



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ABAETETUBA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

**MARCIO KENNEDY ARAUJO FERREIRA**

**TERMISTOR NANOESTRUTURADO COMO ELEMENTO SENSOR PARA  
SISTEMA DE MONITORAMENTO AMBIENTAL**

**ABAETETUBA-PA  
2022**

MARCIO KENNEDY ARAUJO FERREIRA

**TERMISTOR NANOESTRUTURADO COMO ELEMENTO SENSOR PARA  
SISTEMA DE MONITORAMENTO AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Pará, *Campus* Universitário de Abaetetuba, como requisito final para obtenção do grau de Licenciatura Plena em Física, sob orientação do Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis.

**ABAETETUBA-PA  
2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

F383t Ferreira, Marcio Kennedy Araujo.  
TERMISTOR NANÓESTRUTURADO COMO ELEMENTO  
SENSOR PARA SISTEMA DE MONITORAMENTO  
AMBIENTAL / Marcio Kennedy Araujo Ferreira. — 2022.  
75 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal do Pará, , , Abaetetuba, 2022.

1. Incêndios florestai. 2. Buckypaper. 3. Nanotubos de  
Carbono. 4. Termistor. I. Título.

CDD 530.0724

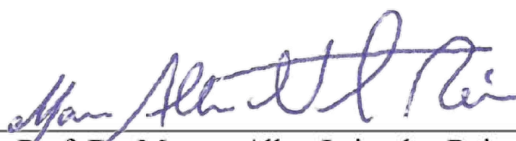
---

MARCIO KENNEDY ARAUJO FERREIRA

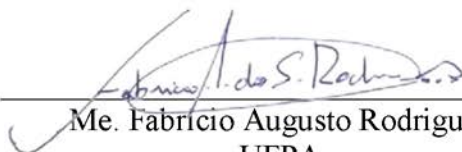
**TERMISTOR NANOESTRUTURADO COMO ELEMENTO SENSOR PARA  
SISTEMA DE MONITORAMENTO AMBIENTAL**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado e aprovado, para obtenção do título de Licenciatura Plena em Física pelo corpo docente da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba.

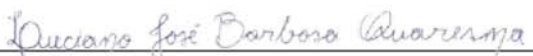
Abaetetuba, 15 de julho de 2022



Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis  
UFPA  
Orientador



Me. Fabrício Augusto Rodrigues  
UFPA  
Examinador



Esp. Luciano José Barbosa Quaresma  
UFPA  
Examinador

Dedico a Deus, meu guia, e a minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a à minha mãe Maria Nailda Araujo Ferreira que sempre esteve ao meu lado e foi a minha maior incentivadora. Ao meu pai Lourival dos Santos Ferreira que batalhou por anos para proporcionar a melhor educação para seus filhos. As minhas irmãs que acreditaram no meu sonho e me deram forças todos os dias. Aos meus sobrinhos que respeitaram meus momentos de reclusão, obrigado pelo carinho, obrigado por ser minha companheira Rosana Cardoso dos Santos e entender a minha dedicação. Agradeço aos meus queridos mestres que se dedicaram a ensinar e compartilhar todo o seu conhecimento. Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis que fez toda a diferença na orientação da minha monografia.

A todos os meus professores, os quais foram de extrema importância em minha formação, não posso deixar de agradecer aqueles que abriram a porta do seu espaço para me ajudar, em especial ao pessoal do laboratório Lamosic.

Agradeço a Deus e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse sonho.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

Charles Chaplin

## RESUMO

A incidência de grandes incêndios descontrolados aumentou em todos os continentes, independentemente das capacidades ou estratégias de combate a incêndios. Uma das principais ferramentas utilizadas para identificação e mapeamento de incêndios é o sensoriamento remoto, dada a facilidade na construção e utilização, além da ampla faixa de operação, no entanto os termistores usualmente utilizados apresentam um alto custo para fabricação. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sensor termistor nanoestruturado (E-tatu), de baixo custo para integração em sistema de monitoramento de incêndios florestais em solo. O sensor desenvolvido é constituído por NTCPM sintetizados pelo método CVD e funcionalizados com COOH, o processo de fabricação de folhas porosas macroscópicas compostas por redes nanotubos de carbono denominadas *Buckypaper* foi realizado por meio da suspensão, onde foram pesado 100 mg de NTCPM funcionalizados com COOH (NTCPM-COOH) e posteriormente foi solubilizados em 100 ml de peróxido de hidrogênio em dois béqueres de 200 ml por meio de um banho de ultra-som em uma lavadora ultra-sônica Soniclean 2PS a 40 kHz por 60 minutos, em seguida as soluções foram depositadas sobre um papel filtro qualitativo 37, sendo que esse filtro estava em um funil Buchner que foi alocado em um kitasato de 500 ml que estava conectado a uma bomba a vácuo, tendo como resultado um filme de aparência uniforme e logo em seguida foi levado à estufa (com temperatura de 100° C) para secagem completa do solvente. O *Buckypaper* produzido possui 800 mm de comprimento, 100 mm de largura, 205 µm de espessura, a fixação dos eletrodos de cobre foi realizada com Tinta Condutiva De Prata Mechanic MCN DJ002, a resistência deste *Buckypaper* é de aproximadamente 55,7 Ω. Durante os testes com a alternância da temperatura, observou-se um aumento da tensão no dispositivo à medida que a temperatura aumentava próximo à fonte da chama e sob o *buckypaper*. Esse comportamento pode ser explicado pela capacidade dos NTC's de absorver e reter calor, fazendo com que os eletrodos de *buckypaper* aqueçam mais do que os eletrodos de cobre, deste modo, criando um gradiente de temperatura entre eles. Os resultados obtidos sugeriram que os dispositivos nanoestruturados de carbono são eficazes, apresentam uma resposta rápida e são uma alternativa viável técnica e financeiramente para os sensores existentes no mercado. Em suma, a pesquisa alcançou os objetivos propostos, pois a partir desse estudo foi possível desenvolver um sistema de monitoramento ambiental baseado em sensor termistor nanoestruturado. Percebe-se que a utilização de sistemas de monitoramentos para pesquisas de focos e áreas queimadas torna-se de grande importância para Região

Amazônica, assim como para o país como um todo., considerando que o Brasil sofre recorrentemente com queimadas principalmente em período de seca.

**Palavra-chave:** Termistor. Nanotubos de Carbono. *Buckypaper*. Incêndios florestais.

## ABSTRACT

The incidence of large uncontrolled fires has increased on every continent, regardless of firefighting capabilities or strategies. One of the main tools used for fire identification and mapping is remote sensing, given the ease of construction and use, in addition to the wide operating range, however the thermistors usually used have a high cost to manufacture. In this sense, the present work aims to develop a low-cost nanostructured thermistor sensor (E-tatu) for integration into a ground forest fire monitoring system. The developed sensor consists of NTCPM synthesized by the CVD method and functionalized with COOH, the process of manufacturing macroscopic porous sheets composed of carbon nanotube networks called Buckypaper was carried out through the suspension, where 100 mg of NTCPM functionalized with COOH ( NTCPM-COOH) and then solubilized in 100 ml of hydrogen peroxide in two 200 ml beakers by means of an ultrasound bath in a Soniclean 2PS ultrasonic washer at 40 kHz for 60 minutes, then the solutions were deposited on a qualitative filter paper 37, and this filter was in a Buchner funnel that was placed in a 500 ml kitasate that was connected to a vacuum pump, as a result, a film of uniform appearance and soon afterwards it was taken to the oven (with temperature of 100° C) for complete drying of the solvent. The Buckypaper produced is 800 mm long, 100 mm wide, 205  $\mu\text{m}$  thick, the copper electrodes were fixed with Mechanic Silver Conductive Ink MCN DJ002, the resistance of this Buckypaper is approximately 55.7  $\Omega$ . During tests with alternating temperature, an increase in voltage across the device was observed as the temperature increased near the flame source and under the buckypaper. This behavior can be explained by the ability of CNTs to absorb and retain heat, causing the buckypaper electrodes to heat up more than the copper electrodes, thus creating a temperature gradient between them. The results obtained suggested that carbon nanostructured devices are effective, have a quick response and are a technically and financially viable alternative to the sensors on the market. In short, the research achieved the proposed objectives, because from this study it was possible to develop an environmental monitoring system based on a nanostructured thermistor sensor. It is noticed that the use of monitoring systems for research of fires and burned areas becomes of great importance for the Amazon Region, as well as for the country as a whole.

**Keywords:** Thermistor. Carbon Nanotubes. *Buckypaper*. Forest fires.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do Incêndio de Kalimantan - Indonésia.....	15
Figura 2 – Incêndio de Roraima no início de 1998.....	15
Figura 3 – Incêndio no Pantanal em 2020 .....	16
Figura 4 – Série histórica do total de focos ativos detectados por satélites referência entre 1988 à março 2021 no Brasil .....	20
Figura 5 – Causas dos incêndios. ....	21
Figura 6 – Ilustração de um incêndio subterrâneo .....	22
Figura 7 – Ilustração de um incêndio de superfície .....	23
Figura 8 – Ilustração de um incêndio de copa .....	24
Figura 9 – Série temporal do sistema Landsat .....	27
Figura 10 – Termistor PTC .....	32
Figura 11 – Termistor NTC.....	33
Figura 12 – NTC pode ser usado para aumentar o tempo e vida de lâmpadas incandescente .....	35
Figura 13 – PTC para medir o fluxo de ar ou líquidos .....	36
Figura 14 – Estrutura de Fuleno constituído por 60 átomos de carbono .....	37
Figura 15 – Folha de grafeno para formar a estrutura cilíndrica dos nanotubos de carbono.....	37
Figura 16 – Ilustração do Nanotubo de Carbono de Parede Simples – NCPS .....	38
Figura 17 – Ilustração do Nanotubo de Carbono de Parede Dupla – NCPD.....	39
Figura 18 – Ilustração do Nanotubo de Carbono de Parede Múltiplas – NTCPM .....	39
Figura 19 – <i>Buckypapers</i> produzidos com NCPS's depositados sobre uma membrana de .....	42
Figura 20 – Placa Arduino .....	44
Figura 21 – Processo de produção do sensor nanoestruturado.....	47
Figura 22 – Imagem de MEV da superfície do filme BP- NTCPM /COOH.....	48
Figura 23 – Circuito para medição de temperatura.....	49
Figura 24 – Foto da impressora ANET A8 onde foram produzidas as peças, na figura (a) do motor responsável pelo movimento vertical e horizontal lateral, (b) a fonte de alimentação com potência de saída de 240W (c) mesa aquecida e (d) Cabeça de impressão Themostat Aquecedor Bocal Barril. ....	50
Figura 25 – Modelagem do case do sistema de monitoramento. ....	51
Figura 26 – Modelagem do case do sistema receptor .....	51
Figura 27 – Processo de fatiamento das peças no Cura Ultimaker .....	52
Figura 28 – Ilustração do funcionamento do sistema .....	53
Figura 29 – Montagem do circuito. ....	54
Figura 30 – Primeiro modelo o protótipo impresso. ....	54
Figura 31 – Segundo modelo o protótipo impresso. ....	55
Figura 32 – Sistema aberto.....	55

