (SAFFiR).....	26
FIGURA 3.1 – ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA.	29
FIGURA 3.2 – ROBÔ ERRATIC – ERA MOBI.....	30
FIGURA 3.3 – ESTRUTURA DO ROBÔ ERRATIC..	31
FIGURA 3.4 – SENSOR HOKUYO RAPID UBG-04LX-F01	32
FIGURA 3.5 – ÁREA DE DETECÇÃO DO SENSOR HOKUYO.	32
FIGURA 3.6 – CÂMARA PHILIPS E IMAGEM	33
FIGURA 3.7 – ARQUITETURA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.	34
FIGURA 3.8 – FORMATO DAS MENSAGENS	34
FIGURA 3.9 – IMPRESSÃO EM 3D DA ESTRUTURA DE FUNIL E MÓDULO DE SENSORES <i>SPREADNOSE</i>	35
FIGURA 3.10 – EXEMPLO DE COMUNICAÇÃO ENTRE NÓS	37
FIGURA 4.1 – MAPA DO PISO 1 DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA E DE COMPUTADORES COM PONTOS DE PASSAGEM (X).....	41
FIGURA 4.2 – MAPA GERADO PELO ROBÔ DO LABORATÓRIO DE SISTEMAS EMBEBIDOS E SUA REPRESENTAÇÃO NO RVIZ.....	41
FIGURA 4.3 – CONDIÇÃO CRÍTICA 2	44
FIGURA 4.4 – DEFINIÇÃO DE ALARME DE INCÊNDIO.....	44
FIGURA 4.5 – FLUXO DE DECISÃO DO ALARME DE INCÊNDIO	45
FIGURA 4.6 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ROBÔ.....	46
FIGURA 4.7 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS MEDIÇÕES DOS SENSORES.....	46
FIGURA 4.8 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO LASER	47
FIGURA 4.9 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO ALARME DE INCÊNDIO	47
FIGURA 5.1 – MAPA COM O PADRÃO DE RONDA.....	48
FIGURA 5.2 – A ESQUERDA ESTÁ O PAINEL GE 2X-F1 E A DIREITA O VISOR DO PAINEL A APRESENTAR OS DISPOSITIVOS CONFIGURADOS	49
FIGURA 5.3 – PAINEL DO SADI (1), DETETOR ÓTICO (2), FONTE DE FUMO (3), ROBÔ (4).....	50
FIGURA 5.4 – VALORES REGISTRADOS NO DIA 1	53

FIGURA 5.5 – REPRESENTAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE PM_{10} . GRÁFICO A: CONDIÇÕES NORMAIS. GRÁFICO B: FUMO DE PAPEL CARTÃO. GRÁFICO C: FUMO DE FIO ELÉTRICO..... 54

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 2.1 – FONTES DE CALOR E TEMPERATURAS MÁXIMAS	9
QUADRO 2.2 – GASES TÓXICOS MAIS RELEVANTES PRODUZIDOS POR DIFERENTES COMPOSTOS	10
QUADRO 2.3 – CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DE GASES ASFIXIANTE DURANTE OS PRIMEIROS SEIS MINUTOS DA QUEIMA DE UMA POLTRONA NUMA SALA	11
QUADRO 2.4 – PROJETOS RELACIONADOS	23
QUADRO 3.1 – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DOS SENSORES.....	35
QUADRO 3.2 – ESPECIFICAÇÃO DE VERSÃO DAS FERRAMENTAS DE SOFTWARE RELEVANTES	37
QUADRO 4.1 – ‘NÓS’ DO SISTEMA	38
QUADRO 4.2 – TÓPICOS E MENSAGENS DO MÓDULO DE SENSORES.....	39
QUADRO 4.3 –VALORES DA CONDIÇÃO 1.....	43
QUADRO 4.4 –VALORES DA CONDIÇÃO 2.....	43
QUADRO 5.1 – CONCENTRAÇÕES MÉDIAS.....	52
QUADRO 5.2 – TEMPOS DE ACIONAMENTO DO ALARME DE INCÊNDIO.....	55

ABREVIATURAS

AFFMP	Autonomous Fire Fighting Mobile Platform
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DCR	DARPA Robotics Challenge
DGPS	Differential Global Positioning System
EUA	Estados Unidos da América
GPS	Global Positioning System
NFPA	National Fire Protection Association
SADI	Sistema Automático de Detecção de Incêndio
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
ROS	Robot Operation System
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
USB	Universal Serial Bus

1 INTRODUÇÃO

Os incêndios em edifícios têm características distintas dos incêndios florestais, sendo o aspecto mais crítico, a evacuação segura dos ocupantes. Em espaços fechados, o fumo gerado numa combustão pode, rapidamente, ocupar as vias de evacuação, reduzindo a altura da camada de interface entre o ar respirável e o ar contaminado, acarretando a redução da visibilidade e o aumento de gases tóxicos, o que, conseqüentemente, reduz a capacidade de escape das pessoas. Esses incêndios, quando alcançam grandes proporções, causam, em geral, enormes prejuízos financeiros, impactos ambientais e, principalmente, mortes.

Através de registos históricos, pode-se notar que esses desastres ocorrem desde a antiguidade até os dias de hoje e são motivo de preocupação e motivação para novos estudos na sociedade. Em resposta aos grandes incêndios ocorridos na história, a sociedade reagiu criando instituições, procedimentos e legislação na tentativa de melhorar a organização urbana e as estruturas dos edifícios para prevenir o início e a deflagração dos incêndios. Regulamentos de construção, equipamentos de detecção e combate, controlo sobre o uso de materiais de produtos aplicados nos edifícios, regulamentos sobre organização estrutural das cidades e criação de organizações públicas e privadas para combate ao incêndio são alguns exemplos de ações que visam aumentar o nível de segurança contra incêndio.

O nível de segurança contra incêndio em edifícios depende, não só de projetos adequados às características físicas e de ocupação de um determinado recinto ou edifício, mas também de medidas que assegurem a manutenção das condições de segurança, definidas no projeto, ao longo do tempo de vida do edifício, sendo o nível de segurança contra incêndio condizente com as características econômicas, sociais e culturais gerais duma sociedade.

Dentre os avanços citados, os equipamentos de detecção de incêndios são essencialmente importantes para que um incêndio num edifício não tome proporções descontroladas [1]. Para que as medidas de controlo e combate sejam eficazes, estas devem ser aplicadas ainda no

estágio inicial da combustão. Ou seja, o ideal é que o foco do incêndio seja identificado no menor tempo possível a fim de dar o alerta à equipa de combate e comandar sistemas automáticos de extinção, reduzindo assim os danos de um incêndio [2]. Os sistemas de proteção em geral têm com finalidade a redução dos danos causados por um incêndio e, consequentemente, do risco de incêndio, já que este consiste na combinação da probabilidade de ocorrência de um evento indesejável de incêndio e a sua intensidade.

Atualmente, o sistema de deteção mais utilizado é o Sistema Automático de Deteção de Incêndios (SADI). Tal sistema de proteção é importante para a redução do risco de incêndio de um edifício, pois tem a capacidade de detetar e alertar as pessoas em relação a condições anormais de um dado ambiente. Porém, apesar de ser aplicado em grande escala, não é capaz de responder às diversas características de um incêndio, como localização da fonte do incêndio, tamanho e taxa de crescimento [3].

Outro aspeto crítico são os alarmes falsos gerados pelo SADI. Os detetores óticos, por exemplo, podem gerar falsos alarmes quando expostos a fumos provenientes de cozinha, vapores de água, fumos de cigarro e aerossóis [4]. Para fornecer informações mais detalhadas sobre incêndios, a abordagem baseada em múltiplos sensores e a integração com robôs móveis está se tornando cada vez mais utilizada.

De acordo com Ur Rehman et al. [5], é viável a implementação de robôs autônomos para, de forma ativa, realizar rondas em busca de potenciais incêndios, procurar e declarar a presença ou a ausência de fogo com base em várias técnicas de perceção sensorial. A partir desse entendimento, foram realizados estudos visando a utilização de robôs para deteção de incêndios no âmbito urbano e também florestal [6].

1.1 MOTIVAÇÃO

Apesar do grande benefício que o SADI proporcionou à proteção contra incêndio em edifícios, eventos trágicos de incêndios ainda ocorrem com certa frequência, mesmo com tal sistema instalado. Pode ser observado, através da análise dos números estatísticos da *National Fire*

Protection Association (NFPA) [7] relativos aos anos de 2012 a 2016, que ter o sistema instalado não garante que as pessoas conseguirão sair com segurança das suas casas, figura 1.1.

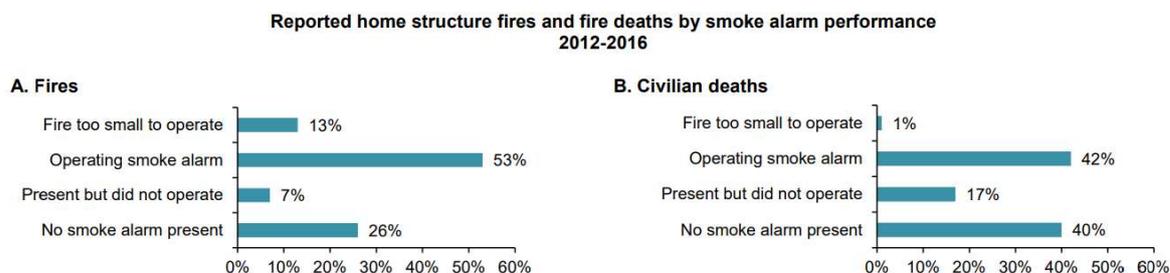


Figura 1.1 – Performance dos detetores de fumo de 2012 a 2016 [7]

O estudo mostra que pouco mais da metade dos casos deu origem a um alarme (53%) e que quase 3 em cada 5 incêndios com registo de morte ocorreram em fogos onde não havia SADI ou onde aquele não funcionava (57%). Outra informação importante obtida a partir do relatório é que, apesar do SADI estar presente em 3 de 4 incêndios residenciais, em 42% dos registos com mortes, o detetor de fumo funcionou, mas não foi efetivo para salvar as pessoas.

As consequências socioeconómicas também representam impacto relevante após os incêndios. Nos EUA, apenas no ano de 2016, foi reportado US \$13,6 bilhões em danos à propriedade. Desse montante, 3/4 do valor (US \$10,4 bilhões) foram referentes a incêndios estruturais, incluindo US \$7,2 bilhões em perdas de propriedades em incêndios residenciais [8].

As falhas podem ocorrer por falta de manutenção, por projeto não adequado às instalações, por má comunicação de evacuação ou por falha na identificação do foco inicial do incêndio, como exemplos. Independente da causa, o fato é que existem vítimas fatais e que é preciso aperfeiçoar as formas de identificação dos incêndios e integrá-las à comunicação eficaz para fuga segura dos ocupantes.

Um dos problemas mais presentes em edifícios e centros comerciais, especificamente, é relativo às alterações físicas nos espaços sem adequação nas instalações do SADI, ou seja, quando um edifício comercial arrenda um determinado espaço para uma empresa, e esta faz as alterações de *layout* de acordo com as suas necessidades, todos os projetos de segurança contra incêndio

também devem ser ajustados de acordo com a legislação e normas aplicáveis para que o ambiente esteja seguro. Em muitos casos, a equipa de obras não é a mesma equipa que fará as alterações no SADI e os tempos de execução dos trabalhos são diferentes. O resultado é que a empresa inicia as suas atividades sem o SADI adequado ao novo *layout* e, por consequência, os tempos de deteção ficam totalmente comprometidos.

Questões de qualidade das instalações também podem influenciar o funcionamento do SADI. As instalações devem cumprir requisitos mínimos para garantir a sua eficiência. Por exemplo, a blindagem eletrostática dos fios e a proteção contra influências de campos magnéticos devem garantir que o SADI não seja afetado por outros sistemas. Caso condutas e fios não sejam dimensionados corretamente, os detetores ficam sujeitos a interferência de campos magnéticos e suscetíveis a alarmes falsos e funcionamento inadequado no momento de um incêndio real.

Outro problema, são os alarmes falsos que acabam por gerar incredibilidade das pessoas em relação ao SADI e fazem com que o sistema seja desabilitado, parcial ou totalmente, na tentativa de se evitar alarmes sonoros indesejados. O desconhecimento da sociedade em relação à importância de se ter um sistema capaz de identificar os produtos de uma combustão e gerar alarmes acarreta a má utilização desses sistemas. Algo importante de se pontuar é o fato do SADI ser um sistema estático, ou seja, é instalado em pontos fixos do edifício e atua de forma passiva e depende que o fumo percorra um determinado espaço e chegue até aos sensores para detetar o incêndio.

Nos últimos anos tem-se investido em novas tecnologias de deteção precoce de incêndios com base em amostragem de partículas, amostragem de temperatura e análise dos vapores do fumo, incluindo a fusão de informações proveniente de diversos sistemas instalados no edifício. A utilização de robôs móveis para busca ativa de condições anormais em espaços interiores também vem sendo estudada, mas ainda sem um modelo comercial validado para implementação nos edifícios.

Diante disso, são necessários estudos para o desenvolvimento de novos equipamentos e métodos visando promover e aumentar a robustez de deteção. Estes estudos devem buscar alternativas tecnológicas capazes de identificar um incêndio em sua fase inicial e alertar os ocupantes do edifício de forma efetiva.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é o estudo da viabilidade de utilizar um robô móvel integrado num módulo de detecção multissensorial de modo a assegurar um nível mais elevado de segurança ao incêndio em edifícios. Para isso foram pesquisados projetos desenvolvidos na área de robótica, com foco em robôs autónomos e aqueles desenvolvidos para detecção e combate a incêndios. Posteriormente, foi realizada a integração de um módulo de sensores a um robô móvel capaz de realizar vistorias no interior de edifícios de forma autónoma ou controlado remotamente por um operador, identificar com um elevado grau de certeza os produtos da combustão e alertar o incêndio.

Em especial, explora-se a utilização do *Robot Operating System* (ROS), principalmente da sua ferramenta *RViz*, para monitoração da rota realizada pelo robô dentro de um determinado ambiente interno, acompanhamento gráfico das medições dos sensores e apresentação do alarme de incêndio.

Os objetivos específicos são:

- Estudar a evolução tecnológica aplicada à detecção de incêndios;
- Integrar um módulo de detecção multissensorial num robô móvel para patrulhamento de espaços internos;
- Analisar a importância dos diferentes sensores para a detecção de diferentes materiais;
- Implementar uma tela gráfica para visualização das informações;
- Realizar experimentos com o módulo de sensores acoplado a um robô móvel, validar a sua eficácia e avaliar os resultados obtidos.

A abordagem utilizada neste trabalho difere da maioria dos trabalhos de busca e salvamento assistidos por robôs. Na maioria dos trabalhos, os robôs são idealizados para atuar após o início de um incêndio, ou seja, não possuem como objetivo central, a vigilância de espaços internos para detecção de fontes de incêndios.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado na seguinte ordem: o capítulo 2 apresenta a evolução histórica das tecnologias de detecção de incêndios com foco em fusão sensorial e robôs móveis. O capítulo 3, apresenta os *softwares* e os materiais utilizados para elaboração de um sistema multissensorial acoplado a um robô móvel. O capítulo 4 descreve a programação implementada, os ambientes de teste, o algoritmo de detecção de incêndio e telas gráficas utilizadas. Em seguida, no capítulo 5, são descritas as experiências realizadas ao longo do projeto e os resultados obtidos. Por fim, o capítulo 6 apresenta tanto as conclusões quanto as sugestões para trabalhos futuros.

2 DETEÇÃO DE INCÊNDIOS

O fogo é um fenômeno quimicamente descrito como uma reação de combustão. A reação de combustão é uma reação química de oxidação, onde o combustível e o comburente são designados como reagentes. Na presença de uma fonte de energia, estes reagentes, nas concentrações adequadas, iniciam o processo de combustão gerando vários produtos e liberando energia. Os produtos da combustão alteram as características do ambiente em que ocorrem. Os detetores de incêndios medem algumas dessas características de modo a detetar variações que possam indicar a ocorrência de um incêndio. Caso as características medidas se tenham alterado devido a outros fenômenos, então poderão ocorrer falsos alarmes. Como as características medidas se propagam no espaço e no tempo, quanto mais longe estiver o detetor das fontes do incêndio, mais tempo será necessário para que seja gerado um alarme.

Os objetivos dos sistemas de detecção de incêndio incluem o uso de um detetor que ofereça um bom desempenho em termos de detecção precoce, gere poucos alarmes falsos e permaneça operacionalmente confiável durante seu ciclo de vida. Uma importante propriedade deste sistema é a detecção de um incêndio na sua fase inicial, antes do *flashover*, figura 2.1.

