



SISTEMA DE DETECÇÃO DE INCÊNDIO PARA ESTRUTURA URBANA COM USO INTEGRADO DE MULTISSENSORES EM TECNOLOGIA EMBARCADA

Marcos Guedes do Nascimento¹
Raimundo Aprígio de Menezes Junior²

RESUMO

Os riscos de incêndio nas cidades e a demanda por recursos para segurança contra incêndio (SCI) têm crescido à medida que a população se torna mais numerosa e o adensamento populacional se intensifica. Além disso, os custos com itens de SCI são altos. Mediante esse contexto, a presente pesquisa buscou desenvolver um sistema de detecção de incêndio (SDI) eficaz e de baixo custo para edificações urbanas, baseado em tecnologia embarcada. Para isto, foi estruturado um conjunto de *hardware* e *software* baseado na plataforma Arduino, com sensores de gás, temperatura e chama, e a partir do uso do método de árvore de decisão e submissão de dados experimentais a uma rotina MATLAB, determinou-se uma heurística que identifica precocemente padrões de incêndio. Foi feita uma comparação do tempo resposta do *sprinkler* de ampola vermelha com o do SDI proposto, sendo constatado que este detecta mais rapidamente o incêndio que aquele, executando a detecção 20s após o início do incêndio e apresentando acurácia de 94%.

Palavras-Chave: Arduino. Detecção de Incêndio. Incêndio Urbano. Microcontrolador. Sensores.

1 INTRODUÇÃO

O incêndio é um problema histórico das cidades. Desde os primórdios, trouxeram prejuízos e preocupações, motivando ações para controlá-lo (SILVA, 2014). Vários povos da antiguidade, como gregos e romanos, constituíram vigias e guardas para informar aos cidadãos a ocorrência destes sinistros e realizar ações para combatê-lo. A adoção de tais medidas permaneceu vigorando durante todo período medieval até a chegada da Idade Moderna (PIRENNE, 2014; WARD, 2020).

A partir do Século XVII, a sociedade passou a voltar seu olhar para prevenção, criando leis que regulamentavam materiais construtivos para as cidades, a exemplo da Lei Inglesa de 1667 (EVERSTINE, 1951; MODERN MASONRY, 2016). Com o surgimento da Revolução Industrial, houve forte avanço tecnológico e crescimento populacional que propiciaram o aumento expressivo

¹ Capitão do CBMPB. Coordenador do CIOP/3ª REISP. Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela UFPB – 2022. Aluno do curso de Aperfeiçoamento de Oficiais – 2022.

² Professor da UFPB – Classe Associado – 2012. Mestre em Engenharia Mecânica pela UFPB – 2008. Doutor em Engenharia Mecânica pela UFPB – 2012.

de cidades, acelerando o adensamento urbano e elevando a quantidade de material combustível em um mesmo espaço físico, aumentando a probabilidade de incêndios (NEGRISSELO *et al.*, 2019).

Nos séculos XVIII e XIX foram criadas tecnologias e instituições voltadas à SCI, a exemplo dos *sprinklers*; órgãos para normatização, qual a *National Fire Protection Association – NFPA* e; laboratórios de certificação, como a *FM Approval* (FMA, 2023; GRANT, 2020; RICHARDSON, 2003). Hoje, a SCI é uma área em destaque, mobilizando ações de combate e prevenção por parte de equipes de bombeiros e Sistemas de Segurança Contra Incêndios – SSCI (GRANT, 2020).

Apesar da evolução dos SSCI nas últimas décadas, a ausência ou a falha deles ainda dão causa a muitos incêndios, tal como o incêndio ocorrido no *Grenfell Tower*, em Londres, em 2017 (KIRKPATRICK; HAKIM; GLANZ, 2017), que causou perdas humanas e econômicas, ou como o que aconteceu no Museu Nacional da Quinta da Boa Vista, no Rio de Janeiro, em razão de um curto circuito (FIORAVANTI, 2018) e na Catedral de *Notre-Dame*, devido à deficiência no SSCI, produzindo danos patrimoniais irreparáveis (OELZE, 2020). Tais tragédias mostram que é preciso continuar investindo no desenvolvimento de tecnologias que aprimorem tais sistemas.

Além do refinamento das ações de prevenção e combate, os estudos sobre SCI devem visar a sustentabilidade no uso dos recursos (GOLLNER; KIMBALL; VECCHIARELLI, 2012), pois a pressão sobre eles tem crescido, devido ao exponencial aumento da população em função do tempo, de 1800 a 2021 (ONU, 1995b apud U.S. CENSUS BUREAU, 2004; WORLD DATA LAB, 2023); ao consumo em massa (BAUDRILLARD, 1995; COLOMBO; FAVOTO; CARMO, 2008); e ao adensamento populacional crescente (ONU, 2015; RITCHIE; ROSER, 2018).

Frente à insustentabilidade do modelo de desenvolvimento vigente no contexto mundial, a ONU publicou em seu Relatório “Nosso Futuro Comum”, o termo Desenvolvimento Sustentável, definindo-o como sendo aquele que busca garantir a provisão às necessidades da geração atual sem afetar o atendimento às necessidades das gerações futuras (ONU, 1987). Das ações para viabilizá-lo, destaca-se a promoção de tecnologias para otimizar o uso de recursos e reduzir o consumo.

No Programa das Nações Unidas ao Meio Ambiente (PNUMA) e na Conferência sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio +20), foi trazido o conceito de *Green Economy Initiative – GEI* – (ONU, 2012) em lugar do termo “ecodesenvolvimento” (ONU, 1972; ONU, 1992). A Iniciativa Economia Verde é feita de processos produtivos que trazem estabilidade ambiental e social, fundando ações que favorecem o DS, dentre elas as tecnologias verdes (GREEN IT), que reduzem impactos ambientais, econômicos e sociais (DASTBAZ *et al.*, 2015; COLOMBELLI *et al.*, 2020).

As tecnologias embarcadas podem ser usadas em sistema de objetos para melhorar a usabilidade e a eficiência, e caso otimizem o uso de recursos são ditas GREEN IT. Estudos na área

de SCI têm desenvolvido métodos para monitoramento e detecção precoce com emprego dessas tecnologias para evitar os sinistros ou para reduzir o tempo de combate, caso ocorram, permitindo o controle rápido, diminuindo assim o uso de recursos (SILVA; BRAGANÇA; COELHO, 2014).

Outra questão que merece destaque são os altos custos para adquirir e manter tais sistemas, por isso, em geral, não são adotados em locais onde não são obrigatórios, tais como residências e pequenas empresas. A questão é que no Brasil, de 2018 a 2020, os incêndios residenciais e em comércios representaram mais de 40% do total (MORATO, MOTTA, 2021). Mediante a necessidade de adoção de tecnologias em Sistemas de Detecção de Incêndio – SDI para se atingir sustentabilidade social, econômica e ambiental, e de universalização dos SDI pela redução de valores dos mesmos, surge a seguinte pergunta: seria possível constituir um SDI de baixo custo suficientemente eficaz na detecção de incêndios?

O objetivo desta pesquisa é constituir um SDI eficaz a edificações urbanas, com base em tecnologia embarcada e de baixo custo. Para isso, pretende-se: (i) constituir um SDI composto por microprocessador Arduino, sensores de gases, temperatura e infravermelho; (ii) montar uma heurística capaz de perceber a ocorrência ou não de incêndio; e (iii) realizar ensaios de combustão de MDF e papel em ambiente controlado para ajuste de sensores e dos parâmetros necessários ao funcionamento adequado do algoritmo do SDI. Acredita-se que seja possível desenvolver um SDI eficaz e de baixo custo, com alto grau de assertividade, pelo uso de tecnologias embarcadas.

Este trabalho se iniciou com um breve histórico sobre incêndios urbanos até a preocupação atual em desenvolver tecnologias que reduzam os custos de produção e o uso de recursos em SSCI. Em seguida, foi tratado acerca dos principais SDI convencionais e alternativos, descrevendo-se ao final do tópico, o SDI proposto e conceitos a ele relacionados. Logo após, falou-se da metodologia, que foi dividida em três etapas: montagem do *hardware*, montagem do *software* e testagem do SDI. Por fim, discutiu-se os resultados e fez-se uma discussão sobre o mesmo, terminando com o relato dos principais avanços alcançados e sugestões de próximos passos para a presente pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O fogo é uma reação de combustão devido à oxidação de partículas de combustível pelo comburente ao receber certa quantidade de calor, sendo os principais produtos água e dióxido de carbono, liberando calor e chama. Se houver pouco comburente, comparado à quantidade de combustível a reagir, há produção de monóxido de carbono. Ao se propagar no tempo e espaço, sem controle prévio, o fogo é dito incêndio (CHANG; GOLDSBY, 2013; SEITO *et al.*, 2008).

2.1 SISTEMAS DE DETECÇÃO E ALARME DE INCÊNDIO (SDAI) CONVENCIONAIS

A concentração de fumaça e variações da temperatura e intensidade de chamas estão ligadas ao incêndio, por isso detectores se baseiam na sensibilidade quanto a alguma dessas variáveis. O SDAI é parte do SSCI e tem como funções: monitorar variação de uma propriedade por meio de heurística que associe cada conjunto de valores a uma situação predefinida; detectar a ocorrência ou não de incêndio a depender da variável medida ultrapassar ou não do valor de corte; e controlar o sinistro por ativação de bombas e *sprinklers* e transmissão de dados à execução de protocolos.