Figura 33 – Sistema isolado .....	56
Figura 34 – Relação de Temperatura x Tensão sem ganho ( $\mu\text{V}$ ) de entrada e Temperatura x saída (mV) do amplificador.....	57
Figura 35 – Experimento 1 .....	58
Figura 36 – Relação de Temperatura x Tensão do termistor.....	58
Figura 37 – Relação de temperatura x tempo do sistema de monitoramento .....	59
Figura 38 – Sistema realizando o teste no meio ambiente .....	59
Figura 39 – Sistema realizando o teste no meio ambiente .....	60

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Classificação dos incêndios florestais segundo a área queimada .....	24
Tabela 2 – Aplicações e faixa de operação dos termistores .....	34

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 01 – Principais sistemas de monitoramento florestal .....	30
--	----

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>17</b>
1.1.1	Geral .....	17
1.1.2	Específico .....	17
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do trabalho.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Incêndios florestais.....</b>	<b>19</b>
2.1.1	Classificação dos incêndios .....	22
2.1.2	Monitoramento .....	25
2.1.3	Sistemas de controle empregados.....	26
<b>2.2</b>	<b>Termistores .....</b>	<b>30</b>
2.2.1	Classificação.....	32
2.2.2	Aplicações .....	34
<b>2.3</b>	<b>Nanotubos de carbono .....</b>	<b>36</b>
2.3.1	Classificação.....	38
2.3.2	Condutividade elétrica.....	40
2.3.3	Condutividade térmica.....	40
2.3.4	Acoplamento elétron-fônon.....	40
2.3.5	<i>Buckypapers</i> .....	41
2.3.6	Termistores Nanoestruturados .....	42
<b>2.4</b>	<b>Hardware do Sistema baseado em Arduino .....</b>	<b>43</b>
2.4.1	Fonte de alimentação .....	44
2.4.2	Núcleo de CPU .....	44
2.4.3	Entradas e saídas.....	44
2.4.4	Entradas analógicas .....	45
2.4.5	Saídas digitais .....	45

<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1</b>	<b>Elementos sensor: Termistor nanoestruturado.....</b>	<b>46</b>
3.1.1	Fabricação.....	46
3.1.2	Caracterização MEV.....	47
3.1.2.1	Princípio de funcionamento .....	48
<b>3.2</b>	<b>Preparação do elemento sensor .....</b>	<b>49</b>
<b>3.3</b>	<b>PARÂMETROS DE MODELAGEM E IMPRESSÃO 3D DAS PEÇAS DO SISTEMA.....</b>	<b>50</b>
3.3.1	Receptor do Sistema de Comunicação Sem Fio dos Dados de Medição do E-tatu .....	52
3.3.2	Processos de medição .....	53
<b>3.4</b>	<b>Montagem do aparato experimental .....</b>	<b>54</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Experimento 1 – Teste do sensor .....</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>Experimento 2 – Captura de dados do sistema por 1 hora .....</b>	<b>59</b>
<b>4.3</b>	<b>Tempo de resposta e valor comercial dos sensores disponíveis .....</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>71</b>
	Apêndice A – Algoritmo na linguagem C++ para O SENSOR de temperatura.....	71

## 1 INTRODUÇÃO

Há milhões de anos, o fogo é um dos principais fatores que moldam a vida na Terra, afetando padrões e processos ambientais globais, como a distribuição e estrutura da vegetação, o ciclo do carbono e o clima (WHITLOCK *et al.*, 2003; BOND *et al.*, 2005; HARDESTY *et al.*, 2005; BOWMAN *et al.*, 2009; MALMSTRÖM, 2010).

O manuseio inadequado e as mudanças climáticas tornam-se um desafio para o monitoramento adequado e gerenciamento do fogo (BOWMAN *et al.*, 2009). Na última década, a incidência de grandes incêndios descontrolados aumentou em todos os continentes, independentemente das capacidades ou estratégias de combate a incêndios (PAGE *et al.*, 2002; WESTERLING *et al.*, 2006; LOHMAN *et al.*, 2007; FORSYTH *et al.*, 2008).

Os incêndios podem causar diversos problemas, incluindo solos pobres, erosão, destruição da vegetação e até mesmo alterações na composição química da atmosfera. Dada a importância da Amazônia para o país, além da proteção dos ecossistemas locais, proteção dos mananciais urbanos, esse tipo de pesquisa se faz necessário, pois pode facilitar a identificação das áreas mais afetadas pelo fogo e identificar possíveis fatores influenciadores e ajudar a melhorar a eficiência das ações de prevenção, controle e extinção de incêndios florestais.

Desde a década de 1970, o aumento dos incêndios florestais tornou-se uma realidade global. Estima-se que os ecossistemas tropicais e subtropicais queimam cerca de 5,4 milhões de quilômetros quadrados a cada ano (MÜELLER-DUMBOIS E ELLENBERG, 1974; GOLDAMMER, 1990). Comparado ao tamanho continental desses ecossistemas, a maior área de queimadas ocorreu na Austrália (14%), seguida pela África (9%) e América do Sul (5%), com queimadas anuais chegando a 740.000 km<sup>2</sup> (VAN DER WERF *et al.*, 2003).

Dois eventos são de particular interesse em todo o mundo porque afetaram grandes áreas de florestas tropicais anteriormente consideradas imunes ao fogo: um na região leste de Kalimantan, na Indonésia (Figura 1), em 1982-1983, e outro na Amazônia brasileira Roraima 1997.-1998 (GOLDAMMER e SEIBERT, 1990; BARBOSA, 1998; SHIMABUKURO *et al.* 1999).

Figura 1 – Localização do Incêndio de Kalimantan - Indonésia



Fonte: The Bornéu Post, 2021.

O incêndio de Roraima (Figura 2), no início de 1998 é mais simbólico, pois ocorreu no bioma amazônico, considerado a maior reserva de floresta tropical da Terra. Neste caso, uma seca prolongada provocada pelo El Niño em 1998 atingiu as florestas de Roraima a ponto de incendiar. O fogo foi finalmente extinto pelas chuvas no início de abril de 1998 e queimou cerca de 3,3 milhões de hectares, dos quais 1 milhão de hectares foram cobertos por floresta tropical (NEPSTAD, MOREIRA E ALENCAR, 1999).

Figura 2 – Incêndio de Roraima no início de 1998



Fonte: Ciência hoje, 2020.

Desde então, tem sido demonstrado que pelo menos uma parte das áreas florestais remanescentes na Amazônia pode queimar sob condições extremas com seca prolongada e presença de fontes de ignição antrópicas (NEPSTAD *et al.*, 1999; COCHRANE, 2000). A comunidade científica concorda cada vez mais com os impactos prejudiciais de tais incêndios descontrolados na biodiversidade, na saúde humana e na economia, visto que atualmente as queimadas são a segunda maior causa para o aumento do efeito estufa (LOHMAN *et al.*, 2007; SOUZA, 2021).

Em 2020, o Pantanal (Figura 3) foi alvo do maior incêndio já visto na região desde o fim da década de 1990, foram cerca de 4,5 milhões de hectares, o que corresponde a mais de 30% da sua área, neste ano o Pantanal acumulou 22.116 focos de incêndio, superando cerca de 42,5% o recorde histórico de 12.536 focos registrado no ano de 2005. (INPE, 2021). Ainda de acordo com o INPE (2021), no ano de 2020 as queimadas na região do Pantanal brasileiro aumentaram 210%, quando comparado ao mesmo período do ano anterior.

Figura 3 – Incêndio no Pantanal em 2020



Fonte: Poder 360, 2020.

De acordo com Leite (2012), partir da década de 1960, tem havido uma conscientização de todos os países do mundo sobre a necessidade de se preservar os recursos naturais. Está claro que não se pode continuar a degradar o meio ambiente na velocidade atual dos países ditos desenvolvidos. Tal preocupação se torna mais evidente ao se observar, dados do INPE (2021), onde no ano de 2020, o país registrou 222.798 focos, contra 197.632 em 2019, um aumento de 12,7%, ficando apenas atrás do recorde de 2010, quando o país registrou cerca de 319 mil focos. Cientes dos danos causados por seus próprios processos de desenvolvimento, como a poluição da atmosfera e a emissão de gases do efeito estufa (GEE), os países ricos desencadearam uma série de ações com vistas ao controle ambiental. Assim, nos países que abraçaram a causa, para se implementar qualquer empreendimento que possa causar impacto, é necessário colocar o projeto para avaliação dos impactos ambientais possíveis de serem produzidos pelo projeto em todas as suas fases.

Uma das principais ferramentas utilizadas para identificação e mapeamento de incêndios é o sensoriamento remoto. O mapeamento do fogo pode ser feito identificando mudanças na energia determinada enquanto queima, como fontes de calor registradas por sensores remotos, ou analisando a resposta espectral de um incêndio para detectar cicatrizes de queimadura (GIGLIO *et al.*, 2006; ALMEIDA FILHO E SHIMABUKURO, 2004; BRAGA, 2015).

Embora produtos de sensoriamento remoto validados já estejam disponíveis em várias regiões do mundo, e o mapeamento sistemático de áreas afetadas por incêndios florestais na Amazônia e outras regiões dominadas por florestas tropicais (SETZER *et al.*, 2007; GIGLIO *et al.*, 2009).