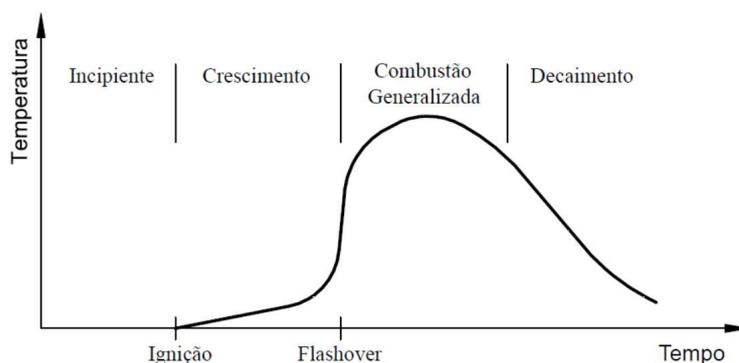


Figura 2.1 – Curva temperatura-tempo de um incêndio real [9]

O tempo de detecção pode ser correlacionado com a distância entre a fonte do incêndio e o detector. Em geral, no início de um incêndio, o fumo aquecido, liberado no processo de combustão, se expande e tende a subir para as partes mais altas do ambiente por ser menos denso que o ar atmosférico. Em espaços fechados, quando o fumo atinge o teto, passa a alastrar-se lateralmente, formando a camada de fumo ou camada quente. Para que um sensor ótico, por exemplo, seja capaz de detectar o fumo, é necessário que o fumo se desloque desde a base do fogo até o interior da câmara ótica. O tempo decorrido entre o instante que o fumo começa a se propagar (t_1) e o momento em que é gerado o alarme (t_3), passando pelo instante que o fumo passa a expandir-se lateralmente (t_2), é tanto maior quanto a distância entre o incêndio e o detector. A figura 2.2 apresenta a importância da variável tempo na detecção de incêndios.

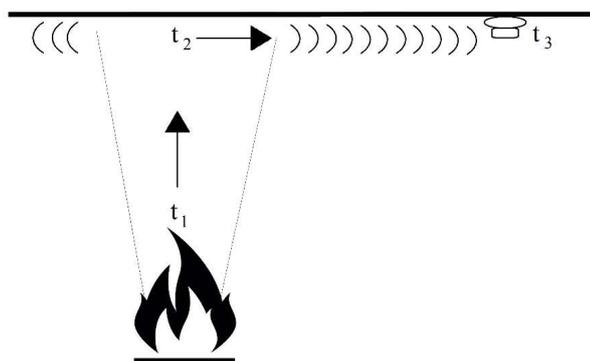


Figura 2.2 – Tempo de detecção. Produzido pela autora.

2.1 CARACTERÍSTICAS DA COMBUSTÃO

As reações de combustão são de oxirredução, pois os combustíveis sofrem oxidação e o comburente sofre redução para a formação dos produtos. Os combustíveis podem ser sólidos (e.g., papel, madeira, carvão), líquidos (e.g., álcool, gasolina, óleo diesel) ou gasosos (e.g., gás hidrogênio, gás propano). O comburente mais comum é o oxigênio (O_2), mas também existem outras substâncias que podem atuar como comburentes num processo de combustão, como: cloreto de sódio ($NaCl$), o clorito de sódio ($NaClO_2$) e o clorato de sódio ($NaClO_3$).

Os produtos das reações de combustão são: calor, chama, gases e fumo:

- Calor

É a energia libertada pela combustão, sendo responsável pela manutenção da reação. É percebido pelo incremento da temperatura no ambiente e atinge valores acima daqueles suportados pelo ser humano. O quadro 2.1 apresenta as temperaturas estimadas de algumas fontes de calor.

Quadro 2.1 – Fontes de calor e temperaturas máximas [10]

Fonte de Calor	Temperatura (°C)
Vela	700 – 1.400
Arco elétrico	4.000
Chama de álcool	1.200 – 1.700
Chama de Fósforo	1.500
Cigarro	300 - 400
Queima de madeira	1.000 – 1.400
Oxiacetileno	2.000 – 3.000

- Chamas

São os gases inflamados visíveis ao redor da superfície do material em combustão. A combustão ocorre sempre com os materiais na fase gasosa. Os sólidos e os líquidos são convertidos para a forma gasosa através do processo de ebulição para os líquidos e decomposição química ou pirólise para os sólidos.

- Gases

São o resultado da modificação da composição do combustível e a sua produção depende da taxa de queima do combustível, do tipo de material e das condições de incêndio relativas à ventilação do local, sendo os mais comuns o vapor de água, o dióxido e o monóxido de carbono.

Alguns materiais sólidos presentes em edifícios urbanos, como a celulose, madeira, algodão, espumas sintéticas e espuma de poliuretano, podem sustentar combustões lentas durante longos períodos [11]. Essas reações possuem temperaturas de decomposição relativamente baixas (~ 400 °C) e os materiais são decompostos em vários fragmentos gerando misturas de gases asfixiantes (e.q., CO e HCN), gases irritantes (e.q., HCl) e matérias particuladas. Alguns dos gases tóxicos mais relevantes são apresentados no quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Gases tóxicos mais relevantes produzidos por diferentes compostos [12]

Gás	Fonte
CO	Maioria dos materiais combustíveis
CO ₂	
CH ₂ =CHCHO	Materiais celulósicos, polietileno, polipropileno, madeira, algodão, papel, poliestireno
HCN	Polímeros contendo nitrogênio, lã, seda
NO ₂	Polímeros contendo nitrogênio, lã, seda, nylons, formaldeído, poliuretanos
HCl	PVC, e materiais com retardantes de chama halogenados
HBr	

Embora os produtos de combustão incluam um grande número de compostos químicos, a maior parte da mistura de gases produzidos pode ser caracterizada por menos de dez espécies. Destes, o monóxido de carbono (CO) representa o tóxico mais comum do fogo [13]. O quadro 2.3 mostra a evolução dos valores de CO, HCN, CO₂ e O₂ num incêndio de uma poltrona de poliestireno com almofadas e capas de poliuretano durante os primeiros seis minutos em um quarto de 39m³ mantido com a porta aberta. Os gases foram medidos na entrada a 2,1m de altura.

Quadro 2.3 – Concentrações médias de gases asfixiantes durante os primeiros seis minutos da queima de uma poltrona numa sala [13]

Tempo (min)	1	2	3	4	5	6
CO (ppm)	0	0	500	2000	3500	6000
HCN (ppm)	0	0	0	75	125	174
CO ₂ (%)	0	0	1,5	3,5	6	8
O ₂ (%)	20,9	20,9	19	17,5	15	12

- Fumo

Fumo corresponde aos produtos não gasosos e deve-se a combustão incompleta dos materiais. Pode ter a cor branca ou cinzenta clara se a mistura tiver níveis altos de comburente ou negra ou cinzenta escura devido a níveis deficientes de comburente à mistura. Além de produzir fumo, o fogo pode incapacitar ou matar, reduzindo os níveis de oxigênio, consumindo o oxigênio ou deslocando-o com outros gases.

Durante a decomposição dos materiais, o fumo também gera aerossóis (partículas com menos de 1,5 μ m de diâmetro médio). Dessa forma, é possível reconhecer o início de um incêndio através da medição e da avaliação de partículas presentes no ar ambiente. As partículas podem ser detectadas a partir da interação com um feixe de luz, como exemplo.

As concentrações dos produtos resultantes da combustão dependem da fase do incêndio, de condições ambientais, da relação combustível e comburente, das características físicas do combustível, dentre outros aspetos. Os incêndios podem ocorrer de diversas formas, desde um incêndio lento que produz grande volume de fumo e monóxido de carbono, mas pouco calor, até incêndios que produzem altas temperaturas, mas com pouco fumo (e.g., álcool). Portanto, a escolha da tecnologia para medição das características do ambiente depende dos materiais combustíveis e das fontes de energia presentes no ambiente que se pretende proteger.

2.2 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS SISTEMAS DE DETECÇÃO

Apesar dos registos históricos apresentarem grandes incêndios desde a antiguidade, foi apenas em meados do século XIX que foi possível o desenvolvimento de detetores de incêndio e alarme automático. Em 1847, Nova York tornou-se a primeira cidade a utilizar um sistema de deteção precoce de incêndio através de uma linha telegráfica. Este meio permitia a ligação por fios elétricos entre pontos de alerta e o quartel de bombeiros [14].

O primeiro sensor automático de incêndio foi projetado por William B. Watkins em 1871. Este dispositivo era constituído por um interruptor térmico bimetálico que podia ser monitorado remotamente. No final dos anos de 1930, o físico suíço Walter Jaeger estava a investigar um sensor iónico para gases tóxicos e, após acender um cigarro em seu laboratório, observou que ocorria a queda na leitura da corrente elétrica quando o fumo proveniente do seu cigarro passava pelo detetor. O experimento de Jaeger foi um dos avanços que abriu o caminho para o desenvolvimento de tecnologias eficazes de deteção de fumo. Anos depois, na década de 1960, com o surgimento dos díodos emissores de luz (LED) e os fotodetetores sólidos (fotodíodos), passou a ser possível a fabricação em larga escala de detetores de fumo óticos. Estes detetores começaram a ser fabricados em grande escala nos Estados Unidos, primeiramente com a sua utilização majoritária em prédios comerciais e posteriormente em espaços residenciais [14].

Até hoje, os sensores maioritariamente instalados nos sistemas de deteção são óticos e térmicos. O detetor ótico de fumo mais comum funciona de acordo com o princípio de dispersão de luz. De modo geral, quando o fumo atinge a câmara ótica, o feixe luminoso, emitido por um diodo ou por um LED, é perturbado, provocando a queda ou o aumento da luz detetada por um fotodetetor. Já o detetor térmico utiliza uma termo-resistência ou uma junção semicondutora para medir a temperatura dos gases junto ao detetor. Existem dois tipos de operação: acionamento do alarme de incêndio quando atingida uma temperatura fixa pré-definida ou *setpoint* (termoestático) e o acionamento do alarme em função da taxa de variação da temperatura (termovelocimétrico).



Figura 2.3 – Detetor térmico Hochiki ABC-EW, detetor ótico Hochiki ALN-EN e detetor com multi-tecnologia Hochiki ACC-EN [15]

Atualmente a segurança contra incêndios em edifícios urbanos conta com sistemas automáticos de detecção de incêndio (SADI) que utilizam detetores de fumos, térmicos, de gases, entre outros. De acordo com o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios de Portugal (RT-SCIE) [16], o SADI é um sistema que identifica uma situação de incêndio e também pode desencadear automaticamente um alarme ou outras ações, nomeadamente o alerta e o comando de dispositivos, sistemas ou equipamentos. Esses sistemas são compostos, em sua versão mais completa, por:

- Centrais e quadros de sinalização e comando

Contêm um processador principal que recebe as informações dos periféricos, as processa e envia sinais ou comandos de acordo com a estrutura do edifício. As centrais mais modernas permitem a programação de acordo com as necessidades reais do local, podendo ser customizadas.

- Botões de alarme

São botões manuais para intervenção humana em adição ou antecipação aos detetores automáticos de incêndio que enviam a informação de alarme de incêndio imediatamente para a central principal de controlo.

- Detetores de incêndio

Dispositivos capazes de medir, registar e comparar automaticamente os produtos da combustão: fumo, calor e chamas e em seguida enviar as informações coletadas para a central principal de controlo. Correspondem à linha de frente do sistema, ou seja, são os primeiros com a capacidade de identificar o fogo e devem fazer isso no menor tempo possível. Dispositivos modernos

podem realizar o processamento de dados no próprio detetor, independente do painel de controlo.

- Sinalizadores de alarme restrito

Dispositivos sonoros ou visuais que são ativados para alarmar o pessoal afetado à segurança de um edifício ou de um estabelecimento.

- Difusores de alarme geral

Dispositivos que, através de comando da central principal de controlo, são ativados e promovem avisos sonoros simples ou com mensagens de voz com o objetivo de alertar e orientar o processo de evacuação dos ocupantes do edifício.

- Telefones para transmissão manual do alerta

Equipamentos telefônicos destinados exclusivamente para contato com entidades de apoio a emergências, como hospitais e corpo de bombeiros.

- Dispositivos de comando de sistemas e equipamentos de segurança

Dispositivos do tipo contatos secos que, a partir de sinais provenientes da central principal de controlo, atuam no fecho de portas, sistemas de ar condicionado, sistemas fixos de extinção, entre outros. São sensores que realizam o monitoramento de diversos pontos do edifício e enviam a informação para o painel principal de controlo. Por exemplo, um sensor de nível de água pode estar instalado no reservatório de água de incêndio e indicar quando o nível estiver abaixo do recomendado.

- Fontes locais de energia de emergência

Grupos geradores ou baterias de acumuladores capazes de assegurar o funcionamento do sistema pelo tempo mínimo exigido, não podendo servir quaisquer outras instalações.

De maneira geral, o SADI deve, para além de identificar o fogo no seu princípio, alertar e orientar a evacuação dos ocupantes, comunicar-se com o corpo de bombeiros, acionar comandos complementares (e.g., desenfumagem, sistemas de extinção) e efetuar a chamada de pessoal responsável. Apesar de não ser comum, além dos dispositivos citados anteriormente, os sistemas de deteção também podem possuir sensores de partículas e químicos para verificação

individual de um parâmetro ou para análise conjunta com outras informações coletadas do ambiente.

Os equipamentos mais avançados utilizam microcontroladores e conversores de sinais analógicos para digitais, permitindo, por exemplo, a identificação de um aumento gradual de fumo em determinado compartimento. Esses equipamentos são capazes de decidir, a partir de limiares de variação pré-estabelecidos, em qual momento deve enviar a informação de alarme de incêndio para o painel de controle principal. Outra funcionalidade destes dispositivos é serem capazes de informar a necessidade de limpeza quando atinge valores altos de obscuridade da câmara ótica. Apesar de não eliminar, essa tecnologia reduz os falsos alarmes e garante maior credibilidade dos ocupantes em relação a um alarme de incêndio.

Apesar da maioria dos detetores de incêndio disponíveis comercialmente utilizar a medição de apenas uma propriedade física resultante do incêndio, alguns dispositivos possuem tecnologia de detecção baseada em múltiplas variáveis. A combinação de mais de uma variável é uma importante ferramenta para aprimoramento da capacidade de detecção do sistema. De acordo com Wald [17], fusão de dados pode ser definida como uma estrutura formal em que são expressos meios e ferramentas para a combinação de dados de diferentes fontes e destina-se a obter informação de maior qualidade, onde a definição exata de "maior qualidade" dependerá da aplicação. A fusão de dados provenientes de sensores é chamada de fusão sensorial. Como exemplo, quando um detetor combina a capacidade de detecção de fumo, através de um sensor ótico e de temperatura com um sensor térmico, este tem a capacidade de só emitir o alarme de incêndio após analisar as informações coletadas pelos dois sensores de modo a reduzir falsos alarmes. Outros dispositivos também podem possuir sensores de gases de forma a melhorar a percepção do ambiente.

A tecnologia de processamento de dados aplicada à detecção de incêndios teve um avanço substancial quando as técnicas de inteligência artificial começaram a ser utilizadas. Esse progresso foi possível com a evolução dos computadores, o aumento na infraestrutura de computação em nuvem e de armazenamento de base de dados. A inteligência artificial aplicada à detecção de incêndios não se resume à combinação simples de detetores tradicionais, mas sim à fusão multissensorial integrada e a algoritmos inteligentes que utilizam dados treinados a partir de diversas bases de dados para concluir sobre a probabilidade de incêndio.

A evolução da rede global de computadores (*internet*) também auxilia e potencia o desempenho dos sistemas de detecção. Atualmente é possível observar remotamente todas as informações do painel de controle em um ambiente específico no edifício ou em qualquer lugar do mundo caso exista um conversor de protocolo do painel para transmissão via TCP/IP. Essa ferramenta é muito útil para o gerenciamento remoto de emergência, pois reduz o tempo de resposta das equipas de combate, fornece informações sobre as condições internas do edifício e reduz os custos de operação.

Atualmente existem também soluções para aplicações específicas, onde o sistema convencional não pode ser instalado ou não é eficaz. No caso dos túneis e estações de metro, é possível a utilização de tecnologia baseada em fibra ótica, onde o sistema é capaz de detetar temperatura, determinar a direção da propagação do incêndio, acionar as comunicações para restringir acessos e orientar a evacuação. Ao contrário dos sensores térmicos pontuais, o sistema distribuído de fibra ótica utiliza toda a extensão da fibra ótica como meio de detecção e a medição da temperatura pode ser feita em qualquer ponto do cabo [18].

2.3 ROBÔS MÓVEIS

Os robôs móveis têm a capacidade de desenvolver as suas atividades em diferentes espaços, podendo esses espaços ser aéreos, aquáticos ou terrestres, conforme a finalidade do robô. De acordo com Kim et al. [19], a robótica pode ser dividida em três gerações, sendo a primeira geração dos robôs industriais ou manipuladores, a segunda dos robôs percetivos e a última dos robôs adaptativos e inteligentes.

