



ENXAME DE VANTS PARA DETECÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS

Trabalho de Conclusão de Curso
Engenharia da Computação

Gildo Ferrúcio Santos Maia Dantas

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Campello Oliveira



Gildo Ferrúcio Santos Maia Dantas

***ENXAME DE VANTS PARA DETECÇÃO DE
INCÊNDIOS FLORESTAIS***

Monografia apresentada como requisito parcial
para obtenção do diploma de Bacharel em En-
genharia de Computação pela Escola Politéc-
nica de Pernambuco - Universidade de Pernam-
buco

Orientador:

Prof. Dr. Sérgio Campello Oliveira

UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Recife - PE, Brasil

27 de junho de 2014

MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

Avaliação Final (para o presidente da banca)*

No dia 8 de 7 de 2014, às 8:00 horas, reuniu-se para deliberar a defesa da monografia de conclusão de curso do discente GILDO FERRUCIO SANTOS MAIA DANTAS, orientado pelo professor Sérgio Campello Oliveira, sob título Enxame de VANTs para Detecção de Incêndios Florestais, a banca composta pelos professores:

José Paulo G. de Oliveira

Sérgio Campello Oliveira

Após a apresentação da monografia e discussão entre os membros da Banca, a mesma foi considerada:

Aprovada Aprovada com Restrições* Reprovada

e foi-lhe atribuída nota: 10,0 (PFZ)

*(Obrigatório o preenchimento do campo abaixo com comentários para o autor)

O discente terá 07 dias para entrega da versão final da monografia a contar da data deste documento.

JOSÉ PAULO G. DE OLIVEIRA

SÉRGIO CAMPELLO OLIVEIRA

Dedico este trabalho a minha família e entes queridos.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço aos meus pais, Paulo Ferrúcio e Gilcélia Maria. Eles me deram pleno suporte e as condições necessárias para que eu chegasse até aqui. Me dando a possibilidade para que eu consiga ir além. Sou grato pelo apoio oferecido na construção de minha vida acadêmica, por serem meus guias na minha vida profissional e pessoal. Sou grato também pelas vezes que me deram alguma resposta negativa quando fosse necessário. Sem o esforço deles eu não teria conseguido. A contribuição deles foi de fundamental importância.

Sou grato também aos meus irmãos Sérgio Paulo e Mirtile Regina, que contribuíram neste trabalho. Ora de forma direta me ajudando nos testes evitando que eu tocasse fogo na casa ou que me acidentasse, ora de forma indireta me auxiliando em tarefas residenciais as quais me distanciei para dedicação a este estudo. Agradeço a eles, pois desde que me entendo por gente, também me deram condições para que eu fosse adiante.

De mesmo modo agradeço a minha namorada Bruna Gabrielle, por sua paciência e também por contribuir de forma indireta me disponibilizando o máximo de tempo, abdicando de convívio quando solicitado por mim para confecção deste estudo.

Agradeço ao amigo Henrique Siqueira que prontamente me disponibilizou sua placa Arduino UNO para que eu conseguisse realizar testes. Também agradeço aos amigos e colegas da turma que estudei e virei noites em projetos: Felipe Farias, Marcello Medeiros, André Ramos, Breno Costa, Vanderson Pessoa, Pedro Buarque, José Cleyton, Eduardo Salgado, Hugo Marcolino, José Guilherme e Karolyne Cavalcanti.

Agradeço aos colegas David Alain e Cristóvão Rufino com quem trabalhei na iniciação científica. E em reserva a David que me ajudou bastante no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço aos demais colegas do estágio que me ajudaram disponibilizando o termômetro da Fluke para os testes e disponibilizando o laboratório de eletrônica quando necessário.

Por fim, não posso deixar de agradecer aos meus professores, que me guiaram no processo de formação. Cada um destes com sua *expertise* e experiência de vida. Destes, especialmente meu orientador Sérgio Campello, por ter tido paciência, me servir de farol na vida acadêmica, proporcionar este contato com a ciência e me ajudar no âmbito profissional.

Resumo

Florestas e matas nativas são fontes ricas de recursos naturais e biológicos. A preservação destas áreas são vitais para os seres humanos. Atualmente um dos maiores problemas que estas áreas enfrentam são incêndios florestais. Apesar da existência de sistemas de monitoramento do governo, existem situações que a detecção não é rápida ou precisa o bastante para tomada de ações combativas a tempo. Este trabalho propõe o desenvolvimento e implantação de um sistema que utiliza um enxame de veículos aéreos não tripulados (VANTs) autônomos que se comportam como uma rede de sensores sem fio (RSSF). Foram analisados os tipos de sensores em função da aplicação para encontrar o tipo mais adequado, de acordo com critérios de seleção descritos no trabalho. O sensor escolhido foi testado com a finalidade de identificar como o termômetro respondia em certas situações. Foram feitos experimentos relativos as leituras do termômetro em cenários adversos que pudessem ser incluídos erros, outros experimentos relativos ao campo de visão, como detecção da mesma fonte de calor em distâncias diferentes. Após observações foi verificada a necessidade de um tratamento das saídas por meio de uma função de ganho das leituras e o estabelecimento de um limiar para classificação de ocorrências de fogo. Após realizados os testes da função de ganho foi verificado que a melhor estratégia era o estabelecimento de um limiar móvel através de uma função de tomada de decisão. Foram feitas considerações para uso do sensor no quadrotor, identificadas melhorias para a detecção de fogo.

Palavras-chave: incêndios florestais, detecção de incêndios, VANT, enxames, RSSF.

Abstract

Native forests are rich sources of natural and biological resources. Preservation of such areas are vital to mankind. Nowadays one of the biggest problems which those areas face are forest fires. Despite the existence of government's monitoring systems, there are situations which detections aren't fast or accurate enough to make combative actions in time. This work proposes the development and implantation of a system which uses an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV) swarm which behave like a wireless sensor network (WSN). Some kinds of sensors were analyzed with respect to the application to find the most adequate ones, according to selection criteria described in the work. The chosen sensor was tested in order to identify how the thermometer respond in some scenarios. Some experiments were made on the readings in situations which errors could be included, other tests related to the sensor's field of view were done, such as detections of the same heat source on different distances. After some observations, it was verified the need of a treatment of the outputs by a gain function and the stablishment of a threshold to classify the fire occurrences. After performing some experiments on the gain function it was noticed that the best approach to set a threshold is to use a mobile threshold through a decision making function. It was established some considerations about the usage of the thermometer on the UAV and some improvements on the fire detection were identified.

Keywords: forest fires, fire detection, UAV, swarms, WSN.

Sumário

Lista de Figuras	p. ix
Lista de Tabelas	p. xi
Lista de Abreviaturas e Siglas	p. xiv
1 Introdução	p. 1
2 Inteligência de enxames e redes de sensores sem fio	p. 3
2.1 PSO	p. 4
2.2 Robótica de enxames	p. 5
2.2.1 Simulador de enxames de robôs baseado no PSO	p. 6
2.3 Redes de sensores sem fio	p. 6
2.3.1 Protocolo baseado em RSSF	p. 8
3 VANTs	p. 13
3.1 Quadrotores	p. 14
3.2 Quadrotor autônomo	p. 16
4 Detecção de fogo	p. 18
4.1 Detecção por infravermelho	p. 18
4.2 Detecção por ultravioleta	p. 20
4.3 Detecção por espectro de luz visível	p. 22
4.4 Detecção por fumaça	p. 22
4.4.1 Fotossensível	p. 23

4.4.2	Gás ionizado	p. 24
5	Desenvolvimento	p. 25
5.1	Considerações sobre o sensor escolhido	p. 25
5.1.1	Esquema elétrico da placa de prototipação do sensor	p. 26
5.1.2	Funcionamento interno	p. 27
5.2	Testes isolados do sensor	p. 28
5.3	Arquitetura de <i>hardware</i> do quadrotor	p. 36
5.4	Algoritmo de detecção de fogo proposto	p. 37
5.4.1	Experimentos da função de ganho desenvolvida	p. 41
5.4.2	Análise dos resultados da função de ganho para elaboração do limiar móvel	p. 42
5.5	Considerações para uso do sensor no quadrotor	p. 45
6	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	p. 46
	Referências	p. 48
	Apêndice A – Código modificado do <i>driver</i> do MLX96014 para Arduino	p. 52

Lista de Figuras

3.1	Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk, utilizado em missões de reconhecimento pela força aérea norte americana.	p. 13
3.2	X-43A, protótipo utilizado para testes de voo em de velocidades hipersônicas superiores à <i>Mach</i> 7.	p. 14
3.3	Configuração de motores em par com finalidade de cancelamento de torque do par oposto.	p. 15
3.4	Dragan Fly Guardian, modelo utilizado para gravação de vídeos em voos planares.	p. 15
3.5	Diagrama de blocos do <i>hardware</i> e suas conexões. As linhas de força dos dispositivos foram omitidas.	p. 16
4.1	Espectro de ondas eletromagnéticas e seus comprimentos de onda.	p. 19
4.2	MLX90614 da Melexis.	p. 20
4.3	ML8511 da Lapis <i>Semiconductor</i>	p. 21
4.4	Honeywell C7962.	p. 22
4.5	Esquema de funcionamento de sensores de fumaça fotossensíveis.	p. 23
4.6	Esquema de funcionamento de sensores de fumaça de gás ionizado.	p. 24
5.1	Esquema elétrico da <i>breakout board</i> do sensor MLX90614.	p. 27
5.2	Diagrama de blocos do MLX90614.	p. 28
5.3	Gráfico do teste de interferência de fonte artificial de infravermelho.	p. 30
5.4	Gráfico do teste de interferência da luz solar.	p. 30
5.5	Gráfico do teste com carvão vegetal e parede, em que os dois estão a 1,2 m de distância.	p. 31
5.6	Gráfico do teste com fogareiro de gás butano e chão, ambos distanciados a 1 m do sensor.	p. 32

5.7	Gráfico do teste com fogareiro de gás butano nas distâncias de 1,5 m, 2m, 2,5 m e 3 m. O sensor estava a 1 m de distância do chão.	p. 34
5.8	Redutor de campo de visão confeccionado. As medidas mostradas estão em mm.	p. 34
5.9	Gráfico da bateria de testes com o braseiro com distância de 1 m do termômetro.	p. 35
5.10	<i>Boxplot</i> da bateria de testes com fogareiro de gás butano a 1 m de distância do termômetro.	p. 35
5.11	Gráfico da bateria de testes de detecção em corpos escuros.	p. 36
5.12	Diagrama de blocos do quadrotor com o termômetro por infravermelho. As linhas de força dos dispositivos foram omitidas deste diagrama.	p. 37
5.13	Esquema elétrico do quadrotor. Foram omitidos deste esquema os circuitos de alimentação da bateria e circuitaria de ligação com os motores. A placa de prototipação do MLX90614 está representada pelo componente U16.	p. 38
5.14	Gráfico do teste com o braseiro e com a parede com a aplicação da função de ganho.	p. 42
5.15	Gráfico do teste com o fogareiro e com o chão com a função de ganho aplicada.	p. 43
5.16	Gráfico do teste com o fogareiro e com o chão aplicando a função de ganho.	p. 44
5.17	Gráfico da bateria de testes com o fogareiro em diversas distâncias, após aplicar a função de ganho.	p. 44

Lista de Tabelas

2.1	Formato dos pacotes.	p. 9
2.2	Pacote Tipo 1 - os VANTs testam a comunicação com a base.	p. 12
2.3	Pacote Tipo 3 - a base responde aos VANTs que gerou pacotes do Tipo 1. . .	p. 12
2.4	Pacote Tipo 2 - os VANTs comunicam à base a existência de alvos.	p. 12
2.5	Pacote Tipo 4 - a base envia um <i>broadcast</i> com informações de alvos vindas de pacotes do Tipo 2.	p. 12
5.1	Tabela de conexões entre o placa de prototipação e o Arduino UNO.	p. 28
5.2	Teste de interferência de fonte artificial de infravermelho.	p. 29
5.3	Teste de interferência de luz solar.	p. 29
5.4	Teste com fogo de carvão vegetal.	p. 31
5.5	Teste com fogo de gás butano.	p. 32
5.6	Bateria de testes de campo de visão, distâncias diferentes.	p. 33
5.7	Teste de campo de visão, ângulo de visão.	p. 33
5.8	Teste de leitura de corpos escuros.	p. 36

Lista de Abreviaturas e Siglas

DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
FPU	<i>Float Point Unit</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e de Recursos Renováveis
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR	<i>Infrared</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SCL	<i>Serial Clock</i>
SDA	<i>Serial Data</i>
SMBUS	<i>System Management Bus</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UPE	Universidade de Pernambuco
UV	Ultravioleta
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

1 Introdução

Atualmente a sociedade enfrenta um problema com certa frequência, incêndios florestais. Florestas, matas nativas, zonas de preservação e reservas ambientais são uma vasta fonte de recursos naturais e biológicos. Portanto, a preservação de tais áreas são indispensáveis aos seres humanos (HU et al., 2009).

Diversos trabalhos abordam o tema da prevenção de incêndios florestais devido a sua importância (HONG et al., 2010), (WANG et al., 2010), (GAI; WENG; YUAN, 2011). Outros trabalhos utilizam processamento de vídeo obtido de câmeras instaladas em áreas críticas (STIPANICEV; BUGARIC; BODROZIC, 2009). Há estudos que fazem detecção de incêndios utilizando técnicas de processamento de imagens (CHEN et al., 2010).

Existem trabalhos que propõem sistemas mais sofisticados baseados em redes de sensores sem fio (RSSF) para monitoramento constante de áreas coletando dados como: umidade relativa, temperatura, pressão atmosférica, leituras de sensores de detecção de chamas, emissão de ultravioleta e infravermelho (ZHANG et al., 2009), (LIU et al., 2011). Nestes estudos, após a coleta dos dados é realizada a fusão sensorial, geralmente por meio de redes neurais artificiais.

Uma das formas mais eficientes de proteção contra incêndios é a sua rápida detecção. Possibilitando que ele seja combatido (MUELLER et al., 2013). Mas atualmente a detecção de incêndios florestais ainda é um processo razoavelmente oneroso e em alguns casos ineficiente. As técnicas atuais de detecção de maneira geral fazem utilização de redes de satélites com diferentes sensores ópticos (INPE, 2012). Em certos casos de áreas críticas utiliza-se inspetores humanos para verificação de focos de incêndio, podendo esta forma de verificação não ser a mais ágil e precisa. Pois estes inspetores precisam se deslocar para realizar o monitoramento, muitas vezes de forma lenta, sem a utilização de equipamentos precisos de localização. Além do gasto que é gerado com o sustento destes inspetores.

Um dos sistemas do governo brasileiro em operação atualmente para detecção de queimadas é o Prevfogo. O qual é operado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) juntamente com o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e de Recursos Naturais Renováveis

(IBAMA) (IBAMA, 2014). Esse sistema tem suas limitações para ocorrências de incêndios florestais mais breves ou mesmo caso estejam sem visada direta para os satélites ou então se o incêndio possui uma extensão menor que os satélites possam detectar (INPE, 2012).

O trabalho propõe o desenvolvimento e implantação de um sistema de detecção de focos de incêndio. Os quais estejam localizados preferencialmente em áreas abertas e que sejam de média ou pequena extensão. O engenho deverá ter idealmente baixo custo associado, tanto de construção, operação e manutenção. Cada dispositivo isoladamente é composto por:

- um veículo aéreo não tripulado (VANT) que sirva para deslocamento, tal dispositivo foi simulado, modelado e seu protocolo de comunicação foi desenvolvido e simulado, tais atividades foram desempenhadas nos respectivos trabalhos (SILVA et al., 2012), (NASCIMENTO et al., 2012), (DUARTE, 2013) e (JUNIOR, 2013);
- um termômetro sem contato.

Os VANTs serão coordenados por algoritmos de controle descentralizado, baseados em inteligência de enxames. Cada um destes veículos representará uma partícula do enxame. O sistema proposto neste trabalho irá atuar como uma rede sensores sem fio, no qual seus integrantes não possuem localização fixa. Pois na definição de RSSF, seus nós são dispostos densamente numa região de interesse, podendo estar dispostos de maneira não determinada (AKYILDIZ et al., 2002). Uma característica inerente do sistema proposto é que não será necessário a utilização de dispositivos estáticos distribuídos de maneira concentrada como em RSSF.

O objetivo deste trabalho é a caracterização do sensor escolhido, no que se refere à qualidade de detecção, estabelecer as considerações para a integração do sensor no VANT. Além do desenvolvimento do *driver* para a plataforma do quadrotor e desenvolvimento do algoritmo de detecção necessário.