Os itens de SSCI disponíveis são classificados em passivos e ativos. São passivos os itens que não têm ação direta no combate, mas reduzem a velocidade de propagação do fogo, tal como a compartimentação e o aumento de resistência de estruturas (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO *et al.*, 2019; SEITO *et al.*, 2008). Já os itens de proteção ativa agem direto no combate, impedindo a propagação, a exemplo de extintores, chuveiros automáticos, alarmes e detectores.

Os SDAI possuem como elementos: central de alarme, sinalizador audiovisual, acionador e detector automáticos e acionadores manuais. A central coleta dados dos detectores e, se confirmar o incêndio, ativa os sinalizadores. Já os acionadores manuais servem aos casos em que se percebe o incêndio antes do acionamento do SDAI e dos *sprinklers*, por isso devem ser instalados mesmo em edificações com sistemas de detecção (ABNT NBR 17.240, 2010; NFPA 72, 2019).

Os principais detectores são: de fumaça, temperatura, multissensoriais e chamas. O detector de fumaça mede variações nas concentrações de gases da combustão, de modo que se excedidos valores limites, o incêndio é admitido e o sensor acionado. Já o detector de temperatura é sensível à variação dela, sendo térmico, quando a variação indicar incêndio, ou termovelocimétrico, quando a rapidez com que a temperatura varia indicá-lo (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO *et al.*, 2019).

O detector multissensorial tem sensores de fumaça e temperatura, enviando os dados à central de incêndio, que recebem tratamento heurístico descrito por algoritmo para nortear a tomada de decisão. Já o detector de chamas é sensível às radiações do espectro da chama, sendo usado em locais amplos ou abertos, onde não há obstáculo para impedir a recepção da radiação, e a fumaça e o calor se dissipam (BRENTANO, 2015; NEGRISSOLO *et al.*, 2019; SEITO *et al.*, 2008).

2.2 TECNOLOGIAS EMBARCADAS EMPREGADAS EM SDI

Apesar dos SDAI tradicionais analisarem temperatura, fumaça e chamas, as estratégias de soluções adotadas, em geral, não dão a capacidade do sistema reagir conforme certas peculiaridades

do ambiente e dos materiais combustíveis. Além disso, a maioria dos SDAI são só reativos, ou seja, só dão a resposta após certo tempo de ter iniciado o sinistro, sem possuir a capacidade de prevê-lo.

Por isso, para refino dos SDI, têm sido usadas tecnologias com inovações que os habilitam a agirem sob uma estratégia de resposta dinâmica, trazendo avanço de desempenho, otimização de recurso, melhor conectividade e inserção de inteligência, tornando-os aprendizes. Em várias áreas tem se usado *hardwares* de prototipagem eletrônica rápida, e dentre os mais usados está a interface Arduino, por não requerer que seus usuários tenham notório saber sobre a eletrônica envolvida.

2.2.1 Sistema de detecção com tecnologias embarcadas

Projetos para monitoramento, detecção e controle de incêndios com tais tecnologias têm usado o Arduino para analisar certas grandezas como parâmetros, cada qual medida por certo sensor. A literatura mostra vários casos práticos para detecção de incêndio, baseando-se em diversas heurísticas e estratégias, e dentre elas pode-se citar o uso da lógica binária (RASHID; RAFID, 2017), até o uso de redes neurais (MUHAMMAD; AHMAD; BAIK, 2018).

No Quênia, foi feito um SDI com Arduino e sensores sob uma Lógica *fuzzy*, com eficiência de 83% (OBANDA, 2017). No Senegal, foi criado um SDI que tinha o Arduino Uno como unidade de controle, com quatro sensores de chamas ligados a ele, e por uso de uma lógica binária instituiu-se uma dinâmica de detecção pela qual só após a sensibilização simultânea dos sensores o Arduino fazia disparar a solenoide que ligava os *sprinklers* (RASHID; RAFID, 2017).

No Brasil, criou-se um SDI com protocolos computacionais com base em IoT, ligado a uma ESP32, levando dados via internet a centrais e usuários (MUENCHEN, 2018). Já na Indonésia e na Malásia foi feito um SDI sob lógica *fuzzy*, com uso do sensor MQ-2 ligado a um Arduino (LABELLAPANSA *et al.*, 2019). Finalmente, na Tanzânia, foi criado um SDI com sensores de fumaça, temperatura e umidade conectados a um Arduino para detectar incêndio, enviando dados a dispositivos móveis via Wi-Fi (LUTAKAMALE; KAIJAGE, 2017). Tais estudos mostram como este tema é usual atualmente, sendo tais detectores já previstos em normas (NFPA 72, 2019).

2.2.2 Sistema de detecção proposto

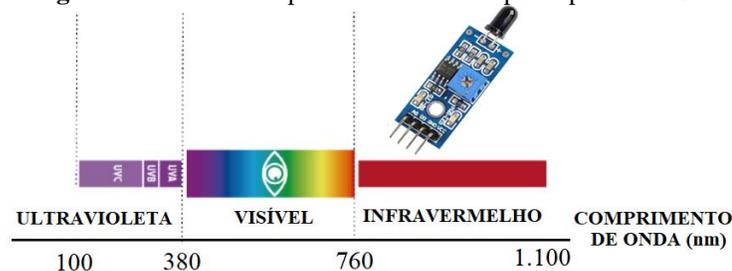
O presente SDI analisa temperatura, gases e chamas, integradamente, sendo sua unidade de controle o Arduino Uno. Fazem papel sensorial, os sensores MQ-2, LM 393 e MLX 90614. Tais dispositivos compõem o *hardware*. Já a programação se baseia na estrutura de árvore de decisão.

2.2.2.1 Conceitos relacionados ao *Hardware*

Arduino Uno – É um microcontrolador de alto desempenho e baixo custo, com memória para armazenamento de dados, microprocessador e pinagens de entrada e saída (MARTINS, 2005). O Arduino é o microcontrolador mais difundido, com o maior número de usuários e alto nível de maturação (MENDONÇA; ZELENOVSKY, 2019). O Arduino Uno mostrou ter memória capaz de suportar a programação, por isso foi escolhido. O ANEXO A traz suas principais características.

Sensor LM393 – É sensível à radiação na faixa espectral do infravermelho, detectando fontes de calor, inclusive radiações emitidas pelas chamas. Na presença delas, o pino digital indica estado 0, e na ausência, estado 1. O valor limite desses estados são tratados pelo potenciômetro que regula a saída digital (MOTOROLA, 1996). O sensor encontra-se representado na Figura 1 e o ANEXO B mostra as principais características pertinentes ao sensor de chamas LM 393.

Figura 1: Faixa de comprimento de onda captado pelo LM 393



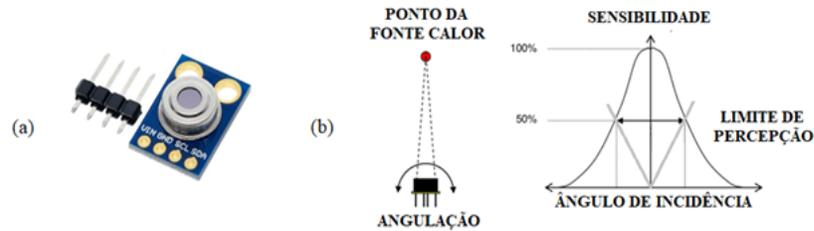
Fonte: Elaboração própria do autor, 2023.

Sensor de Gases MQ-2 – Mede a concentração de fumaça, hidrocarbonetos e álcoois, como GLP e butano, com ótima sensibilidade. Funciona com base na atuação de um aquecedor interno junto ao sensor eletroquímico de estanho (SnO_2), de condutividade baixa e constante no contato com o ar. Ao detectar tais gases, varia proporcionalmente à concentração (HANWEI, S/D).

O ANEXO C traz o circuito elétrico do sensor, como as resistências R_s e R_L formam um divisor de tensão, a equação que mostra como a tensão sobre a resistência R_L muda com a variação da condutividade elétrica do estanho e o gráfico da curva característica da razão entre dois pontos da concentração do gás. Já o ANEXO D traz os principais atributos do MQ-2 (HANWEI, S/D).

Sensor de Temperatura MLX 90614 – Trata-se de um termômetro de leitura remota realizada por intermédio de captação da radiação infravermelha (Figura 2a). Com relação à angulação limite para percepção sensorial, para este dispositivo o valor é de 60° . Tanto esta angulação quanto a modificação da sensibilidade do mesmo com a mudança da posição da fonte de calor em relação ao sensor se encontram representadas na Figura 2b (MELEXIS, 2008).

Figura 2: (a) Sensor MLX 90614; (b) ângulo de visão e variação de sensibilidade



Fonte: MELEXIS, 2008.

O ANEXO E apresenta as principais características do sensor de temperatura MLX 90614, que é um sensor que realiza leitura pontual e que, devido a possuir elevada precisão e resolução aprimorada (MELEXIS, 2008), foi escolhido para ser empregado na construção do SDI.