O uso de tecnologias de sensores para esta finalidade requer um investimento monetário alto, deste modo, surge a necessidade de desenvolver um sensor de baixo custo e eficiente para medir temperatura, servindo como mecanismo de prevenção de incêndios tais como ocorridos em matas próximas às linhas de transmissão.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Geral

Desenvolver um sensor termistor nanoestruturado com Buckypapers para integração em sistema de monitoramento de incêndios florestais em solo.

### 1.1.2 Específico

- a) Fabricar o sensor termistor nanoestruturado;
- b) Montar o circuito elétrico para abarcar o elemento sensor do sistema;
- c) Caracterizar o termistor nanoestruturado;
- d) Modelar em 3D as peças do sistema monitoramento ambiental;
- e) Manufaturar as peças dos sistemas monitoramento ambiental;
- f) Elaborar o sistema de monitoramento ambiental;
- g) Analisar o desempenho do sistema de monitoramento desenvolvido;
- h) Compreender a relação entre o acoplamento elétron-fônon e a variação de temperatura para monitorar os constantes focos de incêndios.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho está estruturado em 5 capítulos. No Capítulo I em que se apresenta a contextualização sobre o tema a ser trabalhado ao longo desta pesquisa, os objetivos e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 aborda o embasamento, dados e conceitos teóricos necessários para o entendimento do assunto tratado nesta pesquisa.

Em seguida o c capítulo 3 serão apresentados os elementos dos sensores, a caracterização e os princípios de funcionamento.

No capítulo 4 abordará os resultados obtidos com os experimentos, e realizado a análise desses resultados.

Por último, o Capítulo 5 – Considerações finais, onde traz as principais conclusões do estudo realizado e sugestões para trabalhos futuros e na sequência, são apresentadas as Referências Bibliográficas presentes nesse estudo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão abordadas todas as temáticas relevantes para o embasamento do estudo, onde serão apresentadas as definições incêndios florestais, monitoramento de incêndios florestais, sistemas de controles ambientais, termistores, nanotubo de carbonos e os buckypapers, visando proporcionar um melhor entendimento segundo alguns autores.

### 2.1 Incêndios florestais

Incêndios ambientais são distúrbios causados por focos de fogo de forma descontrolada, geralmente em áreas rurais ou biomas (CASTRO *et al.* 2002). Tais como, dependendo das condições ambientais, os incêndios têm a capacidade de se espalhar muito rapidamente, outro aspecto observado é que a maioria dos incêndios são causados por humanos. No entanto, eles também podem ser acionados por fenômenos naturais, como raios, reações químicas ou a concentração da luz solar (GUIMARÃES *et al.* 2014).

A maior ameaça às florestas e outras formas de vegetação é, sem dúvida, o fogo, que exige uma ação constante das equipes de monitoramento, independentemente da eficácia dos sistemas de prevenção, cabe salientar que a base para mitigar os danos dos incêndios florestais é a eficiência do monitoramento, a detecção é sem dúvida a mais importante, pois o fogo só pode ser extinto depois de encontrado e localizado, e a rapidez com que os eventos são detectados, o que permite uma ação imediata de combate, pois quanto mais cedo for detectado, maior a probabilidade de extinção e minimização de perdas.

A queimada é o uso do fogo na vegetação de forma controlada, a fim de fornecer condições ambientais para controlar o fogo em uma área e alcançar o manejo desejado, já o fogo descontrolado é chamado de incêndio (SILVA, 1998). Para Fonseca e Ribeiro (2003) os incêndios florestais, são definidos como a incidência do fogo de forma natural ou antrópica em qualquer tipo de vegetação, podendo ser acidental e inesperada pelo responsável pela área. Segundo Andrea e Merlet (2001) globalmente, aproximadamente 90% dos incêndios são causados por humanos, e os 10% restantes estão relacionados a causas naturais como acidentes ou raios.

Para que ocorra um incêndio florestal, deve haver combustível para queimar, oxigênio para manter as chamas e calor para iniciar e continuar a queimar. A relação que ocorre entre esses elementos é conhecida como “triângulo do fogo” e dois produtos químicos devem estar presentes, conforme descreve Motta (2008): Combustível – tudo que pode ser inflamado, por

exemplo, madeira; Oxidante – refere-se a qualquer elemento que, quando associado quimicamente, pode causar a ignição do combustível, como o oxigênio; e a temperatura de ignição – a temperatura na qual o combustível pode queimar.

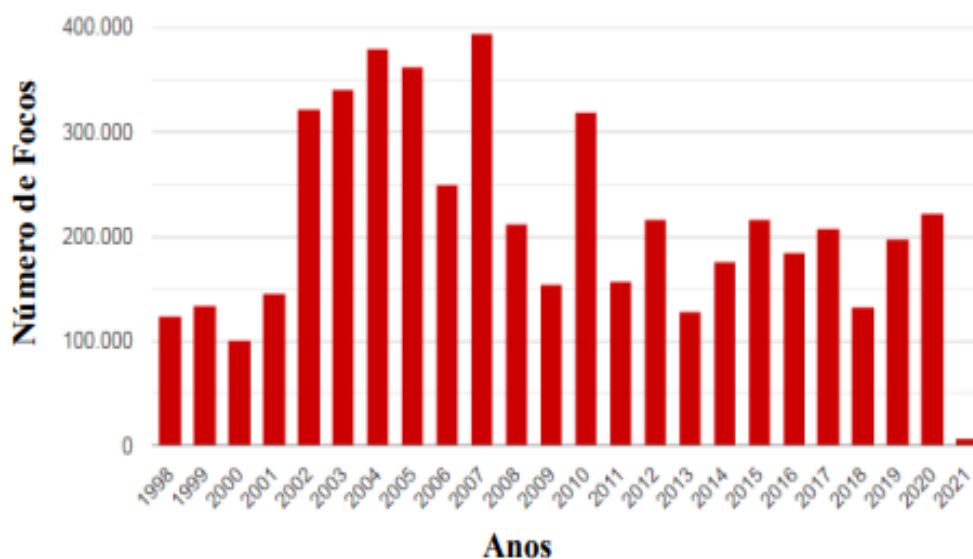
Os incêndios florestais podem causar uma variedade de danos ambientais, incluindo: perda de recursos genéticos, destruição de habitats, extinção de nascentes, destruição de áreas protegidas, infertilidade do solo, desertificação, surgimento de processos erosivos e extinção de espécies da flora e fauna (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

Há 50 anos, o Brasil se tornou referência mundial na produção e exportação de alimentos, segundo o Ministério da Agricultura. Assim, no Brasil, o fogo é uma ferramenta utilizada para manipular pastagens e áreas utilizadas para agricultura (KOHLHEPP, 2018).

Os focos de incêndio têm ocorrido em todas as regiões do país, mas principalmente na região norte, onde cerca de 70% dos focos são classificados como Categoria V, quando a área afetada ultrapassa os 200 hectares (SOARES E SANTOS, 2002; LIMA *et al.*, 2018).

A Figura 4 mostra a série histórica de números de queimadas no Brasil nos últimos 22 anos, onde se observa certo aumento no número de queimadas a partir de 2002, o que pode ser devido ao processo de expansão agrícola do país (RESENDE, 2017).

Figura 4 – Série histórica do total de focos ativos detectados por satélites referência entre 1988 à março 2021 no Brasil



Fonte: INPE, 2021.

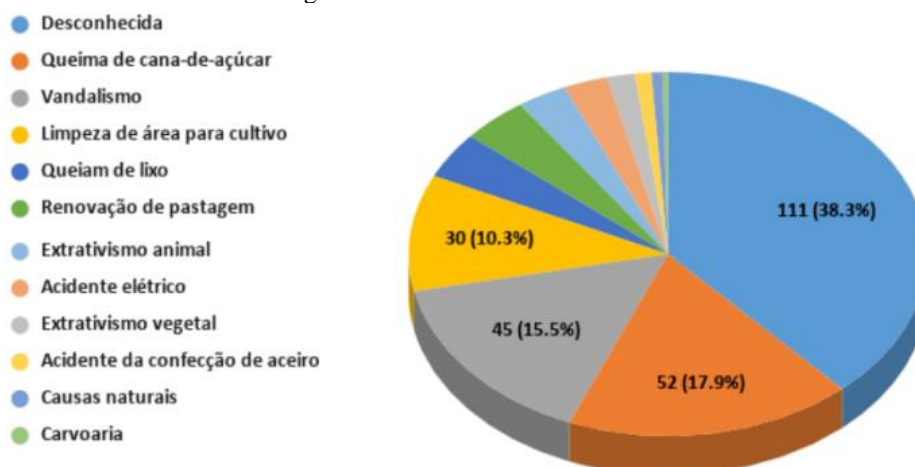
Conforme o IBAMA (1998), e o acordo de regulamento nº 94, a combustão controlada é permitida apenas como um “fator de produção e manejo em áreas de atividades agrícolas,

pastoris ou florestais, assim como com finalidade de pesquisa científica e tecnológica, a ser executada em áreas com limites físicos preestabelecidos.”

A nova Lei Florestal (Lei nº 12.651, de 28 de maio de 2012) proíbe o uso do fogo, a menos que seja considerada uma queima controlada, ou em conexão com práticas de prevenção e combate ao fogo e agricultura de subsistência por povos tradicionais e indígenas, neste presente trabalho, queimadas e incêndios são considerados sinônimos.

Dias (2007), afirma que as principais causas de incêndios no Brasil são analfabetismo ambiental, fenômenos naturais - raios, combustão natural, efeito de lupa; cultura/costumes; fogueiras, ações judiciais junto ao IBAMA e outros, extrativismo, exploração madeireira, extração de mel, caça e "limpeza" de áreas de extração mineral, faíscas mecânicas, quebras e re-ignições de cabos de alta tensão; política agrícola - Incentivo à continuidade das práticas agrícolas, como "limpeza" de áreas com fogo, queima de resíduos florestais, queima de cana-de-açúcar; trabalhadores rurais mal preparados e com manejo/controlado inadequado do fogo, dentre outros. Na Figura 4 destaca-se as principais causas.

Figura 5 – Causas dos incêndios.



Fonte: Silva, 2019.

Segundo Santos (2004), é importante entender a causa e a frequência dos incêndios florestais, principalmente porque iniciar um programa de prevenção é saber quem ou o que está causando os incêndios. Os gases emitidos durante a combustão da biomassa são responsáveis pelas elevadas temperaturas e fluxo de gás CO<sub>2</sub> no solo, resultando em uma perda de carbono de curto prazo para a atmosfera. As emissões de gases (principalmente dióxido de carbono) aumentam a absorção da radiação infravermelha pela atmosfera, fazendo com que a atmosfera e o planeta aqueçam.