O sistema a ser desenvolvido tem como meta a facilitação da busca de focos de incêndio em pequenas e médias áreas de maneira mais precisa e mais rápida. E não de ser um concorrente de sistemas como o Prevfogo do IBAMA ou das redes de satélite do INPE.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: os Capítulos 2, 3 e 4 formam juntos a fundamentação teórica deste trabalho. Já no Capítulo 5 está o desenvolvimento do trabalho onde são apresentados os critérios de escolha de componentes, algoritmos propostos e testes realizados. No Capítulo 6 encontram-se a conclusão e trabalhos futuros.

2 *Inteligência de enxames e redes de sensores sem fio*

Os quadrotoros do sistema proposto neste trabalho são coordenados por um algoritmo descentralizado de inteligência de enxames baseado no PSO. Devido ao protocolo empregado, o sistema se comporta como uma rede de sensores sem fio. Portanto neste Capítulo será abordada uma breve fundamentação teórica sobre inteligência de enxames e redes de sensores sem fio.

Inteligência de enxames é um ramo da ciência que estuda algoritmos de busca baseados no comportamento de agrupamento de animais. São técnicas bioinspiradas na inteligência coletiva gerada a partir da ação conjunta dos agentes, os quais não possuem inteligência. Esta ação conjunta ocorre por meio de interações e troca de informações entre os indivíduos que compõem o enxame, criando um sistema de inteligência coletiva (CAO et al., 1995). Os agentes são os indivíduos que compõem o enxame, também são referenciados como partículas.

A área tem suas origens a partir de estudos de colônias de animais e dos seus integrantes. Um dos primeiros algoritmos, o PSO (do inglês *Particle Swarm Optimization*), proposto em 1995 por James Kennedy e Russel C. Eberhart (KENNEDY; EBERHART, 1995) surgiu a partir de observações de bandos de aves. Existem diversas áreas nas quais algoritmos de inteligência de enxames podem ser aplicados, geralmente sendo estas abstrações de buscas e otimizações (ENGELBRECHT, 2007).

De maneira geral, os algoritmos de inteligência de enxames seguem a mesma dinâmica. Primeiramente as partículas fazem uma avaliação da situação atual, ou seja, extraem a qualidade da solução através de uma função de *fitness*¹. Depois comparam o resultado atual com o melhor resultado individual e com o melhor resultado do grupo. Por último, tomam suas decisões baseadas em mecanismos pseudoaleatórios, os quais ponderam suas ações.

O grande trunfo que faz que surja a inteligência do enxame é a troca de informações das melhores soluções encontradas entre os indivíduos. Dessa forma cada um dos agentes “imi-

¹Esta função é específica para o problema a ser solucionado e é responsável por avaliar a qualidade da solução.

tam” uns aos outros com diferentes graus de similaridade, baseado na comparação mencionada anteriormente (KENNEDY; KENNEDY; EBERHART, 2001).

2.1 PSO

O algoritmo do PSO, é um algoritmo de otimização de funções. O qual funciona baseado na obtenção das melhores posições de cada partícula e do enxame, \vec{P}_{best} e \vec{G}_{best} respectivamente. As melhores posições são extraídas a partir de uma função de *fitness*, específica para o problema em questão. Esta função é responsável por mensurar a qualidade da solução, ou seja, nos dá uma forma de avaliar os pontos do espaço de busca qualitativamente.

Uma característica interessante do PSO é que ele é um algoritmo meta-heurístico, ou seja, não é necessário conhecer o espaço de busca da função que se deseja minimizar. Como consequência, as soluções encontradas de certos problemas podem não ser os pontos ótimos, mas a qualidade das soluções geralmente é muito boa em comparação a algoritmos determinísticos. Valendo ressaltar que em problemas de dimensionalidade alta, um resultado satisfatório pode ser obtido numa parcela de tempo menor caso fosse extraído de algoritmos determinísticos. Sua dinâmica é ilustrada no Algoritmo 1.

Algoritmo 1: Pseudocódigo do PSO

```

1 início
2   inicializar as partículas no espaço de busca dispostas aleatoriamente;
3   para cada partícula faça
4     extrair o fitness inicial;
5     estabelecer seu  $\vec{P}_{best}$  inicial;
6   estabelecer o  $\vec{G}_{best}$  inicial;
7   enquanto critério de parada não é atingido faça
8     para cada partícula faça
9       atualizar a velocidade e a posição da partícula;
10      extrair o fitness;
11      atualizar seu  $\vec{P}_{best}$ ;
12     atualizar o  $\vec{G}_{best}$ ;
13  retorna  $\vec{G}_{best}$ 

```

O algoritmo é estocástico, pois utiliza mecanismos pseudoaleatórios para gerar diversidade das soluções encontradas. Tal mecanismo, por exemplo, é utilizado na obtenção dos valores

dos coeficientes pseudoaleatórios r_1 e r_2 dos componentes cognitivos e sociais c_1 e c_2 , respectivamente, os quais formam as parcelas cognitivas e sociais da equação 2.1. Na equação de velocidade $\vec{v}_i(t)$ representa o vetor velocidade atual da partícula i , $\vec{v}_i(t+1)$ é o vetor de velocidade no próximo instante de tempo da partícula i , ω é o fator de inércia e $\vec{x}_i(t)$ é o vetor de posição da partícula i . É importante ressaltar que o tempo é a unidade de iteração e tem valor igual à 1, logo não é levado em consideração na multiplicação das posições nas equações 2.2 e 2.1. Na equação de posição do PSO $\vec{x}_i(t+1)$ é o vetor da nova posição da partícula i .

$$\vec{v}_i(t+1) = \omega \vec{v}_i(t) + c_1 r_1 [\vec{P}_{besti} - \vec{x}_i(t)] + c_2 r_2 [\vec{G}_{best} - \vec{x}_i(t)] \quad (2.1)$$

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{v}_i(t+1) + \vec{x}_i(t) \quad (2.2)$$

2.2 Robótica de enxames

Robótica é uma área que vem atraindo o interesse da academia para aplicação de inteligência de enxames. Nesta aplicação cada agente do enxame é representado por um robô. Os robôs são utilizados para a execução de atividades complexas ou aquelas que quando executadas de maneira distribuída, é possível obter ganhos relevantes. Neste contexto, robôs são entidades físicas, dispositivos eletrônicos microcontrolados ou microprocessados, que podem possuir atuadores e sensores para interação com o ambiente que os cerca. É válido ressaltar que as tomadas de decisão dos agentes são muito simples, dando margem para que os algoritmos de inteligência de enxames sejam embarcados em robôs com pouco poder computacional.

Pelo fato dos agentes executarem algoritmos de enxame, eles provêm ao sistema características de auto-organização, descentralização do controle dos indivíduos e adaptabilidade ao ambiente. Isto, sem que os indivíduos tenham que necessariamente serem dotados de alguma inteligência, ou memória das soluções encontradas anteriormente.

Um dos projetos de robótica de enxames mais conhecidos é o *Swarmnoid*. Este projeto propõe a utilização de robôs autônomos que agem de forma cooperativa. Tais robôs são divididos em grupos que possuem especialização em alguma tarefa como análise sensorial do ambiente, outros especializados em deslocamento de objetos e atuação (SWARMNOID, 2006).

Outro projeto com notoriedade é desenvolvido pelo laboratório GRASP da Universidade da Pensilvânia. Neste projeto foram utilizados quadrotoros para execução de atividades em grupo como a construção de estruturas (PENN, 2014a), execução de músicas (PENN, 2014b) entre

outras. Porém vale salientar que o controle destes quadrotores é centralizado pois cada VANT possui um marcador detectado por câmeras espalhadas no ambiente que enviam as informações para um computador.

2.2.1 Simulador de enxames de robôs baseado no PSO

Na Universidade de Pernambuco (UPE), foi desenvolvido um simulador de enxames de UAVs, do inglês *Unmanned Aerial Vehicle*, proposto em (SILVA, 2013). Neste estudo foi desenvolvido um simulador de enxame de VANTs coordenado por um algoritmo baseado no PSO.

Neste simulador a base é um ponto do espaço onde os UAVs começam a se movimentar e um ponto em que eles retornam caso entrem em situações adversas. A base não desempenha tarefas de comunicação com os UAVs. O UAVs se comunicam por meio de ligações ponto a ponto, uns com os outros.

Neste *software* os VANTs possuem mecanismos que permitem seu controle. Estes mecanismos contribuem na formação da aceleração em situações específicas. Alguns são descritos a seguir:

- mecanismo de sincronismo: constituído pelos mecanismos de anti-colisão e anti-afastamento;
- mecanismo de anti-colisão: responsável por evitar que os VANTs colidam em pleno voo;
- mecanismo de anti-afastamento: responsável por evitar que os VANTs percam comunicação com seus vizinhos;
- mecanismo de patrulha: o indivíduo se desloca em direção e intensidade aleatória sem qualquer traço de inteligência individual;
- mecanismo de percepção: responsável pela detecção de alvos móveis, para que o VANT consiga perseguir-lo e comunicar aos outros próximos da localidade do alvo;
- mecanismo de retorno à base: tal mecanismo entra em ação quando o indivíduo está em uma situação não favorável. Como em situações de recarga de energia. Assim o VANT se desloca em direção à base.

2.3 Redes de sensores sem fio

Devido aos avanços tecnológicos no ramo da eletrônica, atualmente é possível construir dispositivos com maior poder de processamento, maior precisão, menor consumo energético

e cada vez menores. Tais características, quando em conjunto, abrem a possibilidade para a construção de infraestruturas de monitoramento que possuam capacidades de coleta de dados em tempo real (OLIVEIRA, 2012).

A aplicação de redes de sensores sem fio (RSSF) é ampla. Sendo mais empregada nos ramos listados a seguir:

- militar: observação de territórios inimigos ou hostis sem que haja intervenção direta de observadores humanos;
- indústrias: em indústrias que exigem maior controle no processo fabril e possuem ambientes insalubres ou de difícil acesso (JUNIOR, 2013);
- ambiental: empregadas no monitoramento de ambientes de interesse como qualidade do ar de ambientes urbanos, temperatura ou umidade de ambientes florestais;
- saúde: como proposto em (MILENKOVIC; OTTO; JOVANOVA, 2006), o constante monitoramento do paciente traz a capacidade de uma observação mais elaborada do quadro do indivíduo, melhorando a capacidade de diagnósticos.

Redes de sensores sem fio são compostas por dispositivos de medição dispostos em uma área definida ou bastante próximos a algum evento que se queira monitorar. Estes aparatos podem ser referenciados como nós da rede, já que também possuem capacidade de se comunicar entre eles. Além deste tipo de dispositivo, pode existir outro tipo de nó, responsável pela fusão dos dados coletados pelos nós sensoriais, sendo este denominado de nó concentrador que envia as informações da rede para um *gateway* (SILVA, 2011).

Normalmente nós concentradores possuem maior poder de processamento pois estes são responsáveis por agregar os dados coletados, servir como ponte entre as redes dos nós sensores e a rede de acesso externo. A rede dos nós sensores com o concentrador apresenta determinadas restrições que devem ser contornadas por meio de uma pilha de protocolos que leve em consideração aspectos energéticos e de roteamento dos pacotes e que promova esforço cooperativo dos nós sensores (AKYILDIZ et al., 2002).

De maneira geral as RSSF possuem as seguintes características:

- os dispositivos nós possuem capacidades de pré-processamento dos dados coletados, ainda que limitado a fim de reduzir a transmissão de dados brutos;
- limitações de memória e de autonomia energética;

- localização dos sensores não precisa ser pré-determinada, podendo estar densamente distribuídos na área de interesse;
- os dispositivos são propensos a falhas.

Os componentes básicos de cada dispositivo integrante de RSSF são:

- unidade de processamento;
- unidade de comunicação;
- unidade sensorial;
- unidade de energia.

Os requisitos de uma RSSF essencialmente são:

- tolerância à falhas: caso um dispositivo falhe os protocolos utilizados devem ser auto-organizáveis, a topologia da rede deve se alterar constantemente para contornar os problemas;
- escalável: os protocolos devem permitir a utilização desde poucos dispositivos a milhares destes;
- barata quanto a custos de produção: após o fim da fonte energética dos dispositivos nós, caso o acesso aos dispositivos seja difícil para reparo, talvez seja mais barato descartá-los.

2.3.1 Protocolo baseado em RSSF

Visto que em um enxame de VANTs, cada veículo aéreo deve possuir capacidades sensorial e de comunicação. Este enxame pode se comportar como uma RSSF, desde que haja uma garantia de conexão entre os VANTs e que um dispositivo atue como base ou nó concentrador.

Em busca de uma melhor eficiência energética e estabelecimento de um protocolo eficaz, foi desenvolvido na UPE, um protocolo de comunicação baseado em protocolos de RSSF. O protocolo desenvolvido em (OLIVEIRA; DUARTE; JUNIOR, 2014) possui similaridades com outras topologias de RSSF. Ele é baseado em certas premissas que são observadas, sendo estas:

- igualdade entre os nós, todos os agentes são similares em aspectos de recursos de *hardware* e *software* executado;

- fixação da unidade sorvedoura, a base tem localização fixa;
- mobilidade dos nós sensores, no caso os VANTs que possuem capacidades de mobilidade e sensoriais;
- transmissão de pacotes pelos nós sensores;
- empilhamento dos pacotes recebidos;
- retransmissão de pacotes que são originados de outros nós com destino à base, em situações as quais ambos não possuem comunicação direta;
- *broadcasting* de pacotes transmitidos pela base;
- formato dos pacotes disposto na Tabela 2.1;
- tipo do pacote, levando em conta que cada tipo tem sua função dentro do protocolo e preenchimento específico dos campos.

Tabela 2.1: Formato dos pacotes.

[Fonte: extraído de (JUNIOR, 2013)]

ID	Tipo	Nº UAV Origem	Nº UAV Retrans	X UAV Origem	Y UAV Origem	X UAV Retrans	Y UAV Retrans	X Alvo	Y Alvo
32 bits	2 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits

Em que:

- “ID” é identificador único do pacote por nó;
- “Tipo” é o tipo do pacote;
- “Nº UAV Origem” é o número do nó que deu origem a transmissão do pacote;
- “Nº UAV Retrans” é o número do último nó que retransmitiu o pacote;
- “X UAV Origem” é a coordenada X do nó que originou o pacote;
- “Y UAV Origem” é a coordenada Y do nó que originou o pacote;
- “X UAV Retrans” é a coordenada X do último nó que retransmitiu o pacote;
- “Y UAV Retrans” é a coordenada Y do último nó que retransmitiu o pacote;
- “X Alvo” é a coordenada X do alvo perseguido;

- “Y Alvo” é a coordenada Y do alvo perseguido;

Neste protocolo os nós sensores devem manter a comunicação com a base durante todo o tempo. Para saber se a comunicação está ativa, os nós sensores mandam periodicamente pacotes do Tipo 1, cujo formato está na Tabela 2.2, para que então, a base responda com pacotes do Tipo 3 por *broadcasting*, cujo o preenchimento deste tipo está mostrado na Tabela 2.3.

Para troca de mensagens relativas a alvos detectados são utilizados os tipos 2 e 4 de pacote. Pacotes do Tipo 2 servem para comunicar à base a existência de um alvo em determinada localização, o preenchimento deste tipo de pacote está descrito na Tabela 2.4. Com o intuito de informar os outros agentes do enxame o pacote do Tipo 4 é enviado por *broadcasting* pela base, seu preenchimento está ilustrado na Tabela 2.5.