2.2.2.2 Conceitos relacionados ao *Software*

Na construção de um software é preciso situar boas estratégias de soluções ao problema ao qual se pretende dar uma resposta. Uma delas, é a lógica binária, pela qual se admite duas condições bem definida para um evento: se o evento ocorrer, considera-se que o valor lógico é (1), e caso não aconteça, o valor lógico é (0) (SILVA, FINGER, MELO, 2017). Pode-se definir um modelo a partir desta lógica por uma proposição simples, pela análise de uma só variável; ou por uma proposição composta, analisando variáveis que influenciam o evento, e por uma expressão lógica encontrada pelo uso de operações lógicas, a depender do conjunto de valores lógicos das variáveis, estabelecer se o evento ocorre ou não (ALENCAR FILHO, 2017).

Ao criar um modelo para certo evento, pode-se usar uma análise qualitativa ou quantitativa. A primeira é baseada premissas estabelecidas pelo observador fundadas na observação da prática cotidiana, e a partir delas, o pesquisador estabelece se a ocorrência do evento avaliado é confirmada (1) ou negada (0). Já a segunda é baseada em dados numéricos e mensuráveis, obtidos por meio métodos padronizados, tais como questionários e testes experimentais, valendo-se de observações sistemáticas para estabelecimento dos resultados (SILVA, FINGER, MELO, 2017).

No caso particular desta pesquisa, foram constituídos dois modelos para confirmar ou negar a ocorrência do incêndio, sendo o primeiro fundado sob uma expressão lógica construída através de uma análise qualitativa, e a partir dele, foi feito o segundo modelo, sob uma regra estabelecida por intermédio de um processo de aprendizagem computacional, o qual tem sido utilizado nas mais diversas áreas do campo científico para através de um conjunto de ações, identificar padrões dos

dados e analisar o processo em si, constituindo um modelo à relação causal entre dados de entrada e os dados de saída (ALPAYDIN, 2020).

Na aprendizagem de máquina, busca-se compor táticas para dar ao objeto uma linguagem de aprendizagem, para que assimile como agir em cada experiência, segundo distinções feitas no *software* (RUSSELL; NORVIG, 2021). Das estratégias para efetivar tal linguagem, o método de árvore é um dos mais empregados, sendo tal ferramenta capaz de visualizar a estrutura do problema pela análise sistemática das variáveis envolvidas no mesmo (SILVEIRA; BULLOCK, 2017).

A árvore de decisão admite classificar dados, submetendo-os a um filtro que atua a partir de uma série de perguntas, de modo que perguntas seguintes dependem de respostas nos passos anteriores, e ao fim do processamento de dados é possível classificá-los com alto grau de acerto (OKADA; NEVES; SHITSUKA, 2019). Um dos programas usados para analisar variáveis sob o viés deste método é o MATLAB, que é um *software* de alta performance para resolução de problemas matemáticos, a partir de cálculo e análise numérica (VIEIRA; MORAES, 2013).

3. METODOLOGIA

Nesta pesquisa, foi usado o método hipotético-dedutivo, com indagações advindas das insuficiências no uso dos sistemas de detecção de incêndio convencionais e daqueles baseados em tecnologias embarcadas, fundamentando, por intermédio da problemática, hipóteses com expectativas que serão corroboradas ou frustradas, a depender dos resultados obtidos na análise de dados (MARCONI; LAKATOS, 2021; GIL, 2022).

Este trabalho também tem caráter bibliográfico, uma vez que está baseada em produções com credibilidade técnico-científica sobre assuntos de interesse (MARCONI; LAKATOS, 2021; GIL, 2022), além de possuir aspecto quantitativo, tendo em vista que visa resultados quantificáveis, com base em um conjunto de informações que precisam ser mensuradas, para serem plenamente compreendidas. Finalmente, essa pesquisa é essencialmente experimental porque fez uso de experimentos laboratoriais para realizar o levantamento de dados e estabelecer os resultados (MARCONI; LAKATOS, 2021; GIL, 2022).

Os testes do SDI foram feitos nas dependências do Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da Universidade Federal da Paraíba (LABEME – UFPB), sendo o experimento dividido em três etapas: (i) montagem do *hardware* que formará a estrutura do SDI; (ii) construção do *software* responsável pela implementação da heurística; e (iii) instrumentação e definição de métodos a serem adotados para realização da calibragem do SDI e validação de resultados.

3.1 MONTAGEM DO *HARDWARE*

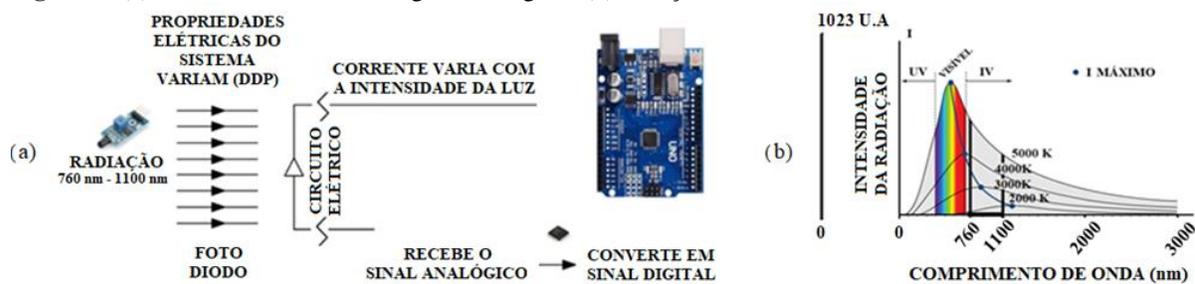
Para sua realização, foram usados os seguintes dispositivos: 01 (um) sensor de temperatura MLX 90614, 01 (um) sensor de gás MQ-2, 01 (um) sensor de chamas LM 393, 01 (uma) luz de *led* de 5 mm de cor vermelha, 01 (uma) placa Arduino Uno R3, 01 (uma) *protoboard* de 400 pontos, 20 (vinte) cabos *jumper* e 01 (um) cabo USB (A/B) – 50 cm. Os sensores e a lâmpada foram ligados a *protoboard*, e esta, foi conectada ao Arduino, segundo o esquema ilustrado no APÊNDICE A.

3.2 CONSTRUÇÃO DO *SOFTWARE*

O *software* foi desenvolvido na plataforma Arduino. De início, a programação foi feita para testes preliminares, fixando-se limites aleatórios de sensibilidade aos sensores, e quando liam acima do limiar fixado, considerava-se incêndio. Foram analisadas as respostas dos sensores à radiação de luz natural e artificial (queima de gasolina, parafina e folha de papel) e notadas incongruências, por leitura incorreta ou interferência, criando-se meios para saná-las.

O sensor de chamas tem um fotodiodo que capta a radiação e gera corrente que varia segundo a intensidade (Figura 3a). Ela chega ao Arduino como sinal analógico, sendo convertido em digital, podendo assumir 1024 valores, por seu sinal ter relação de sinal-entrada de 10 *bits*, que assumem valores 0 ou 1 (2^{10}). Adotou-se uma escala de unidade adimensional (u.a.) variando entre os valores discretos de 0 a 1023, estando o valor 0 associado a menor intensidade e 1023, a maior (Figura 3b).

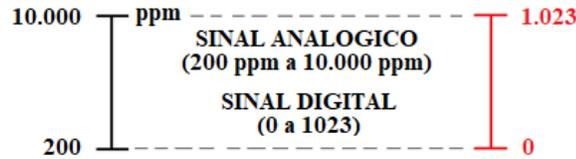
Figura 3: (a) Conversão – sinal analógico em digital; (b) Relação – intensidade luminosa e unidade adimensional



Fonte: Elaboração própria do autor, 2023.

O sensor de gás MQ-2 também tem uma relação de sinal-entrada de 10 *bits*, e o pino digital pode assumir 1024 valores, por isso foi adotada uma escala de unidade adimensional (u.a.) variando de 0 a 1023, com cada valor associado a um valor de concentração gasosa, sendo 0 associado ao menor valor de concentração – 200 ppm – e 1023 ao maior valor de concentração possível de ser detectado pelo sensor, que é 10 000 ppm, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4: Relação – concentração gasosa e unidade adimensional



Fonte: Elaboração própria do autor, 2023.

Para o sensor MLX 90614, não foi preciso estabelecer uma escala paralela, pois possui um processador que, ao ser ligado ao Arduino, converte o sinal digital recebido em sinal analógico, enviando a informação já convertida em valor contínuo dentro da escala original de temperatura.

A modelagem do SDI foi feita sob lógica binária, onde o valor lógico (0) indica ausência de incêndio e (1), a ocorrência. Classificaram-se os valores obtidos por cada sensor por estados binários, sendo 0 o não acionamento do sensor e 1 o indicativo de que o valor medido excedeu o valor de parâmetro, acionando o sensor. A partir das proposições compostas possíveis, definiu-se se houve ou não incêndio. Na Tabela 1, seguem descritos os estados binários de cada sensor.