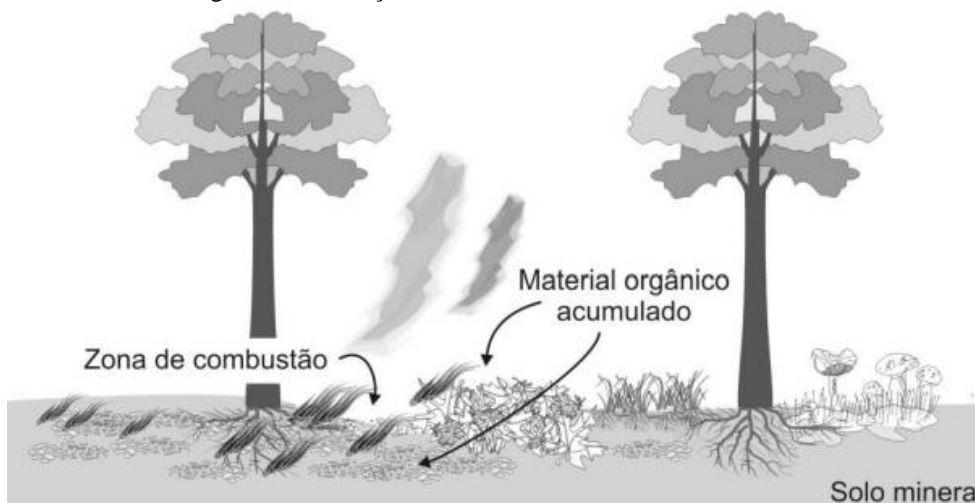
Dado o possível impacto dos incêndios florestais, considera-se a importância da rapidez e eficiência na detecção e monitorização de focos de calor para evitar que os incêndios florestais se iniciem e se propaguem com maior frequência, ao mesmo tempo em que possibilitam o combate estratégico para procurar maximizar a detecção de incêndios, planejamento, controle e determinação do impacto dos incêndios nas áreas afetadas.

### 2.1.1 Classificação dos incêndios

A classificação dos incêndios florestais é dada de acordo com sua aparência (GOLDAMMER, 1982). De acordo com Ribeiro (2002), a classificação mais apropriada para determinar os tipos de incêndio baseia-se no grau de envolvimento de cada camada das esferas florestais no processo de queima, desde os solos minerais até a copa das árvores. Neste caso, os incêndios são classificados como incêndios subterrâneos, de superfície e de copa.

- a) Incêndio subterrâneo ou incêndio de solo: Ocorrem no solo da floresta até uma camada de cerca de 15 cm acima dos solos minerais, ilustrado na Figura 6, devido à grande acumulação de matéria orgânica em decomposição (GOLDAMMER, 1982). Como há pouco oxigênio lá, o fogo se desenvolve lentamente, não há chama e há pouca fumaça, mas persistente, com calor intenso e poder destrutivo uniforme. Incêndios deste tipo são comuns, especialmente se houver turfa, pois o material serve de combustível altamente inflamável, tornando-os difíceis de apagar.

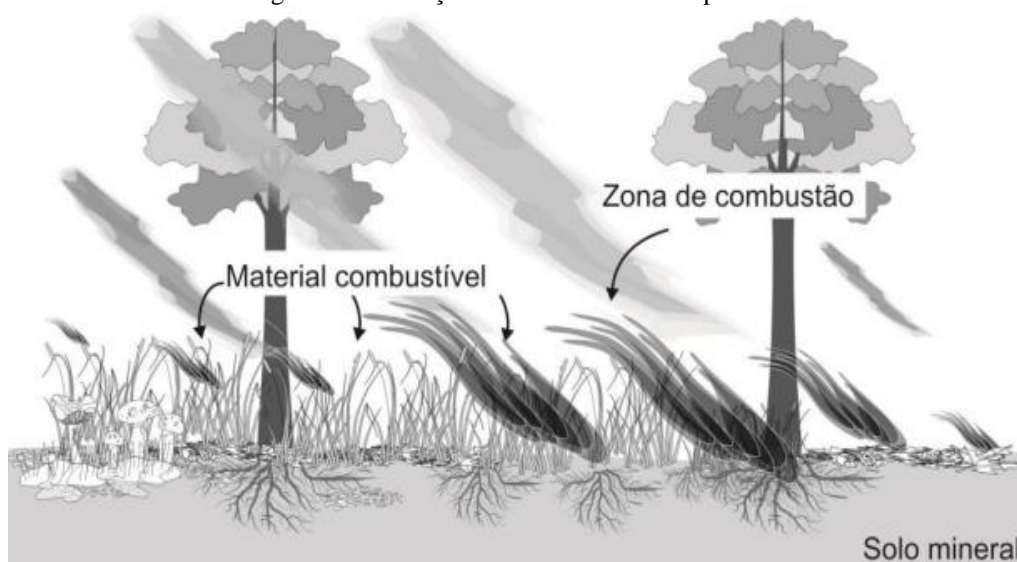
Figura 6 – Ilustração de um incêndio subterrâneo



Fonte: Schumacher *et al.*, 2013.

- b) Incêndio de superfície: Também ocorre no solo da floresta, queimando restos vegetais não decompostos: folhas, galhos, dentre outros. Pode atingir até 1,80m acima do solo, ilustrado na Figura 7, e os materiais presentes até esta altura normalmente é composto por material de pequena espessura, geralmente bastante inflamável (RIBEIRO, 2002). Geralmente são caracterizados por uma propagação relativamente rápida, chamas abundantes e alto calor, mas não são difíceis de lidar. De acordo com Cianciulli (1981), Batista e Soares (1997) e Ribeiro (2002), são os mais comuns, e geralmente é como ocorre o início dos incêndios florestais.

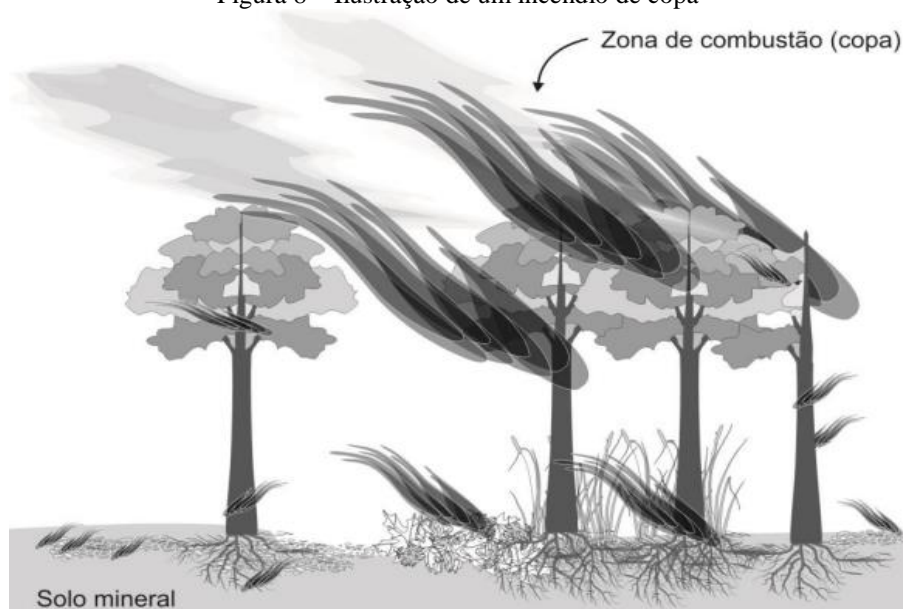
Figura 7 – Ilustração de um incêndio de superfície



Fonte: Schumacher *et al.*, 2013.

- c) Incêndios de copa: Os incêndios classificados nesta categoria ocorrem em árvores, começando 1,80m acima do solo, como ilustrado na Figura 8. Com pouquíssimas exceções (no caso de raios e balões), todos os incêndios na copa se originam de incêndios terrestres, eles se espalham rapidamente e liberam muito calor. As folhas são completamente destruídas e geralmente ocasiona na morte das árvores atingidas pelas chamas (SOARES; BATISTA, 2007). As folhagens servem como combustível e o vento transporta o calor de uma copa para outra, estes tipos de incêndio se propagam facilmente e são os mais difíceis de vencer.

Figura 8 – Ilustração de um incêndio de copa



Fonte: Schumacher *et al.*, 2013.

Segundo Soares e Batista (2007), os três tipos de incêndios destacados, podem ocorrer de forma simultânea e nas mais diversas combinações, dependendo das condições existentes no local.

Além da classificação mencionada, pode-se destacar os métodos de classificação utilizados pelo Serviço Florestal dos Estados Unidos da América e pelo Serviço Florestal do Canadá, dentre as duas metodologias, destaca-se a do Canadá, Tabela 1, por apresentar condições mais adequadas para o uso em território brasileiro, dada as características da vegetação, os meios de proteção e o clima entre os países (SOARES, 1985).

Tabela 1 – Classificação dos incêndios florestais segundo a área queimada

<b>Classes</b>	<b>Área queimada (ha)</b>
<b>I</b>	≤ 0,9
<b>II</b>	1,0 – 4,0
<b>III</b>	4,1 – 40,0
<b>IV</b>	41,0 – 200
<b>V</b>	> 200

Fonte: Adaptado de Soares e Batista, 2007.

### 2.1.2 Monitoramento

A rapidez e eficiência na detecção e monitoramento de incêndios florestais são fundamentais para a viabilização do controle de incêndios. Essas características podem interferir nas operações de combate e no processo de mitigação de danos. Além disso, localizações imprecisas ou conhecimento insuficiente da precisão do local do incêndio podem afetar as estimativas do impacto ambiental dos incêndios (BATISTA, 2004). O sensoriamento remoto é uma ferramenta extremamente útil para obter essas informações, principalmente em grandes áreas afetadas por incêndios e/ou em áreas de difícil acesso (PEREIRA *et al.*, 1997).