Para que existam garantias que os VANTs do enxame se comportem como uma RSSF houve modificações feitas em (DUARTE, 2013) nas equações de movimentação do enxame propostas no estudo (SILVA, 2013). A função de atualização de velocidade passou a ser a função descrita na Equação 2.3, com a adição do componente de comunicação.

$$\vec{v}_i(t+1) = \omega \vec{v}_i(t) + c_1 r_1 [\vec{P}_{besti} - \vec{x}_i(t)] + c_2 r_2 [\vec{G}_{best} - \vec{x}_i(t)] + \vec{a}(t)_{sync} + B c_3 r_3 [\vec{x}_{base} - \vec{x}_i(t)] \quad (2.3)$$

Em que:

- $\vec{v}_i(t+1)$ é o vetor de velocidade do próximo instante;
- $\vec{v}_i(t)$ é o vetor de velocidade do instante atual;
- ω é o fator de inércia;
- c_1 é o coeficiente do componente cognitivo;
- r_1 é um valor pseudoaleatório, uniformemente distribuído entre 0 e 1, que irá ponderar o componente cognitivo;
- \vec{P}_{besti} é a melhor posição individual da partícula i ;
- c_2 é o coeficiente do componente social;
- r_2 é um valor pseudoaleatório, uniformemente distribuído entre 0 e 1, que irá ponderar o componente social;
- \vec{G}_{best} é a melhor posição global do enxame;

- $\vec{a}(t)_{sync}$ é o vetor de aceleração de sincronismo descrita na Equação 2.4;
- B é um valor booleano, que é ativado caso o VANT perca comunicação com a base;
- c_3 é o coeficiente do componente de comunicação;
- r_3 é um valor pseudoaleatório, uniformemente distribuído entre 0 e 1, que irá ponderar o componente de comunicação;
- $\vec{x}_i(t)$ é o vetor de posição da partícula no instante atual;
- $\vec{x}_{base}(t)$ é o vetor de posição da base no instante atual.

$$\vec{a}(t)_{sync} = \vec{a}(t)_{acol} + \vec{a}(t)_{com} \quad (2.4)$$

$$\vec{a}(t)_{acol} = \sum_{i=1}^{n_{obstaculos}} \vec{x}(t)_{vant} - \vec{x}(t)_{obstaculoi} \quad (2.5)$$

$$\vec{a}(t)_{com} = \sum_{i=1}^{n_{vizinhos}} \vec{x}(t)_{vizinhoi} - \vec{x}(t)_{vant} \quad (2.6)$$

Onde:

- $\vec{a}(t)_{acol}$ é vetor de aceleração anticolisão, descrito na Equação 2.5;
- $\vec{a}(t)_{com}$ é o vetor de aceleração de comunicação, descrito na Equação 2.6;
- $\vec{x}_{vant}(t)$ é o vetor de posição do VANT no instante atual;
- $\vec{x}_{obstaculoi}(t)$ é o vetor de posição do obstáculo i no instante atual;
- $\vec{x}_{vizinhoi}(t)$ é o vetor de posição do vizinho i no instante atual.

Tabela 2.2: Pacote Tipo 1 - os VANTs testam a comunicação com a base.

[Fonte: extraído de (JUNIOR, 2013)]

ID	Tipo	Nº UAV Origem	Nº UAV Retrans	X UAV Origem	Y UAV Origem	X UAV Retrans	Y UAV Retrans
32 bits	00	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits

Tabela 2.3: Pacote Tipo 3 - a base responde aos VANTs que gerou pacotes do Tipo 1.

[Fonte: extraído de (JUNIOR, 2013)]

ID	Tipo	Nº UAV Retrans	X UAV Origem	Y UAV Origem
32 bits	10	32 bits	32 bits	32 bits

Tabela 2.4: Pacote Tipo 2 - os VANTs comunicam à base a existência de alvos.

[Fonte: extraído de (JUNIOR, 2013)]

ID	Tipo	Nº UAV Origem	Nº UAV Retrans	X UAV Origem	Y UAV Origem	X UAV Retrans	Y UAV Retrans	X Alvo	Y Alvo
32 bits	01	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits	32 bits

Tabela 2.5: Pacote Tipo 4 - a base envia um *broadcast* com informações de alvos vindas de pacotes do Tipo 2.

[Fonte: extraído de (JUNIOR, 2013)]

ID	Tipo	Nº UAV Origem	X UAV Origem	Y UAV Origem
32 bits	11	32 bits	32 bits	32 bits

3 *VANTs*

Cada partícula do enxame do sistema proposto é composta por um veículo aéreo não tripulado autônomo. Com a finalidade de fundamentar os conhecimentos sobre este tipo de veículo, serão apresentados neste Capítulo os conceitos deste tipo de aeronave. Sendo abordados os fundamentos do que são VANTs, suas vantagens, aplicações e características do projeto dos VANTs autônomos utilizados como uma das bases deste estudo.

Também conhecidos como *drones*, veículos aéreos não tripulados ou VANTs são aeronaves que dispensam a necessidade de um piloto a bordo da aeronave. Elas podem ser pilotadas remotamente ou podem ser autônomas. Atualmente o interesse de pesquisas sobre VANTs cresceu rapidamente devido a aplicações militares recentes que tiraram proveito das diversas vantagens que este tipo de veículo traz (NASCIMENTO et al., 2012),(SILVA et al., 2012),(VARELA et al., 2011).

A ideia de uso de veículos deste tipo não é nova. E seu uso já era realizado no começo do século XX por militares para treinamento de tropas antiaéreas, sendo utilizado como alvo a ser abatido (TAYLOR; MUNSON, 1977). Atualmente um dos usos mais frequentes de uso militar é para aeronaves de reconhecimento, como é o caso do Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk, ilustrado em Figura 3.1



Figura 3.1: Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk, utilizado em missões de reconhecimento pela força aérea norte americana.

[Fonte: reproduzido de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global_Hawk_1.jpg]

Dentre os benefícios obtidos pelo uso de VANTs os mais importantes são:

- as aeronaves tornam-se mais eficientes pois não necessitam possuir sistemas de auxílio a vida do piloto, podendo carregar mais carga útil;
- caso a aeronave seja derrubada não há a necessidade de operações de resgate ou desgaste diplomático para recuperação do piloto.

Uma das formas mais difundidas de utilização de *drones* é para missões de reconhecimento. Mas em estudos e aplicações recentes, o uso civil também vem ganhando corpo (AMAZON, 2014). Outra aplicação que VANTs possuem é em pesquisas e testes de tecnologias como é o caso do X-43A da NASA, ilustrado na Figura 3.2, utilizado na pesquisas de motores *scramjet*, capaz de propulsionar este protótipo a velocidades próximas de *Mach 7*.



Figura 3.2: X-43A, protótipo utilizado para testes de voo em de velocidades hipersônicas superiores à *Mach 7*.

[Fonte: reproduzido de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:X43a2_nasa_scramjet.jpg]

3.1 Quadrotores

Uma das configurações mais adotadas em pesquisas e aplicações civis atualmente é a configuração de quadrotores. Aeronaves deste estilo possuem quatro hélices divididas em dois pares. De maneira que um dos pares gire no sentido horário e o outro no anti-horário para cancelamento do torque gerado pelos motores, como mostrado na Figura 3.3.

Estes veículos são capazes de realizar decolagem e aterrissagem vertical, trazendo outros benefícios, dentre os quais podem-se destacar três:

- capacidade de pairar, sendo bastante útil para gravação de vídeos, como o modelo mostrado na Figura 3.4, realizar voos a baixas velocidades possibilitando voos tanto em lugares abertos quanto lugares fechados;

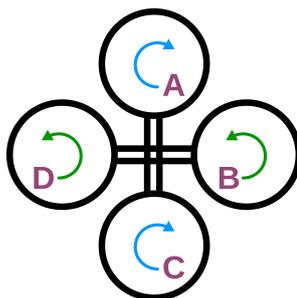


Figura 3.3: Configuração de motores em par com finalidade de cancelamento de torque do par oposto.

[Fonte: reproduzido de (WIKIPEDIA, 2014b)]

- em relação a energia gasta para sustentação da aeronave, este *design* favorece a uma melhor eficiência energética em relação a helicópteros, pois todas as hélices quando em rotação erguem a aeronave. Devido à configuração de pares de motores com rotações opostas. Não havendo gasto adicional de energia para estabilizá-la, como é observado em helicópteros com suas hélices traseiras para eliminar o torque gerado pela hélice principal;
- a dinâmica de direcionamento, inclinação e altitude do quadrotor é baseado em diferenças de rotação entre os motores, tornando seu controle razoavelmente simples.



Figura 3.4: Dragan Fly Guardian, modelo utilizado para gravação de vídeos em voos planares.

[Fonte: reproduzido de
<http://www.draganfly.com/uav-helicopter/draganflyer-guardian/gallery/pictures/picture-7.php>]

Comercialmente, existem também alguns projetos que utilizam tal configuração como o Parrot ARDrone (PARROT, 2013), alguns produtos da XProHeli (XPROHELI, 2012) respectivamente com a finalidade de entretenimento e gravação de vídeos. Também existem os projetos Aeroquad (AEROQUAD, 2014) e Arducopter (ARDUCOPTER, 2013) que são *hardware* e *software* livre, abertos para a comunidade. Estes últimos voltados a amadores.

3.2 Quadrotor autônomo

O projeto do quadrotor desenvolvido por David Alain e Cristóvão Rufino descrito em (NASCIMENTO et al., 2012), é composto basicamente por sensores de que auxiliam a navegação, dois microcontroladores, motores e um módulo de comunicação sem fio. Uma maior descrição do modelo pode ser visto no artigo em questão.

No decorrer das pesquisas o projeto do quadrotor sofreu algumas alterações em sua arquitetura. A arquitetura atual está descrita na Figura 3.5 e ilustra o diagrama de blocos funcionais do projeto descrito em (NASCIMENTO et al., 2014). Dentre as mudanças, a mais impactante foi deixar de utilizar dois microcontroladores NXP LPC1768 Cortex-M3 para usar somente um STM32F4 Cortex-M4F do *kit* de desenvolvimento STM32F4Discovery. O qual possui maior poder de processamento e capacidade de cálculo de pontos flutuante em *hardware*, a partir de sua FPU (do inglês *Float Point Unit*).

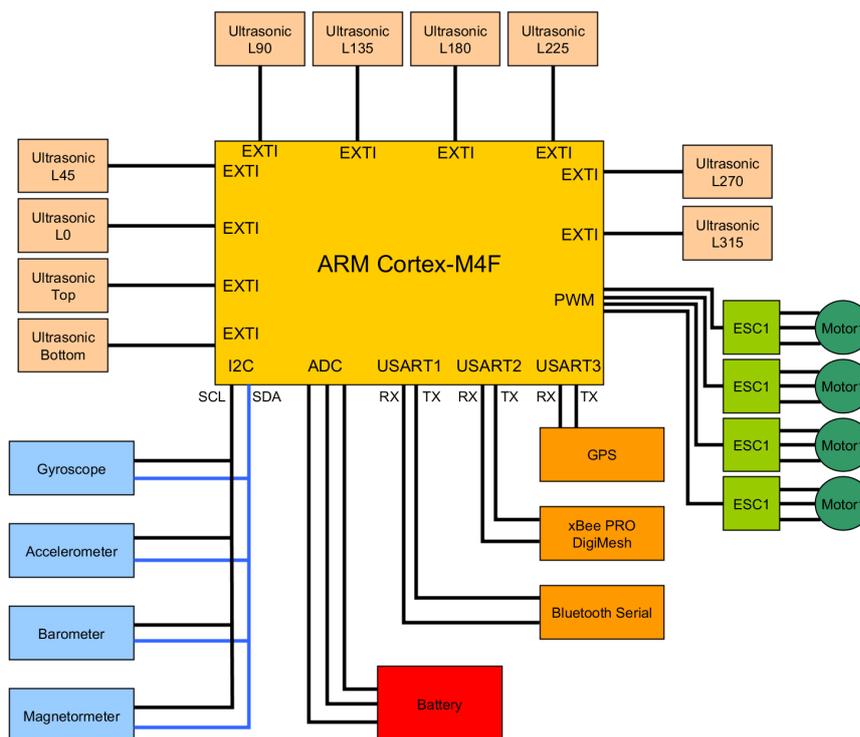


Figura 3.5: Diagrama de blocos do *hardware* e suas conexões. As linhas de força dos dispositivos foram omitidas.

[Fonte: extraído de (NASCIMENTO et al., 2014)]

Para que seja possível o controle dos VANTs por meio de robótica de enxames, o *hardware* utilizado é quem deve fazer com que sejam atendidos certos requisitos de controle através dos mecanismos a seguir:

- mecanismo de locomoção;
- mecanismo de localização;
- mecanismo de anticolisão;
- mecanismo de comunicação;
- mecanismo de percepção do ambiente.

4 *Detecção de fogo*

A rápida detecção de focos de incêndio é crucial para diminuição das perdas e para que sejam tomadas medidas de combate ao ocorrido o quanto antes (MUELLER et al., 2013).

Existem diversos tipos de sensores para detecção de chamas. Entre eles:

- detecção por infravermelho;
- detecção por ultravioleta;
- detecção por espectro de luz visível;
- detecção por fumaça.

Além dos métodos descritos, existem outros métodos capazes de detectar a presença de chamas por processamento de imagem (KWON; CHO; HWANG, 2008), por processamento de vídeo (MUELLER et al., 2013) ou utilizando técnicas multissensoriais (LIU et al., 2011).

Para a utilização nos VANTs, os sensores devem obedecer a certos requisitos básicos:

- tamanho miniaturizado: sabendo que quanto menos carga o quadrotor carregar, maior será sua autonomia;
- robustez: o campo de aplicação proposto neste trabalho é em ambiente aberto, não controlado e com possíveis intempéries.

4.1 **Detecção por infravermelho**

Toda matéria com temperatura T acima de zero Kelvin emite de radiação, com intensidade proporcional à sua temperatura, tal propriedade da matéria é conhecida como radiação térmica. Esta propriedade é causada pelo movimento das moléculas que compõem a matéria (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2010). Uma das radiações observadas se situa na região

do infravermelho, que compreende o intervalo de $0,7 \mu\text{m}$ a 1 mm de comprimento de onda como é ilustrado na Figura 4.1.

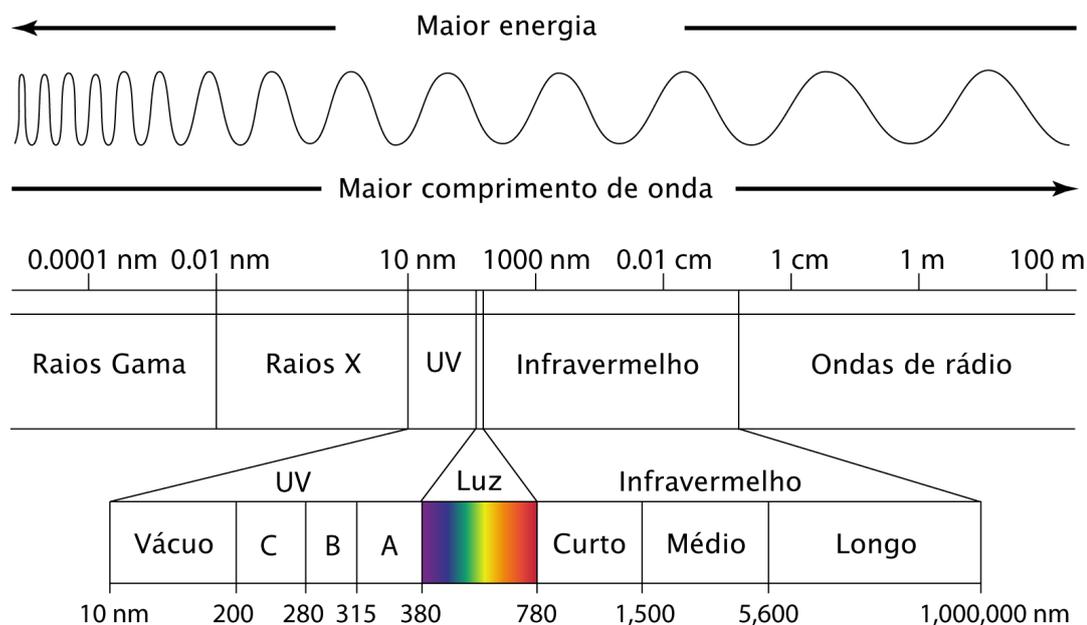


Figura 4.1: Espectro de ondas eletromagnéticas e seus comprimentos de onda.

Sabe-se que fogo emite ondas de calor e diversas ondas eletromagnéticas, numa ampla faixa do espectro. Dentre as ondas irradiadas uma das faixas emitidas é o infravermelho.

Detectores de fogo por infravermelho e termômetros por infravermelho possuem uma diferença sutil no modo de operação. Geralmente detectores possuem circuitaria que dispara a partir de certo limiar. Já os termômetros são mais elaborados, pois possuem fotorreceptores que emitem sinais elétricos com intensidade proporcional à quantidade de energia infravermelha que captam (HOWSTUFFWORKS, 2014b). Dessa forma é possível inferir a temperatura de objetos.

Existem diversas vantagens oferecidas no uso de detecção por infravermelho, eis algumas delas:

- medições de alvos móveis são mais fáceis de serem realizadas;
- detecções podem ser feitas em lugares perigosos e/ou de difícil acesso, um exemplo são

superfícies com temperaturas absurdamente altas, nas quais nenhuma medição por contato pode ser feita;

- não existem perdas significativas de energia do alvo ao se realizar uma medição, pois não ocorre interferência do medidor no corpo.