Na primeira geração, o Unimate foi o primeiro robô para utilização industrial comercializado na história. O robô, desenvolvido por George Devol, foi instalado em uma linha de montagem da General Motors em Nova Jersey, em 1961. Devol juntou-se com Joseph Engelberger, seu sócio comercial, e fundou a primeira empresa de fabricação de robôs do mundo, a Unimation.

Anos mais tarde, em 1968, foi criado o primeiro robô móvel, conhecido como Shakey e desenvolvido pelo *Stanford Research Institute* (SRI) [20]. Este robô possuía diversos sensores

que o permitiam movimentar-se de um lado para o outro sobre uma superfície plana, enviando sinais de rádio a um computador DEC PDP-10, que por sua vez processava os dados e devolvia o comando para a próxima ação do robô. Dessa forma, o robô era capaz de se mover sem colidir com obstáculos e executar tarefas simples, como empurrar caixas.



Figura 2.4 – Shakey, o primeiro robô móvel [21]

A forma com que o robô móvel realiza os seus movimentos é um aspeto crucial para a eficiente implementação do sistema. Para que o robô móvel possa patrulhar um determinado ambiente é preciso que o mesmo tenha a capacidade percorrer caminhos de forma segura. A definição dos caminhos pode ser feita através de comandos dados por um Operador remoto (tele operação) ou de forma autónoma pelo meio de algoritmos de navegação.

A tele operação é executada normalmente por um Operador que possui informações do ambiente onde o robô está a realizar o patrulhamento. As informações sensoriais e, em muitos casos, imagens de câmaras de vídeo, coletadas pelo robô no ambiente são enviadas ao Operador que analisa os dados e envia comandos de velocidade linear e angular ao robô. A utilização de tele operação tem a vantagem de garantir a segurança do operador já que, nesse modelo, pode-se observar o ambiente enquanto permanece em uma área segura através do uso do controlo remoto [22]. No entanto, existem limitações relativas a comunicação sem fio e à eficácia no controlo simultâneo de mais de um robô.

A navegação autónoma pode ser feita através da definição de um conjunto de pontos de passagem dentro de um mapa pré-definido ou na forma de exploração. Na navegação num ambiente conhecido, o robô, através de sensores de posicionamento e de perceção do ambiente (e.g., sensores ultrassónicos, sensores infravermelhos), consegue perceber os obstáculos e os espaços livres de modo a definir o melhor percurso entre a posição inicial e o ponto definido como destino. A navegação pela exploração do ambiente baseia-se em examinar um ambiente desconhecido e produzir um mapa enquanto define os caminhos a percorrer, simultaneamente. O mapa gerado na primeira excursão no ambiente pode ser usado para navegação subsequente. Neste caso o sistema não possui informações do ambiente até que o robô consiga perceber o ambiente através dos sensores e armazenar os dados para geração de um mapa. A navegação ocorre através da definição de fronteiras e o robô avança de acordo com o reconhecimento dos limites de uma determinada zona.

Em geral a navegação autónoma é uma abordagem mais complexa que a tele operação já que o algoritmo tem de combinar diversas informações sensoriais para tomada de decisão. Entretanto, fatores como geolocalização do robô e correção constante de posicionamento devem ser considerados para que execute as tarefas planeadas com sucesso [23].

Com o desenvolvimento dos microprocessadores, sensores e dispositivos de controlo motriz, foi possível assistir a um forte desenvolvimento da robótica e das capacidades associadas aos robôs. Desde missões complexas de manutenção em indústrias ao auxílio em atividades domésticas, a capacidade de expansão dos robôs é evidente e as aplicações incluem vigilância, patrulhamento, entretenimento, serviços pessoais, limpeza, assistência médica, entre outros.

Um exemplo de aplicação em ambiente doméstico é o robô aibo. O cão robô foi criado em 1999 pela Sony para servir como animal de estimação, interagindo com seu dono e produzindo reações apropriadas para a rotina do cão. Na versão atual, 2.0, aibo tem a capacidade de realizar o patrulhamento de uma casa com base no conceito de "*securitainment*" (segurança e entretenimento). O cão robô é capaz de criar mapas através da técnica de localização e mapeamento simultâneos (SLAM) que consiste na habilidade de construir um mapa de um ambiente ao mesmo tempo em que se geolocaliza. Através de aplicação para *smartphone*, o dono do cão robô pode visualizar os mapas criados, selecionar locais para o aibo patrulhar e atribuir nomes às rotas de patrulha [24], [25].

Dentre as versões comerciais existentes, o robô móvel Roomba, robô de limpeza doméstica, foi o primeiro robô doméstico a ser vendido em larga escala. A iRobot, empresa fundada em 1990 em Massachusetts, declarou que de 2002, ano de lançamento, a 2011, mais de 6 milhões de unidades foram vendidas em todo o mundo. Roomba é equipado com um conjunto de sensores que permitem identificar desníveis e impedir a queda em escadas, mudar de direção quando atinge um obstáculo e detetar pontos extremamente sujos no chão. A sua locomoção é feita por duas rodas motorizadas que podem trabalhar independentemente para avançar e girar em torno de seu próprio eixo para seguir em outra direção [26].

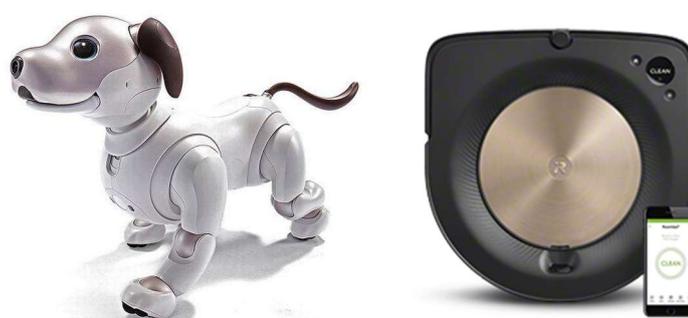


Figura 2.5 – Aibo [25], Roomba s9+ [26]

No caso de aplicações de segurança física em edifícios comerciais e nas indústrias, já existem modelos comerciais de robôs que estão a substituir o patrulhamento humano. Estes podem ser configurados de acordo com a necessidade do cliente, ajustando-se ao mapa do edifício e a política de segurança da empresa. O patrulhamento de espaços internos ou externos em geral é uma tarefa importante nos serviços de segurança em edifícios. Nas rondas, os responsáveis pela segurança, percorrem corredores, salas e ambientes restritos por um determinado intervalo de tempo, com o objetivo de verificar qualquer condição anormal, como uma pessoa não autorizada ou um incêndio. Esta tarefa pode ser cansativa e necessita de extrema atenção aos detalhes, de modo a detetar qualquer situação suspeita e ser capaz de averiguar se corresponde a um evento indesejável. O robô de segurança K5, criado pela Knightscope, uma *startup* da Califórnia, realiza a atividade de patrulhamento na área do Vale do Silício nos EUA. A sua presença física afasta intrusos e seu o custo de exploração é cerca de um quarto do que os donos de *shoppings* normalmente pagam por uma patrulha humana [27]. O benefício de utilizar robôs para execução destas atividades, é que este mantém o mesmo nível de inspeção em todas as rondas e pode criar e enviar registos automáticos com informações dos locais para centrais de

segurança (e.g., imagens, temperatura, análise de gases). Entretanto, existem algumas limitações nessas implementações como a habilidade do robô em abrir portas, ultrapassar obstáculos e ajustar-se a mudanças repentinas no ambiente.

Robôs para atuação em ambientes mais complexos, como plataformas petrolíferas, estão a ser desenvolvidos para ajudar em tarefas específicas. O robô quadrúpede ANYmal, desenvolvido pela ANYbotics, fundada em 2016, foi o primeiro robô autônomo a trabalhar numa plataforma petrolífera do mundo. Em setembro de 2018, o robô realizou tarefas como: a inspeção de níveis de óleo, medições térmicas e níveis de água numa plataforma do mar do norte. Quanto à capacidade de locomoção, o robô pode subir e descer escadas, transpor obstáculos, degraus, saltar vãos e rastejar em espaços estreitos, navegando por ambientes complexos de vários pavimentos [28].



Figura 2.6 – Robô de segurança K5 [29] e Robô ANYmal [28]

Relativamente a equipamentos que atuam em meios aéreos, os veículos aéreos não tripulados (UAVs), conhecidos como drones, geralmente associados a aplicações militares, estão sendo amplamente utilizados também para tarefas civis, incluindo transporte, comunicação, segurança, entretenimento, agricultura e combate a incêndios [30]. Como exemplo, a inspeção de estruturas (e.g., estradas, pontes, túneis e edifícios altos) e de instalações elétricas, permitem a coleta de dados através de câmaras acopladas ao robô para detetar desgastes físicos, otimizando o planeamento das manutenções. No caso das inspeções de linhas de energia, uma das utilidades é a análise de vegetação próxima dos limites das linhas de alta tensão para intervenção das equipas de manutenção, reduzindo o risco de incêndio florestal.

Como pode ser percebido, a evolução aplicada a robótica é crescente, tendo sido, num primeiro momento, utilizada para realizar tarefas repetitivas na indústria e posteriormente aplicada ao setor dos serviços, realizando tarefas cada vez mais exigentes em ambientes cada vez menos estruturados.

2.3.1 ROBÔS DE EMERGÊNCIA

A demanda a respeito de robôs móveis para resposta a desastres naturais ou provocados pelo homem ganharam força na última década. A motivação inclui o fato do local de um desastre ser geralmente muito perigoso para intervenção humana ou por aquele não poder ser alcançado. Em muitos casos, existem dificuldades adicionais, como temperaturas extremas, níveis radioativos, fortes forças do vento que não permitem uma ação rápida dos socorristas humanos [31]. Os projetos existentes nesse âmbito podem ser divididos em três grupos: robôs para detecção de incêndio, robôs para combate a incêndios e robôs para auxílio aos bombeiros e resgate de vítimas. Sendo este último grupo o que possui mais propostas de desenvolvimento com projetos que pretendem, em geral, realizar busca de vítimas em operações de salvamento pós-desastre, comunicar-se com a equipa de bombeiros a respeito das condições internas dos ambientes e combater as fontes de incêndio.

Tendo em conta a perigosidade do ambiente, é fácil perceber a importância do estudo de robôs para atuação em incêndios já deflagrados seja para o combate ou para auxílio das equipas de emergência. Um dos fatores críticos para o combate aos incêndios pelos bombeiros são as altas temperaturas que podem variar de acordo com os materiais que estão a arder, com o armazenamento dos materiais e com a quantidade de oxigênio no ambiente. As temperaturas máximas que os incêndios podem chegar superam muito àquelas suportadas pelo ser humano. Mesmo que sejam utilizadas roupas protetoras, o risco de acidente é sempre elevado. No caso da assistência pós desastre, como exemplo, robôs são utilizados para avaliar as condições de segurança no interior de edifícios antes da entrada dos bombeiros.

O uso de robôs móveis para detecção de incêndio através da busca ativa por fontes indesejadas é interessante no sentido que estes podem patrulhar os ambientes internos e analisar uma área

maior que sensores fixos, aproximando-se de fontes de incêndios. Considerando que os produtos da combustão se propagam no espaço e no tempo, ao inspecionar por completo o ambiente, o robô irá aproximar-se da fonte do incêndio, detetar os produtos da combustão e gerar o alarme num tempo inferior comparado a um sensor fixo. Os robôs móveis podem complementar os sistemas tradicionais e trabalhar de forma simultânea, ou serem acionados para verificar a veracidade de um alarme de incêndio gerado pelo sistema tradicional. Além disso, é mais viável a implementação de um módulo complexo de sensores num equipamento capaz de patrulhar diversos espaços, do que a instalação fixa de diversos módulos de modo a proteger todo um edifício.

Relativamente ao interesse da sociedade no assunto, surgiu em 2003 o “Grande Desafio” lançado pela *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) para estimular a inovação na navegação de veículos terrestres não tripulados. Em 2012 foi lançado o evento *DARPA Robotics Challenge* (DRC) com foco em robôs terrestres, supervisionados por humanos, capazes de executar tarefas complexas em ambientes perigosos. O desafio foi idealizado após o acidente nuclear de Fukushima Daiichi, ocorrido no Japão em 2011, e reuniu alguns dos melhores grupos de pesquisa no campo de robôs humanoides para utilização em cenários de desastres. No desafio final, ocorrido na Califórnia em 2015, a equipa Kaist de Daejeon, República da Coreia, foi a vencedora depois de competir com outros 22 robôs de cinco países diferentes, ganhando o grande prêmio de US \$ 2 milhões. O robô vencedor DRC-Hubo pode locomover-se tanto com pernas (bípede) como sobre rodas. Esta capacidade híbrida de locomoção garantiu que o robô concluísse as oito tarefas do desafio no menor tempo [32], [33].

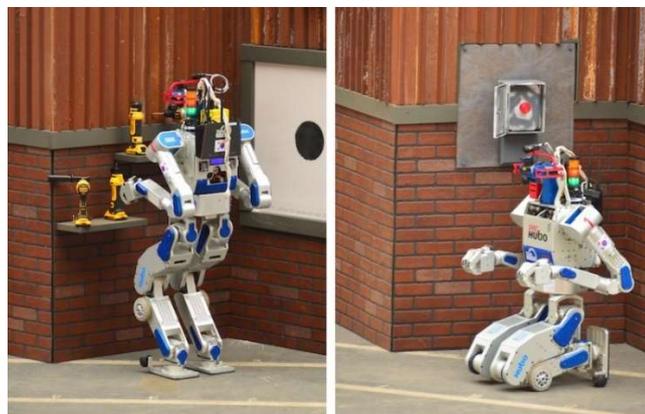


Figura 2.7 – Robô DRC-Hubo [33]

Essencialmente, existe uma variedade de estudos e implementações de robôs móveis que operam em situações perigosas para o ser humano. É de interesse público que os avanços tecnológicos incluam sistemas e equipamentos para reduzir ou minimizar os efeitos causados por incêndios. Isso pode ser notado pelas competições de robótica de combate a incêndios dirigidas a jovens estudantes [34]. Nessas competições, são desenvolvidos pequenos robôs que devem andar por um labirinto ou uma área a simular os cômodos de uma casa, procurar um incêndio, normalmente simulado por uma vela ou por um ponto quente e apagá-lo.

Pesquisas científicas avançam no sentido de combinar robôs, que possuem capacidade de locomoção com sensores dos produtos da combustão para que estes monitorem continuamente as características do ambiente e, quando identificarem uma variação anormal, sejam capazes de rastrear e ir em busca da fonte geradora das variações ambientais de modo a validar se corresponde a um incêndio ou não.

2.3.2 ROBÔS NA SEGURANÇA AO INCÊNDIO

O quadro 2.4 apresenta alguns trabalhos acadêmicos e projetos desenvolvidos na área e, na sequência, é feito um resumo de cada um dos projetos relevantes à presente tese.

Quadro 2.4 – Projetos relacionados

Robô /Autor	Tipo	Operação	Fonte
Chung Cheng I	Robô móvel	Autônomo	[35]
Guardians	Grupo de robôs móveis	Autônomo	[36]
Firerob	Robô móvel	Controlo remoto	[37]
View-Finder	Grupo de robôs móveis	Semi-autônomo	[38]
Kim et al.	Humanóide	Híbrido	[39]
SAFFiR	Humanóide	Autônomo	[40]
AFFMP	Robô móvel	Autônomo	[41]
Martínez-de-Dios et al.	Grupo de robôs móveis	Controlo remoto	[42]

Luo et al. [35] propôs um algoritmo para detecção de incêndio com a utilização de um sensor de fumo, sensor de chama e sensor de temperatura. O módulo contendo os sensores foi montado na parte frontal do robô de segurança Chung Cheng I. Foi também instalada uma câmara para visualização de imagens do ambiente. Durante a experiência realizada, o robô de segurança detectou a fonte de incêndio usando o módulo de sensores, podendo alterar sua orientação para ficar de frente para a fonte de incêndio e transmitir as imagens ao computador de supervisão. Utilizando os seus algoritmos, o robô é capaz de decidir se o evento de incêndio é verdadeiro, ativar o alarme e enviar uma mensagem ao usuário através da Internet e de um telefone celular usando um modem GSM.