Tabela 1: Descrição dos estados lógicos dos sensores

VALOR LÓGICO	0	1
SENSOR DE CHAMAS	Intensidade luminosa abaixo do limiar (C)	Intensidade luminosa igual ou acima do nível de corte (\bar{C})
SENSOR DE GÁS	Concentração abaixo do limiar (G)	Concentração igual ou acima do nível de corte (\bar{G})
SENSOR DE TEMPERATURA	Temperatura abaixo do limiar (T)	Temperatura igual ou acima do nível de corte (\bar{T})
INCÊNDIO	Não ocorrência de incêndio (I)	Ocorrência de incêndio (\bar{I})

Fonte: Elaboração própria do autor, 2023.

Estabelecendo-se um modelo qualitativo fundado em premissas advindas de observações cotidianas, foi feita uma tabela-verdade contendo nas três primeiras colunas os valores lógicos dos sensores nos casos possíveis e na última, mostrando quando há incêndio (1) ou não (0), a partir da combinação dos valores lógicos das linhas, só sendo admitida a condição de incêndio, quando não se encontra nenhuma situação possível com estes valores em que não haja fogo (Tabela 2).

Tabela 2: Descrição dos estados lógicos dos sensores

CHAMAS	GASES	TEMPERATURA	INCÊNDIO
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Fonte: Elaboração própria do autor, 2023.

Na primeira e na última linha encontram-se as soluções triviais. Na primeira linha, todos os sensores assumem valor 0, o que significa que as grandezas medidas estão em patamares menores que o nível de corte, deduzindo-se que não há incêndio nesta situação (0). Na oitava linha ocorre o contrário, as grandezas passaram dos patamares de corte, e por isso, indica que há incêndio (1).

Na linha 2 só a temperatura ultrapassa o limite de corte, mas tal comportamento pode ser devido ao aquecimento de um ferro de passar roupa ou de um ferro de solda, mas é improvável que seja devido à ocorrência de incêndio (0), uma vez que os níveis de chama e de gases medidos neste caso, estão abaixo do valor crítico que indica a ocorrência do evento.

Na linha 3, há o indicativo de que o nível de fumaça está acima do limite, mas com valores de temperatura e intensidade de chamas abaixo dos limiares, atributo inerente ao incêndio. Sendo assim, a elevação do nível de gás ou fumaça pode estar associada a fatores outros, tal como uma boca de fogão com o fluxo de gás aberto, mas possivelmente não por motivo de incêndio (0).

O sensor de chamas está abaixo do nível de corte na linha 4, e apesar dos sensores de gases e de temperatura estarem acima do limiar, não quer dizer que haja incêndio nestas condições, pois é possível que neste cenário esteja ocorrendo, por exemplo, o aquecimento de uma ponteira de aparelho de solda, com a liberação de gases ou fumaça, mesmo não havendo incêndio (0).

Na linha 5, a intensidade das chamas está acima do nível de corte, mas não há elevação da temperatura e de concentração de gás ou fumaça a patamares peculiares ao incêndio, logo, o sensor de chamas pode estar detectando uma luz que emite grande quantidade de radiação na faixa do infravermelho, por exemplo, mas é improvável que haja incêndio (0).

Os sensores de chamas e de temperatura, na linha 6, indicam que os valores medidos estão além do limite estabelecido. Nesta situação é provável que haja incêndio, pois variações a níveis elevados de energia térmica e luminosa são inerentes durante este evento. Logo, a configuração pode ser classificada como incêndio (1) e o nível baixo de fumaça pode se justificar ou pelo fato de queima ser lenta, ou devido à combustão liberar pouca fumaça, não estando o ambiente saturado.

Finalmente, na linha 7 a intensidade luminosa e os níveis gasosos estão além dos limites de corte definidos. Contudo, sem elevação da temperatura a valores acima dos limites estabelecidos não é possível caracterizar este conjunto de informações como incêndio (0), pois o aumento desta última grandeza é característica intrínseca à ocorrência do sinistro.

Com todos os dados levantados a partir das possíveis combinações das proposições simples, é possível perceber que só haverá confirmação de incêndio em dois casos dos oito possíveis: na 6ª linha e na 8ª linha (101 ou 111). Utilizando-se de um método de simplificação booleana, pode-se representar a expressão lógica que representa a tabela 9 como sendo:

$$I = C \wedge T \quad (1)$$

O modelo encontrado, apesar de ter certo grau de precisão, por advir de análise qualitativa, pode ser melhorado. Por isso foi feito um modelo quantitativo, motivado por dados experimentais, usando a técnica de *machine learning* de árvore de decisão para obter as regras que faz o SDI responder da maneira mais simples e assertiva se há incêndio (1) ou não (0).

3.3 TESTAGEM DO SDI

3.3.1 Simulador físico

É uma estrutura em alvenaria, com 1m³, em formato cúbico, simulando um compartimento de edifício, guardada a proporção, com uso de material celulósico como combustível. Tem uma abertura frontal (porta) de 0,27m x 0,70m e uma lateral (janela) de 0,33m x 0,33m, ambas fechadas com chapa de zinco. A porta tem corte quadrangular a meia altura, para que a queima seja vista durante os testes. Na parte superior, foi feito um corte na estrutura para posicionar o SDI. Por fim, foi instalada uma tubulação de aço de ½ de diâmetro para fixação do *sprinkler* (APÊNDICE B).

Para dimensionar a estrutura, observou-se as especificações das Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (CBPMESP, 2019). Esta norma adota, para estimar a carga de incêndio, a área equivalente a 1m², por isso o simulador foi feito com estas dimensões. Projetado para queimas de pequenas cargas de incêndio, a altura considerada foi de 1,00 m, que corresponde a um terço do pé direito da maioria das edificações.

3.3.2 Calibragem dos sensores

Esta fase é composta por 06 queimas: 03 delas tendo folha de papel A4 como combustível, e nas demais, MDF. Para medir temperatura e massa, foram usados 02 termômetros analógicos (0° a 350°C; 5°C) e 01 balança digital (5g a 8200g; 0,1g). Em edificações urbanas, em decorrência da predominância de materiais celulósicos, folha de papel A4 e MDF foram escolhidos. A carga de incêndio de cada material foi definida na fase preliminar como sendo a que liberava calor, fumaça e radiação térmica capazes de caracterizar um princípio de incêndio, com temperaturas dentro das indicadas aos eletrônicos empregados. Antes de cada experimento, foi feita uma queima de papel para retirar a umidade, e após isto esperou-se as variáveis retornarem ao nível do ambiente.

Na fase de queima, iniciou-se o ciclo, pondo o combustível no centro do simulador. Antes da queima, foi iniciado o processamento da programação, e caso houvesse alguma incoerência nos valores captados, eram verificadas as conexões, e se isso não resolvesse o problema, o programa era fechado, a programação revista e os testes feitos com os sensores até se resolver a situação. A partir daí, ao se confirmar a coerência dos dados captados, o SDI seguiu captando-os e a combustão era iniciada. A fonte de ignição foi uma pequena estopa umedecida com álcool, acesa com fósforo.

Iniciada a combustão, os dados foram captados a cada cinco segundos. A queima livre se processou até que chegasse à saturação da temperatura, geralmente entre 80°C e 100°C, já que a carga de incêndio não era suficiente para atingir temperaturas maiores, sendo a queima interrompida após atingir seu estágio máximo de desenvolvimento. A temperatura foi monitorada constantemente, pelo uso de um termômetro analógico instalado no teto e na parte inferior do simulador, encerrando-se o ciclo quando a temperatura ambiente era alcançada.

Encerradas as queimas, as informações adquiridas foram armazenadas em formato .txt e importadas do monitor serial ao formato .csv, para acondicionar os dados em Excel. A cada conjunto de dados das queimas de certo material, foram construídos um total de 04 (quatro) gráficos representados em uma figura, com cada queima representada por uma cor.

Os dois primeiros gráficos trazem a variação de concentração de fumaça e intensidade luminosa com o passar do tempo, nesta ordem, com cada grandeza variando de 0 a 1023, em escala unidade adimensional, e o tempo em segundos. O terceiro gráfico traz a variação de temperatura com o tempo, estando a temperatura em graus Celsius e o tempo em segundos. O último gráfico retrata os estados de incêndio (1) e não incêndio (0).

O levantamento da informação sobre estes dois estados ocorreu a partir da observação do desenvolvimento da combustão. A queima só foi entendida como incêndio a partir do momento em que houve a propagação do fogo no tempo e espaço. Enquanto as chamas e a fumaça foram insipientes e a temperatura esteve em patamares baixos e sem variações sucessivas nos valores, seja antes ou após o desenvolvimento pleno do fogo, não foi considerado incêndio.

A partir destes gráficos, foi feita a análise da velocidade da queima em relação a cada material e a responsividade dos sensores em relação ao material combustível, tanto no que se refere ao tempo de resposta quanto ao nível de sensibilidade com que cada sensor recepcionou a informação. A confirmação ou não do incêndio segundo inspeção visual e os dados obtidos nas queimas realizadas foram submetidos a uma rotina no MATLAB, a fim de que após o processamento das informações, pelo uso do método de árvore de decisão, fossem estabelecidas as melhores estratégias de solução para detecção de incêndio e os limites de cortes adequados.