O dispositivo ilustrado na Figura 4.2 é o MLX90614 da Melexis (MELEXIS, 2013). Este componente é um termômetro por infravermelho. Ele atende ao requisito de tamanho. Ele capta raios de infravermelho, processa o sinal eliminando ruídos e codifica sua leitura podendo disponibilizar sua saída em dois formatos: serial via barramento SMBUS (do inglês *System Management Bus*) ou por largura de pulso (MELEXIS, 2013).



Figura 4.2: MLX90614 da Melexis.

[Fonte: reproduzida do *datasheet* do produto]

Porém existem algumas premissas que devem ser levadas em consideração na utilização de sensores deste tipo:

- altos níveis de fumaça ou poeira no campo visual do detector levam a uma leitura errada (RAYTEK, 2014);
- somente a temperatura da superfície do corpo é mensurada, temperaturas dos núcleos não são medidas.

4.2 Detecção por ultravioleta

O mesmo princípio físico de radiação térmica ocorre para o espectro de ultravioleta. E baseado neste princípio a detecção de fogo por ultravioleta também é possível de ser realizada

(WIKIPEDIA, 2014a). Ultravioleta corresponde ao intervalo de comprimento de onda de 100 nm até 400 nm.

De maneira geral, a detecção de chamas por ultravioleta provê os mesmos benefícios que na detecção por infravermelho. Além das mesmas vantagens, existe outra que é interessante: tal tipo de sensor não sofre interferência significativa por radiação solar. Apesar do sol também emitir ultravioleta, a atmosfera terrestre filtra grande parte desta radiação.

Dentre os sensores pesquisados desta categoria, o detector de ultravioleta é o ML8511 da LAPIS Semiconductor (LAPIS, 2013), ilustrado na Figura 4.3 atende aos requisitos de tamanho e é um candidato. Seu modo de montagem é SMD (do inglês *Surface Mounting Device*), ou seja, o processo de soldagem é mais complexo. Sua saída é por níveis de tensão, proporcional a quantidade de ultravioleta captado indicando a incidência de ultravioleta em mW/cm^2 . Tal sensor não foi encontrado em tempo hábil para a conclusão e entrega deste trabalho, pois seria necessário a aquisição, implementação e testes de caracterização para incorporação deste ao projeto.

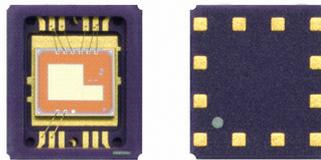


Figura 4.3: ML8511 da Lapis Semiconductor.

[Fonte: reproduzida de (LAPIS, 2013)]

Também existem premissas que merecem destaque neste tipo de detector:

- susceptibilidade a alarmes falsos caso haja uma fonte de ultravioleta no campo de visão do sensor. Um exemplo de fonte seriam lâmpadas fluorescentes.
- altos níveis de fumaça, poeira e partículas de óleo no campo visual do detector levam a uma leitura errada, pois estes materiais são absorventes de radiação ultravioleta.

4.3 Detecção por espectro de luz visível

Neste tipo de detecção não existe uma única técnica. Pois dependendo do combustível as frequências emitidas pelo fogo são diferentes. Tornando o projeto do detector específico ao uso que será destinado. Para não sofrer interferência, sensores de luz visível normalmente são utilizados para detecção em lugares onde não há incidência de luz, por exemplo, em oleodutos como é o caso do Honeywell C7962 (HONEYWELL, 2014) ilustrado na Figura 4.4.



Figura 4.4: Honeywell C7962.
[Fonte: reproduzida de (HONEYWELL, 2014)]

Este sensor, assim como a maioria dos outros similares, necessita estar instalado em ambiente escuro ou com iluminação controlada. O que não é o caso da aplicação proposta neste trabalho.

Existem estudos baseados na detecção de chamas por espectro de luz visível. Nos trabalhos acadêmicos o método de detecção mais difundido é a detecção baseada em visão computacional, com processamento de imagens ou vídeos. A maioria delas utilizando métodos de extração de características como o formato de uma região que possua determinada coloração para que seja feita a classificação do sinal capturado (MUELLER et al., 2013), (TRUE, 2009), (KWON; CHO; HWANG, 2008). Estes métodos de detecção por imagem necessitam de um poder de processamento maior que o microcontrolador dispõe, logo também estariam descartados.

4.4 Detecção por fumaça

Uma forma de detectar incêndios é através de uma detecção indireta, a partir da detecção de fumaça. Visto que tal substância é um dos subprodutos do fogo. De maneira mais específica, a fumaça é composta por combustível não queimado. A fumaça formada pelo fogo é característica de cada material combustível.

Sabe-se que a fumaça é composta por partículas de compostos de carbono, as quais não sofreram combustão. Existem duas técnicas que utilizam características da fumaça para detecção de chamas. Sendo estas:

- fotossensível;
- gás ionizado.

4.4.1 Fotossensível

Sensores deste tipo utilizam um emissor e um receptor. O emissor pode ser um *laser* de baixa potência ou um diodo emissor de luz, em inglês *light emitting diode* (LED). O receptor normalmente é um fotodiodo ou outro sensor baseado no efeito fotoelétrico. De maneira geral o receptor fica localizado em um ângulo fora do campo de emissão direta do emissor. Quando há fumaça, a concentração de partículas dispersas no ar aumenta, o que ocasiona o espalhamento do feixe de luz do emissor para o receptor (HOWSTUFFWORKS, 2014b). O esquema de funcionamento está ilustrado em Figura 4.5.

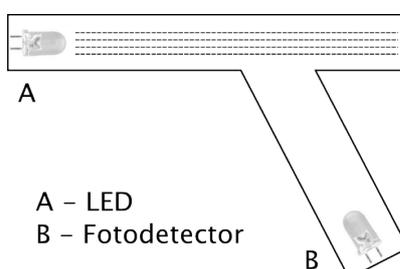


Figura 4.5: Esquema de funcionamento de sensores de fumaça fotossensíveis.

[Fonte: elaboração própria]

Devido ao seu modo de funcionamento, há ressalvas a se considerar no uso deste tipo de detector. Chamas que não produzem fumaça em quantidade relevante tornam sua detecção mais difícil.

Nas pesquisas não foram encontrados sensores deste tipo que atendam ao requisito de tamanho miniaturizado. Fazendo uma análise sobre o ambiente da aplicação proposta no trabalho, esta classe de dispositivos não atende ao requisito de robustez pois partículas de poeira ou areia poderiam levar a falsos positivos.

4.4.2 Gás ionizado

Este tipo de detector possui um projeto conceitualmente mais complexo e se baseia em radiação. Conforme ilustrado em Figura 4.6, há uma câmara de ionização com amostras do isótopo radioativo amerício-241. Este elemento emite radiação de partículas alfa, a qual é ionizada, permitindo o fluxo de cargas elétricas entre duas placas metálicas (USEPA, 2012). Havendo fumaça, mesmo que de partículas minúsculas, este sensor consegue detectar quando há chamas. Pois ocorre uma diminuição no fluxo desta corrente.

O custo de produção deste tipo de sensor é pequeno em níveis industriais. E seu índice de detecções corretas é alto, logo é o tipo de sensor de fumaça mais utilizado no mercado (HOWSTUFFWORKS, 2014a).

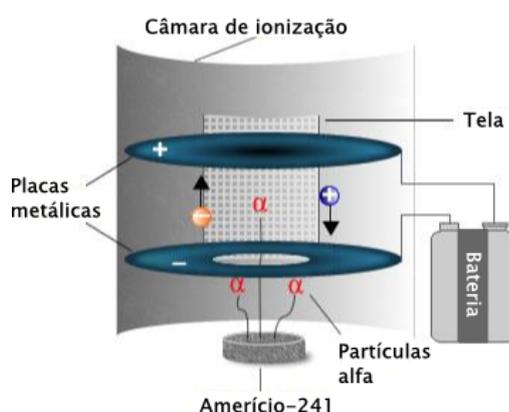


Figura 4.6: Esquema de funcionamento de sensores de fumaça de gás ionizado.

[Fonte: traduzida de (HOWSTUFFWORKS, 2014a)]

Nas pesquisas também não foram encontrados sensores desta classe que atendam ao requisito de tamanho. O outro requisito básico de robustez não é atendido pois também pode ser afetado por partículas suspensas no ambiente da aplicação proposta aqui. Outro problema que o ambiente da aplicação proposta traria a este tipo de sensor e também a sensores fotossensíveis é que o vento e o deslocamento de ar gerado pelas hélices poderiam dificultar que a fumaça tivesse acesso a câmara de ionização.

5 *Desenvolvimento*

Dentre as técnicas de detecção ilustradas no Capítulo 4 deste trabalho, as mais simples de se implementar porém robustas são: detecção por infravermelho e por ultravioleta. Lembrando que o método de detecção por imagens pode ser bastante robusto, ao ponto de ter ótimo custo benefício, mas a plataforma utilizada no quadrotor não possui recursos computacionais suficientes para tal.

Para este trabalho foi escolhido o uso de um único sensor e este foi o termômetro por infravermelho. A escolha deste em vez do detector de ultravioleta se fez devido ao fato do termômetro por infravermelho nos permitir avaliar, *a priori*, a ocorrência de fogo por um domínio mais familiar e fácil de lidar que é a temperatura. Pois o fogo de diferentes combustíveis podem emitir intensidades diferentes de infravermelho e ultravioleta, visto que atingem temperaturas diferentes.

Diante dos requisitos apresentados e análises prévias mostradas no Capítulo 4, o MLX90614 da Melexis foi o sensor escolhido. Daqui em diante referências como “o dispositivo” ou “o sensor” ou “o detector” serão feitas ao termômetro.

5.1 **Considerações sobre o sensor escolhido**

O MLX90614 é composto basicamente por dois circuitos integrados, ambos desenvolvidos e produzidos também pela Melexis, sendo estes:

- o MLX81101, uma pilha termoeétrica, estimulada por infravermelho;
- o MLX90302, um processador de sinais analógicos.

O sensor é capaz de aferir temperaturas de -70°C até 380°C e possui resolução de $0,02^{\circ}\text{C}$. Devido ao seu alcance de temperaturas ser alto ele é, em tese, capaz de detectar focos de incêndios.

O dispositivo possui um filtro óptico passa ondas longas integrado ao encapsulamento. Este filtro elimina o fluxo de infravermelho visível e infravermelho curto, com a finalidade de reduzir a interferência do ambiente e da luz solar. A faixa de comprimentos de onda de infravermelho que passam pelo filtro é de $5,5 \mu\text{m}$ até $14 \mu\text{m}$.

5.1.1 Esquema elétrico da placa de prototipação do sensor

Durante o momento de pesquisa para compras do sensor foi encontrado uma *breakout board* do MLX90614. Decidimos comprá-la ao invés de adquirir somente o sensor pois facilitaria o processo de desenvolvimento.

A placa de prototipação mantém a possibilidade de uso do sensor tanto via serial pelo barramento SMBUS ou por largura de pulso. Foi definido que a utilização da saída por SMBUS é a melhor opção, pois diminui o erro acumulado na demodulação do sinal caso fosse enviado por largura de pulso, além do barramento ser parcialmente compatível com o barramento I²C (do inglês *Inter-Integrated Circuit*) suportado pela plataforma da STM32F4Discovery utilizada nos quadrotoros.

O barramento SMBUS é compatível com o barramento I²C sob certas condições (INTEGRATED, 2014). Dentre elas a mais importante é a temporização dos dispositivos, os quais devem obter frequência de *clock* de no mínimo 10 kHz e máximo de 100 kHz, através da linha SCL (do inglês *Serial Clock*). Pois somente no barramento SMBUS existe um *timeout* da comunicação de no mínimo 35 mseg em que a linha SCL fica em estado baixo. Outra diferença muito importante são os níveis de tensão. No barramento SMBUS o nível lógico alto é de 2,1 V e nível lógico baixo é de 0,8 V. Já no I²C o nível lógico alto é de $0,7 \times V_{DD}$ e o nível lógico baixo é de $0,3 \times V_{DD}$.

A Figura 5.1 ilustra o esquema elétrico da *breakout board*. Quando a placa estiver conectada sozinha no barramento SMBUS, os resistores de *pull-up*, R1 e R2, nas linhas de SCL (linha de *clock* da comunicação serial) e SDA (linha de dados da comunicação serial) indicados no esquema elétrico do dispositivo devem ser mantidos. Caso esteja conectada em um barramento que já tenha os resistores de *pull-up* é necessário retirar os existentes da *breakout board*. O capacitor C1 é somente um capacitor de desacoplamento, funcionando como um filtro de ruídos de alta frequência. O resistor R3 se faz necessário para utilização do LED indicador de alimentação. A variação do sensor disponibilizada com a placa de prototipação é a versão MLX90614ESF-AAA-000-TU. As características mais relevantes desta variante é que ela requer uma alimentação de 5V e possui uma única zona de detecção de infravermelho.

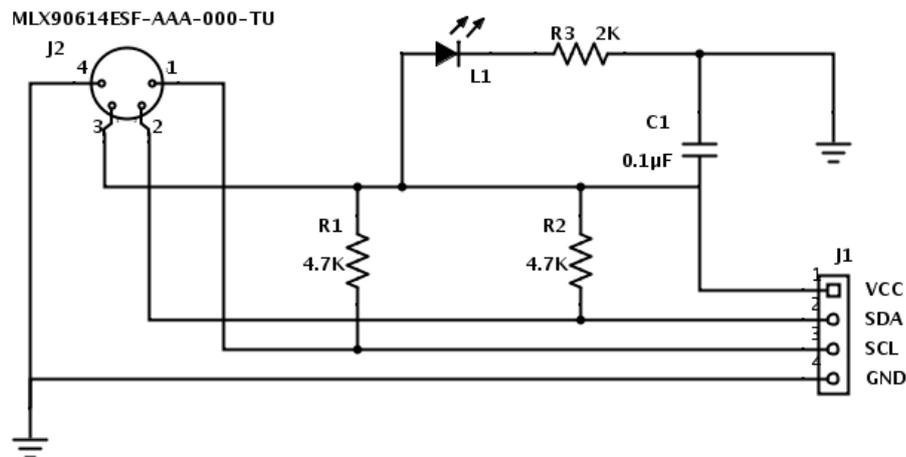


Figura 5.1: Esquema elétrico da *breakout board* do sensor MLX90614.

[Fonte: elaboração própria]

O termômetro funciona captando o infravermelho que incide sobre ele e realiza os cálculos para aferir a temperatura. Em aspectos práticos ele tira uma média da temperatura de todos os objetos que estão em seu campo de visão. Isto é um ponto importante a se levar em consideração pois se a fonte de calor estiver pequena em relação ao tamanho do campo de visão do sensor, as leituras obtidas não irão refletir a real temperatura da fonte de calor. O ângulo de visão de termômetro tem abertura por volta de 120° .

5.1.2 Funcionamento interno

Como mencionado previamente, o MLX90614 é composto basicamente por uma pilha termoeétrica, indicada na Figura 5.2 pelo bloco do componente 81101, além do processador de sinais 90302.

A saída da pilha termoeétrica é amplificada por um amplificador de ganho programável. Após esta etapa, o sinal analógico é convertido para digital por um modulador delta-sigma (INSTRUMENTS, 2014). Logo então, o sinal já digitalizado é processado por um DSP (do inglês *Digital Signal Processor*) para então ser entregue em largura de pulso ou serial pelo barramento SMBUS. Todo o funcionamento do termômetro e de seus componentes é regido por uma máquina de estados que funciona de acordo com a configuração realizada no termômetro.

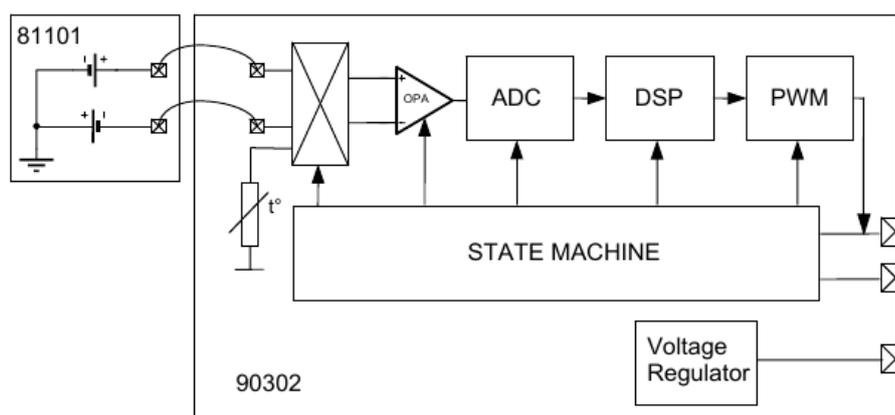


Figura 5.2: Diagrama de blocos do MLX90614.