O projeto Guardians [36] realizou um estudo com um grupo de robôs autônomos desenvolvidos para aplicação em incêndios de grandes armazéns. Este trabalho, concluído em 2010, teve a participação da Universidade de Coimbra em conjunto com o *South Yorkshire Fire and Rescue* do Reino Unido e teve como objetivo central auxiliar os bombeiros no combate a incêndios dentro de armazéns de grande dimensão e na busca por vítimas, tendo em vista as atividades dos bombeiros serem extremamente perigosas devido à baixa visibilidade por causa do fumo gerado e ao risco de “*backdraft*”. As principais funções dos robôs no projeto são: atuar ao redor do bombeiro no interior do ambiente e enviar instruções de orientação e navegação ao bombeiro, a fim de auxiliar a tomada de decisão. A tecnologia de comunicação aplicada possibilitou a comunicação entre os robôs até uma distância de 30 metros dentro do edifício.



Figura 2.8 – Formação do grupo de robôs [36]

O Firerob [37] teve como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de veículo autônomo de combate a incêndio capaz de combater eficientemente incêndios em ambientes perigosos, particularmente onde o risco de acidentes para humanos é alto, como, por exemplo, instalações nucleares, instalações químicas que fabricam materiais inflamáveis e nocivos e refinarias de petróleo. A depender do local do incêndio e do material a arder, torna-se impossível o acesso dos bombeiros ao local e o combate ao fogo fica restrito às ações externas ao edifício. Neste projeto foi desenvolvida uma proteção multicamadas para proteger o corpo do veículo, suportar explosões violentas e choques. Um revestimento especial foi aplicado para permitir que o aço resistisse a temperaturas de 830°C durante 30 minutos. O controle do veículo foi feito remotamente e possuiu um alcance de 2 km. Um sistema de posicionamento dinâmico, que utiliza algoritmos de GPS, permite que os operadores localizem o veículo com uma precisão de 50cm. O veículo também é equipado com tecnologia de imagem de vídeo para apoiar os operadores. O sistema possui uma câmara de espectro visível e uma câmara de espectro infravermelho. Foi utilizada uma ligação sem fio para transmitir sinais de vídeo para a estação remota.

O projeto View-Finder [38] foi um projeto financiado pela UE que decorreu entre os anos de 2006 e 2009 e analisou a utilização de plataformas de robôs móveis semiautônomas para estabelecer a segurança após incêndios. Os robôs foram desenvolvidos para planejar seu caminho e evitar obstáculos enquanto inspecionam a área. A ideia do projeto era também que os operadores humanos pudessem monitorar os processos dos robôs e enviar solicitações de tarefas por meio de controlos disponíveis na estação base. O projeto focou-se em dois cenários possíveis, dentro e fora de um edifício, com uma plataforma de robô correspondente desenvolvida para cada cenário. O cenário interno usava um robô equipado com dois sensores de distância a laser. Para detetar incêndios, dois tipos de sensores químicos foram usados para identificar baixa concentração e alta concentração de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e gases tóxicos. Outro desafio desse projeto foi garantir que os dados coletados pelos robôs chegassem à estação base com a maior rapidez possível e que pudessem ser facilmente interpretadas.

Kim et al. [39] apresentou um algoritmo desenvolvido para um robô móvel inteligente de combate à incêndios. O algoritmo proposto utiliza uma câmara de infravermelho, um sensor de radiação ultravioleta, um sensor de varrimento a laser (LIDAR) e uma câmara de vídeo para

encontrar um incêndio. Um incêndio em tamanho real foi produzido com gás propano para validação do sistema num ambiente experimental constituído de um corredor e duas salas. O robô, através de fusão sensorial, foi capaz calcular seu caminho em busca do fogo, mover-se em sua direção, evitando obstáculos e, finalmente, encontrar o fogo. Os testes foram realizados no modo autónomo, mas o sistema também permite o controlo remoto do robô pelos bombeiros. Por fim, quando o combustível foi cessado e o fogo acabou, o robô retornou ao seu ponto de partida original.

Um protótipo de robô autónomo de combate a incêndios (SAFFiR) [40], ilustrado na figura 2.9, foi desenvolvido pelo *Office of Naval Research* (ONR) nos EUA em 2015 para localizar e combater incêndios dentro de navios. O robô é do tipo humanoide e foi criado com o objetivo de entrar em locais com passagens estreitas, subir escadas e escotilhas, projetadas para mobilidade humana.

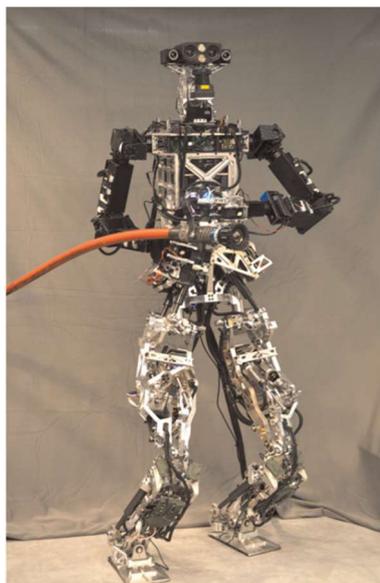


Figura 2.9 – Robô autónomo de combate a incêndios (SAFFiR) [40]

Khoon et al. [41], descreveu um estudo sobre robôs móveis para combate a incêndios, onde é apresentado o desenvolvimento do robô com um equipamento básico de combate e que pode patrulhar um ambiente com o objetivo de detetar precocemente o fogo e combatê-lo em seu início. Todo esse processo foi desenvolvido para ocorrer de forma autónoma, pois as ações são automatizadas usando um microcontrolador que executa um algoritmo de deteção de incêndio,

algoritmo de navegação autônoma, algoritmo de rastreamento de linha e um subsistema de extinção de incêndios. O principal objetivo deste projeto foi implementar uma Plataforma Móvel de Combate a Incêndio Autônoma (*Autonomous Fire Fighting Mobile Platform - AFFMP*) que seja capaz de realizar rondas e monitorar uma área pré-determinada, detetar a ocorrência de incêndio, identificar a localização exata da fonte de calor, extinguir a chama e retomar a sua função de vigia quando o incêndio for extinto. A deteção do incêndio neste robô é feita com um módulo de deteção de chama com saída analógica e conversão de sinal analógico para digital do microcontrolador. Quando os sensores identificam que existe uma fonte de incêndio e a distância é suficiente, o sistema de extinção é ativado. Outro recurso interessante é a utilização de sensores ultrassônicos para perceber obstáculos e evitar colisões.

Além de robôs terrestres, veículos aéreos já são utilizados para atuação no gerenciamento de emergências. Dentre as aplicações de drones para atuação em desastres, o suporte a incidentes de incêndios florestais é a atividade mais desenvolvida entre todos os desastres [43]. Os drones podem atuar no monitoramento, controlo e mitigação de incêndios florestais e oferecem inúmeras vantagens, que incluem visão aérea para coleta de dados e deteção de fogos, operação permanente e a segurança das pessoas que permanecem longe do risco principal [44]. Martínez-de-Dios et al. [42] apresentou a aplicação de um sistema de UAVs em incêndios florestais. As experiências com três tipos diferentes de UAVs foram realizadas na Serra de Gestosa e no aeródromo de Lousã (Portugal). Os experimentos foram realizados com incêndios reais controlados por bombeiros em condições quase operacionais. Além dos sensores necessários para a navegação, como *Differential Global Positioning System* (DGPS), giroscópios, unidades de medição inercial e outros, os UAVs foram equipados com sensores heterogêneos para a percepção do ambiente, como câmaras visuais e infravermelhas e um sensor de incêndio especializado. Quando qualquer um dos UAVs utilizados deteta um incêndio, este georreferencia o alarme e envia a localização georreferenciada do alarme para o Centro de Controlo que então inicia a fase da confirmação do incêndio. Caso o alarme seja confirmado como incêndio, o estágio de confirmação do alarme termina e o estágio de observação do incêndio é iniciado. Os experimentos demonstraram a possibilidade de determinação de parâmetros da evolução do incêndio através da análise de imagens e algoritmos de segmentação de incêndio.

Através dos trabalhos publicados, feiras de robótica e projetos europeus nessa área, é possível perceber que os protótipos dos robôs para auxílio a emergências não evoluíram ainda para um modelo comercial e produção em larga escala com aplicação real em edifícios urbanos. O uso de robôs móveis na detecção e combate de incêndios urbanos possui muitos desafios em vários níveis, como desenvolvimento de sensores, técnicas de processamento de imagens e algoritmos de planeamento de trajetórias.

3 MÉTODOS E MATERIAIS

Este capítulo descreve os métodos e materiais utilizados neste trabalho, assim como um resumo da programação utilizada.

3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

A arquitetura geral do sistema está representada na figura 3.1, onde, no canto inferior esquerdo, estão os sensores, responsáveis pelas atividades de percepção do ambiente, acima está representado o sistema de controlo, que realiza o planeamento das tarefas, sincronização, controlo e monitoramento da execução de todas as atividades do robô, e, no canto inferior direito, os atuadores, relacionados às atividades de execução dos movimentos e ações do robô.

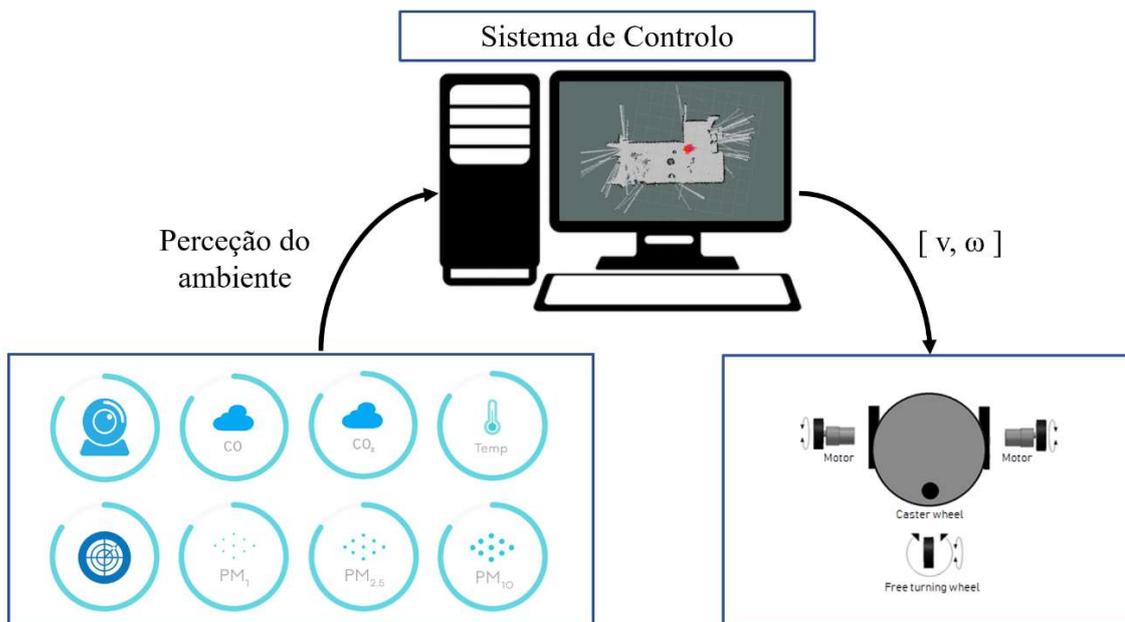


Figura 3.1 – Arquitetura geral do sistema.

Os sensores, indicados na figura no canto inferior esquerdo, correspondem a câmara *webcam*, ao sensor de varrimento a laser e o módulo *spreadNose*, composto por sensores de CO, CO₂, temperatura e medidor de partículas (PM₁, PM_{2,5} e PM₁₀). Os sensores analisam o ambiente envolvente e enviam os dados recolhidos ao sistema de controlo. O sistema de controlo processa os dados recebidos e, de acordo com o planeamento do patrulhamento, envia os comandos de velocidade linear e angular aos atuadores através de rede WiFi. Os atuadores são os motores de corrente contínua responsáveis por mover as rodas do robô.

Neste trabalho o sistema de controlo é composto por um *laptop* acoplado ao robô e um computador remoto. Esta configuração é bastante típica ao usar o sistema robótico ROS já que nele é possível visualizar o mesmo conjunto de informações em diversos computadores interligados por uma rede. Esta funcionalidade é extremamente útil neste trabalho, pois permite que as tarefas que exigem mais processamento, como o visualizador RViz, sejam realizadas no computador remoto e não no computador de bordo do robô.

3.2 ESTRUTURA FÍSICA DO ROBÔ

O mecanismo de acionamento do robô utilizado neste trabalho é uma base de robô móvel (ERA Mobile Robot) fabricada pela Videre Design LLC, figura 3.2. Trata-se de uma base de robô móvel industrial capaz de suportar diversos sensores, incluindo sensores infravermelhos, sonares, *laser rangefinder* (LRFs) e câmaras.



Figura 3.2 – Robô Erratic – ERA MOBI.

As características mais relevantes da base ERA-MOBI são apresentadas a seguir.

- Base com dimensões de 40 cm (L) x 37 cm (C) x 18 cm (A);
- 2 rodas motrizes com 15cm de diâmetro;
- 1 roda castor 6,25 cm diâmetro;
- Velocidade máxima de 2,0 m/s;
- 2 baterias de chumbo (12V, 7Ah).

O robô possui acionamento diferencial que consiste em duas rodas montadas em um eixo comum controlado por dois motores independentes, além de outra roda livre de suporte que garante estabilidade e distribuição de peso do robô. Com esta configuração, altera a sua direção atuando cada uma das rodas motrizes a uma velocidade diferente. No entanto, não será possível considerar que o robô irá subir escadas e nem subir rampas com grandes inclinações, mas apenas deslocar-se por salas e corredores sem inclinações ou grandes ressaltos. O esquema mecânico do robô é apresentado na Figura 3.3.

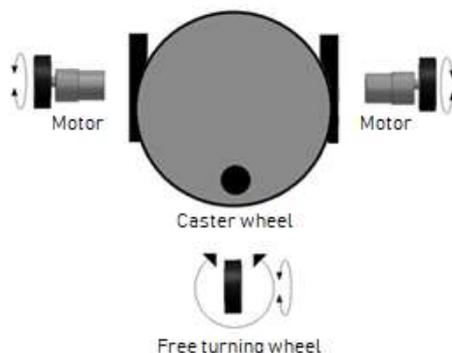


Figura 3.3 – Estrutura do Robô Erratic. Adaptado de [45].

3.3 SENSORES

Para que o robô tenha a capacidade de navegação, através de movimentos autônomos, ou possa ser operado remotamente por um operador, é preciso que este consiga perceber a geometria e

as características do ambiente em que se encontra. Os sensores para percepção da geometria do ambiente utilizados neste trabalho são: sensor de varrimento a laser e câmara de vídeo.

O sensor de varrimento a laser Hokuyo Rapid UBG-04LX-F01 foi integrado à base do robô, através de interface USB. O dispositivo é composto por um emissor de luz e um fotorreceptor. A tecnologia baseia-se na emissão de uma onda de luz e na deteção da onda refletida por uma superfície para cálculo das distâncias entre o sensor e pontos de uma superfície a ser mapeada. Este sensor mede distâncias de 20mm a 5600mm num setor de varredura de área de 240° com resolução angular de 0,36°.



Figura 3.4 – Sensor Hokuyo Rapid UBG-04LX-F01 [46]

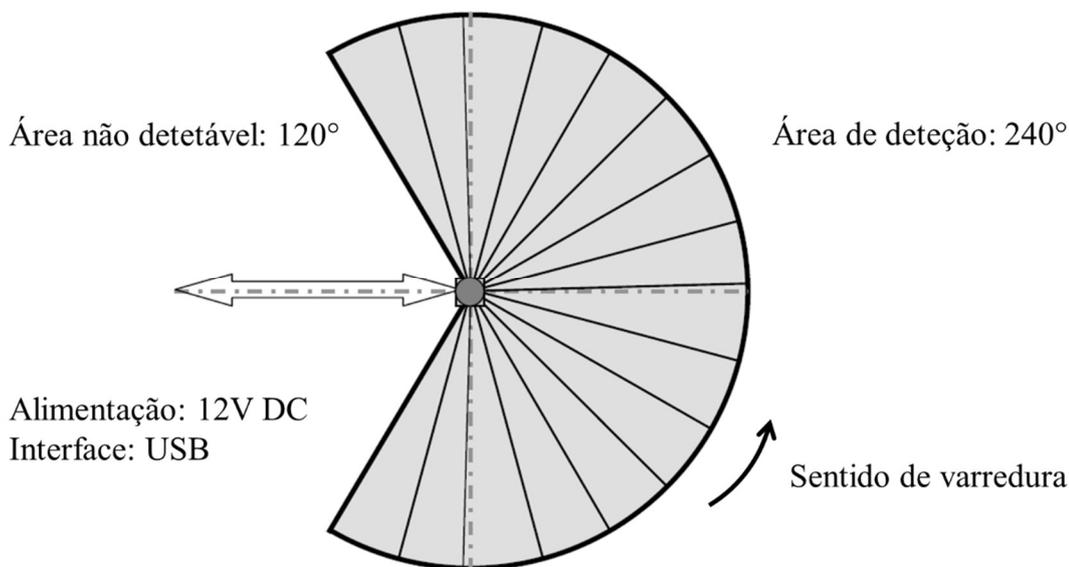


Figura 3.5 – Área de deteção do sensor Hokuyo. Adaptado de [47].