3.3.3 Validação do resultado

Dentre os detectores de incêndio convencionais, o *sprinkler* com líquido vermelho na ampola foi usado como elemento a ser comparado com o SDI que se propõe. Esse *sprinkler* tem a ampola rompida ao atingir a temperatura de 68 °C. No interior do simulador, ele foi conectado a um Sistema de Chuveiro Automático de tubo molhado.

Na fase de validação, foram feitas duas queimas: (i) a preliminar, tendo como combustível papel A4, a fim de retirar a umidade do ambiente e testar o nível de leitura dos sensores; e (ii) a queima usada para realizar o teste de validação dos resultados, sendo utilizados na programação os novos parâmetros adquiridos no processamento da rotina feita no MATLAB.

Baseando-se nesses novos parâmetros, usando o método de árvore de decisão sobre os dados fornecidos pelo SDI e observando as condições de delimitação deste estudo, foi obtido um elevado grau de assertividade. A última queima desta fase foi realizada para se fazer a comparação entre o tempo de resposta ao incêndio dado pelo *sprinkler* e o tempo de resposta à mesma situação, oferecido pelo SDI no caso prático particular estudado nesta pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os experimentos foram divididos em três etapas: fase preliminar, fase de calibração e fase de validação. Foi baseado nisto que se definiram as três partes desta seção.

4.1 FASE PRELIMINAR

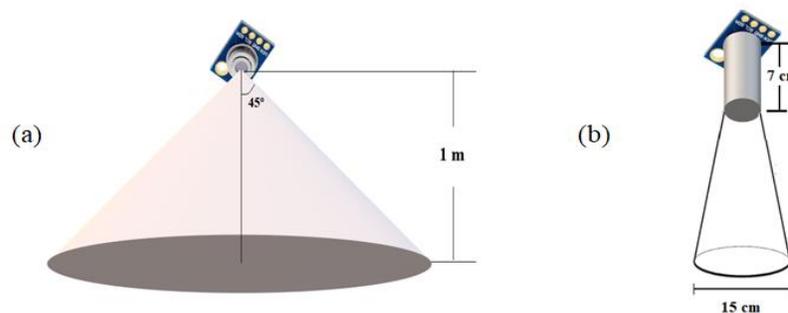
É a fase na qual foram feitos ajustes para tornarem os sensores aptos a captarem os dados com o mínimo de interferência. Os sensores de chamas e de temperatura necessitaram passar por determinadas adaptações, para que fosse possível resolver algumas questões relacionadas à acurácia e à interferência sofrida por eles durante o processo de leitura.

Certas fontes de radiação não advindas do fogo (radiação solar e luz branca artificial), em locais fechados e abertos, interferiam na resposta do sensor de chamas. Para dirimir tais ruídos, foi posto um tubo de plástico envolto por fita isolante preta, para que não passasse radiação pelas paredes laterais, e em uma das extremidades do tubo foi posta fita adesiva vermelha na frente do sensor como filtro às radiações das faixas espectrais do vermelho e infravermelho.

Quanto ao MQ-2, o *datasheet* (HANWEI, S/D) mostra que seu ângulo de visão é 90° , havendo perda de sensibilidade à medida que a fonte de calor se distancia do eixo ortogonal r ao plano do sensor. No limite do ângulo de visão, há perda de 50% da acurácia da medição. A uma distância de 1,0 m da fonte de calor, o MQ-2 aufer a média de temperatura na região circular de área de $3,14 \text{ m}^2$ no plano perpendicular ao eixo r , ocorrendo grande discrepância entre o valor medido e o valor da temperatura no ponto onde a fonte de calor está (Figura 5a).

Para resolver esta inconsistência, foi posto um guia de ondas de 7 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro, feito de alumínio e encoberto por fita de resina de Politetrafluoroetileno – PTFE (fita veda rosca), que é um isolante térmico (WANG; XU; HE, 2017). Esta camada de fita foi disposta com a finalidade de se isolar, termicamente, o metal do ar ambiente, para que esta troca de calor não interferisse na acuidade da leitura realizada pelo sensor (Figura 5b).

Figura 5: (a) Região limite de leitura do MQ-2; (b) ajuste do sensor com tubo de alumínio



Fonte: Elaboração própria do autor, 2023.

Sendo assim, apesar da redução significativa da área de varredura do sensor, o mesmo apresentou sensibilidade ao calor em uma região circular com 15 cm de diâmetro (Figura 5b), o que se mostrou suficiente para que qualquer fonte de energia térmica posta na região de teste fosse detectada, sendo atenuadas as inconsistências das medições, anteriormente apresentadas.

4.2 FASE DE CALIBRAÇÃO

Nesta fase, os dados foram captados pelos sensores em uma situação de incêndio e, junto à expressão lógica para designar quando ele teve início ou não, buscou-se, pelo método de árvore de decisão, constituir os limiares de corte ideais à obtenção de uma estratégia de solução que, por uma heurística simplificada, exibisse alto grau de eficácia. Os valores usados nestes testes responderam com razoabilidade às condições empíricas impostas na fase preliminar, sendo tais valores de corte empregados aos sensores de gás, chamas e temperatura 80 u.a., 500 u.a. e 60°C , nesta ordem.

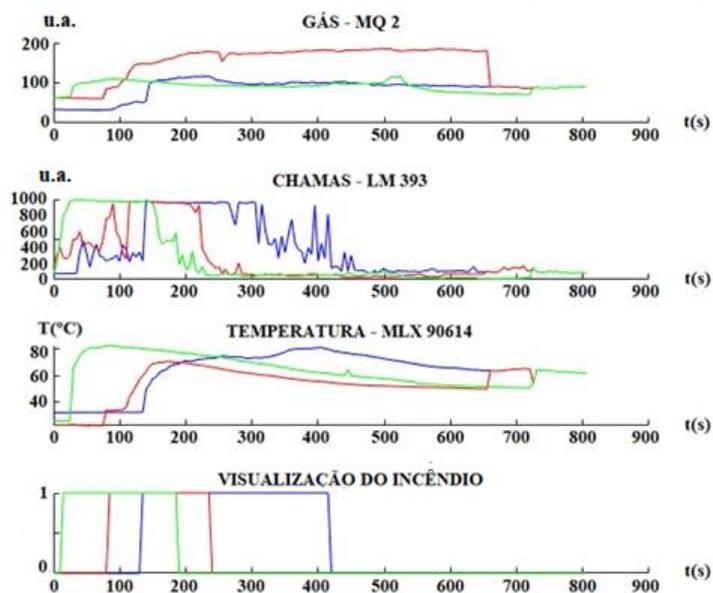
Nesta etapa, foram feitas três queimas de cada combustível (MDF e folha de papel A4), sendo coletados os dados de cada queima e construída uma figura com quatro gráficos alusivos às queimas de cada material, tendo cada gráfico três curvas: verde (1ª queima), azul (2ª queima) e vermelha (3ª queima). Os três primeiros gráficos trazem a variação dos valores medidos pelos sensores com o passar do tempo, e o quarto foi feito a partir da observação do ambiente sinistrado, definindo-se o valor 0 para não percepção visual do incêndio e 1 para a visualização de incêndio.

Os gráficos das Figuras 6 e 7 mostram, nesta ordem, as curvas das queimas com papel e com MDF. Ambas apresentam valores referentes às leituras feitas pelos sensores em função do tempo e à evolução do fogo com o passar do tempo, indo da condição de não incêndio (0) a incêndio (1). Desenvolvido o fogo, o ambiente retornou à condição de não incêndio (0), havendo aumento de concentração gasosa, diminuição de temperatura e ausência de chama. O desenvolvimento do incêndio e a resposta dos sensores apresentaram comportamentos similares nas curvas azul, vermelha e verde, referentes à 1ª, 2ª e 3ª queima, respectivamente.

4.2.1 Resultados das queimas com papel

Nota-se na Figura 6 que antes da combustão houve lapso temporal em cada queima, alusivo ao tempo de preparação do experimento. Após isto, deu-se início à queima, havendo pouca fumaça, por isso foi indicada alteração sutil no MQ-2. Devido à pouca chama no início, o LM 393 pouco se sensibilizou. Mas o sensor menos sensível foi o MLX 90614, sem quase mostrar variação.