[Fonte: reproduzido de (MELEXIS, 2013)]

5.2 Testes isolados do sensor

Para fim de testes isolados de robustez na detecção e qualidade do sensor foram realizados determinados experimentos utilizando um *firmware* para Arduino baseado no código disponível em (GITHUB, 2014), pois este código utiliza uma biblioteca de I²C compatível com o MLX90614. Para todos os testes foi utilizada uma taxa de 10 leituras por segundo. O código modificado do *driver* do MLX90614 está no Apêndice A. As conexões da placa de prototipação com o Arduino UNO estão na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Tabela de conexões entre o placa de prototipação e o Arduino UNO.

[Fonte: elaboração própria]

Conector <i>breakout</i>	Conector Arduino UNO
GND	GND
VCC	5V
SCL	A5
SDA	A4

Para efeitos de base de comparação os testes que tinham como métrica a observação do valor final da detecção, foi utilizado um termômetro de infravermelho da Fluke modelo 62 Mini.

Segue a relação de testes executados, todos com a finalidade de caracterizar o MLX90614:

- interferência de fonte artificial de infravermelho, a descrição deste teste está na Tabela 5.2;
- interferência de luz solar, a descrição deste teste está na Tabela 5.3;

- fogos de diferentes combustíveis:
 - carvão vegetal, a descrição deste teste está na Tabela 5.4;
 - gás butano, a descrição deste teste está na Tabela 5.5;
- teste de campo de visão:
 - distâncias diferentes, a descrição deste teste está na Tabela 5.6;
 - ângulo de visão, a descrição deste teste está na Tabela 5.7;
- teste de leitura de corpos escuros, a descrição do teste está na Tabela 5.8.

Tabela 5.2: Teste de interferência de fonte artificial de infravermelho.

[Fonte: elaboração própria]

Objetivo	Testar a eficiência do filtro óptico presente no termômetro.
Descrição	Neste teste foi utilizado um LED de infravermelho curto como fonte artificial, comumente utilizado em aparelhos de controle remoto.
Métricas	Medição das variações na temperatura aferida pelo sensor.
Cenário do experimento	Foi colocado um aparelho de controle remoto de televisão apontando diretamente para a lente do sensor. Com distância de 5 cm do sensor. Aproximadamente nos instantes $seg=[10, 20]$ e $seg=[30, 40]$ o LED do controle remoto ficou acionado constantemente.

Pelo teste de interferência de fonte artificial de infravermelho descrito na Tabela 5.2, cujo gráfico vide Figura 5.3, nota-se que as leituras apresentaram variações de pouco mais de 0.3°C . Mesmo quando o LED estava acionado. Logo, é possível concluir que o sensor filtra com boa eficiência os raios de infravermelho curto.

Tabela 5.3: Teste de interferência de luz solar.

[Fonte: elaboração própria]

Objetivo	Testar a eficiência do filtro óptico presente no termômetro.
Descrição	Neste teste o sensor foi apontado para o sol.
Métricas	Medição das variações na temperatura aferida pelo sensor.
Cenário do experimento	O sensor foi direcionado para o sol durante uma manhã ensolarada de poucas nuvens do tipo <i>stratus</i> .

No teste de interferência de luz solar conforme Tabela 5.3, cujo gráfico está disposto na Figura 5.4 demonstra o resultados do teste. As leituras colhidas apresentaram variações de aproximadamente 3°C no intervalo de $seg=[0, 27]$. Neste intervalo houve a passagem de uma nuvem baixa e pouco extensa do tipo *stratus*. No restante do tempo em que a houve céu limpo, a leitura apresentou uma estabilidade maior. O que nos leva a interpretação que as leituras mais baixas foram obtidas não devido a ausência de luz direta do sol e sim pela temperatura da nuvem, visto que ela era baixa e possuía uma extensão mediana.

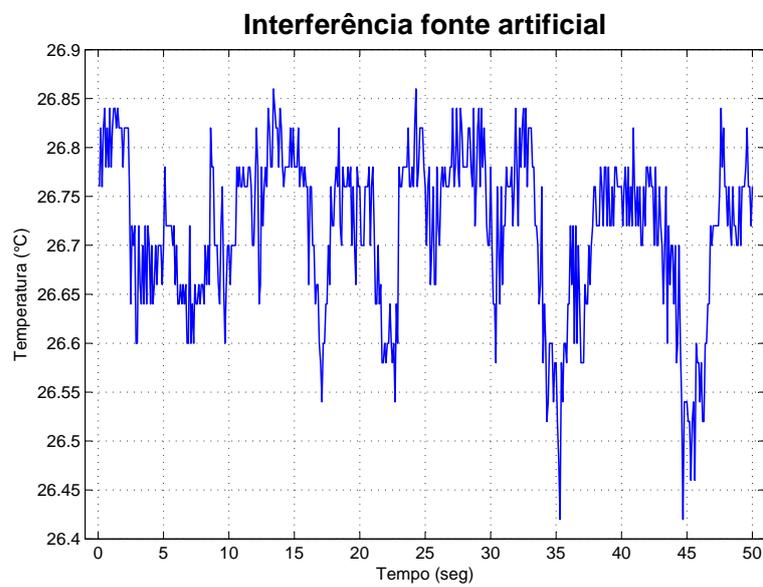


Figura 5.3: Gráfico do teste de interferência de fonte artificial de infravermelho.
[Fonte: elaboração própria]

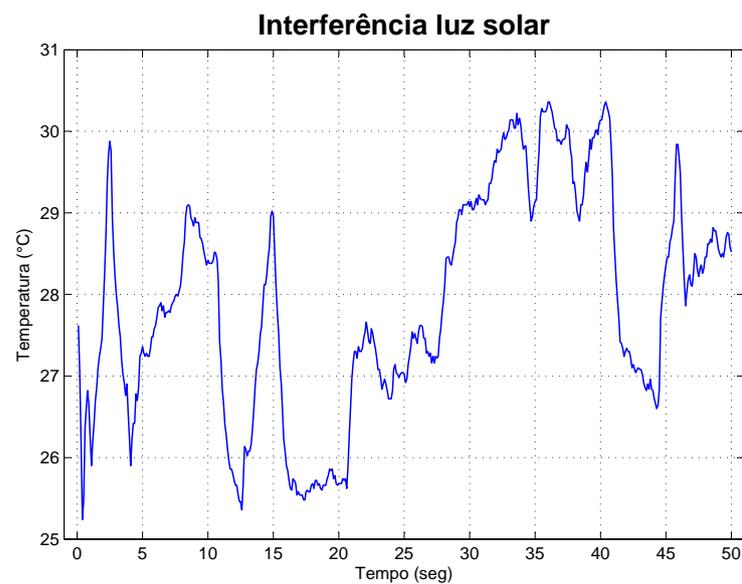


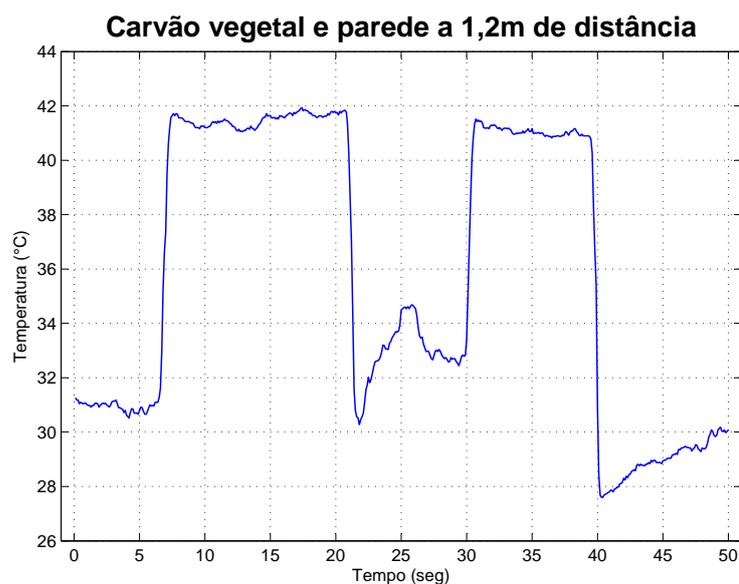
Figura 5.4: Gráfico do teste de interferência da luz solar.
[Fonte: elaboração própria]

Tabela 5.4: Teste com fogo de carvão vegetal.

[Fonte: elaboração própria]

Objetivo	Testar a detecção de fogo de carvão vegetal, visto que esta é a fonte de calor é mais próxima do tipo presente na aplicação proposta neste trabalho.
Descrição	Neste teste foram coletadas leituras do termômetro a partir de brasas de carvão vegetal. Em certos momentos o sensor era apontado para uma parede e depois era direcionado novamente para a fonte de calor.
Métricas	Medição das variações na temperatura aferida pelo sensor.
Cenário do experimento	A fonte de calor estava localizada a 1,2 m e a temperatura aferida pelo termômetro da Fluke era de 260°C. O braseiro é circular e possui diâmetro de 38 cm. A parede estava a uma distância de 1,2 m e sua temperatura medida pelo termômetro da Fluke era de 29°C. Nos intervalos aproximados de seg=[7, 21] e seg=[30, 40] o sensor estava apontado para o braseiro, nos demais instantes estava apontado para a parede.

O gráfico da Figura 5.5 ilustra a série de leituras captadas no experimento com fogo de carvão vegetal descrito na Tabela 5.4. Por este gráfico é possível notar uma grande diferença entre o valor entregue pelo termômetro da Fluke e os valores entregues pelo Melexis. Visto que o Fluke 62 Mini possui ângulo de visão muito menor em comparação ao MLX90614, tornando o Fluke mais preciso em aferições à distância. Porém ainda é possível obter uma diferença de dez graus centígrados entre os instantes em que o sensor deixou de apontar para a parede e passou a apontar para o fogareiro.

**Figura 5.5: Gráfico do teste com carvão vegetal e parede, em que os dois estão a 1,2 m de distância.**

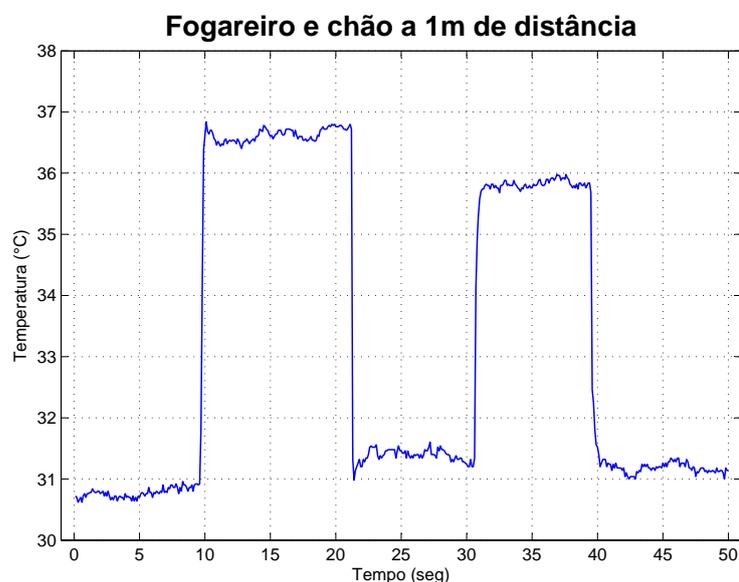
[Fonte: elaboração própria]

Tabela 5.5: Teste com fogo de gás butano.

[Fonte: elaboração própria]

Objetivo	Testar a detecção de fogo de outra fonte além de brasas de carvão vegetal.
Descrição	Neste teste foram coletadas leituras do termômetro a partir de um fogareiro de gás butano. Em certos momentos o sensor foi apontado para o chão.
Métricas	Medição das variações na temperatura aferida pelo sensor.
Cenário do experimento	O fogareiro estava a um 1 m de distância do sensor e sua temperatura aferida pelo termômetro da Fluke era de 170°C. O fogareiro possui formato retangular e 20 cm de comprimento por 5 cm de largura. O sensor estava a uma distância de 1 m do chão e este tinha temperatura de 30°C de acordo com o termômetro da Fluke. Nos intervalos aproximados de $seg=[10, 21]$ e $seg=[30, 40]$ o sensor estava apontado para o fogareiro, nos demais instantes estava apontado para o chão.

O resultado obtido no teste com o fogo de gás butano descrito na Tabela 5.5 encontra-se na Figura 5.6. A partir deste gráfico é possível notar novamente a grande diferença do valor obtido pelo termômetro da Fluke, que foi utilizado neste teste como valor de referência. Também é notável enxergar que a diferença da temperatura chega a casa de aproximadamente 5 graus centígrados nos momentos em que o termômetro transita entre apontar para chão e para o fogareiro.

**Figura 5.6: Gráfico do teste com fogareiro de gás butano e chão, ambos distanciados a 1 m do sensor.**

[Fonte: elaboração própria]

A bateria de testes do campo de visão nos permitiu avaliar o comportamento do termômetro

Tabela 5.6: Bateria de testes de campo de visão, distâncias diferentes.

[Fonte: elaboração própria]

Objetivo	Testar a detecção de calor a partir de distâncias diferentes entre a fonte de calor e o sensor. Este teste tem como foco analisar a variação das detecções em distâncias diferentes.
Descrição	Neste teste foram coletadas leituras do termômetro a partir de um fogareiro de gás butano em diversas distâncias. Em certos momentos o sensor foi apontado para o chão.
Métricas	Medição das variações na temperatura aferida pelo sensor.
Cenário do experimento	Houve quatro baterias de testes em que o fogareiro estava a distâncias de 1,5 m, 2 m, 2,5 m e 3 m do sensor. As temperaturas do fogareiro aferidas pelo termômetro da Fluke foram respectivamente 162°C, 147°C, 117°C e 96°C. O fogareiro possui formato retangular e 20 cm de comprimento por 5 cm de largura. Em toda esta bateria de testes o sensor estava a uma distância de 1 m do chão, cujo tinha temperatura de 30°C aferida pelo Fluke. Nos intervalos aproximados de $seg=[9, 21]$ e $seg=[30, 40]$ o sensor estava apontado para o fogareiro, nos demais instantes estava apontado para o chão.

variando aspectos de detecção em distâncias diferentes e campos de visão com aberturas diferentes. A partir do teste descrito na Tabela 5.6, com o resultado ilustrado na Figura 5.7 provou ser verdadeira a dependência da distância no valor das temperaturas obtidas pelo sensor. A medida que o sensor ganhava distância do fogareiro, a variação de temperaturas aferida pelo sensor quando apontado para o fogo e depois para o chão torna-se menor. Neste teste se manteve a grande diferença entre as temperaturas aferidas pelo termômetro da Fluke e as temperaturas apresentadas pelo MLX90614.

Tabela 5.7: Teste de campo de visão, ângulo de visão.

[Fonte: elaboração própria]

Objetivo	Testar a detecção de calor a partir uma fonte de calor. Este teste tem como foco analisar a variação das detecções com o uso de um redutor de campo de visão e sem o uso deste aparato.
Descrição	Neste teste foram coletadas leituras do termômetro a partir de um braseiro em distância fixa.
Métricas	Medição das variações na temperatura aferida pelo sensor.
Cenário do experimento	Houve duas baterias de testes em que o braseiro estava a 1 m de distância do sensor. Em uma bateria o sensor estava com um redutor do campo de visão e na outra bateria o sensor realizou leituras sem o uso deste redutor, mantendo assim seu campo de visão original. O redutor do campo de visão confeccionado tem formato cilíndrico, conforme Figura 5.8 e possui uma lâmina de papel alumínio com a finalidade de refletir o raios infravermelho que incidam nas paredes internas do redutor direcionando-os para o sensor. A temperatura do braseiro aferida pelo termômetro da Fluke era de 275°C. O braseiro possui formato circular e tem diâmetro de 38 cm.