Uma câmara Philips modelo SPZ5000, do tipo *webcam*, com resolução de vídeo de 1,3 megapixel e ângulo de visão de 80° foi incluída no sistema, através de conexão USB, para que fosse possível a visualização do ambiente à frente do robô durante o patrulhamento, figura 3.6.



Figura 3.6 – Câmara Philips [48] e imagem

3.3.1 SISTEMA DE DETEÇÃO DE INCÊNDIO

O sistema de medição utilizado é composto por sensores capazes de detectar compostos químicos presentes nos gases da combustão e, também, fatores ambientais, nomeadamente CO, CO₂, material particulado e temperatura. A utilização dos sensores tem como objetivo identificar seu potencial para deteção de produtos da combustão que possam surgir nas fases iniciais do desenvolvimento do fogo.

Para o uso dos sensores, foi reutilizada uma placa eletrônica anteriormente desenvolvida para o projeto chamado *SpreadNose* [49], sendo necessária a adaptação do módulo de sensores ao robô. Os dados provenientes dos sensores são transferidos para o *laptop* instalado no robô através de uma porta USB, armazenados e analisados para decisão em tempo real do alarme de incêndio, conforme ilustrado na figura 3.7.

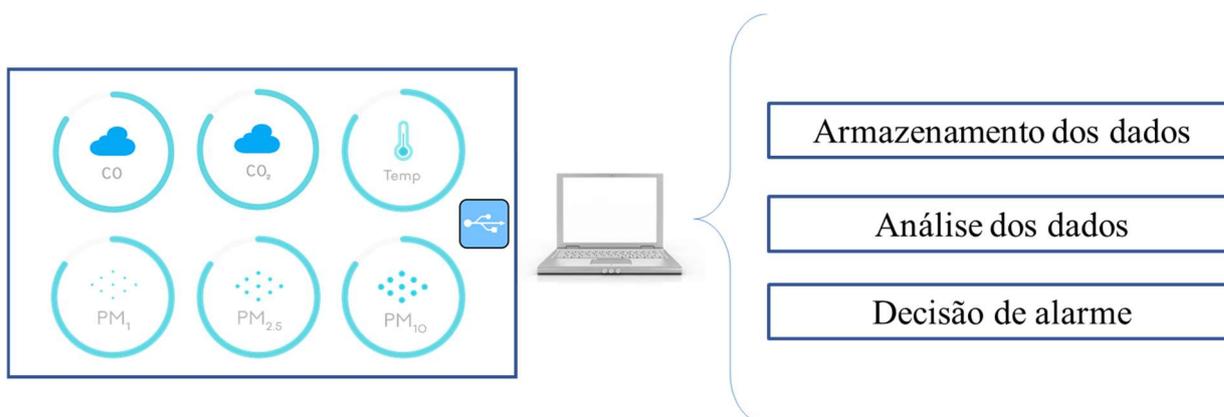


Figura 3.7 – Arquitetura do sistema de medição.

O módulo ao ser iniciado necessita de 30 segundos para aquecimento de alguns sensores até estar pronto para ser utilizado. Durante este período é apresentado o texto “Warming up” e quando o aquecimento é concluído é enviado o texto “Done”. As mensagens com os dados dos sensores é inicializada com o texto ”DATA;” seguido dos valores dos sensores intercalados com “;”. A frequência de envio das mensagens é de 2 segundos. A figura 3.8 apresenta um exemplo do formato de mensagem.

```

Warming up;
Done;
DATA;18905;495;49746;795;2;6;6;2670;3011;
DATA;21684;779;46347;708;2;6;6;2670;3009;
DATA;21684;779;46097;690;3;5;5;2667;3010;
DATA;21511;779;46662;692;3;6;6;2671;3006;
DATA;21858;779;46725;694;3;6;6;2669;3006;
DATA;19704;779;49746;769;3;6;6;2672;3004;
DATA;21476;1204;47433;715;3;6;6;2670;3006;
DATA;21858;1204;46853;695;3;6;6;2669;3004;
DATA;21719;1204;47045;695;3;6;6;2669;3003;
DATA;21858;1204;47174;699;3;6;6;2669;3004;
DATA;20030;1204;50174;775;3;5;5;2669;3002;
DATA;21373;1384;47696;720;3;5;5;2668;3002;
DATA;21754;1384;47110;699;3;5;5;2669;3003;

```

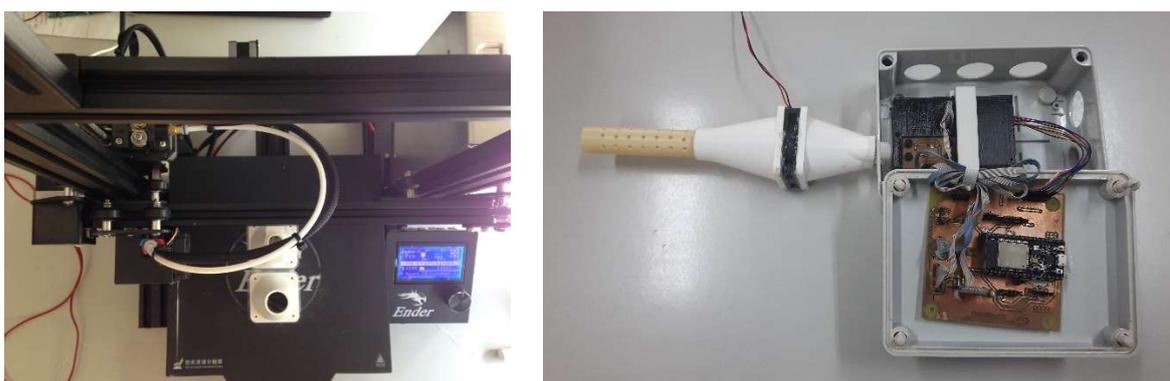
Figura 3.8 – Formato das mensagens

Relativamente aos modelos de sensores utilizados no módulo *spreadNose* e suas respectivas características, as mesmas são apresentadas no quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Informações técnicas dos sensores

Indicador	Sensor	Amplitude	Tecnologia
CO	Sensortech MiCS 4514	1 - 1000ppm	Semicondutor de Óxido Metálico
CO ₂	Amphenol Telaire T6713	0 - 5000ppm	Infravermelho não dispersivo
PM ₁	Plantower PMS5003	0.3 - 1.0µm	Dispersão de luz
PM _{2.5}		1.0 - 2.5µm	Dispersão de luz
PM ₁₀		2.5 - 10µm	Dispersão de luz
Temperatura	Sensirion SHTC3	-40 - 125°C	Semicondutor de banda larga

No decorrer dos ensaios preliminares, observou-se que o sistema de medição se tornava mais eficiente quando adicionada uma ventoinha, montada em uma estrutura com a forma de funil e um tubo como furos para a entrada do ar, à entrada da caixa do sensor Plantower PMS5003. A estrutura adicionada ao módulo *spreadNose* foi produzida durante o estudo elaborado para a Quarta Conferência Ibérica de Robótica [50]. A estrutura do sistema de medição é apresentada na figura 3.9.

Figura 3.9 – Impressão em 3D da estrutura de funil e módulo de sensores *spreadNose*

3.4 ROBOT OPERATING SYSTEM

O sistema escolhido para programação do robô e realização dos ensaios é um sistema de código aberto chamado *Robot Operating System* (ROS). Este sistema operacional é um *software* que suporta o desenvolvimento de sistemas complexos, porém modulares, em um ambiente de computação distribuído. ROS é composto por uma coleção de ferramentas, bibliotecas e convenções que visam simplificar o desenvolvimento de projetos complexos em uma ampla variedade de plataformas robóticas [51]. De forma reduzida é possível dizer que ROS é conjunto de drivers que permite ler dados de sensores e enviar comandos para atuadores. Uma das suas vantagens é a grande quantidade de algoritmos já desenvolvidos e disponibilizados na net para manipulação de dados e conexão de vários componentes de um sistema robótico.

O ROS possui uma arquitetura modular, sendo possível processar diversos códigos simultaneamente, de acordo com a necessidade do projeto. Esses códigos, chamados de ‘nós’ ou ‘*nodes*’, realizam o processamento e disponibilizam os resultados usando um fluxo de dados baseado em tópicos sobre os quais os ‘nós’ trocam mensagens. As mensagens, quando disponibilizadas no sistema, ficam acessíveis para que qualquer outro ‘nó’ as possa utilizar. Este recurso é especialmente importante neste trabalho, pois se trata de um projeto que utiliza dois computadores, um robô autônomo e sensores, onde o tráfego de mensagens através do sistema é essencial para integração dos seus componentes.

Para exemplificar esta arquitetura de *software*, é possível citar o processo de visualização das medições dos sensores através da ferramenta de visualização 3D do ROS chamada RViz, realizada neste trabalho. Para que as informações coletadas pelos sensores sejam inseridas no ROS foi necessária a criação de um ‘nó’ para leitura e armazenamento dos dados. Esse ‘nó’, chamado de *Sensory Fusion Node*, depois de coletar os dados, publica os valores, já tratados, dentro do sistema através de tópicos contendo as mensagens. Em seguida, um outro ‘nó’ do sistema, *Marker Display Node*, subscreve essas mensagens, as transforma em dados de visualização e as publica para que o ‘nó’ RViz possa representá-las graficamente, figura 3.10.

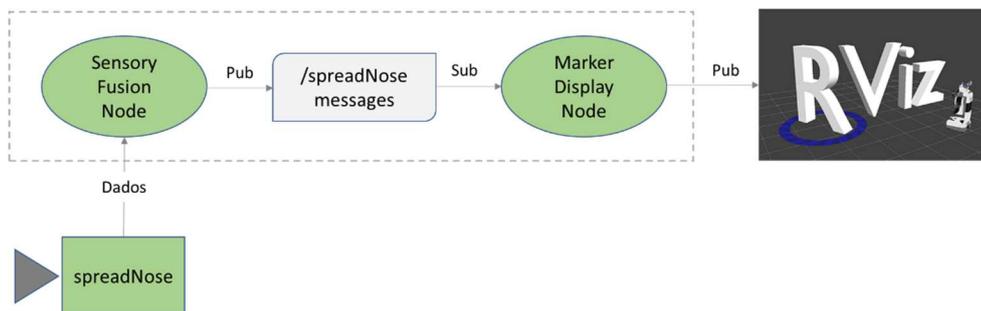


Figura 3.10 – Exemplo de comunicação entre nós

O sistema ROS deve ser executado num computador com o sistema operativo Ubuntu Linux. O quadro 3.2 apresenta as especificações de versão mais relevantes dos softwares utilizados.

Quadro 3.2 – Especificação de versão das ferramentas de software relevantes

Computador	Ferramenta de Software	Especificação
Computador de Supervisão	Sistema Operacional	Ubuntu 16.04
	ROS	Kinetic
	RViz	1.12.17
Computador de interface com o Robô	Sistema Operacional	Ubuntu 12.04
	ROS	Groovy

4 IMPLEMENTAÇÃO

Este capítulo apresenta a implementação da programação desenvolvida para controlo do robô e para tratamento das informações dos sensores com o objetivo de preparar o sistema para os testes experimentais.

4.1 DESCRIÇÃO DA PROGRAMAÇÃO

A programação utilizada pode ser dividida em dois grupos: locomoção e deteção do incêndio. O primeiro grupo dedica-se a registar e processar as informações da câmara, da odometria, do laser, de geolocalização, dos comandos de deslocamento, velocidade e aceleração do robô. Para aplicação deste primeiro grupo foram utilizados ficheiros disponibilizados na net pela comunidade ligada ao ROS, sendo necessário apenas o ajuste de algumas configurações para adequação ao modelo utilizado. O segundo grupo refere-se à recolha dos dados do *spreadNose*, ao processamento e a representação gráfica através de textos, formas geométricas e cores. Para este último grupo, os códigos foram desenvolvidos e testados antes dos ensaios demonstrativos. A linguagem de programação escolhida para desenvolvimento da programação foi Python visto que os códigos já existentes para controlo da base do robô foram elaborados nesta linguagem. O quadro 4.1 apresenta todos códigos ou ‘nós’ utilizados neste trabalho.

Quadro 4.1 – ‘Nós’ do Sistema

Grupo	Nó	Detalhe
Deteção do incêndio	sensory_fusion	Armazenamento de dados dos sensores e execução do algoritmo
	marker_display	Conversão de dados em representações gráficas

Quadro 4.1 – ‘Nós’ do Sistema (cont.)

Grupo	Nó	Detalhe
Locomoção	erratic_base_driver	Locomoção do robô (odometria)
	joint_state_publisher	Junções do robô
	robot_state_publisher	Estado do robô (transformadas)
	hokuyo	Sensor de varrimento a laser
	câmara	Imagens do ambiente
	amcl	Localização do robô
	move_base	Deslocamento autónomo do robô
	joy_node	Controlo remoto (joystick)
	map_server	Configurações do mapa

Relativamente às mensagens dos dados dos sensores, foram criados dois tipos específicos para publicação das informações dos gases (CO e CO₂) e para publicação de materiais particulados (PM₁, PM_{2,5} e PM₁₀). Para publicação das mensagens de temperatura foi utilizado o tipo de mensagem padrão chamada `sensor_msgs/Temperature`, assim como também foram utilizadas mensagens padrões do ROS para publicação das informações para visualização no RViz. No quadro abaixo são apresentados os tópicos, tipos de mensagens e descrições das informações relativas ao módulo *spreadNose*.

Quadro 4.2 – Tópicos e Mensagens do módulo de sensores

Tópico	Tipo de Mensagem	Descrição
/spreadNose/co	teleop_bot_ws/gas	Recebe e armazena o valor de CO e CO ₂ .
/spreadNose/co2		

Quadro 4.2 – Tópicos e Mensagens do módulo de sensores (cont.)

Tópico	Tipo de Mensagem	Descrição
/spreadNose/PM1	teleop_bot_ws/particle	Recebe e armazena o valor de PM ₁ , PM _{2,5} e PM ₁₀ .
/spreadNose/PM25		
/spreadNose/PM10		
/spreadNose/temp	sensor_msgs/Temperature	Recebe e armazena o valor de temperatura.
/spreadNose/senfusion	teleop_bot_ws/gas	Após execução do algoritmo, armazena a informação do alarme de incêndio.

4.2 DEFINIÇÃO DOS AMBIENTES DE TESTE

Os ambientes de teste utilizados neste trabalho localizam-se no piso 1 do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra.

- Ambiente 1 - Corredores do piso 1.

Um mapa pré-definido de parte do piso 1, previamente elaborado no trabalho de Cabrita et al. [52], foi utilizado para realização dos testes de patrulhamento do robô, figura 4.1. O mapa foi alinhado com o ambiente ao nível do chão e, através da determinação da posição do robô no ROS, foi possível inserir pontos no mapa para controlo do patrulhamento. O objetivo de inserir um mapa já criado anteriormente é exemplificar a possibilidade de geração dos mapas em um *software* de desenho técnico e posterior conversão em uma imagem gráfica em escala de cinza (PGM). A ideia é que numa versão comercial seja possível inserir os mapas dos pavimentos com os pontos críticos para definição da rota do robô sem a necessidade de prévio mapeamento dos espaços. Neste ambiente foram realizados testes de navegação do robô pelos corredores.

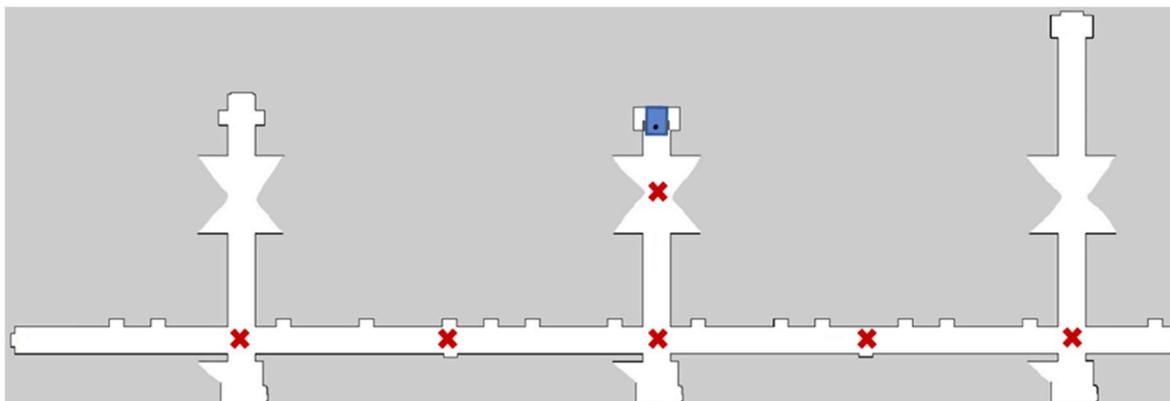


Figura 4.1 – Mapa do piso 1 do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores com pontos de passagem (X)

- Ambiente 2: Laboratório de Sistema Embebidos.