Figura 6: Variações de unidades com o tempo – queimas com papel



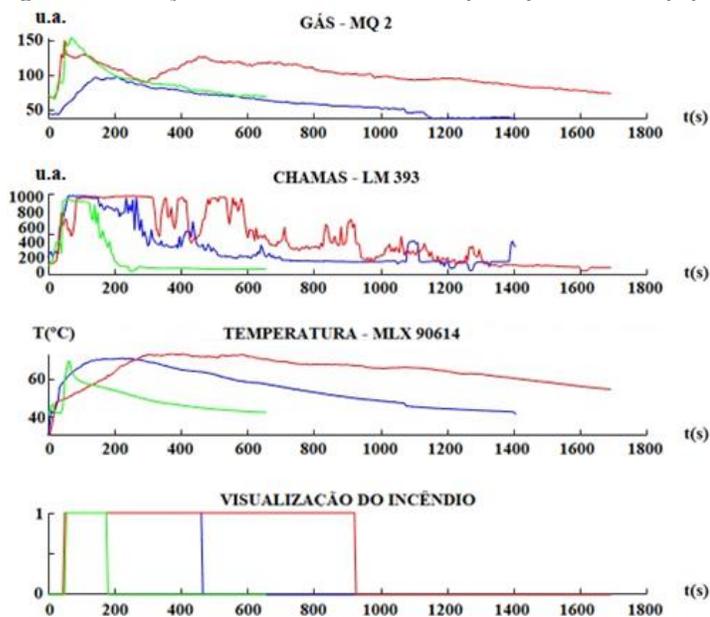
Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Ao analisar a Figura 6, nota-se que na primeira queima (curva azul), após 10s do início do incêndio, o sensor de chamas passa de 800 u.a. e a temperatura do objeto ultrapassa 60 °C, e após 15s o MQ-2 registra valores acima de 900 u.a., sendo o incêndio registrado nesse instante. Na segunda queima (curva vermelha), o LM 393 e o MQ-2, após 10s de iniciado o incêndio, superam os limiares, enquanto o MLX 90614 só passa de 60 °C após 35s. Já na terceira queima (curva verde), os três sensores passaram dos limiares após 10s, sendo a temperatura quem passou mais lentamente do seu limiar. Logo, pode-se dizer que nas queimas de papel A4 o sensor de chamas foi o primeiro a detectar, seguido do sensor de gás e, por fim, do sensor de temperatura.

4.2.2 Resultados das queimas com MDF

Conforme se observa na Figura 7, antes do início da combustão ocorreu um lapso temporal quanto à preparação do experimento. Em seguida, teve início a queima, fase em que houve pouca fumaça e chama, além de baixíssima variação da temperatura.

Figura 7: Variações de unidades com o tempo – queimas com papel



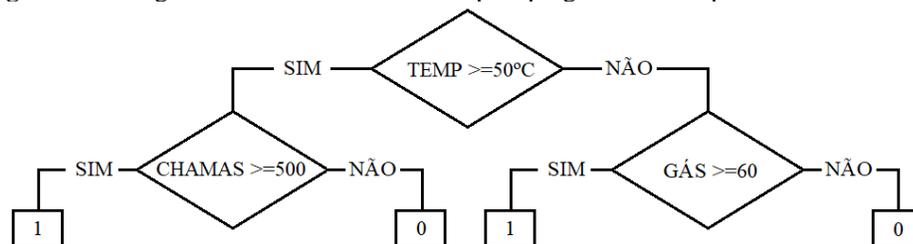
Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

Percebe-se na Figura 7 que se passaram 25s do início da primeira queima (curva azul) sem haver variação expressiva nos níveis das medidas feitas pelos sensores, quando então o incêndio fica caracterizado. Após 20s deste momento, o sensor de chamas passou de 800 u.a. De 30 a 40s do início do incêndio, o sensor de temperatura ultrapassou os 60 °C, e só 40s após isto, foi que o sensor de gases registrou o valor de corte. Na segunda queima (curva vermelha), após 10s do início

do incêndio o MQ-2 havia ultrapassado seu limiar, e com mais 5s os demais sensores passaram dos seus valores limites. Por fim, na terceira queima (curva verde), o sensor de temperatura ultrapassou os 60°C após 10s do incêndio ter iniciado. Passados mais 5s, o LM 393 ultrapassou seu limiar, e passados mais 10s, o MQ-2 superou 80 u.a. Em geral, nas queimas com MDF, o sensor de chamas foi o primeiro a atingir o limiar, seguido do sensor de temperatura e, por fim, do sensor de gases.

Sob a lógica binária para determinação da ocorrência ou não do incêndio, se chegou a um resultado com base na inspeção visual feita por um observador e outro decorrente de cada tupla numérica formada pelos valores medidos pelos sensores em certo instante. Os dados foram submetidos a uma rotina do MATLAB para análise, sendo obtidos novos parâmetros de corte a cada sensor, otimizando o percentual de concordância entre dados de entrada e saída e reduzindo os falsos positivos e falsos negativos. Das estratégias de solução expressas no MATLAB, foi indicada a que desse um alto nível de assertividade ao SDI e tivesse uma lógica de programação simples, feita com base numa árvore de decisão com o mínimo de folhas. Assim foi refeita a programação a partir dos novos pontos de corte, obedecendo a lógica expressa na Figura 8.

Figura 8: Fluxograma da heurística escolhida para programa obtido pelo método da árvore



Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

4.3 FASE DE VALIDAÇÃO

Nesta fase, foram realizadas duas queimas: (i) a primeira delas chamada de preliminar, a qual tinha como objetivos principais reduzir a umidade do ambiente e conferir os parâmetros de calibração dos sensores; e (ii) a segunda foi feita para consumação do teste, tendo nesta queima, já implementada no SDI, a programação feita com base nos parâmetros estabelecidos pelo MATLAB.

Após ter sido verificada a sensibilidade e a precisão dos sensores e confirmado o funcionamento adequado do SDI durante a primeira queima, esperou-se o reestabelecimento das variáveis medidas pelos sensores aos níveis de condições normais para o ambiente, para em seguida ser iniciada a segunda queima. Esta teve como combustíveis pedaços de folhas de papel A4 e de MDF, totalizando 500 gramas de material. A combustão foi feita em presença do SDI e do *sprinkler*, a fim de comparar os tempos de resposta ao incêndio dados por ambos.

Nesta comparação, ficou comprovado que, no caso específico testado, o SDI detectou o incêndio de acordo com os parâmetros esperados, sendo acionado 20 segundos após observado visualmente o início do incêndio. O *sprinkler*, por sua vez, gastou cerca de 1 minuto até atingir a temperatura de 68°C, que é o valor previsto para o rompimento da ampola, mas a mesma não quebrou, embora submetida a temperaturas entre 70°C e 80°C por mais 2 minutos, só rompendo depois de passados mais de 3 minutos desde a percepção visual do início do incêndio.

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente, destacaram-se resultados obtidos na calibração, pautados em características expressas nos gráficos e propriedades físicas e químicas dos materiais combustíveis usados nos testes. O primeiro é que a queima do MDF se mostrou mais lenta que a do papel, pois tem menor superfície de contato com as chamas por ser menos fragmentado (CHANG; GOLDSBY, 2013).

Outra questão importante, foi o fato de que a variação da temperatura em relação ao tempo, em todas as queimas, foi similar às curvas características de incêndio contidas na literatura (COSTA; SILVA, 2006), embora a carga de incêndio só tenha permitido se chegar à temperatura de 90°C, o que mostra que estas curvas independem da quantidade de combustível usado na queima.

Deve-se pontuar ainda que, pela literatura, o detector clássico que primeiro detecta incêndio são os de gases, depois os de chamas, e por fim, os de temperatura (ABINEE, 2013). Contudo, em nosso estudo, o sensor de chamas foi o que primeiro a detectar o incêndio. Ademais, na queima do MDF, o sensor de temperatura detectou o incêndio antes do sensor de gases, já na queima do papel A4, que é mais rápida, o sensor de fumaça detectou o incêndio antes que o sensor de temperatura.

A diferença de respostas ao incêndio dadas pelos sensores do SDI proposto em relação aos detectores convencionais, justifica-se pelo fato de que nestes, a análise de apenas uma variável associada ao incêndio, e mesmo nos detectores multissensoriais, apenas a solução trivial em que o sensor de gás ou de temperatura atinge seu limiar, o incêndio é confirmado. Já no SDI sugerido, é feita uma análise computacional simultânea e integrada de três grandezas relativas ao incêndio, o que reduz a incidência de falsos positivos e falsos negativos quanto ao evento (GAVIRA, 2003).

Há de se considerar também detectores alternativos, baseados em tecnologias embarcadas, como o SDI no qual a identificação de sensibilização simultânea de quatro sensores de chamas resulta na ativação de um solenoide, permitindo a passagem de água para os *sprinklers* (RASHID; RAFID, 2017). A questão é que neste caso, assim como nos detectores tradicionais, há observação do limiar de só uma variável crítica para se definir a ocorrência ou não de incêndio, sendo usada a

superposição de resultados para reduzir a ocorrência de resultados errôneos, de modo que o sistema só é acionado quando os quatro sensores de chamas são sensibilizados simultaneamente.

Encontra-se também na literatura pesquisas que empregam estratégias motivadas por outros princípios lógicos que podem reduzir casos de falsos positivos e falsos negativos, pois trazem uma heurística que classifica, com alto grau de assertividade, não só situações bem definidas de incêndio ou não incêndio, mas intermediárias, as quais exibem características de ambos estados ao mesmo tempo, a exemplo do estudo feito sob uma lógica *fuzzy* e um viés multissensorial, mostrando ótima sensibilidade, conseguindo registrar uma taxa de acerto de 83% e 17% de taxa de alarmes falsos, de modo que em seis casos de teste, o sistema falhou em apenas um deles (OBANDA, 2017).

Comparando-se o resultado obtido por Obanda (2017) com o que foi obtido com o SDI ora proposto, percebe-se que, apesar deste considerar apenas dois estados definidos para cada variável, obteve um percentual menor de avaliações equivocadas – 6% - se comprada a outra pesquisa, tendo empregado o método de árvore de decisão, como estratégias de *machine learning*, para melhorar o grau de assertividade do SDI, que foi de 94%.