Nas últimas décadas, a computação evoluiu muito, principalmente no desenvolvimento de modelos de gráficos e banco de dados. Além de utilizar uma gama de ferramentas comuns, como editores de texto, planilhas dentre outros, também foram desenvolvidos os Sistemas de Informação Geográfica, os SIGs (THOMÉ, 1998). Segundo Câmara *et al.* (1996), o SIG é um sistema computacional que permite a captura, manipulação, recuperação, análise e apresentação de dados georreferenciados.

Para os autores Lillesand e Kiefer (1994), o sensoriamento remoto (SR) é o processo científico de obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno por meio da análise de dados adquiridos por equipamentos que não estão em contato com o objeto, área ou fenômeno. Slater (1980) descreveu SR como um conjunto de atividades para coletar informações sobre a superfície da Terra, usando sensores montados em satélites ou aeronaves, e medidos em campo e em laboratório, de modo simplificado, estes sensores são dispositivos que coletam energia e a convertem em sinais que podem registrar e extrair informações.

Liu (2007) argumenta que a detecção de incêndios por satélites é controlada por diversos fatores, incluindo o ângulo de visão do sensor, iluminação e características da superfície e subsuperfície. Esses fatores podem caracterizar, por exemplo, mudanças de terreno, áreas afetadas em diferentes altitudes, e a emissividade de um alvo depende principalmente da data e hora do incêndio, além de dados da cobertura vegetal, umidade, condutividade elétrica e capacidade de calor.

O INPE vem aprimorando seu sistema de detecção de incêndio, eles são produzidos a partir de imagens de sensores em satélites polares ou geoestacionários. Um ponto geográfico chamado “hot spot ou foco de calor” é gerado quando o sensor detecta uma superfície com área mínima de 900 m<sup>2</sup> e temperatura acima de 47 °C (GONTIJO *et al.*, 2011).

No entanto, nem todo "ponto quente" é um incêndio. O sensor pode não detectar algumas áreas queimadas. Portanto, é importante realizar pesquisas que visem validar esses produtos e aprimorar as técnicas de detecção de incêndio.

Os conceitos e definições apresentadas neste trabalho procuram seguir convenções adotadas por diversos autores que discorrem sobre monitoramento ambiental de incêndios. Schaeffer *et al.* (1988), apud González-Cabán *et al.* (1995), afirmam que não existe um único parâmetro capaz de diagnosticar a saúde ou estabilidade de um ecossistema.

Diante da afirmação do autor, é possível estabelecer que a diversificação e a criação de outros parâmetros otimizam e fornecem informações que contribuem para o aperfeiçoamento dos processos de monitoramentos, assim tornando o processo mais eficaz.

### 2.1.3 Sistemas de controle empregados

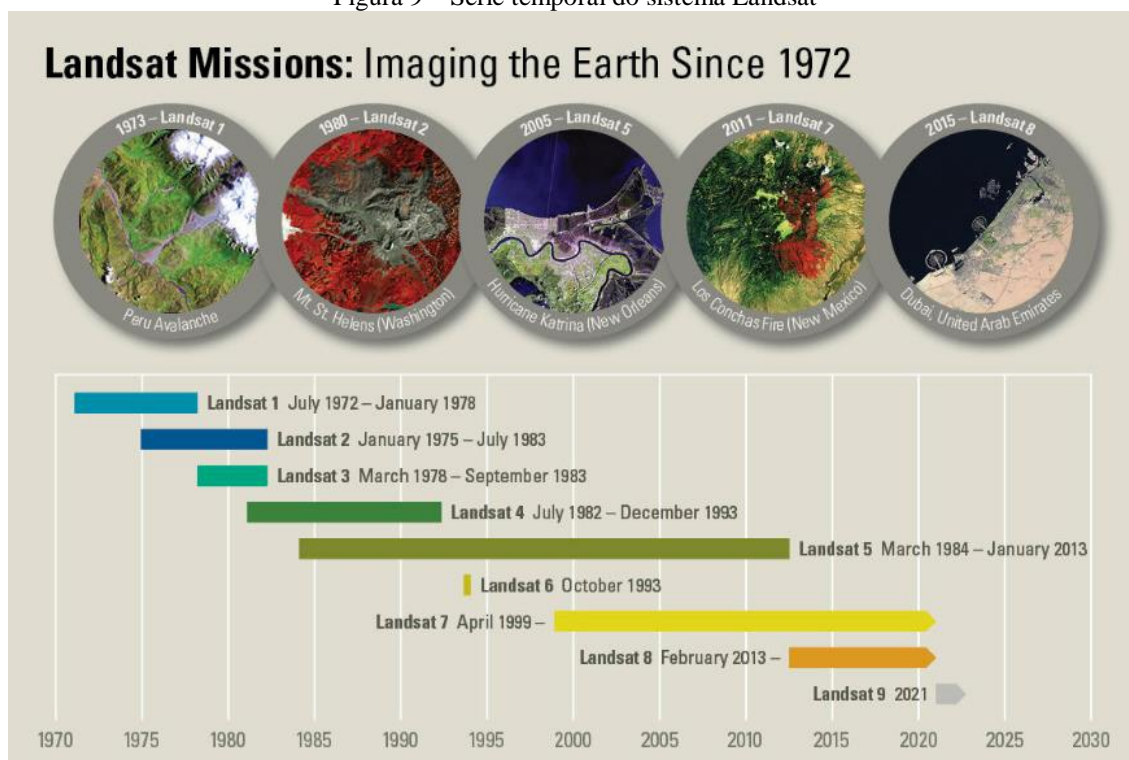
Antes de iniciar a discussão que este capítulo faz em relação ao Monitoramento de Incêndios Florestais, é preciso realizar uma abordagem em relação a esta temática. Deste modo Remmel e Perera (2001) apud Batista (2010), faz-se referência ao ano de 1972, onde houve o lançamento do primeiro satélite para monitoramento de incêndios florestais, chamado de Landsat, onde este possibilitou detectar alterações nas áreas florestais através do espaço.

A Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA) criou o programa espacial Landsat, seu início ocorreu na segunda metade da década de 1960, e foi desenvolvido especificamente para observar os recursos naturais. O programa é o mais antigo programa de observação da terra nos Estados Unidos, e seu primeiro sensor Multispectral Scanner System (MSS) foi introduzido em 1972. Atualmente possui a maior coleção de dados de observação remota da Terra da história, que podem ser aplicados à agricultura, mudanças climáticas, desmatamento e mapeamento na região (USGS, 2021).

Desde então, as imagens termais e do infravermelho médio têm sido usadas na detecção de incêndios e estudos de mapeamento, permitindo que áreas queimadas e não queimadas sejam detectadas por meio do contraste entre os gradientes térmicos.

Na Figura 9, pode-se observar a série temporal de satélites lançados pelo programa, sendo o Landsat 9, o mais atual da série, que está em órbita desde maio de 2013, este satélite opera usando dois sensores, sendo eles, o Sensor Infravermelho Térmico (TIRS) e o Imager Operacional da Terra (OLI) (USGS, 2021).

Figura 9 – Série temporal do sistema Landsat



Em 10 de abril 1989, o governo brasileiro criou através do Decreto nº. 97.635, o Sistema Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais - PREVFOGO, que atribui ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA a competência de coordenar as ações necessárias à organização, implementação e operacionalização das atividades relacionadas com a educação, pesquisa, prevenção, controle e combate aos incêndios florestais e queimadas (IBAMA, 2010).

Apesar de ter sido criado em 1989, o PREVFOGO deu início efetivo às suas atividades em 1990, quando foram alocados os primeiros recursos. Durante o primeiro ano de operação definiu-se linhas de atuação de curto e médio prazo, distintas entre si. A primeira visando o estabelecimento de mecanismos emergenciais de proteção contra incêndios nas Unidades de Conservação da União mais sujeitas a este tipo de ocorrência. Para tanto, fez-se necessário dotá-las de infraestrutura e meios para prevenção e combate aos incêndios florestais, bem como de recursos humanos capacitados para tais tarefas.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do Sistema de Monitoramento, Prevenção e Controle de Incêndios Florestais na Amazônia – PROARCO, monitora as ocorrências de incêndios para todos os estados brasileiros por meio de sensores espaciais, o programa foi criado em 1998, com objetivo de prevenir e combater incêndios

florestais em larga escala na região da Amazônia legal, especificamente, no Arco do desflorestamento (LAGARES, 2007).

No entanto, o monitoramento dos incêndios florestais no Brasil ainda é deficitário, devido às limitações técnicas inerentes ao sistema utilizado e devido à falta de estudos básicos sobre o comportamento do fogo e as características ambientais associadas à ignição e propagação dos incêndios nos diversos ecossistemas brasileiros (SETZER *et al.*, 2007; GIGLIO *et al.*, 2009; GUIMARÃES *et al.*, 2014; INPE, 2021).

Em virtude disto, encontramos Razafimpanilo et al (1995, apud BATISTA 2004, p. 238), quando este diz que:

“A eficiência do monitoramento de incêndios por satélites depende de informações prévias do ambiente, tais como: características do material combustível, informações sobre regeneração natural e fenologia da vegetação, condições climáticas, dentre outros.”

Ainda em relação ao processo de monitoramento, é preciso levar em consideração, a frequência e distribuição dos incêndios florestais também está fortemente associada às condições meteorológicas. Através do monitoramento das condições meteorológicas é possível se fazer previsão do risco de incêndios, mediante o cálculo de índices de risco, definindo-se para um determinado período as áreas de maior probabilidade de ocorrer incêndios. Um fator que contribui para isto é a frequência demasiadamente relevante nas regiões norte e centro-oeste, onde o número de estações ainda não é suficiente para cobrir toda a área (SOUZA *et al.*, 2014).

As questões meteorológicas são fatores decisivos na determinação do padrão e da dinâmica dos incêndios florestais, sendo elas: temperatura, umidade relativa do ar, vento e precipitação. Em relação ao impacto dos materiais combustíveis florestais, destacam-se sua quantidade, umidade, inflamabilidade, continuidade e compactação. (CBMDF, 2019). Igualmente importante, as características topográficas de um local afetado têm forte influência no comportamento dos incêndios florestais, que podem se espalhar muito mais rapidamente do que nas encostas (SHUMACHER et. al, 2005).

No entanto, são nessas regiões que se observa o maior número de focos de calor, que na falta de informações adicionais, são utilizados como únicos indicadores das ocorrências de incêndios florestais. E isto, como já mencionado anteriormente, acarreta problemas significativos no planejamento do controle de incêndios e no dimensionamento dos efeitos produzidos. Devido as características da cobertura vegetal nestas áreas sendo estas, fatores condicionantes da qualidade e confiabilidade da detecção de incêndios florestais por satélites.