O Laboratório de Sistemas Embebidos foi o ambiente de teste do sistema de detecção de incêndio. Para geração do mapa do laboratório, foi utilizada uma programação já desenvolvida no ROS chamada *gmapping*. Este código consiste na identificação dos espaços através das informações geradas pelo sensor de varrimento a laser e na localização do robô através da odometria. O robô foi tele operado durante o mapeamento do laboratório para posterior processamento do mapa do ambiente. Na figura 4.2 é apresentado, à esquerda, o mapa gerado e, à direita, a sua representação no RViz num dos testes preliminares.

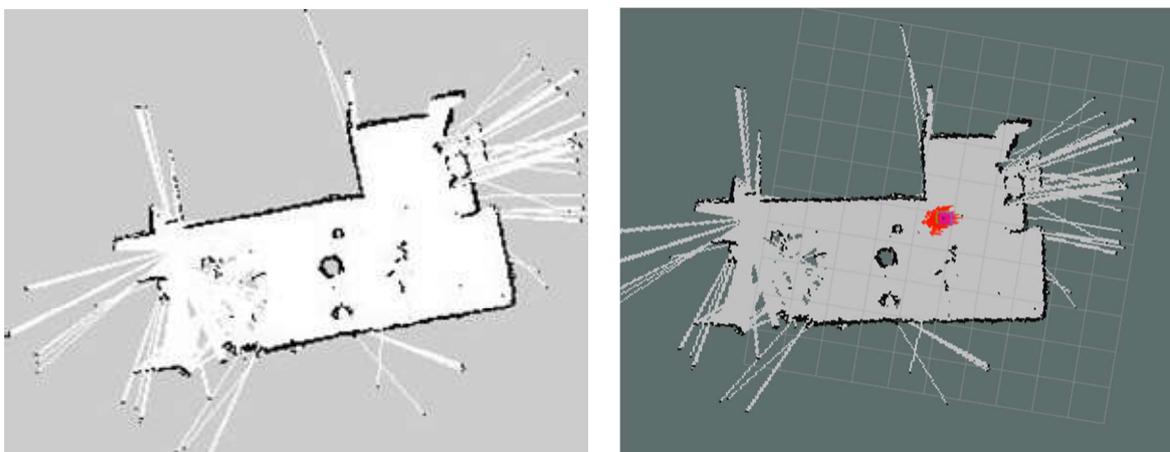


Figura 4.2 – Mapa gerado pelo Robô do Laboratório de Sistemas Embebidos e sua representação no RViz

4.3 FUSÃO SENSORIAL PARA DETEÇÃO DO INCÊNDIO

Foi desenvolvido um algoritmo para analisar continuamente os dados recolhidos pelos sensores a partir de parâmetros pré-definidos e decidir sobre o alarme de incêndio. A informação recolhida pode ser visualizada através do sistema de monitoramento remoto RViz.

A fusão sensorial foi idealizada para verificar as variações medidas pelos sensores de CO, CO₂, PM₁, PM_{2,5} e PM₁₀, pois, dentre os sensores disponíveis no módulo *spreadNose*, estes tiveram melhor resposta nos testes preliminares quanto a identificação de focos de incêndios. Os valores recolhidos pelos sensores neste trabalho serão tratados como adimensionais, pois não foi possível garantir a calibração dos sensores. Por esta razão, não foram considerados valores fixos para definição do alarme de incêndio.

O algoritmo desenvolvido analisa os valores recolhidos do ambiente e os define como “normais” (estado 0) ou “críticos” (estado 1) de acordo com a diferença entre o valor atual e um valor recolhido anteriormente. Os valores foram definidos com base na observação das medições preliminares. De maneira geral, o sistema considera que uma medição é “crítica” quando:

- 1) A diferença entre dois valores medidos, durante o patrulhamento, no intervalo de 10 segundos, for maior que a variação (Δ) definida para aquela medida;

A condição crítica para o caso (1) ocorrerá quando a diferença entre os valores coletados num intervalo de 10 segundos for superior aqueles definidos no quadro 4.3. A variação (Δ) corresponde a diferença dos valores coletados no instante (t) em comparação com os registados 10 segundos antes (t-10s).

Quadro 4.3 –Valores da condição 1

Grandeza	Δ 10 segundos
CO	> 5
CO ₂	> 10
PM ₁	> 20
PM _{2,5}	> 40
PM ₁₀	> 50

- 2) A diferença entre o valor médio medido em condições normais e o valor medido durante o patrulhamento, for maior que a variação (Δ) definida para aquela medida.

O caso (2) trata da condição crítica quando a diferença entre um valor atual medido e o valor médio definido nas condições normais do ambiente for maior do que o estabelecido no quadro 4.4.

Quadro 4.4 –Valores da condição 2

Grandeza	Δ
CO	> 25%
CO ₂	> 10%
PM ₁	> 150%
PM _{2,5}	> 200%
PM ₁₀	> 200%

Para melhor visualização do caso 2, na figura 4.3 é apresentado um exemplo genérico onde o valor base, definido a partir da medição das condições normais do ambiente é apresentado em verde, e a curva pontilhada em vermelho corresponde as medições no decorrer do tempo. A partir da referência do valor base, quando os valores coletados no ambiente atingem um patamar maior x% que o valor base, este é definido como crítico.

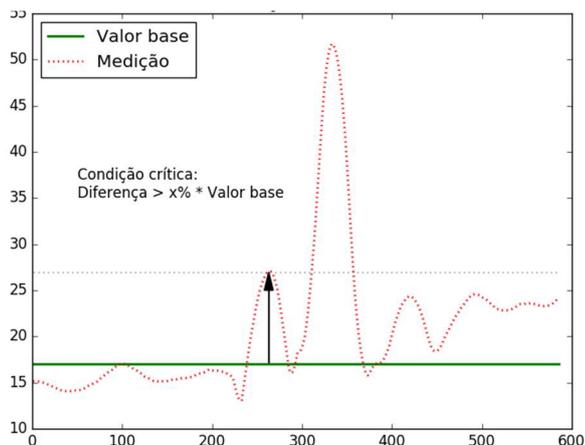


Figura 4.3 – Condição crítica 2

Ao iniciar o sistema, o estado de todas as grandezas é ‘0’. O módulo multissensorial começa então a recolher as medidas e, caso uma das duas condições críticas seja verdadeira, o estado daquela grandeza é alterado de ‘0’ para ‘1’ numa matriz 1x5. O sistema então continua a coletar e processar os dados e caso todos os estados sejam alterados para ‘1’, é sinalizado o ‘Alarme de Incêndio’, conforme ilustra a figura 4.4.

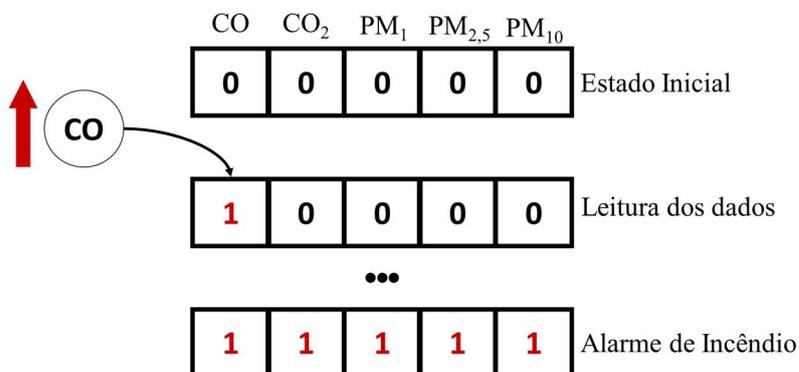


Figura 4.4 – Definição de Alarme de Incêndio

O fluxo de decisão do alarme de incêndio é apresentado na figura 4.5.

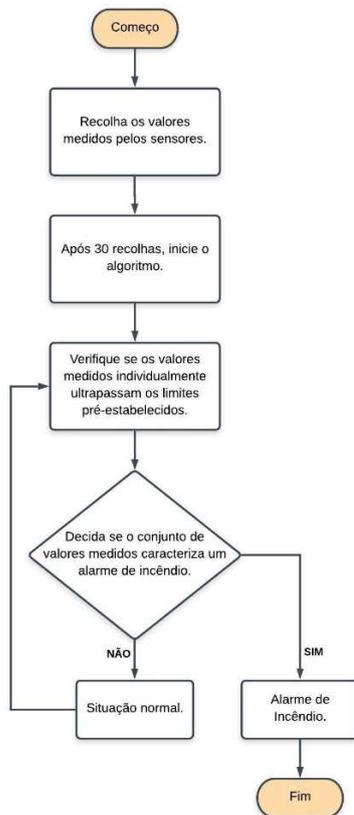


Figura 4.5 – Fluxo de decisão do alarme de incêndio

4.4 AMBIENTE DE TELE OPERAÇÃO

O ambiente de tele operação foi idealizado de modo que seja possível observar remotamente o robô durante o patrulhamento de espaços internos de um edifício. Através da tela gráfica é possível observar informações dos sensores, da câmera de vídeo, do laser de localização (LRF – laser range finder) e o indicador de alarme de incêndio a um Operador.

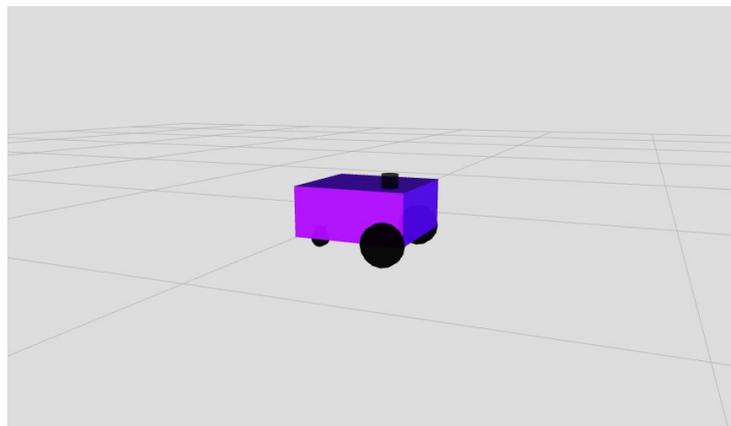


Figura 4.6 – Representação gráfica do robô

As informações do módulo de sensores são apresentadas na forma de texto a esquerda do mapa do piso, figura 4.7, onde podem ser acompanhados os valores medidos em tempo real.

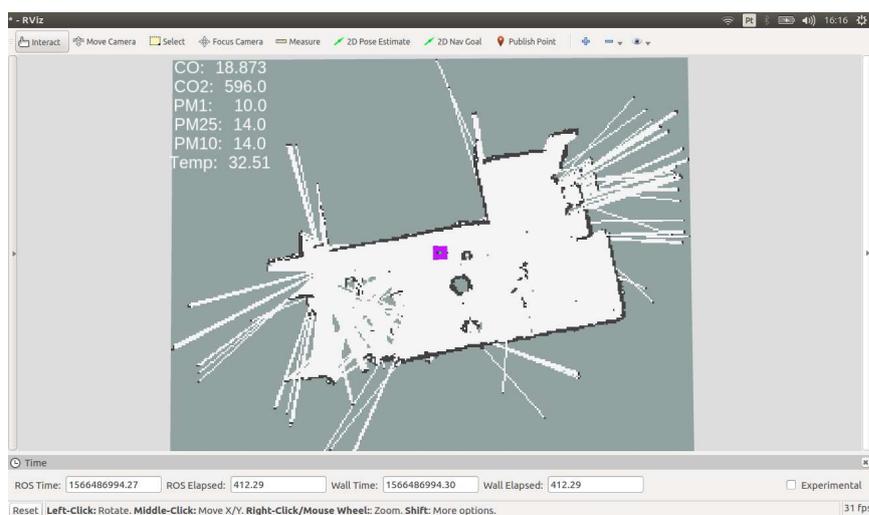


Figura 4.7 – Representação gráfica das medições dos sensores

O laser pode ser observado através da sua representação no mapa. Por ser a leitura dos obstáculos, sua representação é dinâmica de acordo com os movimentos do robô, figura 4.8.

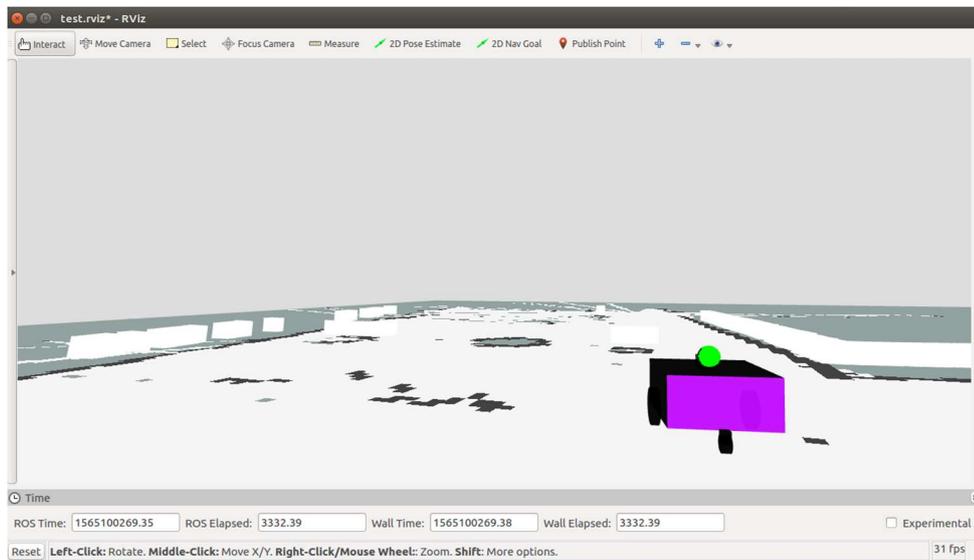


Figura 4.8 – Representação gráfica do laser

Foi configurada também uma esfera em cima do robô para representar o Alarme de Incêndio. A esfera fica na cor verde quando nenhuma grandeza teve seu estado alterado para '1', a cor se altera para amarelo quando uma ou mais grandeza foi alterada e, por fim, fica na cor vermelha quando todas as grandezas são alteradas e é ativado o Alarme de Incêndio, figura 4.9.

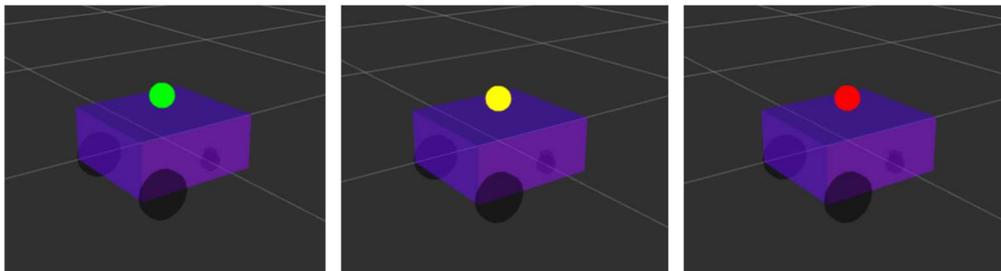


Figura 4.9 – Representação gráfica do Alarme de Incêndio

5 ENSAIOS DEMONSTRATIVOS

Os cenários dos ensaios experimentais deste trabalho representam fontes de incêndios características em edifícios comerciais e tem como objetivo avaliar a eficácia na identificação de compostos gasosos e materiais particulados através do módulo de sensores *spreadNose*.

5.1 APLICAÇÃO

O robô equipado com o computador de interface, o sensor de varrimento a laser e o módulo de sensores, através de controlo remoto, realizou a tarefa de patrulhamento no Laboratório de Sistemas Embebidos a partir da porta de entrada até o final da sala. O mapa do laboratório e a rota realizada pelo robô são ilustrados na figura 5.1.