A Tabela 5.7 descreve os testes específicos do ângulo de visão, cujo gráfico está na Figura 5.9. No intervalo $seg=[10, 20]$ a leitura da série com o redutor apresentou temperaturas menores

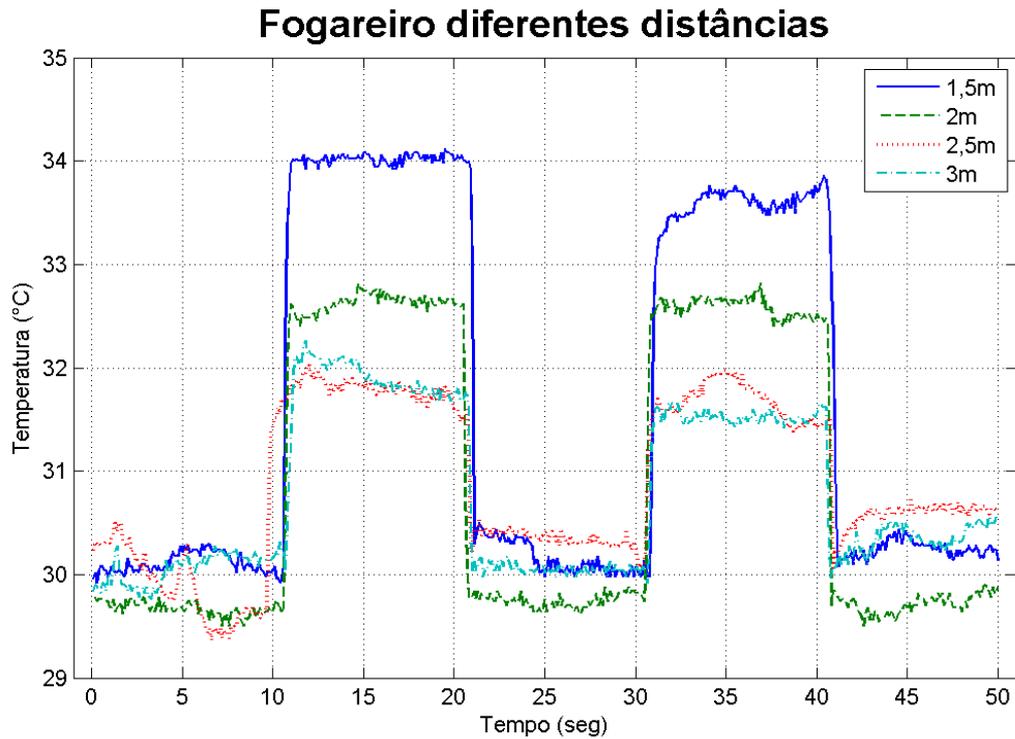


Figura 5.7: Gráfico do teste com fogareiro de gás butano nas distâncias de 1,5 m, 2m, 2,5 m e 3 m. O sensor estava a 1 m de distância do chão.

[Fonte: elaboração própria]

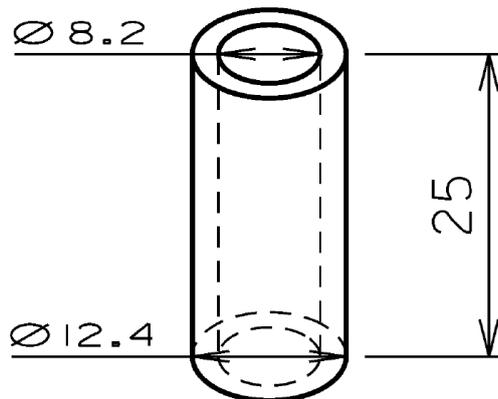


Figura 5.8: Redutor de campo de visão confeccionado. As medidas mostradas estão em mm.

[Fonte: elaboração própria]

em relação as da série sem o redutor, pois neste intervalo houve um desvio não intencional do sensor. Quando o sensor foi reapontado para o braseiro as temperaturas colhidas voltaram para a faixa esperada. A partir de uma análise da série por *boxplot*, vide Figura 5.10, nota-se que a média das detecções com o redutor é maior que da série sem o redutor. Esta situação ocorre quando a fonte de calor é menor que o campo de visão original do sensor.

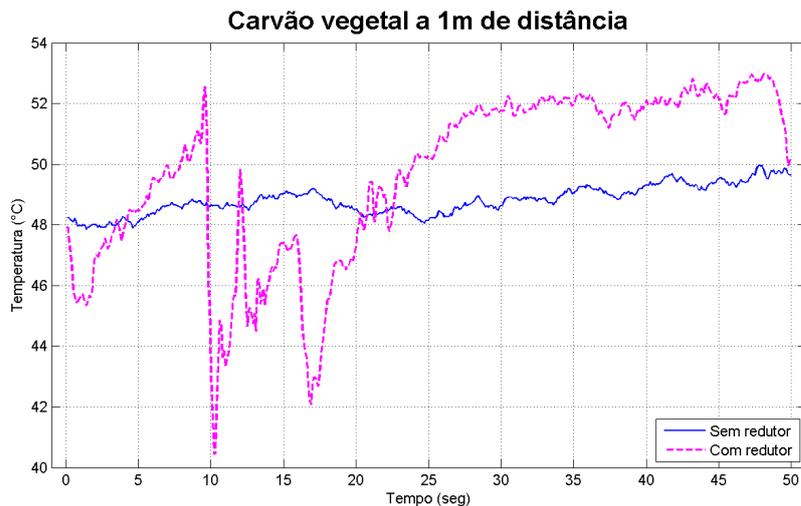


Figura 5.9: Gráfico da bateria de testes com o braseiro com distância de 1 m do termômetro.

[Fonte: elaboração própria]

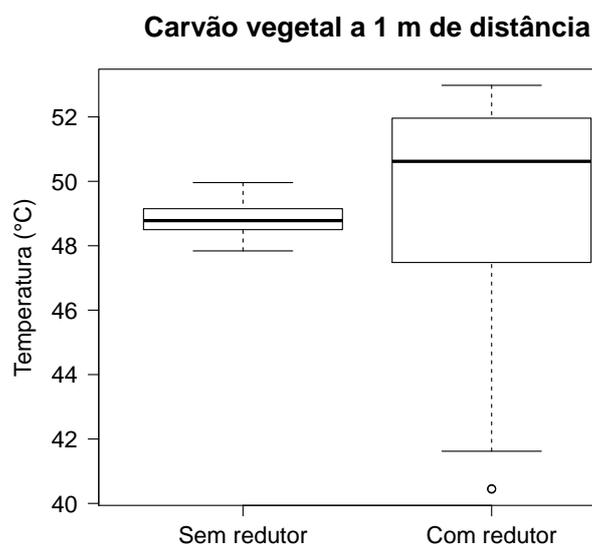


Figura 5.10: Boxplot da bateria de testes com fogareiro de gás butano a 1 m de distância do termômetro.

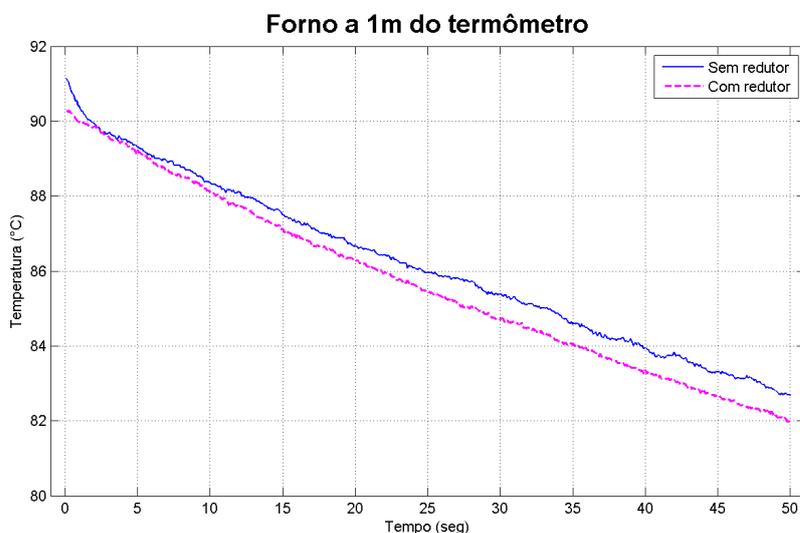
[Fonte: elaboração própria]

Tabela 5.8: Teste de leitura de corpos escuros.

[Fonte: elaboração própria]

Objetivo	Testar a detecção de calor a partir um corpo escuro como fonte de calor. Corpos escuros absorvem uma faixa maior do espectro, irradiando menos frequências.
Descrição	Neste teste foram coletadas leituras do termômetro a partir das paredes de um forno doméstico à gás, as quais são pretas e foscas.
Métricas	Medição das variações na temperatura aferida pelo sensor.
Cenário do experimento	A parede do forno estava localizada a 1 m de distância do sensor. As temperaturas da parede do forno, medida pelo termômetro da Fluke foram de 120°C no instante $\text{seg}=0$, 116°C no instante $\text{seg}=25$ e 113°C no instante $\text{seg}=50$. A parede do forno é uma superfície retangular com medidas de 31 cm de altura por 45 cm de largura.

O experimento de leitura de corpos escuros com temperatura elevada, descrito na Tabela 5.8, nos mostrou que o detector é capaz de enxergar estes alvos sem tantas dificuldades. O gráfico desta bateria de testes está na Figura 5.11. Nota-se neste gráfico que as temperaturas aferidas pelo sensor sem o redutor foram mais altas. Este caso se apresenta quando a fonte de calor é maior que o campo de visão original do MLX90614. Sendo este o caso contrário do teste do ângulo de visão.

**Figura 5.11: Gráfico da bateria de testes de detecção em corpos escuros.**

[Fonte: elaboração própria]

5.3 Arquitetura de *hardware* do quadrotor

Para a incorporação do termômetro por infravermelho no quadrotor, não foi necessária a adição ou modificação da circuitaria existente do projeto proposto em (NASCIMENTO et al.,

2014). A Figura 5.12 ilustra o diagrama de blocos do quadrotor com a adição do termômetro por infravermelho, nota-se que não houveram muitas mudanças ao digrama apresentado na Figura 5.2. Já a Figura 5.13 representa parte do esquema elétrico do quadrotor. Neste esquemático estão dispostos todos os sensores, o XBEE para comunicação e os conectores da placa STM32F4Discovery.

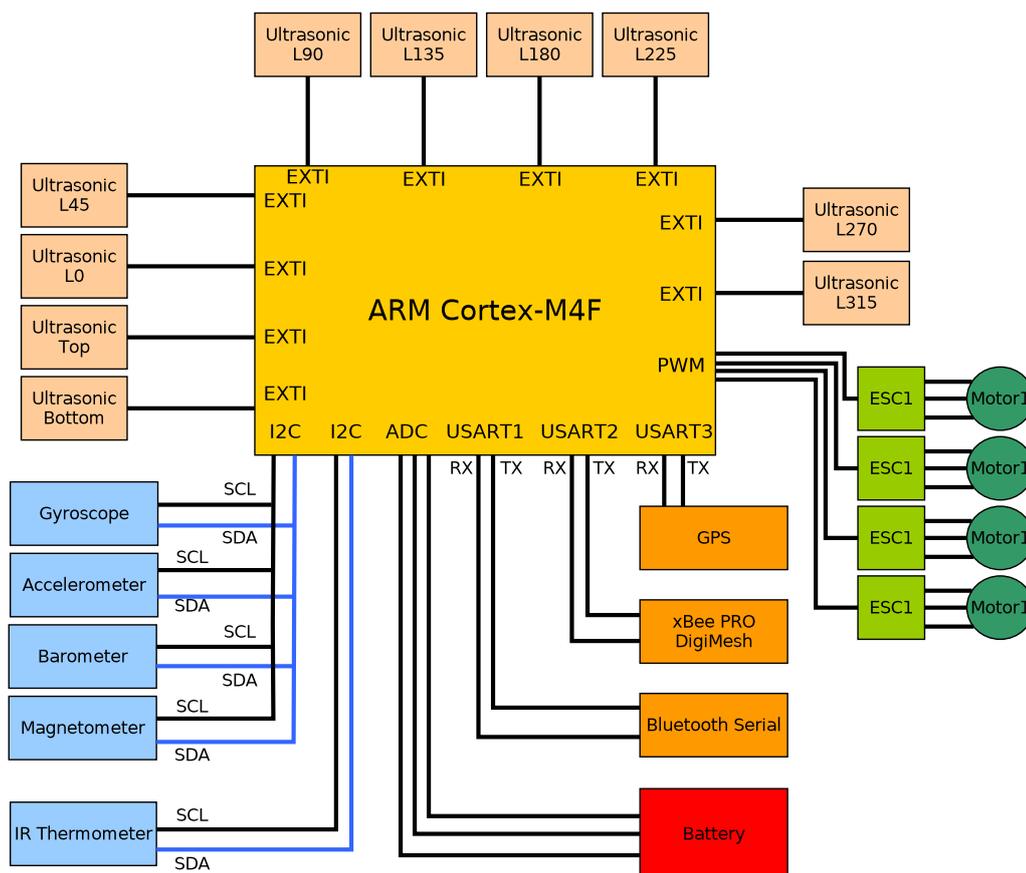


Figura 5.12: Diagrama de blocos do quadrotor com o termômetro por infravermelho. As linhas de força dos dispositivos foram omitidas deste diagrama.

[Fonte: adaptado de (NASCIMENTO et al., 2014)]

5.4 Algoritmo de detecção de fogo proposto

A partir dos resultados dos testes isolados do termômetro, pode-se concluir que por conta do sensor ter resolução muito alta, suas leituras normalmente terão variações entre de um instante n para leituras de instantes anteriores. Sendo assim, somente um algoritmo simplista de estabelecimento de um limiar é susceptível a falsos positivos devido a possíveis picos na leitura.

Para evitar que por algum acaso a partir de uma única leitura com valor muito alto, esta

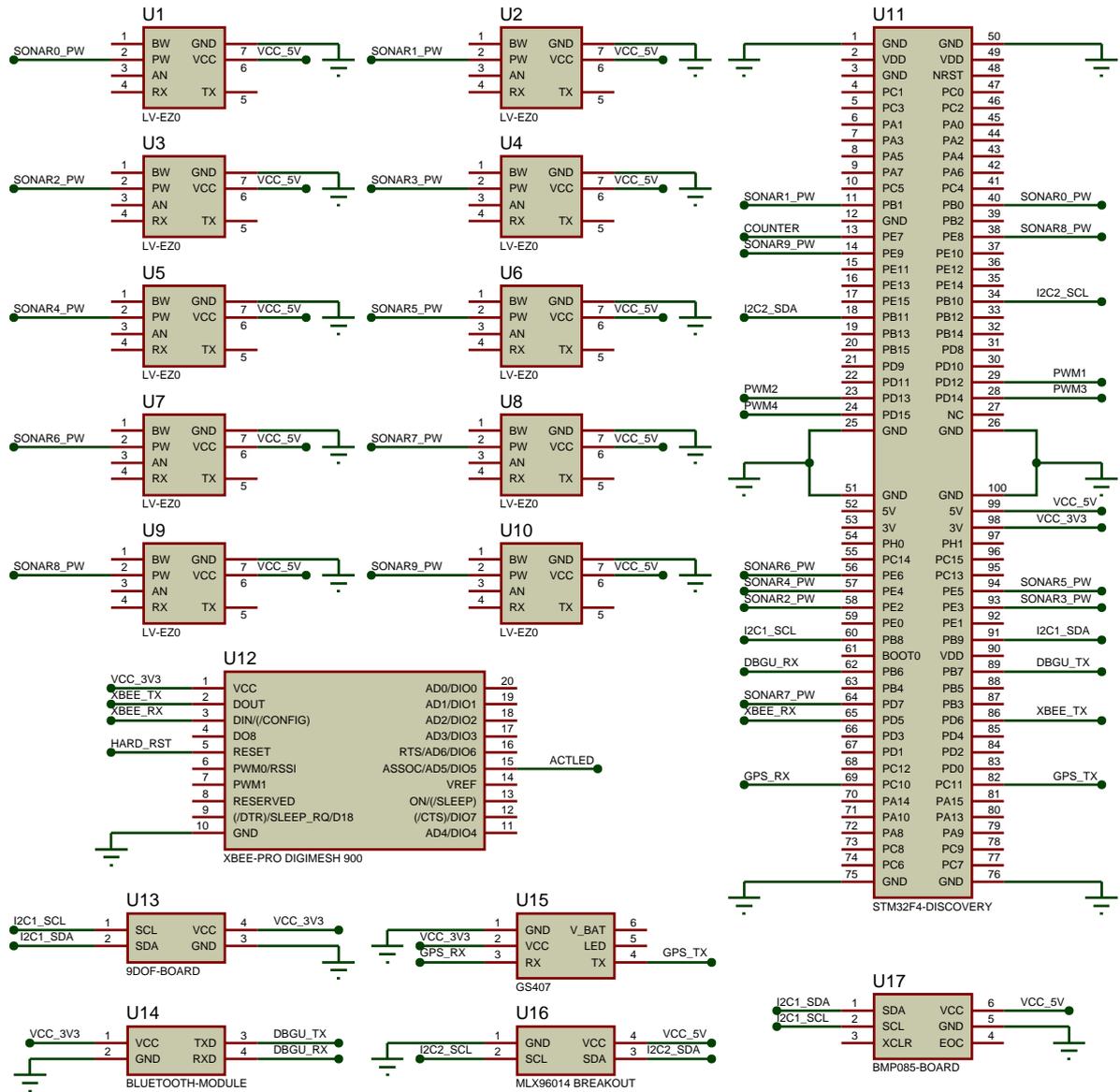


Figura 5.13: Esquema elétrico do quadrotor. Foram omitidos deste esquema os circuitos de alimentação da bateria e circuitaria de ligação com os motores. A placa de prototipação do MLX90614 está representada pelo componente U16.