Sendo assim, em alguns ecossistemas, como as savanas tropicais, um incêndio começa e termina em poucas horas, portanto, pode ser que inicie e termine entre dois intervalos consecutivos de tempo da passagem do satélite, e como consequência, o incêndio não será detectado (BATISTA, 2004; VON BEHR, 2004; DE MORAIS E DE CRISTO, 2014). No entanto, é preciso levar em consideração que a variabilidade espacial e temporal da temperatura e da refletância do ambiente são importantes problemas a serem considerados nos algoritmos de detecção de incêndios por meio de imagens de satélites (UGARTE, et al 2003 apud BATISTA 2004).

Em 2015, foi aprovado um tratado internacional envolvendo quase todas as nações, com o objetivo de reduzir as emissões de GEE, e estimular ações para conter a temperatura média global abaixo dos 2 °C: o Acordo de Paris, que buscava mobilizar a diminuição de lançamento de gases causadores do efeito estufa na atmosfera (SILVA, 2013)

Diversas formas de detecção de incêndios florestais podem ser utilizadas, no entanto, deve-se levar em consideração as características do local, principalmente extensão da área a ser monitorada, pode se utilizar meios de detecção através de vigilância terrestre por postos de vigilância e torres de observação, patrulhamento aéreo com aeronaves e monitoramento por imagens de satélites.

Atualmente no estado do Mato Grosso do Sul, uma empresa na área da celulose, implantou um sistema de monitoramento por vídeo em torres, para monitorar cerca de 450mil hectares, no total são 21 torres, alimentadas por energia solar, as torres possuem aproximadamente 70 m de altura e possuem um raio de alcance de 15 km. São equipadas com câmeras que permitem controlar em tempo real, cerca de 96% da área florestal da empresa no estado, este monitoramento tornou-se eficaz para ajudar no combate e preservação das florestas do estado (VIEGAS, 2019).

Levando em consideração que o Brasil é um país de grande extensão territorial, fica claro que o processo de monitoramento de incêndios florestais, a nível nacional e em escalas regionais, realizado através de imagens de satélites é o meio mais eficiente e de baixo custo, quando comparado com os demais meios de detecção. O planejamento nacional das atividades de controle de incêndios florestais, o disciplinamento das atividades de uso do fogo controlado, bem como a avaliação dos efeitos do fogo sobre a atmosfera, só é viável através do monitoramento por satélite (BATISTA, 2014). Portanto, as informações obtidas devem ser de qualidade e confiáveis. No Quadro 1, apresenta-se um resumo dos principais sistemas de monitoramento utilizados no território brasileiro.

Quadro 1 – Principais sistemas de monitoramento florestal

Sistemas	Descrição/Metodologia	Principais atividades
PRODES – Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite	Sua metodologia é baseada na interpretação de imagens Landsat (20 a 30 metros de resolução espacial), e desde 2005 são utilizadas também imagens de outros satélites, no caso de alta cobertura de nuvens, que possibilitam mapear polígonos de desmatamento maiores do que 6,25 hectares.	Detecta cortes rasos;  Calcula a taxa de desmatamento oficial anual.
DETER – Detecção do Desmatamento em Tempo Real	Este sistema utilizando dados dos sensores Modis, do satélite Terra/Aqua, e WFI, do satélite Cbers, com resoluções espaciais de 250 e 260 metros respectivamente, e realiza um levantamento rápido de alertas de evidências de alteração da cobertura florestal na Amazônia, servidos de suporte à fiscalização e controle de desmatamento.	Detecta desmatamento, degradação e exploração de madeira;  Emite notificação diárias ao IBAMA;  Detecção e emissão de alertas diários.
DEGRAD - Mapeamento da Degradação Florestal na Amazônia Brasileira	O sistema utiliza imagens dos satélites Landsat e CBers e identifica áreas degradadas de no mínimo 6,25 hectares, com objetivo de mapear anualmente áreas de floresta degradada e com tendência a ser convertida em corte raso. O Degrad foi descontinuado em dezembro de 2016, quando a degradação passou a ser mapeada exclusiva e sistematicamente pelo Deter	Mapeamento da chamada degradação florestal, definida como áreas com alteração.
Programa de Monitoramento de Queimadas e Incêndios	O programa monitora a ocorrência de incêndios, e combina o uso de imagens de satélites Landsat com informações complementares e levantamentos feitos em campo para classificação das áreas, deste modo, fornece informações diárias através de relatórios, dados estatísticos e gráficos de foco de incêndio.	Fornecer informações diárias sobre os focos de incêndios aos órgãos de proteção ambiental responsável.
TerraClass	Este sistema é fruto da parceria do INPE com a EMBRAPA, sua metodologia, utiliza imagens de satélites Landsat, qualifica, identifica e investiga as possíveis causas do desflorestamento da Amazônia Legal.	Quantifica o desflorestamento;  Identificar as ações realizadas dentro de uma área após o desmatamento em corte raso.

Fonte: Elaborada pelo autor conforme dados do Ministério do Meio Ambiente, 2016.

## 2.2 Termistores

Os termistores são sensores termorresistivos, ou seja, são sensores termicamente sensíveis, que apresentam uma variação no valor da resistência quando submetidos à mudança de temperatura, essa relação é descrita de forma não linear, esses sensores são classificados de acordo com o seu coeficiente de temperatura e podem ser negativos ou positivos (BEZERRA, 2019).

Em outras palavras, podemos dizer que os termistores, são dispositivos que apresentam resistência elétrica alterada termicamente, deste modo, o valor da resistência

elétrica varia para cada temperatura absoluta. Estes dispositivos são comumente utilizados para o controle de equipamentos eletrônicos (termômetros, alarmes, dispositivos de refrigeração e dissipadores de calor).

Esses sensores recebem ou perdem energia pela diferença de temperatura entre eles e o ambiente em que estão inseridos, podendo receber essa energia por meio do efeito Joule. Essa transferência é por transferência de calor, que ocorre por condução, radiação e convecção (GABRIEL, 2004).

Na transferência por condução, a transferência de energia é realizada por contato molecular direto, não havendo transferência de massa e depende da diferença de temperatura e do ambiente físico. Quanto à transferência de calor por radiação, existe uma independência do meio físico, ocorre na direção de um objeto mais quente para outro de menor temperatura. Por fim, há a transferência de calor por convecção, que está relacionada à condução de calor e ao movimento molecular, que pode ser livre ou forçado devido a diferenças de densidade devido a mudanças de temperatura (GABRIEL, 2004).

Os termistores são fabricados a partir de materiais semicondutores cerâmicos, e geralmente possuem como matéria prima principal uma mistura sintética de óxidos, sulfetos e silicatos (DYER, 2004). Deposita-se pequenas quantidades de uma pasta semicondutora sobre fios de liga de platina, em seguida, reveste-se com epoxi para a proteção e a estabilização. A natureza do material do termistor torna possível que pequenas mudanças na temperatura do corpo produzam grandes mudanças na resistência medida, uma relação que é exponencial (PARENTE, 2000).

A medição de temperatura deste dispositivo é feita basicamente aplicando uma corrente no elemento semicondutor e verificando a tensão através do componente à medida que a temperatura muda (WEBSTER E EREN, 2014).

Os termistores são um dos tipos mais exatos dentre os sensores de temperatura existentes, e não são afetados pelo tempo (envelhecimento), pois além da alta sensibilidade, os termistores são quimicamente e física quimicamente estáveis, apresentando uma alta responsividade, entretanto nas desvantagens destes sensores, inclui-se a fragilidade, com faixa de temperatura limitada, com comportamento não linear e propensos a descalibração em altas temperaturas (SIMPSON *et al.*, 1991).

### 2.2.1 Classificação

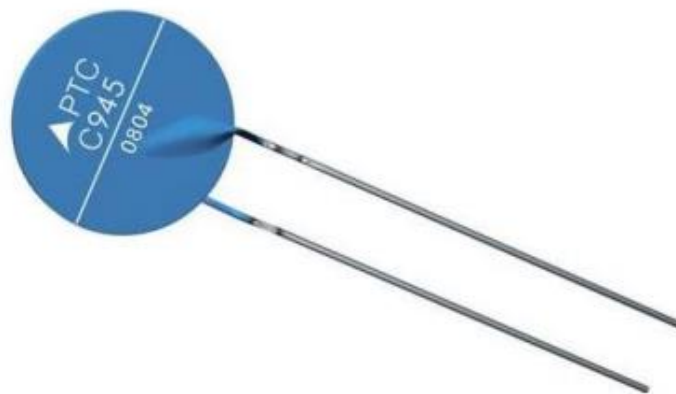
Estes sensores podem ser classificados como: o termistor PTC (Positive Temperature Coefficient), onde para o coeficiente positivo sua resistência elétrica aumenta sensivelmente com o aumento da temperatura, e o termistor NTC (Negative Temperature Coefficient), quando o coeficiente é negativo, o termistor reduz a resistência elétrica conforme ocorre o aumento da temperatura, cabe salientar que os termistores não são polarizado eletricamente (BEZERRA, 2019).

#### a) Termistor PTC

Os sensores do tipo PTC (Figura 10) possuem resistência proporcional à temperatura, funcionam em uma faixa limitada devido à falta de linearidade, e possuem a característica de possuir um ponto de transição, ou seja, somente a partir de uma determinada temperatura, aparecerá em função da mudança de Ohm de temperatura (MONTEIRO et al., 2019).

Geralmente são feitos de um material cerâmico à base de titanato de bário. Muitos termistores do tipo PTC são projetados para trabalhar com interruptores, o que significa que quando a resistência atinge a temperatura de disparo, a resistência muda repentinamente. Existem tipos de termistores PTC usados como fusíveis, chamados de Semifusíveis, Multifusíveis ou Polyswitches. Esses componentes permitem que a corrente flua adequadamente em baixas temperaturas, mas quando a temperatura atinge o valor de disparo, o circuito é interrompido (MONTEIRO et al., 2019).

Figura 10 – Termistor PTC



Fonte: Monteiro *et al.*, 2019.