Finalmente, pode-se afirmar que o tempo resposta do SDI estudado é excelente, pois quando este tempo foi comparado ao tempo resposta do *sprinkler* de ampola vermelha, cuja temperatura de rompimento para liberação rompimento é de 68° (ABNT NBR 16.400, 2018), notou-se que este só detectou o incêndio após mais de três minutos do início do mesmo e a uma temperatura de mais de 75°C, enquanto que aquele detectou o incêndio após 20s do seu início.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos experimentos realizados e resultados da análise feita pelo MATLAB, pelo uso do método de árvore de decisão sobre os dados fornecidos pelo SDI, ficou evidenciado que, para o caso particular estudado, o sistema foi capaz de identificar o incêndio 20s após seu início ser observado, sendo quase 10 vezes inferior ao tempo passado para o *sprinkler* detectá-lo. Quanto ao nível de assertividade do SDI, a estrutura de árvore forneceu um desempenho de cerca de 94%, significando que a cada 100 análises feitas o resultado de 6 delas contradiz a situação real, mostrando falsos positivos ou falsos negativos dentre estes casos.

Como próximos passos, sugere-se o aumento da quantidade de testes para cada material e do número de materiais testados, para ver a sensibilidade dos sensores frente aos principais produtos da combustão provenientes da queima dos materiais mais comumente usados nas edificações. É importante, ainda, que se procure otimizar a programação pela qual é feita a análise

de dados captados pelos sensores, inclusive com implementação de lógica *fizer* e rede neural, à medida que o processo ficar mais denso e robusto.

Ainda no contexto da constituição do SDI, é preciso trabalhar no sentido de melhorar o circuito com os sensores, de modo a desenvolver uma prototipagem mais apurada e compacta, otimizando os itens eletrônicos. É preciso, ainda, estabelecer um estudo para implementação do IoT, para que, junto ao microcontrolador, os dados obtidos sejam transferidos pelos sensores a uma central de controle e aos usuários do serviço, via *internet*, e por meio de imagens térmicas e visuais se estabeleça o acompanhamento remoto do ambiente em tempo real.

A área em estudo se encontra em plena ascensão na comunidade científica e envolve duas questões intensamente discutidas no seio da sociedade, que são a otimização de recursos para desempenho das atividades diárias e o uso de IoT para automação de processos realizados em dispositivos utilizados no cotidiano. Desse modo, a continuação desta pesquisa é viável e necessária, constituindo-se como importante fomento ao desenvolvimento de produtos eficazes e sustentáveis na área de segurança contra incêndio em edificações urbanas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Grupo setorial de sistema de detecção e alarme de incêndios**. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/externas/54a-legislatura/tragedia-em-santa-maria-rs/reunioes-1/audiencias-publicas/apresentacao-abinee>. Acesso em: 21 jul. 21.

ALENCAR FILHO, E. **Iniciação a Lógica Matemática**. Embu das Artes: Brasil Franchising Participações Ltda, 2017. 203 p.

ALPAYDIN, E. **Introduction to Machine Learning**. 4^a ed. Cambridge: MIT Press, 2020. 712 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17.240 – Sistemas de detecção e alarme de incêndio – Projeto, instalação, comissionamento e manutenção de sistemas de detecção e alarme de incêndio – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 54 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.400 – Chuveiros automáticos para controle e supressão de incêndios — Especificações e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018. 78 p.

ATMEL CORPORATION. **8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash**: Datasheet. 2015. 294 p.

BAUDRILLARD, J. **A sociedade de consumo**. Lisboa: Edições 70, 1995. 213 p.

BRENTANO, Telmo. **A proteção contra incêndios no projeto de edificações**. 3^a ed. Porto Alegre: Gráfica EPECÊ, 2015. 640 p.

- CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química**. 11ª ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013. 1169 p.
- COLOMBELLI, A; GHISSETTI, C.; QUATRARO, F. **Green technologies and firms' market value**: a micro-econometric analysis of European firms. *Industrial and Corporate Change*, v. 29, n. 3, p. 855–875, 2020.
- COLOMBO, L. O. R.; FAVOTO, T. B.; CARMO, S. N. **A evolução da sociedade de consumo**. *Akrópolis*, v. 16, n. 3, p. 143-149, 2008.
- CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO – CBPMESP. **Instrução Técnica nº 14 – Carga de Incêndio nas edificações e áreas de risco**. São Paulo: CBPMESP, 2019. 12 p.
- COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio**. In: Seminário internacional NUTAU 2006: Inovações tecnológicas & sustentabilidade – Núcleo de pesquisa em tecnologia em arquitetura, urbanismo e design. São Paulo: USP, 2006.
- DASTBAZ, M.; PATTINSON, C.; AKHGAR, B. **Green Information Technology: A Sustainable Approach**. 1ª Ed. Burlington: Morgan Kaufmann Books, 2015, 348 p.
- EVERSTINE, C. N. **The Establishment of Legislative Power in Maryland**. *Maryland Law Review*, v. 12, n. 2., Spring, 1951.
- FIORAVANTI, Carlos. **A provável origem das chamas**: Laudo aponta sobrecarga em ar-condicionado e falhas do sistema elétrico como causas do incêndio do Museu Nacional. *Revista Pesquisa Fapesp*, ed. 279, 2019. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2019/05/057_mn_279.pdf. Acesso em: 15 jan. 2023.
- FMAPPROVALS. **HISTORY**: More Than a Century of Technical Integrity. Disponível em: <https://www.cencenelec.eu/about-cen/>. Acesso em: 30 jan. 2023.
- GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-20052003-004345/publico/Gavira1.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7ª ed. Barueri: Editora Atlas, 2022. 208 p.
- GOLLNER, M.; KIMBALL, A.; VECCHIARELLI, T. **Fire Safety Design and Sustainable Buildings**: Challenges and Opportunities Report of a National Symposium. Courtyard Marriott – Magnificent Mile, Chicago, Illinois. National Fire Protection Association, 2012.
- GRANT, C. C. **History of NFPA**. Disponível em: <https://www.nfpa.org/About-NFPA/NFPA-overview/History-of-NFPA>. Acesso em: 22 jan. 2023.
- HANWEI ELETRONICS GROUP CORPORATION. **Technical data MQ-2 gas sensor**. Datasheet. [201-?]. 3 p.

KIRKPATRICK, D. D.; HAKIM, D.; GLANZ, J. Why Grenfell Tower Burned: Regulators Put Cost Before Safety. **The New York Times**, Londres, Inglaterra, 24 jun. 2017. World. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2017/06/24/world/europe/grenfell-tower-london-fire.html>. Acesso em: 29 jan. 2023.

LABELLAPANSA, A. *et al.* **Prototype for early detection of fire hazards using fuzzy logic approach and Arduino microcontroller**. International Journal of Advanced Computer Research, v. 9, n. 44, 2019.

LUTAKAMALE, A. S.; KAIJAGE, S. **Wildfire Monitoring and Detection System Using Wireless Sensor Network: A Case Study of Tanzania**. Wireless Sensor Network, v. 9, p. 274-289, 2017.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação de dados**. 9ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2021.

MARTINS, N. A. **Sistemas Microcontrolados**. São Paulo: Editora Novatec, 2005. 263 p.

MENDONÇA, A.; ZELENOVSKY, R. **Arduíno: Guia avançado para projetos**. Nova Ed. Interciência, 2019. 548 p.

MICROELECTRONIC INTEGRATED SYSTEMS – MELEXIS. **MLX90614 family Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39**. 2007. 40 p.

MODERN MASONRY. **The Great Fire of London: a step change for concrete and masonry**. In: _____. (org), News & Events, Reino Unido, 03 ago. 2016. Disponível em: <https://www.modernmasonry.co.uk/MMA/News-Events/2016/The-Great-Fire-of-London-a-step-change-for-concrete>. Acesso em: 23 fev. 2023.

MORATO, R.; MOTTA, M. Notícias de incêndios estruturais aumentam 43,7% em 2020. **Instituto Sprinkler Brasil**, São Paulo, Brasil, 11 fev. 2021. Notícia. Disponível em: <https://sprinklerbrasil.org.br/imprensa/noticias-de-incendios-estruturais-aumentam-437-em-2020/>. Acesso em: 07 jan. 2023

MOTOROLA. **Low offset voltage dual comparator: LM393, LM393A, LM293, LM2903, LM2903V**. 1996. 6 p.

MUENCHEN, J. D. **Uma proposta de detecção de incêndio utilizando o protocolo MQTT para aplicações IoT**. Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2018.

MUHAMMAD, K.; AHMAD, J.; BAIK, S. W. **Early Fire Detection using Convolutional Neural Networks during Surveillance for Effective Disaster Management**. Neurocomputing, v. 288, p. 30-42, 2018.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 72 – National Fire Alarm and Signaling Code**. EUA: NFPA, 2019.

NEGRISSOLO, W. *et al.* **Fundamentos de segurança contra incêndio em edificações: Proteção ativa e passiva.** FUNDABOM. 1ª ed. São Paulo: FIREK Educação, 2019. 276p.