[Fonte: elaboração própria]

ocorrência gere um falso positivo, o mais prudente a se fazer de imediato é que o sensor realize uma série de leituras e retire uma média destas. Para assim, ser estabelecido um limiar das médias ou outro modelo de classificação de exemplos de ocorrência de corpos quentes.

Porém, a abordagem de somente retirar uma média das leituras para avaliar alguma diferença destas médias pode não ser das melhores estratégias. Pois este tratamento das leituras não estaria levando em consideração um aspecto importante na utilização do sensor: o tamanho relativo da fonte de calor com o campo de visão do MLX90614. Pois para estabelecer um limiar das médias deveria se levar em consideração a dependência da distância que é aferida a temperatura. Quanto mais distante a fonte de calor está do sensor, maior é o campo de visão do termômetro e menor é o tamanho da fonte de calor em comparação com o campo de visão. De acordo com o *datasheet* do produto (MELEXIS, 2013) o ângulo de visão é de aproximadamente 120°, ou seja, o campo de visão pode vir a se tornar demasiadamente grande em relação ao tamanho do corpo alvo devido a distância entre o sensor e o alvo.

Logo, deve-se estabelecer uma função que leve em consideração a variação das leituras e a distância entre a fonte de calor e o termômetro. A variação das leituras é possível de ser obtida por simples diferença das temperaturas atual e anterior. Já a distância entre a fonte de calor e o sensor é possível de se obter no quadrotor a partir do ultrassom. Porém neste trabalho, nos testes desta função a aquisição das distâncias foi manual.

A Equação 5.1 é a fórmula de ganho elaborada neste trabalho. Trata-se de uma função multivariada que tem como variáveis: uma matriz linha com as dez últimas leituras, a distância da medição e a soma da variação das medições. Ela foi elaborada para trabalhar com intervalos de dez leituras, visto que é a frequência de leituras por segundo utilizada no *driver* para Arduino. Ou seja, a função trabalha em cima de leituras adquiridas em um segundo.

Uma característica necessária para a fórmula de ganho é que ela tem que ser descontínua, pois de acordo com as restrições da soma das variações de temperatura ela deve ter comportamento diferente. Este critério foi utilizado com a finalidade de dar maior ganho nas regiões onde a curva da média de temperaturas cresce, sendo estes os pontos de interesse na detecção. Como segue:

- no intervalo $\sum_{n=0}^9 \Delta T_n \leq 0$ a curva da leitura das temperaturas é decrescente, não sendo esta a situação de interesse na detecção. No intervalo $0 < \sum_{n=0}^9 \Delta T_n \leq 1$ a curva das leituras está sofrendo alterações pouco significativas, em certos momentos crescentes e nos demais decrescentes, lembrando que esta é uma oscilação usual nas leituras. Este último intervalo também não é relevante para a detecção de focos de incêndio. Portanto, para estes dois

intervalos foi utilizada somente a média das dez últimas leituras;

- para o intervalo $\sum_{n=0}^9 \Delta T_n > 1$ a curva das temperaturas passa a ter um grau de crescimento relevante, logo a função de ganho adiciona uma parcela com o logaritmo neperiano.

Para que a fórmula não tivesse resultados demasiadamente elevados, ou então que tendessem rapidamente ao infinito dependendo dos valores de entrada, para a parcela aditiva foi escolhida a função $\ln()$. Pois esta função possui um comportamento de crescimento bastante sutil, podendo-se dizer que ela aparenta assintotar algum valor, o que não é verdade pois ela não é limitada e tende ao infinito, com um passo suave.

$$g(T, d, \sum_{n=0}^9 \Delta T_n) = \begin{cases} \bar{T} & ; \text{para } \sum_{n=0}^9 \Delta T_n \leq 1 \\ \bar{T} + \ln(\bar{T} \times d \times \sum_{n=0}^9 \Delta T_n) & ; \text{para } \sum_{n=0}^9 \Delta T_n > 1. \end{cases} \quad (5.1)$$

Onde:

- T representa uma matriz linha com as dez últimas leituras;
- \bar{T} representa a média das dez últimas leituras;
- $\sum_{n=0}^9 \Delta T_n$ representa a soma das diferenças das dez últimas temperaturas lidas do sensor, conforme Equação 5.2;
- d é a distância do sensor para a fonte de calor, em centímetros.

$$\sum_{n=0}^9 \Delta T_n = \sum_{n=0}^9 (T_n - T_{n-1}) \quad (5.2)$$

O Algoritmo 2 demonstra o pseudocódigo da função de ganho das leituras obtidas do MLX90614.

Algoritmo 2: Pseudocódigo da função de ganho das leituras

```

1 início
2   obter  $T$  com 10 leituras;
3   para cada  $T_n$  faça
4      $\Delta T_n = T_n - T_{n-1}$ 
5     obter  $\sum_{n=0}^9 \Delta T_n$ ;
6     calcular  $\bar{T}$ ;
7     obter  $d$  em centímetros;
8     se  $\sum_{n=0}^9 \Delta T_n \leq 1$  então
9       retorna  $\bar{T}$ ;
10    senão
11      retorna  $(\bar{T} + \ln(\bar{T} \times d \times \sum_{n=0}^9 \Delta T_n))$ ;

```

Depois de aplicada a função de ganho, pode-se estabelecer um limiar fixo ou móvel para classificar a ocorrência de foco de incêndio. A descrição deste limiar será apresentada após os testes da função de ganho.

5.4.1 Experimentos da função de ganho desenvolvida

Para fins de testes do algoritmo desenvolvido, serão apresentados nesta secção os testes em que houve transições de alvo entre zonas frias e a fonte de calor. Os experimentos têm a finalidade de testar a performance da função de ganho das leituras do sensor.

Os experimentos do algoritmo apresentados nesta secção foram simulados, ou seja, o tratamento das leituras com a função de ganho não foi realizado diretamente na plataforma do Arduino. Pois a função de ganho tem como uma das entradas a distância em centímetros do sensor para a fonte de calor. Para cada teste, foi medida a distância manualmente entre o sensor e a fonte de calor assim como uma temperatura de referência pelo termômetro 62 Mini da Fluke. As temperaturas que serviram de entrada para os testes da função foram as mesmas leituras dos testes isolados de caracterização do MLX90614.

Segue a relação dos experimentos que passaram pela função de ganho:

- teste com fogo de carvão vegetal a 1,2 m de distância, conforme explanado previamente na Tabela 5.4;

- testes com fogo de gás butano em diversas distâncias, conforme explanado previamente na Tabela 5.6 com a adição de leituras aferidas a distância de 1 m do fogareiro cuja temperatura estava a 170°C de acordo com o termômetro da Fluke.

Observando e analisando os resultados dos experimentos da função de ganho pode-se estabelecer um limiar para a classificação de situações onde há um foco de incêndio ou não. Porém estabelecer um limiar fixo não é a melhor abordagem, pois podem existir situações que o ambiente de busca atinja este limiar sem que haja fogo. Deve-se então estabelecer uma função que descreva este limiar.

5.4.2 Análise dos resultados da função de ganho para elaboração do limiar móvel

O gráfico do teste da função de ganho na série de leituras do fogareiro com carvão vegetal, conforme descrito na Tabela 5.4, está na Figura 5.14. Nele é possível notar que a função de ganho aumentou o valor da leitura em bordas de subida da curva das médias das leituras. Este comportamento foi pensado com o intuito de facilitar a detecção destes momentos de subida, ou seja, situações onde a leitura de temperatura aumenta significativamente, situações estas em que há maior probabilidade de haver a detecção de focos de incêndio.

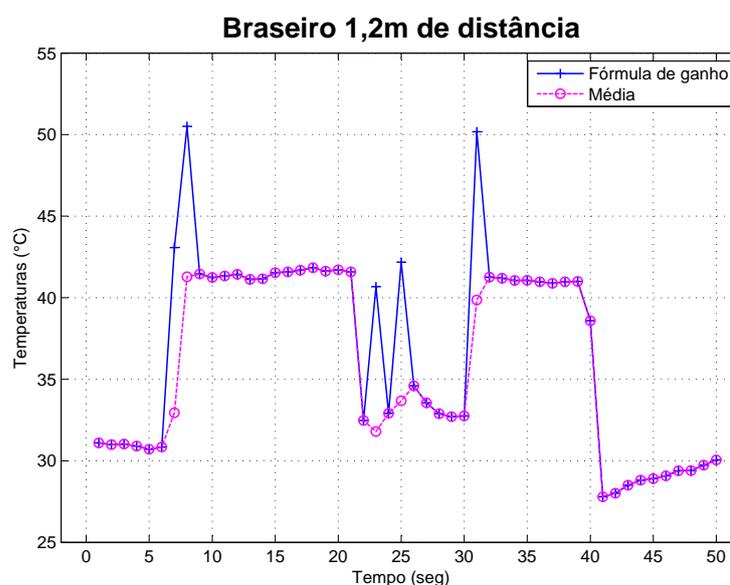


Figura 5.14: Gráfico do teste com o braseiro e com a parede com a aplicação da função de ganho.

[Fonte: elaboração própria]

Os gráficos dispostos nas Figuras 5.15 e 5.16 nos permitem visualizar a aplicação da função de ganho diante da simples extração das médias numa periodicidade de 10 leituras, nas distâncias respectivas de 1 m e 3 m do sensor. Para o caso da leitura a 1 m de distância a aplicação da função contribui para uma detecção mais segura dos momentos em que a temperatura cresce consideravelmente. O ponto do instante $\text{seg}=10$ da curva das médias apresenta um valor próximo de $32,5^{\circ}\text{C}$, já o valor do mesmo instante da curva da função de ganho tem um valor em torno de $42,5^{\circ}\text{C}$. No instante $\text{seg}=31$ a curva das médias tem valor de aproximadamente 33°C e na curva da função de ganho o valor retornado é por volta de $42,3^{\circ}\text{C}$.

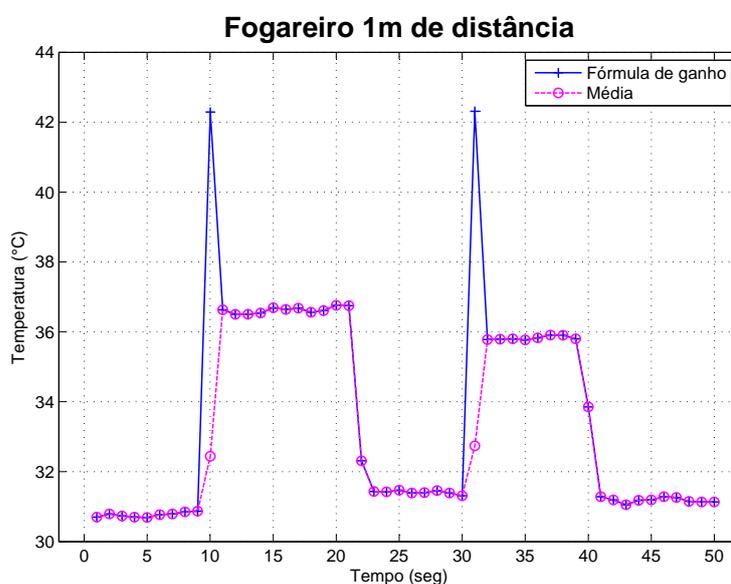


Figura 5.15: Gráfico do teste com o fogareiro e com o chão com a função de ganho aplicada.

[Fonte: elaboração própria]

No caso da leitura a uma distância de 3 m, disposto na Figura 5.16, a função de ganho melhora sensivelmente a diferença das temperaturas com a ocorrência de fogo ou não. Visto que sem a função o estabelecimento de um limiar poderia ser ainda mais arriscado, pois a diferença dos casos em que há fogo e onde não há é muito pequena, tornando a classificação mais difícil. Na Figura 5.17 é possível visualizar a aplicação da função de ganho e sua desenvoltura em diferentes distâncias, conforme teste descrito na Tabela 5.6.

Pelos resultados obtidos nos experimentos da função de ganho, pode-se observar que os picos gerados por ela fazem com que os valores de saída sejam, aproximadamente 30% maiores que a observação anterior. Como é possível observar no gráfico da Figura 5.17, na curva de 1,5 m de distância o valor do instante $\text{seg}=10$ é de 30°C e no instante $\text{seg}=11$ tem valor próximo a

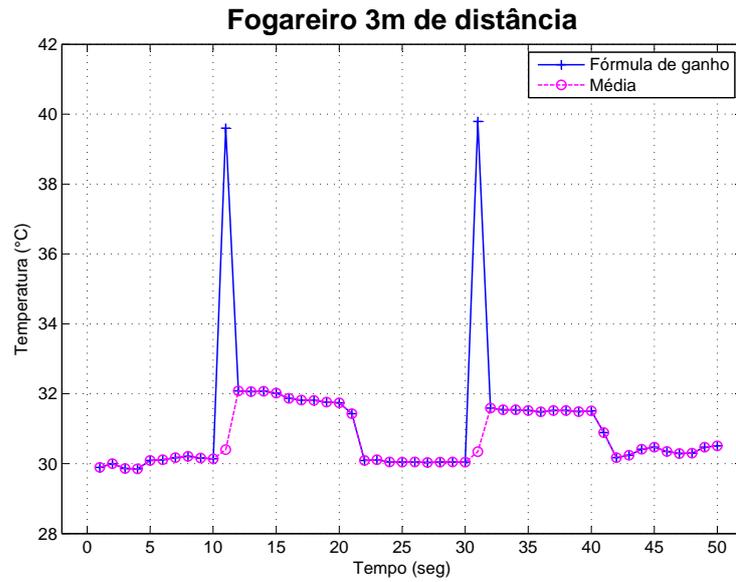


Figura 5.16: Gráfico do teste com o fogareiro e com o chão aplicando a função de ganho.
[Fonte: elaboração própria]

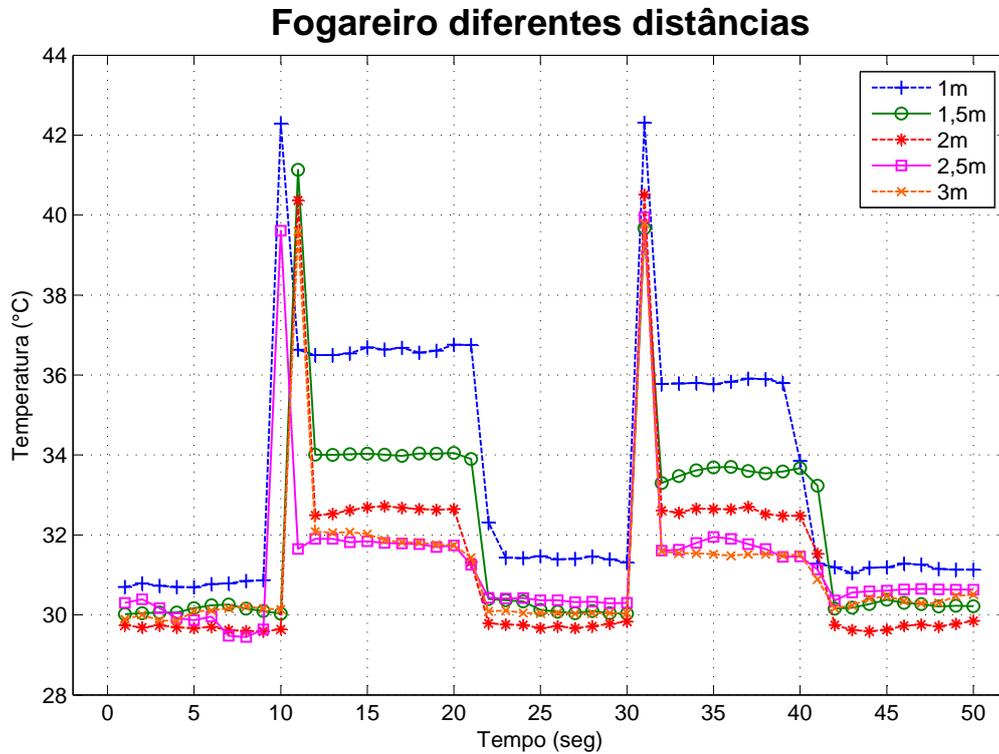


Figura 5.17: Gráfico da bateria de testes com o fogareiro em diversas distâncias, após aplicar a função de ganho.
[Fonte: elaboração própria]

41°C. Este mesmo comportamento ocorre para as outras curvas. Podendo este percentual ser um critério para a ativação da função decisória, a qual está descrita na Equação 5.3.

$$d(g(T_i), g(T_{i-1})) = \begin{cases} \text{TRUE} & ; \text{ caso } g(T_i) \geq (1,3 \times g(T_{i-1})) \\ \text{FALSE} & ; \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad (5.3)$$

Onde:

- $g(T_i)$ é a saída da função de ganho do instante atual i , mais especificamente $g(T_i, d, \sum_{n=0}^9 \Delta T_n)$;
- $g(T_{i-1})$ é a saída da função de ganho do instante anterior $i - 1$, mais especificamente $g(T_{i-1}, d, \sum_{n=0}^9 \Delta T_n)$;

5.5 Considerações para uso do sensor no quadrotor

Uma consideração a ser feita é sobre o ângulo de montagem do termômetro no VANT. Visando à correta obtenção da distância através do sonar inferior e também para facilitar o cálculo das coordenadas do alvo é preferível que o termômetro esteja montado ortogonalmente ao plano do corpo do quadrotor. Assim como é feito com o sonar que é direcionado para baixo.