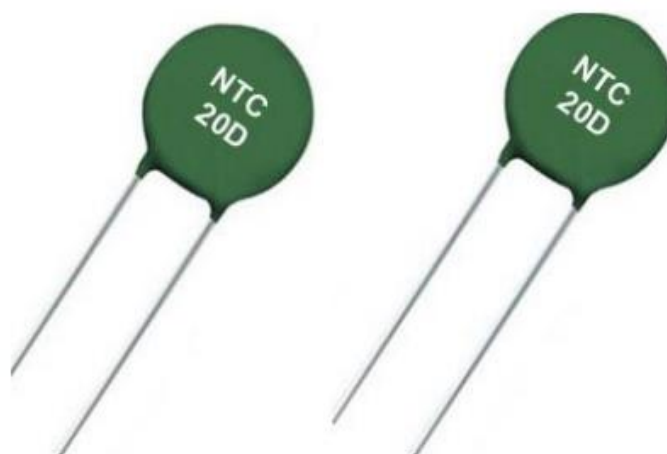
Esses termistores são mais sensíveis às mudanças térmicas do que os tipos NTC, mas, por outro lado, possuem resistência e faixa de temperatura de operação mais limitadas e são mais baratos. Essas características o tornam mais adequado para uso em pequena escala, mas é necessária alta confiabilidade. As aplicações para termistores do tipo PTC incluem circuitos de controle e proteção térmica para motores, transformadores, equipamentos eletrônicos audiovisuais, dentre outros (MONTEIRO et al., 2019).

#### b) Termistor NTC

Os termistores NTC (Figura 11), mostram uma diminuição na resistência com o aumento da temperatura, que é governada por uma forte relação não linear, ou seja, o aumento da temperatura provoca o aumento o número de elétrons livres na banda de condução, resultando na diminuição da resistividade e da resistência elétrica. No entanto, em algumas aplicações, como na medição de temperatura, é possível obter uma relação aproximadamente linear entre esta quantidade e a resistência (SARKAR *et al.* 2013).

Os NTC's são geralmente feitos de óxidos de metais de transição (níquel, cobalto, cobre, titânio), que podem ser adicionados a dopantes para ajustar algumas de suas propriedades. O processo de produção inclui várias etapas que podem exigir construção mecânica em alta pressão e temperatura para obter um grau suficiente de sinterização.

Figura 11 – Termistor NTC



Fonte: Monteiro *et al.*, 2019.

Esses dispositivos possuem uma ampla gama de aplicações e se destacam na medição, controle e compensação de temperatura (WEBSTER E EREN 2014). Além da relação resistência-temperatura, outras características como tensão-corrente e corrente-tempo

permitem que esses dispositivos sejam utilizados em diversas aplicações (JAGTAP *et al.* 2011; WEBSTER E EREN 2014).

O NTC é mais comumente utilizado do que o PTC pois possuem maior facilidade para ser fabricado. A característica do PTC é que existe um ponto de transição, e somente a partir de uma determinada temperatura, ele apresentará uma mudança ôhmica com a mudança de temperatura, na Tabela 2, apresenta-se as faixas de operações e aplicações dos termistores.

Tabela 2 – Aplicações e faixa de operação dos termistores

<b>Tipo</b>	<b>Corrente para início</b>	<b>Estabilidade (°C)</b>	<b>Aplicação</b>
<b>NTC</b>	100 mA	-50 a 150	Área militar, injeção eletrônica de combustível, ar-condicionado e controle automático de temperatura, indicador de óleo, sensores para freezers em relação à temperatura extrema
<b>PTC</b>	100 mA	-	Desmagnetizador, secador de cabelo, surto de corrente, fusível, chave interruptora.

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 2.2.2 Aplicações

Os termistores são amplamente aplicados como sondas de temperatura em aplicações industriais, eletrodomésticos, equipamentos médicos, indústria automotiva, telecomunicações, instrumentação de pesquisa científica, aplicações militares, dentre outros.

Em algumas aplicações, eles são projetados para medir valores absolutos razoáveis de temperatura, como aplicações médicas, enquanto em outras, como aplicações industriais, podem ser projetados para medir temperaturas na casa dos milhares de Kelvin (PARENTE, 2000). Outra diferença importante é a precisão das medições de temperatura a serem feitas. Em alguns casos, uma precisão de medição de temperatura de 1 °C é suficiente, enquanto em outros casos é necessária uma precisão de um décimo ou mesmo um centésimo de grau.

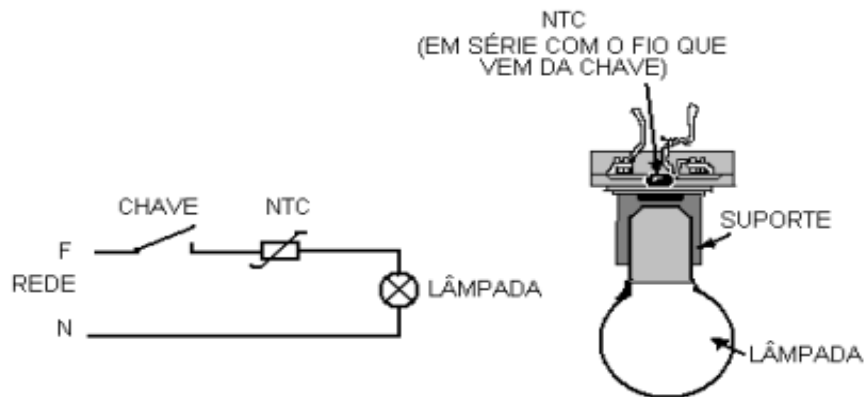
Os circuitos de desenvolvimento de sinal, por outro lado, podem ser mais ou menos complexos, às vezes até envolvendo condicionadores de sinal e placas de aquisição de dados para digitalização de informações e processamento computacional. Os dispositivos do tipo NTC podem ser aplicados, por exemplo para aumentar o tempo de vida de lâmpadas de filamento (SOUZA, 2017).

O termistor do tipo NTC pode ser usado para aumentar o tempo e vida de lâmpadas incandescente, visto que a lâmpada incandescente normalmente queimará quando for ligada,

pois a resistência interna da lâmpada é muito baixa quando a temperatura ainda está muito baixa, então a corrente no circuito será maior neste momento, e aquecerá após ligar na lâmpada, aumentando a resistência do filamento, corrente constante (SOUZA, 2017).

A Figura 12 ilustra um termistor NTC associado em série com a lâmpada, deste modo, quando a lâmpada está acesa, o termistor está frio, então sua resistência é alta e a corrente no circuito é baixa, à medida que a corrente circula pelo termistor, ele começa a aquecer, o valor da resistência diminui e a corrente na lâmpada aumenta, após um tempo ela estará totalmente acesa e a corrente nominal da lâmpada circulará no circuito. Nessas aplicações, o termistor pode ser montado próximo à lâmpada e a temperatura nesse componente será função da temperatura da lâmpada, tornando o circuito mais eficiente.

Figura 12 – NTC pode ser usado para aumentar o tempo e vida de lâmpadas incandescente

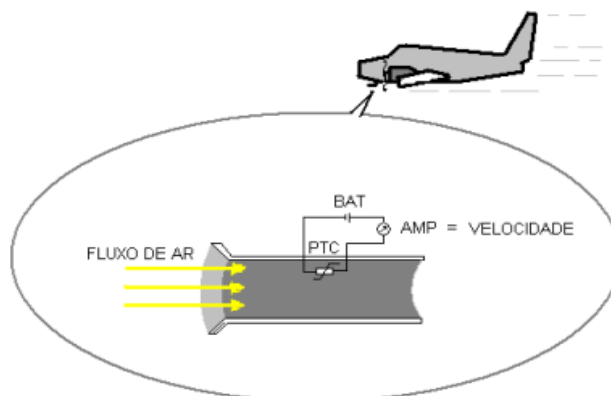


Fonte: Souza, 2017.

Nas inúmeras aplicações dos sensores PTC, podemos citar os dispositivos para medir o fluxo de ar ou líquidos. Cabe salientar, que a corrente no circuito é função do fator de dissipação  $K$ , tipicamente na faixa de  $6 \text{ mW}/^\circ\text{C}$ , se o componente for colocado em um ambiente de fluxo, como o ar, isso dissipará mais calor, alterando a temperatura. resistência do varistor altera a corrente no circuito. A corrente pode ser medida em um amperímetro calibrado para indicar o fluxo de ar ao redor do termistor, deste modo, quanto maior o fluxo, maior a corrente.

É desta forma, que alguns velocímetros de aviões funcionam, a velocidade do ar é função da velocidade do avião, existe um termistor dentro de um tubo montado na parte frontal do avião, que resfria o termistor para captar o fluxo de ar, alterando a corrente em o circuito e no controle, sendo a velocidade do avião exibida no painel, o esquema pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – PTC para medir o fluxo de ar ou líquidos



Fonte: Souza, 2017.

### 2.3 Nanotubos de carbono

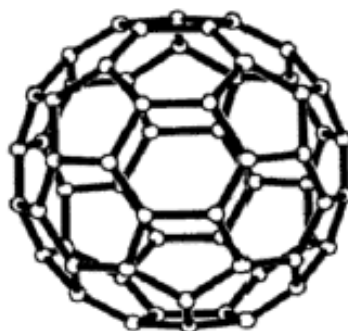
O carbono é um dos elementos mais abundantes e pode ser encontrado de várias formas na natureza, destacando-se o grafite, diamante, fulerenos (C<sub>60</sub>) e atualmente os nanotubos de carbono. A natureza alotrópica de sua hibridização orbital de valência (sp, sp<sup>2</sup> e sp<sup>3</sup>) possibilita a composição de materiais com as mais diversas propriedades físico-químicas (GOMES, 2010; FERREIRA, 2017).

Antes da descoberta dos fulerenos em 1985, apenas dois alótropos cristalinos de carbono puro, o diamante e grafite, eram conhecidos. Na década de 1970, novos métodos levaram à produção de fibras de carbono menores, mais uniformes e com melhores propriedades mecânicas, no entanto apenas da década de 80, com a publicação dos resultados da síntese de cadeias de carbono realizado por Harry Kroto, da Universidade de Sussex, no Reino Unido, que houve um salto nas pesquisas, com a descoberta de uma nova forma alotrópica de carbono, denominando-a "*buckminsterfullerenes*" (atualmente, denominada apenas Fulereno ou Buckyballs) (KROTO et al, 1985; RIBEIRO, 2017).