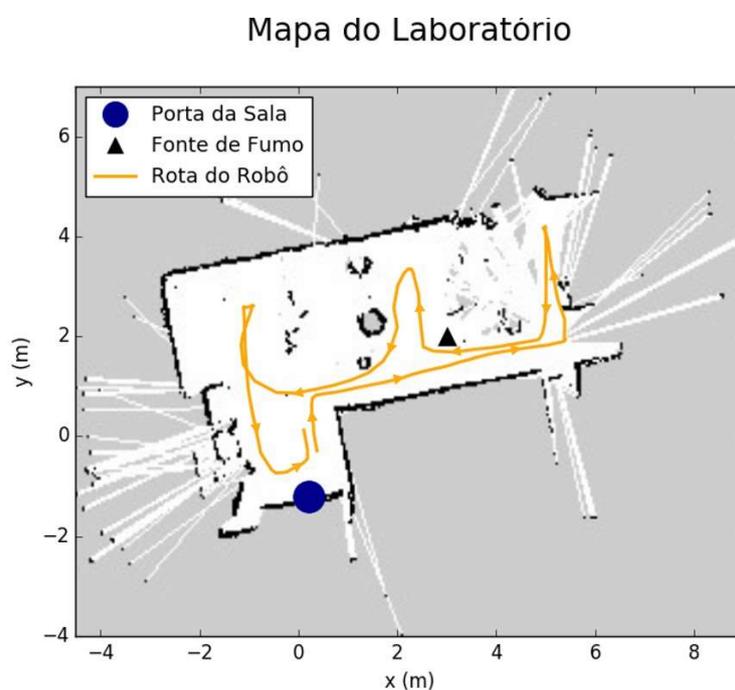


Figura 5.1 – Mapa com o padrão de ronda

Os materiais combustíveis escolhidos para os ensaios foram papel cartão e fio elétrico. Os ensaios com fumo proveniente da combustão dos materiais foram realizados apenas com os materiais a gerar fumo, sem a presença de chamas, tendo em vista o objetivo do trabalho ser a identificação do incêndio ainda na sua fase inicial, garantindo a segurança das pessoas e dos equipamentos durante os experimentos.

Os ensaios ocorreram nos dias 08 e 10 de julho e dia 06 de agosto de 2019. Em cada um dos dias de ensaio, o robô realizou patrulhamento em condições normais e com fumo proveniente de papel cartão e fumo proveniente de fio elétrico. Em cada patrulhamento o robô percorreu o percurso apresentado na figura 5.1 três vezes consecutivas com uma velocidade aproximada de 0,1 m/s e teve duração média de 10 minutos.

Com o intuito de verificar o tempo de resposta de um sistema de deteção tradicional durante os ensaios, foi configurado o sistema automático de deteção de incêndio da GE Security, painel 2X-F1 com laço de deteção composto por dois detetores óticos pontuais modelo DP2061N (Aritech), numerados como 1001 e 1002 (laço 1 - TESTE ROBO), figura 5.2. Sendo um detetor instalado numa altura de 2,30 metros e outro posicionado numa altura de 1 metro.



Figura 5.2 – A esquerda está o Painel GE 2X-F1 e a direita o visor do Painel a apresentar os dispositivos configurados

A queima dos materiais foi realizada a 10 cm do chão dentro de um recipiente de alumínio num ponto exatamente em baixo do detetor ótico número 2. A disposição dos elementos é apresentada na figura 5.3.

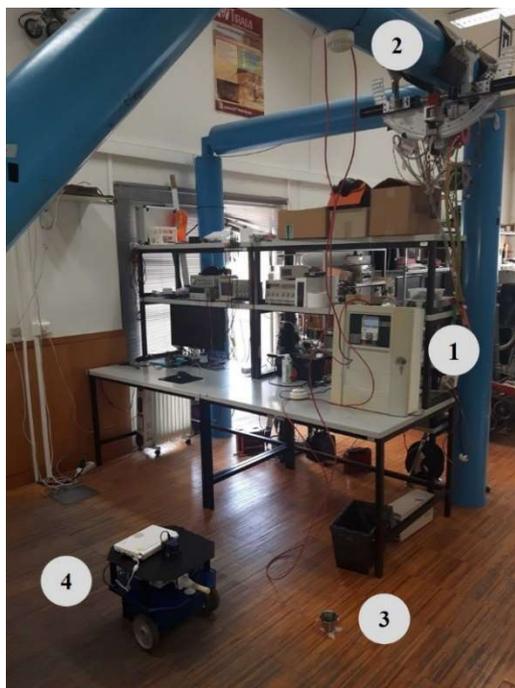


Figura 5.3 – Painel do SADI (1), Detetor ótico (2), Fonte de fumo (3), Robô (4)

Após a montagem do sistema e definição dos cenários, a tarefa seguinte foi medir as condições normais da sala e registar os dados para comparação com os valores a serem adquiridos durante os testes com fumo. Através da observação dos valores recolhidos nos testes, foi definido que as 30 primeiras medições deveriam ser descartadas, pois neste período os sensores ainda estão a ajustar-se às condições ambientais.

Nos ensaios com papel cartão, a fonte de energia foi um isqueiro e a combustão foi controlada visualmente para que o material combustível permanecesse apenas em brasa durante o ensaio, sem gerar chamas. Nos ensaios com fio elétrico, uma fonte de alimentação ajustável foi usada para fornecer corrente elétrica nas extremidades de um fio elétrico de cobre 21 awg. A corrente elétrica foi controlada de modo a aquecer o fio ao ponto de libertar fumo. Quando se observava um aquecimento demasiado, a corrente era reduzida de modo a não produzir chamas. A corrente

aplicada pela fonte de alimentação ajustável variou entre 9 A, corrente máxima suportada pelo fio elétrico, e 15 A.

5.2 RESULTADOS

Os ensaios foram monitorados através da tela gráfica desenvolvida e foi possível verificar o comportamento do robô relativamente a sua locomoção, posicionamento e medições do módulo multissensorial. As informações fornecidas pelo laser e os dados de odometria retroalimentaram o sistema e atualizaram o posicionamento do robô, fazendo com que os erros de posicionamento fossem corrigidos ao longo da sua trajetória. Durante todo o percurso, o robô esteve a monitorar o ambiente através do módulo de sensores e a armazenar os dados para análise posterior.

Primeiramente foram observados os valores recolhidos em condições normais, quando o ambiente não estava exposto ao fumo, nos 3 dias de ensaio. Foi possível perceber que as diferenças são grandes a depender do dia e do horário em que os dados são recolhidos. Por exemplo, no caso da medição de partículas, os valores coletados no terceiro dia são bastante inferiores aos coletados nos dois primeiros ensaios. Já o valor de CO no segundo dia supera em mais de 50% os valores médios do primeiro e terceiro dia. Os valores de CO₂ também tiveram variações consideráveis a depender do dia. Essas variações podem ser justificadas, por exemplo, pela presença ou não de pessoas no ambiente durante os ensaios.

A partir da análise dos valores em condições normais, foi definido que as concentrações dos produtos da combustão deveriam ser estudadas com base nas medições do próprio dia em que foram adquiridas, ou seja, não seria possível comparar os dados do ambiente com interferência de fumo do segundo dia com os dados do primeiro ou terceiro dia. No quadro 5.1 são apresentados os valores médios recolhidos nos três dias de ensaios.

Quadro 5.1 – Concentrações médias

Grandeza	Dia 1	Dia 2	Dia 3
CO (ppm)	18,65	29,24	19,04
CO ₂ (ppm)	439,97	484,48	471,03
PM ₁ (µg/m ³)	14,46	13,67	5,20
PM _{2,5} (µg/m ³)	19,18	16,67	6,17
PM ₁₀ (µg/m ³)	19,58	16,90	6,28

Em seguida foram gerados gráficos com as concentrações das grandezas em função do tempo para observação geral das medições e comparação entre as medições em condições normais e com fumo. Para melhor representação das curvas foi utilizado o filtro digital de Savitzky-Golay. Este filtro consiste em um algoritmo de filtragem e suavização de dados e pode ser pensado como uma generalização de um filtro de média móvel. O filtro Savitzky-Golay foi configurado com um comprimento de janela igual a 31 e um polinômio de terceira ordem para ajuste das amostras. A utilização deste filtro no trabalho teve como objetivo suavizar os dados coletados pelos sensores, sem distorcer a tendência das medições.

Como exemplo são apresentados os gráficos das medições do Dia 1 onde é possível observar que as curvas dos ensaios com fumo têm um crescimento gradual ao longo do tempo, enquanto as curvas dos ensaios em condições normais são decrescentes ou não possuem crescimentos significativos. As curvas na cor verde representam as medições em condições normais, na cor amarela as medições com influência de fumo proveniente de papel cartão e na cor vermelha aquelas provenientes de fio elétrico. Os valores de temperatura não apresentaram variações significativas durante os ensaios.

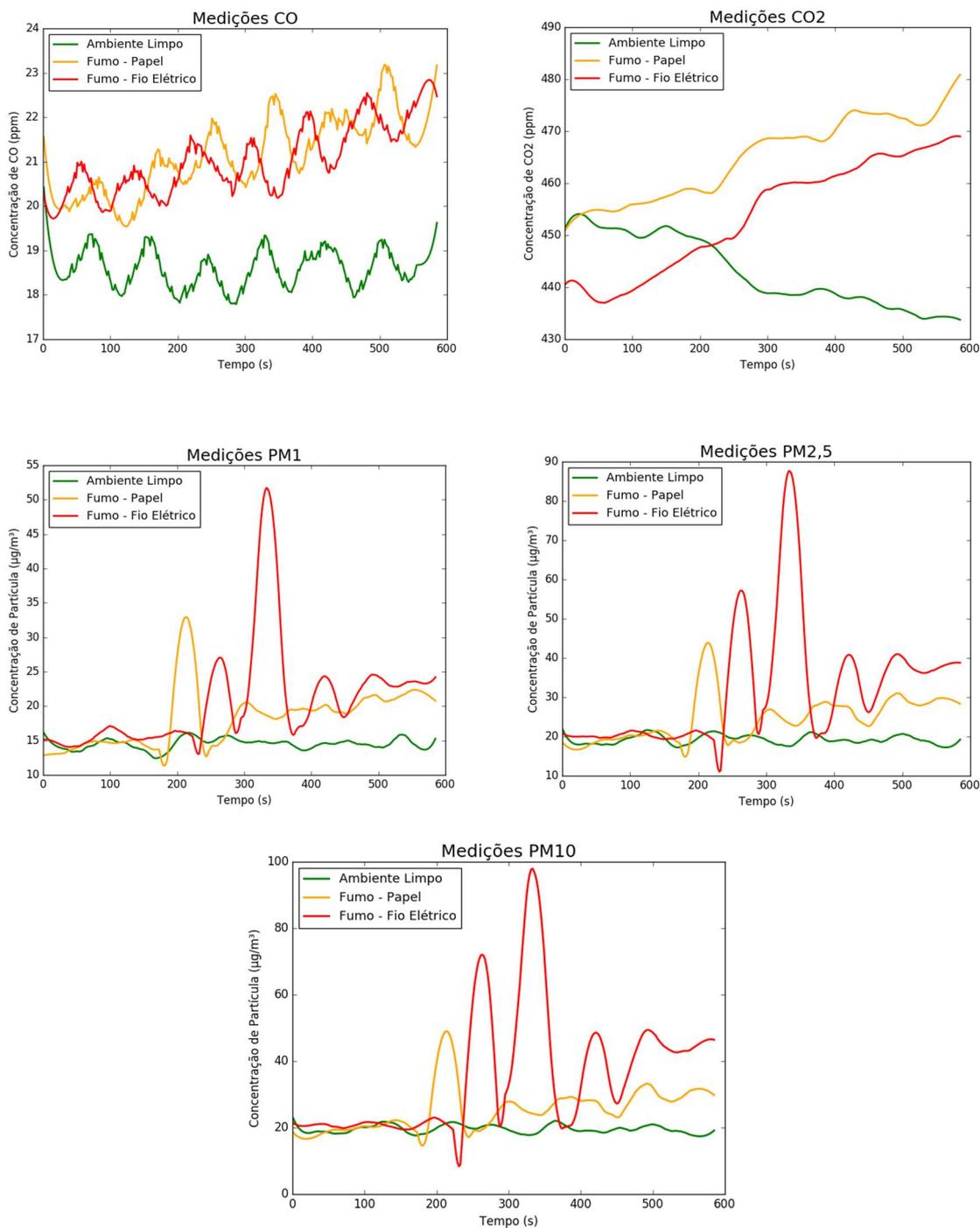


Figura 5.4 – Valores registados no Dia 1

De modo a verificar a distribuição dos poluentes no Laboratório, foram salvas as coordenadas geométricas da posição do robô em conjunto com os dados dos sensores durante os ensaios. Em

seguida foram plotados, sobre o mapa do laboratório, os dados dos sensores com a representação de esferas, onde a cor e o tamanho variam de acordo com o valor medido. Foi possível constatar que, apesar dos testes terem sido realizados num ambiente supostamente isolado, com portas e janelas fechadas, existe uma corrente de ar que carrega as partículas na direção oeste da sala e, por isso, as maiores concentrações foram medidas próximas à fonte de fumo e do lado esquerdo da mesma. Como exemplo, a figura 5.5 apresenta as concentrações de PM_{10} medidas nos três ensaios do Dia 2.

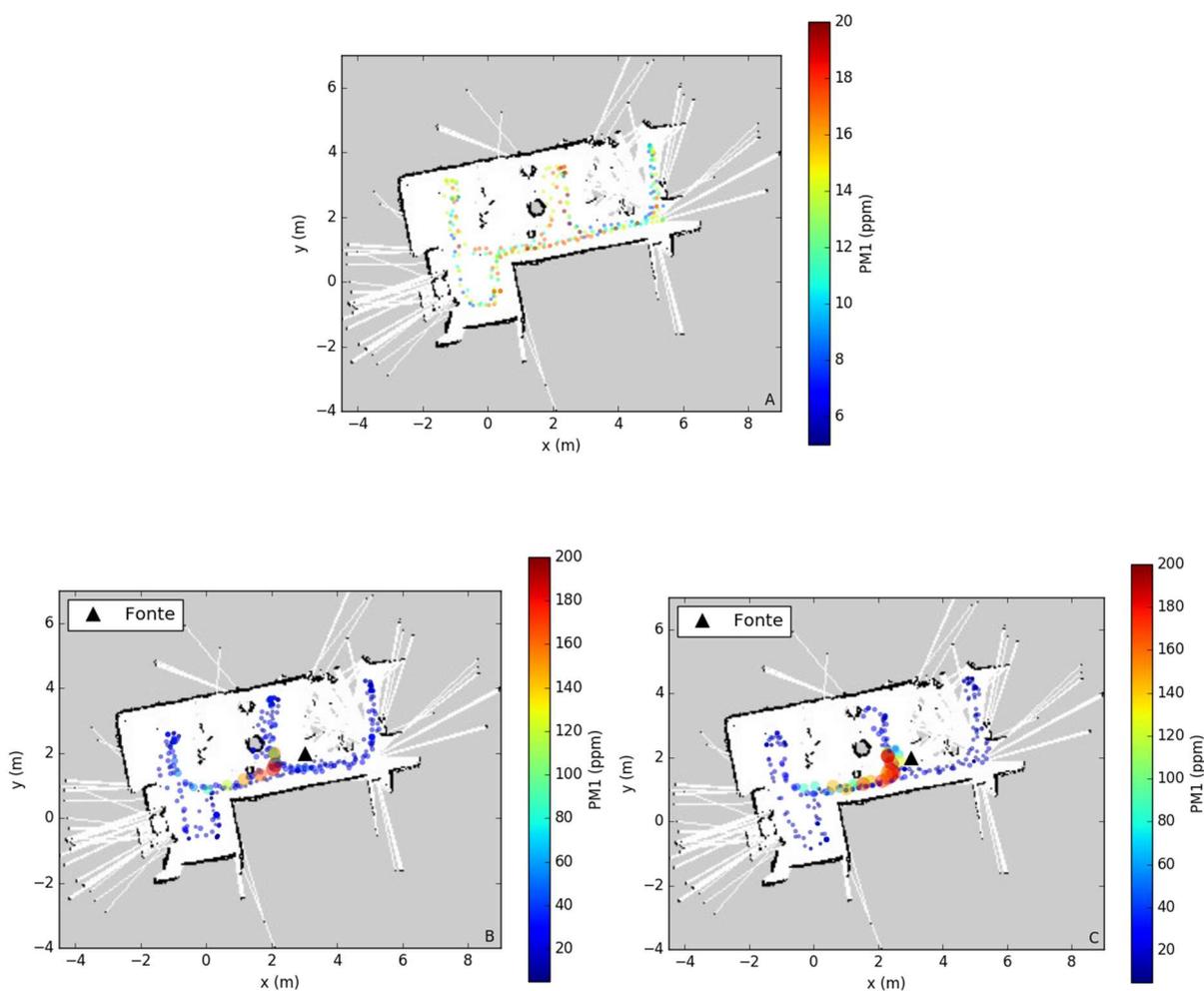


Figura 5.5 – Representação das concentrações de PM_{10} . Gráfico A: condições normais. Gráfico B: fumo de papel cartão. Gráfico C: fumo de fio elétrico.