A utilização de um redutor de campo de visão como o ilustrado na Figura 5.8 apresenta uma melhoria na performance da detecção, pelo menos em tese. Pois para que funcione na prática como esperado deve-se garantir que a parede interna reflita os raios infravermelhos que incidam.

6 *Considerações Finais e Trabalhos Futuros*

Neste trabalho foi proposto um sistema de detecção de focos de incêndio, utilizando VANTs autônomos coordenados por um algoritmo de robótica de enxames, os quais se comportam como RSSF móveis. Foram pesquisados tipos de sensores candidatos, analisadas as características e a viabilidade de cada tipo. Foram realizados testes com o termômetro de infravermelho, visto que este sensor foi o escolhido diante dos critérios apresentados.

Foram feitos experimentos relativos às leituras deste termômetro de infravermelho, simulando situações de detecção de corpos quentes, fogo e interferência. Também foram feitos testes do campo de visão variando aspectos como distância de detecção e tamanho relativo do alvo com o campo de visão fazendo uso de um redutor de campo de visão. Pelo resultados dos testes de interferência foi possível concluir que o termômetro não sofre interferências significativas de fontes de infravermelho como luz solar e fontes artificiais. Em situações que simulam o voo foi possível observar que havia a necessidade de um tratamento das saídas, como uma função que ponderasse as leituras de acordo com a distância da detecção.

Foi proposta uma função de ganho e realizados experimentos desta função a fim de observar seu comportamento. Diante dos resultados colhidos foi possível observar que a função de ganho proposta é capaz de enaltecer as bordas de subida das curvas de temperatura. Possibilitando que o estabelecimento de um limiar fosse factível. Contudo, observou-se a necessidade de um mecanismo de limiar móvel, pois limiares fixos poderiam recair em detecções falhas.

Por questões temporais, não foi possível a conclusão da implementação do *driver* do termômetro para a STM32F4Discovery, possibilitando a realização de testes da função de ganho utilizando o sonar inferior e realização de testes da função de ativação para situações de voo real. Portanto, estas duas atividades se caracterizam dentro do conjunto de trabalhos futuros, as mais importantes para o segmento da pesquisa e desenvolvimento do sistema de detecção de focos de incêndio.

Para melhoria da performance da detecção no quadrotor é interessante a utilização de um

reductor do campo de visão. Pelo fato do VANT ter de sobrevoar a fonte de calor, geralmente a uma altura segura o suficiente para que ele não se danifique, o uso de um reductor de campo de visão pode melhorar significativamente os valores das leituras obtidas.

Este reductor de campo de visão em vez de ser do tipo utilizado neste trabalho pode ser uma lente paralelo-convexa ou uma lente de Fresnel para colimar o feixe de detecção do sensor (ONLINE, 2014). Lentes de Fresnel possuem uma vantagem muito interessante em relação a lentes paralelo-convexas, elas são feitas com menos material para obter a mesma distância focal. Esta vantagem é interessante para diminuir a quantidade de carga que o quadrotor terá de carregar.

Como melhoria do controle dos VANTs há a implementação de estratégias de voo seguro, no que diz respeito a buscas de focos de incêndio. Para uma correta detecção da fonte de calor e para que esta seja segura, o VANT deve permanecer a menor quantidade de tempo possível em cima da fonte de calor. Esta observação é importante pois quando o VANT está em cima da fonte de calor, ocorre a propagação do calor do corpo quente por radiação e também por convecção. O calor excessivo além de atribuir erro nas leituras do sensor, pode danificar os demais componentes.

Uma melhoria para detecção de focos de incêndio que também fica como trabalho futuro é a utilização de um dispositivo Android e de uma placa IOIO (SPARKFUN, 2014) em conjunto com a plataforma do quadrotor. Para que, ao detectar um possível foco de incêndio, o dispositivo Android seja notificado, retire uma foto e a envie para análise de um controlador humano, ou então que realize a detecção de fogo por processamento de imagem a partir da foto tirada.

Referências

- AEROQUAD. *Aero Quad Forum - Aero Quad - The Open Source Quadcopter*. 2014. <<http://aeroquad.com/content.php>>. Acessado em 25 de fevereiro de 2014.
- AKYILDIZ, I. et al. A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, v. 40, n. 8, p. 102–114, Aug 2002. ISSN 0163-6804.
- AMAZON. *Amazon Prime Air*. 2014. <<http://www.amazon.com/b?node=8037720011>>. Acessado em 25 de fevereiro de 2014.
- ARDUCOPTER. *Multirotor UAV*. 2013. <<http://copter.ardupilot.com/>>. Acessado em 25 de fevereiro de 2014.
- CAO, Y. et al. Cooperative mobile robotics: antecedents and directions. In: *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 1, p. 226–234 vol.1.
- CHEN, Y. et al. The research of forest fire monitoring application. In: *Geoinformatics, 2010 18th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5.
- DUARTE, G. A. *Protocolo Híbrido de comunicação em RSSF móvel com coordenação baseada em enxame de robôs com comunicação contínua com a base*. 67 p. Dissertação — Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, 2013.
- ENGELBRECHT, A. P. *Computational intelligence: an introduction*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- GAI, C.; WENG, W.; YUAN, H. Gis-based forest fire risk assessment and mapping. In: *Computational Sciences and Optimization (CSO), 2011 Fourth International Joint Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1240–1244.
- GITHUB. *Página do GitHub com códigos para o MLX90614 em Arduino*. 2014. <<https://github.com/elechouse/MLX90614>>. Acessado em 11 de março de 2014.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of physics extended*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- HONEYWELL. *Visible Light Flame Detector*. 2014. <<https://customer.honeywell.com/en-US/Pages/Product.aspx?cat=HonECC%20Catalog&pid=C7962B1002/U&category=C7962&catpath=1.1.20.2.10&rank=0&v1=Sort.1.Product.Rank&asc=1>>. Acessado em 11 de abril de 2014.
- HONG, L. et al. Research on forest fire monitoring quality variation with wireless sensor node density. In: *Communications and Mobile Computing (CMC), 2010 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 3, p. 339–342.

- HOWSTUFFWORKS. *How Smoke Detectors Work*. 2014. <<http://home.howstuffworks.com/home-improvement/household-safety/fire/smoke1.htm>>. Acessado em 11 de abril de 2014.
- HOWSTUFFWORKS. *Thermometer*. 2014. <<http://science.howstuffworks.com/nature/climate-weather/meteorological-instruments/thermometer-info6.htm>>. Acessado em 11 de maio de 2014.
- HU, H. et al. Design wireless multi-sensor fire detection and alarm system based on arm. In: *Electronic Measurement Instruments, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 3–285–3–288.
- IBAMA, I. B. de Meio Ambiente e dos R. N. R. *Monitoramento - Prevfogo*. 2014. <<http://www.ibama.gov.br/prevfogo/monitoramento>>. Acessado em 15 de fevereiro de 2014.
- INPE, I. N. de P. E. *Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios*. 2012. <<http://www.inpe.br/queimadas/faq.php>>. Acessado em 25 de março de 2014.
- INSTRUMENTS, T. *How delta-sigma ADCs work, Part 1*. 2014. <<http://www.ti.com/lit/an/slyt423/slyt423.pdf>>. Acessado em 06 de julho de 2014.
- INTEGRATED, M. *Comparing the I2C Bus to the SMBUS - Application Note*. 2014. <<http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/476>>. Acessado em 03 de junho de 2014.
- JUNIOR, H. B. C. *Hibridização de protocolos de comunicação para coordenação de enxame de veículos aéreos não tripulados*. 49 f. Monografia — Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2013.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948 vol.4.
- KENNEDY, J. F.; KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. *Swarm intelligence*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2001.
- KWON, O.-H.; CHO, S.-M.; HWANG, S.-M. Design and implementation of fire detection system. In: *Advanced Software Engineering and Its Applications, 2008. ASEA 2008*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 233–236.
- LAPIS. *Datasheet do ML8511*. 2013. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightImaging/ML8511_3-8-13.pdf>. Disponível em.
- LIU, Y. et al. A novel accurate forest fire detection system using wireless sensor networks. In: *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN), 2011 Seventh International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 52–59.
- MELEXIS. *Datasheet do MLX90614*. 2013. <<http://www.melexis.com/Assets/IR-sensor-thermometer-MLX90614-Datasheet-5152.aspx>>. Disponível em.
- MILENKOVIC, A.; OTTO, C.; JOVANOV, E. Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation. *Computer Communications (Special issue: Wireless Sensor Networks: Performance, Reliability, Security, and Beyond)*, v. 29, p. 2521–2533, 2006.

- MUELLER, M. et al. Optical flow estimation for flame detection in videos. *Image Processing, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 7, p. 2786–2797, 2013. ISSN 1057-7149.
- NASCIMENTO, D. A. et al. Design and implementation of autonomous quadrotor units for a swarm of robots application. In: *Computational Intelligence, 2014. Proceedings., The Latin American Congress on*. [S.l.: s.n.], 2014.
- NASCIMENTO, D. do et al. Modeling and design of an autonomous unmanned aerial vehicle quadrotor prototype for applications in swarm of robots. In: *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS), 2012 Brazilian*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 325–328.
- OLIVEIRA, C. R. A. *Construção de modelos simuláveis para avaliação de consumo de energia em redes de sensores sem fio*. 82 p. Dissertação — Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco, 2012.
- OLIVEIRA, S. C.; DUARTE, G. A.; JUNIOR, H. B. C. Unified coordination-communication strategy to swarm controlled mobile wireless sensor network. In: *Computational Intelligence, 2014. Proceedings., The Latin American Congress on*. [S.l.: s.n.], 2014.
- ONLINE, E. B. *Fresnel Lens*. 2014. <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/219816/Fresnel-lens>>. Acessado em 20 de junho de 2014.
- PARROT. *AR.Drone 2.0. Parrot new wi-fi quadricopter - AR.Drone.com - HD Camera - Civil drone - Parrot*. 2013. <<http://ardrone2.parrot.com/>>. Acessado em 25 de fevereiro de 2014.
- PENN. *Construction with Quadrotors*. 2014. <<http://www.upenn.edu/spotlights/quadrotors>>. Acessado em 08 de maio de 2014.
- PENN. *Quadrotors come to TED*. 2014. <<http://www.upenn.edu/spotlights/penn-quadrotors-ted>>. Acessado em 08 de maio de 2014.
- RAYTEK. *Principles Of Non Contact Measurement*. 2014. <http://support.fluke.com/raytek-sales/Download/Asset/IR_THEORY_55514_ENG_REVB_LR.PDF>. Acessado em 10 de março de 2014.
- SILVA, D. et al. On the analysis of a swarm intelligence based coordination model for multiple unmanned aerial vehicles. In: *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS), 2012 Brazilian*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 208–213.
- SILVA, D. M. P. F. *Coordenação de veículos aéreos não tripulados utilizando inteligência de enxame*. Dissertação — Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, 2013.
- SILVA, L. H. S. *Desenvolvimento de uma Rede de Sensores Sem Fio Utilizando ZigBee para Aplicações Diversas*. 80 f. Monografia — Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2011.
- SPARKFUN. *IOIO for Android*. 2014. <<https://www.sparkfun.com/products/retired/10748>>. Acessado em 22 de junho de 2014.

- STIPANICEV, D.; BUGARIC, M.; BODROZIC, L. Integration of forest fire video monitoring system and geographic information system. In: *ELMAR, 2009. ELMAR '09. International Symposium*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 49–52. ISSN 1334-2630.
- SWARMNOID. *Swarmnoid project*. 2006. <<http://www.swarmanoid.org/>>. Acessado em 08 de maio de 2014.
- TAYLOR, J.; MUNSON, K. *Jane's pocket book of remotely piloted vehicles: robot aircraft today*. [S.l.]: Collier Books, 1977.
- TRUE, N. *Computer Vision Based Fire Detection*. 2009. <<http://cseweb.ucsd.edu/classes/wi09/cse190-a/reports/ntrue.pdf>>. Acessado em 11 de abril de 2014.
- USEPA. *Ionization Technology*. 2012. <http://www.epa.gov/radiation/sources/smoke_ion.html>. Acessado em 06 de maio de 2014.
- VARELA, G. et al. Swarm intelligence based approach for real time uav team coordination in search operations. In: *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2011 Third World Congress on*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 365–370.
- WANG, T. et al. Study of the pseudo-color processing for infrared forest-fire image. In: *Future Computer and Communication (ICFCC), 2010 2nd International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 1, p. V1–415–V1–478.
- WIKIPEDIA. *Ultraviolet*. 2014. <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultraviolet#Fire_detection>. Acessado em 14 de maio de 2014.
- WIKIPEDIA. *Unmanned aerial vehicle*. 2014. <<http://en.wikipedia.org/wiki/UAV>>. Acessado em 24 de fevereiro de 2014.
- XPROHELI. *Quadcopters and Multirotors for Aerial Video and Photography*. 2012. <<http://xproheli.com/>>. Acessado em 25 de fevereiro de 2014.
- ZHANG, J. et al. Forest fire detection system based on wireless sensor network. In: *Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 520–523.

APÊNDICE A – Código modificado do driver do MLX96014 para Arduino

Listing A.1: Código do *driver* do MLX96014 modificado

```

1 #include <i2cmaster.h>
2
3 unsigned int readNumber = 0;
4
5 void setup(){
6     Serial.begin(115200);
7     Serial.println("Setup...");
8     i2c_init(); //Inicialização do barramento I2C
9     PORTC = (1 << PORTC4) | (1 << PORTC5); //Habilita pullups
10 }
11
12 void loop(){
13     int dev = 0x5A<<1; //Recebe o endereço deslocado a esquerda para
14     recebimento do bit de escrita/leitura
15     int data_low = 0;
16     int data_high = 0;
17     int pec = 0;
18     double tempFactor = 0.02; // 0.02 graus por LSB;
19     double tempData = 0x0000;;
20     float celcius;
21
22     i2c_start_wait(dev+I2C_WRITE);
23     i2c_write(0x07);
24     i2c_rep_start(dev+I2C_READ);
25     data_low = i2c_readAck(); //Lê 1 byte e manda ack
26     data_high = i2c_readAck(); //Lê 1 byte e manda ack
27     pec = i2c_readNak();
28     i2c_stop();

```

```
29     //Une os bytes mais e menos significativos e processa a temperatura.  
    0 bit mais significativo é uma flag de erro, que quando está setado  
indica que deve ser ignorado o cálculo da temperatura  
30     //Mascara o bit de erro, o desloca à esquerda em 8 bits e adiciona o  
byte menos significativo  
31     tempData = (double)(((data_high & 0x007F) << 8) + data_low);  
32     tempData = (tempData * tempFactor) - 0.01;  
33     celcius = tempData - 273.15;  
34  
35     Serial.print(readNumber);  
36     Serial.print(": ");  
37     Serial.println(celcius);  
38     readNumber++;  
39     delay(100); //Espera 1/10 de segundo  
40 }
```