OBANDA, Z. S. **A Multi-sensor fire detection system using an Arduino Uno microcontroller.** 92 p. Tese (Doutorado em Tecnologia da Informação). Strathmore University, Nairobi, 2017. Disponível em: <https://su-plus.strathmore.edu/server/api/core/bitstreams/c73c6348-99b9-49c7-8325-39ba8ab55d2a/content>. Acesso em: 13 jan. 2023.

OELZE, S. Notre-Dame, um ano após o incêndio. **Deutsche Welle**, Alemanha, 15 abr. 2020. Cultura. Disponível em: <https://p.dw.com/p/3auce>. Acesso em: 15 jan. 2023.

OKADA, H. K. R.; NEVES, A. R. N.; SHITSUKA, R. **Analysis of Decision Tree Induction Algorithms.** Research, Society and Development, v. 8, n. 11, p. 01-15, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento.** Agenda 21. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento.** Rio +20. Documento: o Futuro que queremos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **Declaração de Estocolmo sobre o Meio Ambiente Humano.** In: Anais Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano. Estocolmo, 1972.

_____. **Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Nosso Futuro Comum.** Transmitido à Assembleia Geral da ONU como um anexo ao documento A/42/427 – Desenvolvimento e Cooperação Internacional para o Meio Ambiente, Editora: Oxford University Press, 1987.

_____. **World Population Prospects: The 2014 Revision.** Department of Economic and Social Affairs. New York: United Nations, 2015

PIRENNE, H. **Economic and Social History of Medieval Europe.** Edição Ilustrada. Eastford: Martino Fine Books, 2014. 256 p.

RASHID, R. I.; RAFID, S. M. **An Automated Fire Suppression Mechanism Controlled Using an Arduino.** Tese de Bacharelado do Curso de Ciência em Engenharia Elétrica e Eletrônica da BRAC University. Dhaka, 2017.

RICHARDSON, J. **History of Fire Protection Engineering.** 3ª ed. Bethesda: NFPA, 2003. 293 p.

RITCHIE, H.; ROSE, M. **Urbanization.** Publicado online por Our World In Data, 2018. Disponível em: <https://ourworldindata.org/urbanization#what-share-of-people-will-live-in-urban-areas-in-the-future>. Acesso em: 12 fev. 2023.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach, Global Edition.** 4ª ed. Londres: Pearson Education, 2021. 1170 p.

SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra Incêndios no Brasil**. 1ª ed. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 496 p.

SILVA, F. S. C.; FINGER, M.; MELO, A. C. V. **Lógica para programação**. 2ª ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

SILVA, J. M.; BRAGANÇA, L.; COELHO, A.L. **A Segurança Contra Incêndios em Edifícios e a Sustentabilidade**. In: Workshop on Sustainable Construction and Rehabilitation. Portugal. Guimarães, 2014.

SILVA, V. P. **Segurança Contra Incêndio em Edifícios: Considerações para o Projeto de Arquitetura**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2014. 15 p.

SILVEIRA, G.; BULLOCK, B. **Machine Learning: Introdução à classificação**. São Paulo: Casa do Código, 2017. 637 p.

U.S. CENSUS BUREAU. **Global population profile: 2002**. International Population Reports WP/02. Washington: Government Printing Office, 2004.

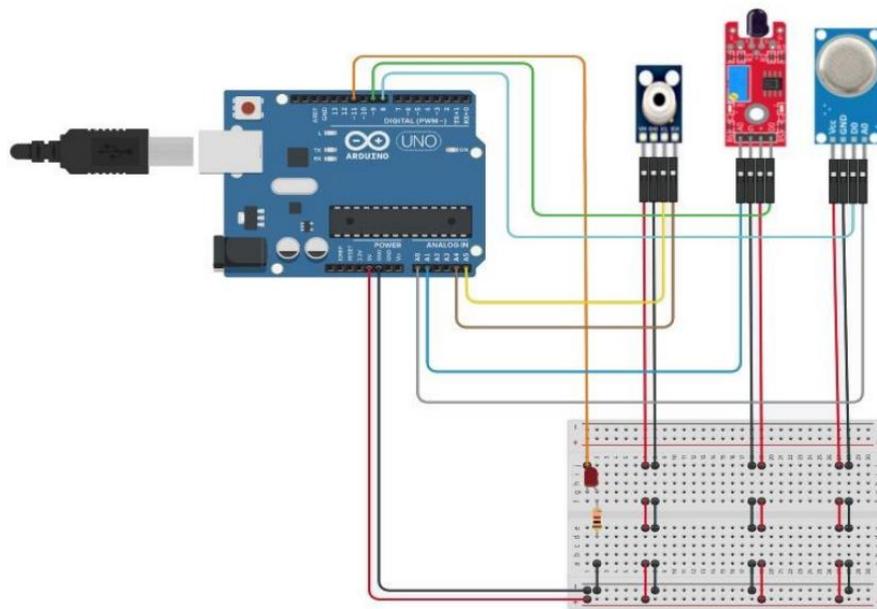
VIEIRA, C.; MORAIS, V. **MATLAB®: curso completo**. 1ª ed. Lisboa: FCA, 2013. 664 p.

WANG, R.; XU, G.; HE, Y. **Structure and properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers**. E-Polymers, v. 17, n. 3, p. 215-220, 2017.

WARD, M. J. **Fire Officer: Principles and Practice**. IAFC – NFPA. 4ª ed. Sudbury, EUA: Jones and Bartlett PubliSHGE/EFrs, 2020. 550 p.

WORLD DATA LAB. **Making everyone count**. Disponível em: <https://worlddata.io/>. Acesso em: 02 fev. 2023.

APÊNDICE A – Esquema do SDI proposto



APÊNDICE B – Simulador físico para realização dos experimentos



ANEXO A: Principais características do Arduino Uno

CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Tensão de operação	5 V
Fonte de alimentação	7 a 12 V
Corrente máxima por porta de E/S	40 mA
Corrente máxima suportada pela USB BM	500 mA
Faixa de temperatura para trabalho do ATmega328	-40 °C a 125 °C

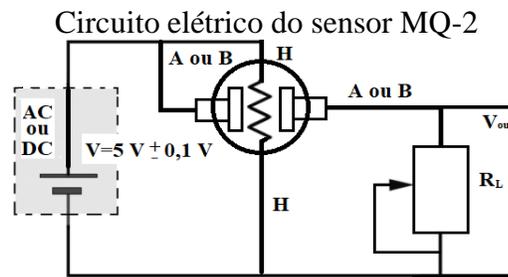
Fonte: ATMEL, 2015.

ANEXO B: Principais características do sensor de chamas LM 393

CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Tensão de operação	3,3 V - 5 V
Faixa espectral de sensibilidade	760 nm a 1100 nm
Ângulo máximo de visão	60 °
Distância mín. e máx. entre sensor e fonte	20 cm a 1 m
Faixa de temperatura no ambiente p/ trabalho	0 °C a 70 °C
Temperatura máxima de operação	125°

Fonte: MOTOROLA, 1996.

ANEXO C: Princípio de acionamento do sensor MQ-2

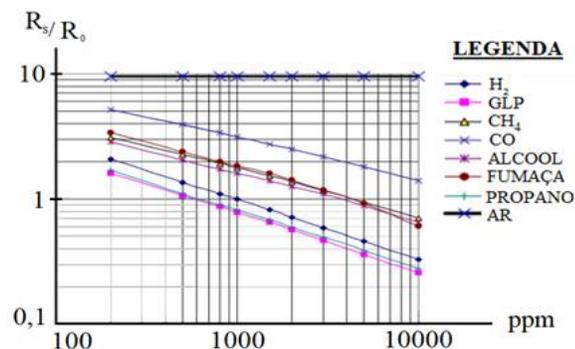


Fonte: HANWEI, S/D.

A variação na condutividade elétrica do estanho implica na variação da tensão sobre a resistência de carga (R_L). A resistência do sensor (R_s) pode ser medida a partir da equação 1:

$$R_s = \left(\frac{V_c}{V_{RL}} - 1 \right) R_L \quad (1)$$

Sendo R_0 o valor de R_L no ar limpo e R_s um valor fixo, $\frac{R_s}{R_0}$ em ar limpo é 9,8 e o R_0 pode assim ser calculado, gerando a curva característica do MQ-2 quanto a certos gases.



Fonte: HANWEI, S/D

ANEXO D: Principais características do sensor de gases MQ-2

CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Tensão de operação	5 V
Faixa de resistência do sensor para ação de detecção	3 K Ω a 30 K Ω (Parâmetro – 1000 ppm – isobutano)
Faixa de concentração gasosa	300 ppm a 10 000 ppm
Faixa de temperatura de uso e armazenamento	-20 °C a 70 °C

Fonte: HANWEI, S/D.

ANEXO E: Principais características do sensor de temperatura MLX 90614

CARACTERÍSTICAS	VALOR OU OUTRA INFORMAÇÃO
Tensão de operação	3,3 V - 5 V
Ângulo máximo de visão	90 °
Faixa espectral de temperatura do ambiente	-40 °C a 125 °C
Faixa espectral de temperatura do objeto	-70 °C a 380 °C

Fonte: MELEXIS, 2008.