Relativamente a verificação do tempo decorrido desde o início dos ensaios até que as grandezas atingissem as condições críticas definidas no Capítulo 4 e, em conjunto, ativassem o alarme de

incêndio, o sistema mostrou-se eficaz nos produtos da combustão provenientes de papel cartão e de fio elétrico. No quadro 5.2 é apresentado um resumo com o instante em que a condição de alarme de incêndio é atingida para cada dia de ensaio. O ensaio do dia 3 com papel cartão não pode ser realizado.

Quadro 5.2 – Tempos de acionamento do alarme de incêndio

Dia	Tempo de acionamento do Alarme de Incêndio (s)	
	Papel cartão	Fio elétrico
1	579	257
2	305	627
3	x	455

O sistema automático de alarme de incêndio, instalado especificamente para os ensaios, não atingiu o nível de sensibilidade pré-definido no painel de controlo de 2,5%/ft (nível 3) durante os ensaios.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um robô móvel para patrulhamento de espaços internos com capacidade de identificar incêndios através de um algoritmo de fusão sensorial. Ensaios experimentais foram realizados no piso 1 do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra para validação do sistema proposto e os resultados demonstraram boa capacidade na deteção de produtos da combustão, nomeadamente CO, CO₂, PM₁, PM_{2,5} e PM₁₀.

O sistema robótico ROS foi utilizado para agregar todas as funcionalidades utilizadas no projeto e para representar graficamente, através do RViz, os valores registados pelo módulo de sensores, o indicador visual de alarme de incêndio, o robô e as condições ambientais. Um mapa 2D do Laboratório de Sistemas Embebidos do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra foi gerado com o auxílio das informações do laser e de odometria para servir de base nos ensaios experimentais. Foi testada a navegação autónoma através da determinação de pontos de passagem e de comando remoto do robô nos corredores do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores com a utilização de um mapa pré-definido. Nos ensaios com fumo foi testada também a capacidade de controlo remoto através de joystick, ambos com representação gráfica do modelo do robô no mapa 2D.

Os ensaios experimentais iniciaram com o registo das condições normais do laboratório, seguido de ensaios com fumo proveniente da queima de papel cartão e de fio elétrico. Os resultados dos ensaios mostraram boa capacidade na identificação de incêndios em ambientes fechados. O sistema atingiu a condição de alarme de incêndio, considerando os valores dos sensores nos três dias de ensaio, enquanto o SADI instalado não indicou o alarme de incêndio.

Foi possível perceber que as concentrações dos gases e de materiais particulados eram maiores não só próximas da fonte de fumo, como era esperado, mas também do lado oeste do Laboratório. É admissível que, mesmo num ambiente sem sistema de ventilação mecânico, com

portas e janelas fechadas, exista uma pequena corrente de ar a entrar pelas frestas das portas que provoca a dispersão dos gases e das partículas. Esse deslocamento faz com que as partículas demorem mais tempo para atingir os detetores óticos do SADI nas concentrações de alarme, localizados no teto da sala. A vantagem de se ter um robô móvel a patrulhar um ambiente com um sistema ativo é que, ao deslocar-se pelo ambiente, acaba por buscar os produtos da combustão em diferentes espaços o que resulta numa deteção mais eficaz do incêndio.

A análise dos valores coletados em dias diferentes permitiu concluir que para o sistema identificar corretamente os cenários com fumo, é preciso que o robô tenha, previamente, os dados das condições normais do mesmo período do dia. Ou seja, o robô deve ter o registo das condições normais para geração das curvas características dos gases e materiais particulados e, posteriormente, iniciar o patrulhamento em busca de possíveis fontes de incêndios.

Nos ensaios com fumo, a expectativa na medição das concentrações de CO e CO₂ era que esses valores fossem maiores, pois esses gases são gerados em quantidade significativa nos processos de combustão lenta. É possível que isso tenha ocorrido por causa das dimensões do laboratório, onde as concentrações tenderam a diluir-se pelo ambiente. Também era esperado que o sensor de temperatura pudesse observar mudanças significativas durante os ensaios com fumo. Num próximo estudo é desejável que outro sensor de temperatura seja instalado do lado de fora do módulo de sensores para melhor aferição da temperatura ambiente.

Apesar do módulo *spreadNose* possuir também sensores de NO₂, O₃ e humidade relativa do ar, esses sensores não foram utilizados no algoritmo para decisão do alarme de incêndio, pois não apresentaram relação direta com os produtos da combustão. Porém, caso essa tecnologia fosse aplicada em locais onde a análise da qualidade do ar em ambientes interiores fosse uma mais valia, tais sensores poderiam ser utilizados.

Dentre os diversos produtos tóxicos provenientes de um incêndio, foram analisados os níveis de CO e CO₂ através de sensores MOX MiCS-4514 e Amphenol Telaire T6713. Porém, uma avaliação completa da toxicidade deve também incluir os efeitos sinérgicos de outros gases, como níveis deficientes de O₂ e aumento de HCl. Além disso, outros sensores também deveriam ser implementados a fim de verificar as melhores respostas para identificação dos produtos da

combustão, como exemplo, a utilização de câmaras térmicas para busca de espectros característicos dos produtos da combustão poderiam auxiliar na identificação do incêndio.

O uso de robôs móveis para detetar incêndios é uma abordagem relevante, pois para além do seu objetivo central, pode-se ainda adicionar uma ampla variedade de tarefas ao seu trabalho. O robô poderia realizar outras funções além do patrulhamento e identificação de focos de incêndio a fim de otimizar as suas funções. Como sugestão de desenvolvimento futuro, pode-se admitir que o robô poderá atuar no controlo de acesso e análise de qualidade do ar, além de realizar tarefas relacionadas a resposta a emergências, como o auxílio na evacuação dos ocupantes através de comandos de voz ou manter-se no local em caso de sinistro e enviar informações a equipas de emergência sobre a evolução do incêndio. Outra atividade factível para este sistema é o patrulhamento em edifícios de serviços nos períodos onde não existem pessoas a trabalhar. Os robôs móveis podem ser úteis na verificação de alarmes de incêndio gerados pelo SADI e pode-se, inclusive, supor ser possível o aumento da sensibilidade dos detetores pontuais para que possam ser ativados com um nível menor de fumo e serem complementados pela confirmação do robô. É mais viável economicamente a implementação de um sistema complexo móvel a patrulhar os espaços internos do que a instalação de várias unidades em pontos fixos.

Para que um produto final possa ser comercializado, deve-se encontrar uma forma de padronização de testes do sistema de robô móvel semelhante ao sistema de ensaio de detetores de incêndio para garantia das suas funcionalidades. Outras questões relativas à mobilidade dos robôs no interior dos edifícios também devem ser consideradas. A capacidade de abrir portas, subir escadas e rampas, entre outros, são alguns desafios para implementação deste tipo de tecnologia.

REFERÊNCIAS

- [1] MARTINS, G.C.D.C. (2013). Caracterização Experimental de Detetores de Incêndio. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra.
- [2] VASILIEV, A.A., GRIGORIEV, G. Y., LAGUTIN, A. S., NABIEV, S. S., PISLIAKOV, A. V., SAMOTAIEV, N. N., e SOKOLOV, A. V. (2017). Contemporary technologies of early detection of fire in space vehicles. *Acta Astronautica*. 135: 76-82.
- [3] CHEN, T. H., WU, P. H., e CHIOU, Y. C. (2004). An early fire-detection method based on image processing. *International Conference on Image Processing. ICIP'04. IEEE*. 3: 1707-1710.
- [4] NORTH WALES FIRE AND RESCUE SERVICE. Causes and potential solutions to avoid false alarms from Automatic Fire Alarm (AFA) Systems. Acedido em 15 de abril de 2019, no Web site da: North Wales Fire and Rescue Service: <https://www.nwales-fireservice.org.uk/afa/causes-and-potential-solutions-to-avoid-an-afa>.
- [5] UR REHMAN, A., NECSULESCU, D.S., e SASIADEK, J. (2015). Robotic Based Fire Detection in Smart Manufacturing Facilities. *IFAC*. Vol. 48, número 3: 1640-1645.
- [6] KIM, J. H., e LATTIMER, B. Y. (2015). Real-time Probabilistic Classification Of Fire And Smoke Using Thermal Imagery For Intelligent Firefighting Robot. *Fire Safety Journal*. 72: 40 - 49.
- [7] AHRENS, M. (2019). Smoke Alarms in U.S. Home Fires. Acedido em 05 de agosto de 2019, no Web site da NFPA: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Detection-and-signaling/ossmokealarms.pdf>.
- [8] HAYNES, H. J.G. (2017). Fire Loss in the United States During 2016. Acedido em 01 de junho de 2019, no Web site da NFPA: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/US-Fire-Problem/Old-FL-LL-and-Cat/FireLoss2017.ashx?la=en>.
-

-
- [9] BUCHANAN, A. H. (2001). Fire engineering design guide. Centre for Advanced Engineering. University of Canterbury.
- [10] GRIMWOOD, P., e DESMET, K. (2003). Tactical Firefighting: A Comprehensive Guide to Compartment Firefighting & Live Fire Training. Fire tactics, 40-80.
- [11] REIN, G. (2009). Smouldering combustion phenomena in science and technology. International Review of Chemical Engineering, 1: 3 – 18.
- [12] STEC, A. A., e HULL, T. R. (Eds.). (2010). Fire toxicity. Elsevier.
- [13] OHLEMILLER, T. J. (2002). Smoldering combustion. SFPE handbook of fire protection engineering. Society of Fire Protection Engineers. NFPA. Nova Iorque.
- [14] MARQUES, L. (2011). Sistemas de Detecção de Incêndios. 2^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos.
- [15] Hochiki. Product Catalogue - Fire Detection Solutions. Acedido em 28 de agosto de 2019, no Web site da Hochiki: https://www.hochikieurope.com/guides/HE_Product%20Guide.pdf.
- [16] República Portuguesa. Ministério da Administração Interna. (2008). Portaria n.º 1532/2008 de 29 de dezembro de 2008 - Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios. Diário da República, 1^a série – N.º 250.
- [17] WALD, L. (1999). Some terms of reference in data fusion. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 37(3), 1190-1193.
- [18] LIU, Z., e KIM, A. K. (2013). Review of recent developments in fire detection technologies. Journal of Fire Protection Engineering, 13: 129 – 151.
-

-
- [19] KIM, J. H., KIM, Y. D., e LEE, K. H. (2004). The third generation of robotics: Ubiquitous robot. In Proc of the 2nd Int Conf on Autonomous Robots and Agents.
- [20] PEREIRA, J. (2003). Avaliação e correção do modelo cinemático de robôs móveis visando a redução de erros no seguimento de trajetórias. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina.
- [21] Stanford Magazine. (2014). Stanford's Robotic History. Acedido em 28 de agosto de 2019, no Web site da Stanford Magazine: <https://stanfordmag.org/contents/stanford-s-robotic-history>.
- [22] CHANG, P. H., KANG, Y. H., CHO, G. R., KIM, J. H., JIN, M., LEE, J., JEONG, J. W., HAN, D. K., JUNG, J. H., LEE, W.J., e KIM, Y. B. (2006). Control architecture design for a fire searching robot using task oriented design methodology. In 2006 SICE-ICASE International Joint Conference (3126 – 3131). IEEE.
- [23] HONG, J. H., MIN, B. C., TAYLOR, J. M., Raskin, V., e MATSON, E. T. (2012). NL-based communication with firefighting robots. In 2012 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (1461 – 1466). IEEE.
- [24] aibo. aibo Patrol. Acedido em 28 de agosto de 2019, no Web site da Aibo: <https://us.aibo.com/feature/patrol.html>.
- [25] SHAH, D. The old dog has learned new tricks. (2017) Acedido em 15 de agosto de 2019, no Web site da The Hindu: <https://www.thehindu.com/sci-tech/technology/gadgets/sonys-aibo-robot-pup-is-back-with-some-new-tricks/article20571110.ece>.
- [26] Roomba. Robot Supremacy Wiki. Acedido em 28 de agosto de 2019, no Web site da Robot Supremacy: <https://robot supremacy.fandom.com/wiki/Roomba>.
- [27] SCHILLER, B. (2015). Meet The Scary Little Security Robot That's Patrolling Silicon Valley. Acedido em 28 de agosto de 2019, no Web site da Fast Company:
-

-
- <https://www.fastcompany.com/3049708/meet-the-scary-little-security-robot-thats-patrolling-silicon-valley>.
- [28] HUTTER, M., et al. (2016). Anymal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (38-44).
- [29] KOETTING, N. (2017). What's That Robot Doing Downtown? Acedido em 28 de Agosto de 2019, no Web site da Houstonia: <https://www.houstoniamag.com/articles/2017/12/29/knightscope-k5-security-robot-downtown-houston>.
- [30] FLOREANO, D., e WOOD, R. J. (2015). Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 521(7553), 460.
- [31] TZAFESTAS, S. G. (2013). Introduction to mobile robot control. Elsevier. EUA.
- [32] DARPA Robotics Challenge. (2015). DARPA Robotics Challenge Finals. Acedido em 28 de agosto de 2019, no Web site da DARPA: <https://archive.darpa.mil/roboticschallenge/>.
- [33] GUIZZO, E., e ACKERMAN, E. (2015). How South Korea's DRC-HUBO Robot Won the DARPA Robotics Challenge. Acedido em 28 de agosto de 2019, no Web site da IEEE Spectrum: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/humanoids/how-kaist-drc-hubo-won-darpa-robotics-challenge>.
- [34] MUHAMMAD, F. (2018). Trinity College Firefighting Robot Contest Recap 2018. Acedido em 28 de agosto de 2019, no Web site da IEEE Spectrum: <https://sites.tufts.edu/robotics/2018/04/13/trinity-college-firefighting-robot-contest-recap-2018>.
- [35] LUO, R. C., e SU, K. L. (2007). Autonomous fire-detection system using adaptive sensory fusion for intelligent security robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12(3): 274 – 281.
-

-
- [36] MARJOVI, A., MARQUES, L., e PENDERS, J. (2009). Guardians robot swarm exploration and firefighter assistance. In Workshop on NRS in IEEE/RSJ international conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- [37] FIREROB (Autonomous firefighting robotic vehicle). (2010). Final Report Summary. Acedido em 15 de abril de 2019, no Web site da CORDIS: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/107630/reporting/en>.
- [38] BAUDOIN, Y., et al. (2009). View-finder: robotics assistance to fire-fighting services and crisis management. In 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security & Rescue Robotics (SSRR 2009) (1-6). IEEE.
- [39] KIM, J. H., KELLER, B., e LATTIMER, B. Y. (2013). Sensor fusion based seek-and-find fire algorithm for intelligent firefighting robot. In 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (1482-1486). IEEE.
- [40] LAHR, D., OREKHOV, V., LEE, B., e HONG, D. (2013). Early developments of a parallelly actuated humanoid, SAFFiR. In ASME 2013 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference.
- [41] KHOON, T. N., SEBASTIAN, P. e SAMAN, A. B. S. (2012). Autonomous Fire Fighting Mobile Platform. *Procedia Engineering*. 41: 1145 – 1153.
- [42] MARTÍNEZ-DE-DIOS, J. R., MERINO, L., OLLERO, A., RIBEIRO, L. M., e VIEGAS, X. (2007). Multi-UAV experiments: application to forest fires. In *Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles* (207-228). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [43] RESTAS, A. (2015). Drone applications for supporting disaster management. *World Journal of Engineering and Technology*, 3, 316-321.
-

-
- [44] KUMAR, M., COHEN, K., e HOMCHAUDHURI, B. (2011). Cooperative control of multiple uninhabited aerial vehicles for monitoring and fighting wildfires. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 8(1), 1-16.
- [45] JOSEPH, L. (2015). *Learning robotics using Python*. Packt Publishing Ltd.
- [46] Hokuyo Automatic Co. Ltd. Acedido em 20 de agosto de 2019, no Web site da Hokuyo Automatic Co. Ltd.: <http://www.hokuyo-aut.jp>.
- [47] Hokuyo Automatic Co. Ltd. (2008). *Scanning Laser Range Finder UBG-04LX-F01 Specifications*.
- [48] Philips Computer accessories. Acedido em 20 de agosto de 2019, no Web site da Philips: https://www.philips.co.uk/c-p/SPZ5000_00/pc-webcam.
- [49] PALHINHA, J. P. P. (2018). *SpreadNose: Sistema de Monitorização de Poluição em Ambientes Urbanos*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra.
- [50] CONCEIÇÃO, C. S., MACEDO, J. MARQUES, L. (2019). Detecting Indoor Smoldering Fires with a Mobile Robot. (ROBOT 2019), Springer, (accepted).
- [51] QUIGLEY, M., GERKEY, B., e SMART, W. D. (2015). *Programming Robots with ROS: a practical introduction to the Robot Operating System*. O'Reilly. USA.
- [52] CABRITA, G., SOUSA, P., MARQUES, L., e DE ALMEIDA, A. (2010). Infrastructure monitoring with multi-robot teams. In *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*. 18 – 22.