Com a ajuda de Richard Smalley, da Rice University (Houston, EUA), eles usaram uma técnica de vaporização a laser em grafite e observaram uma nova estrutura chamada C<sub>60</sub> no produto da reação. A geometria da nova estrutura, composta apenas por átomos de carbono, lembra uma bola de futebol com 20 anéis hexagonais e 12 anéis pentagonais. Os hexágonos permanecem planos (como o grafite, que é plano porque só tem hexágonos), enquanto cada pentágono começa com um ângulo de curvatura, necessitando de 12 pentágonos para envolver a superfície sobre si, formando uma esfera, conforme ilustrado na

Figura 14. A descoberta desta estrutura marca uma nova era na ciência do carbono (ARAÚJO, 2011; RIBEIRO, 2017).

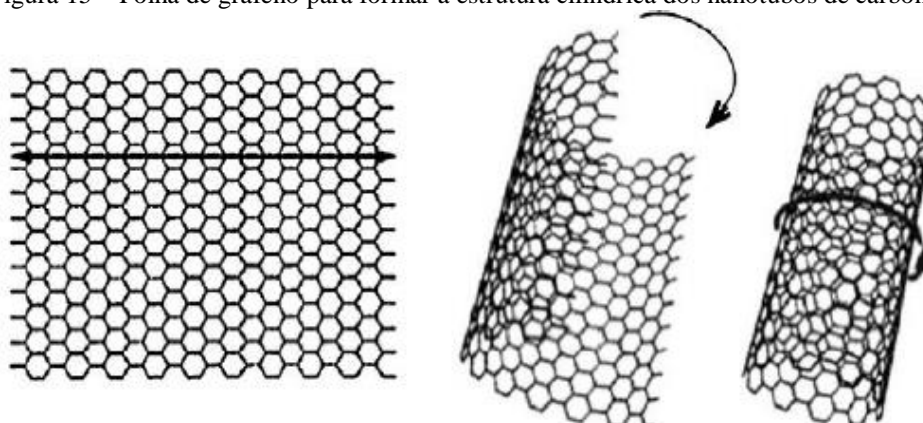
Figura 14 – Estrutura de Fuleno constituído por 60 átomos de carbono



Fonte: Taylor, 1995.

Esse estudo, possibilitou no ano 1991, a descoberta de uma nova estrutura de carbono gerada pelo método de descarga de arco e analisada por microscopia eletrônica de transmissão pelo físico japonês Sumio Iijima (IIJIMA, 1991). As estruturas, denominadas nanotubos de carbono, são geometricamente compostas por enrolamentos de folhas de grafeno (presentes na estrutura gráfitica) derivados de cilindros em nanoescala (ZOU E ZHANG, 2012), conforme mostra a Figura 15, usualmente medem aproximadamente 3nm de diâmetro por 1000nm de comprimento.

Figura 15 – Folha de grafeno para formar a estrutura cilíndrica dos nanotubos de carbono



Fonte: Sheshmani, Ashori e Fashapoyeh, 2013.

Desde sua descoberta do físico Iijima, os nanotubos de carbono têm sido alvo de pesquisas devido à sua geometria, morfologia e outras propriedades únicas. Os nanotubos de carbono têm sido reconhecidos como materiais fascinantes com dimensões em nanoescala, prometendo abrir novas áreas empolgantes na física e química do carbono (ENDO *et al.*,

1996). A preparação desses materiais, suas propriedades como eletrônica, mecânica, térmica e óptica, e suas aplicações em diversas áreas têm sido intensamente estudadas (WANG e YEOW, 2009).

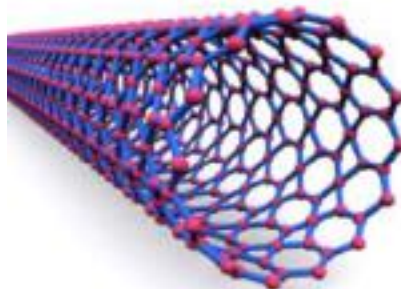
Os nanotubos de carbono são macromoléculas cristalinas semelhantes a cordas ou barbantes, morfologicamente, são formados por folhas de grafeno enrolados, que são descritas como camadas de carbono de um único átomo dispostas em uma estrutura hexagonal na forma hibridizada  $sp^2$ , construídos em torno de uma das maiores forças de ligação da natureza, a ligação covalente entre dois átomos de carbono, por sua vez, formando uma rede cristalina interligada por meio das ligações covalentes (ROSSO, 2001; HENNRICH et al, 2006).

### 2.3.1 Classificação

Do ponto de vista estrutural, os nanotubos de carbono são classificados em três grupos, que possuem como base o número de paredes presentes, cabe salientar, que dada a relação de aspecto comprimento/diâmetro atinge valores entre 100 e 1000 nm em muitos casos, tais sistemas são considerados protótipos importantes para o estudo de sistemas unidimensionais (RIBEIRO, 2008). Os nanotubos de carbono são classificados como:

- a) Nanotubos de Carbono de Parede Simples – NCPS (do inglês, *Single-walled Carbon Nanotubes* – SWCNT), como próprio nome induz, é constituído por apenas uma camada cilíndrica de grafeno com diâmetro que varia entre 0,4 a  $>3$  nm (BAUGHMAN *et al.*, 2002), ilustrado na Figura 16;

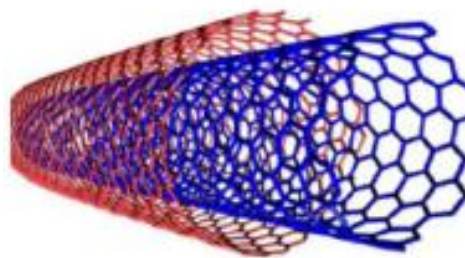
Figura 16 – Ilustração do Nanotubo de Carbono de Parede Simples – NCPS



Fonte: Pinheiro, 2017.

- b) Nanotubos de Carbono de Parede Dupla – NCPD (do inglês, *Double-walled Carbon Nanotubes* – DWCNT), quando composto por duas camadas cilíndrica de grafeno, ilustrado na Figura 17;

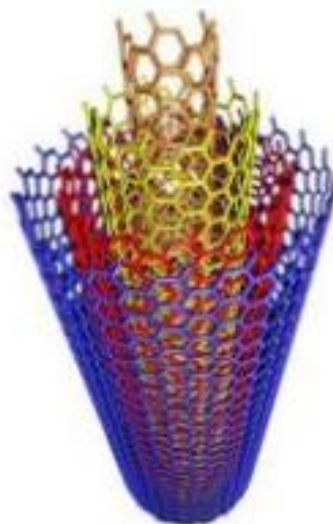
Figura 17 – Ilustração do Nanotubo de Carbono de Parede Dupla – NCPD



Fonte: Pinheiro, 2017.

- c) Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiplas – NTCPM (do inglês, *Multi-walled Carbon Nanotubes* – MWCNT), ilustrado na Figura 18, quando constituídos por várias folhas cilíndricas coaxiais de grafeno, mantendo a interação entre si dada às interações de Van der Waals, apresentando diâmetro entre 1,4 até 100 nm (BAUGHMAN *et al.*, 2002).

Figura 18 – Ilustração do Nanotubo de Carbono de Parede Múltiplas – NTCPM



Fonte: Araújo, 2015.

Dependendo de como as folhas de grafeno são enroladas, o NTCPM pode ter diferentes geometrias e propriedades eletrônicas (condutoras e semicondutoras). Diversos estudos descrevem que o transporte de elétrons em nanotubos de carbono (NTCPM e NTCPM) ocorre balisticamente, ou seja, sem espalhamento, permitindo excelente condutividade elétrica através das grandes extensões dos nanotubos de carbono, deste modo, os nanotubos de carbono possuem propriedades elétricas e térmicas, atrativas e promissoras para diversas

aplicações como: dispositivos de conversão de energia; dispositivos para armazenamento de energia; sensores e detectores de chama.

### 2.3.2 Condutividade elétrica

De acordo com LOSS, M. R. (2014) afirma que as propriedades elétricas dos nanotubos de carbono são em grande parte uma consequência de sua estrutura unidimensional (1-D), e estrutura eletrônica peculiar à do grafite, diante da afirmação essa condição depende do vetor quiral  $Ch$ . Seguindo a mesma linha de argumentação e possível dizer que um nanotubo é metálico quando  $n-m$  é múltiplo de 3, em caso contrário é semiconductor. Todos os nanotubos do tipo armchair são metálicos, enquanto os zig-zag e chiral podem ser metálicos ou semicondutores. (HERBST et al, 2004).

### 2.3.3 Condutividade térmica

Segundo Yang *et al.* (2002) a condutividade térmica dos nanotubos de carbono é dominada por fônons e ocorre de forma quase balística. Em estudos feitos por Kim *et al.* (2001), observou-se que a condutividade térmica  $k$  de nanotubos de carbono isolados, em torno de 3000 W/m.K, em temperatura ambiente. Entretanto em trabalhos realizados por Yang *et al.* (2002) o valor médio de  $k$  em filmes de nanotubos de carbono foi 15 W/m.K. Este valor mais baixo é dado pela dispersão do fluxo de fônons devido ao acoplamento entre os tubos.

### 2.3.4 Acoplamento elétron-fônon

De acordo com Ferreira (2017), o transporte elétrico em nanotubos de carbono é afetado pela dispersão através de defeitos e vibrações quantizadas da rede denominada fônons. Esse mecanismo de espalhamento pode ocorrer por meio de interações elétron-elétron, elétron-defeito e elétron-fônon.

Em semicondutores de gap largo, um elétron se move através do cristal com propriedades determinadas principalmente pelo potencial periódico associado com o arranjo dos íons nos pontos da rede. Vibrações de íons, em torno de posições de equilíbrio, produzem, quase instantaneamente, mudança nas energias dos elétrons e, deste modo, introduziu uma perturbação dependente do tempo inserida na equação de Schorondinger do sistema. A colisão entre os elétrons causa transições de nível de energia nas quais a direção de propagação pode mudar (ERAS, 2007; MATTOS, 2010). Essa interação é associada ao acoplamento de

elétrons-fônons e é, geralmente, fraca o bastante para ser considerada como uma pequena perturbação que pode induzir transições entre estados não perturbados (SANTOS JÚNIOR, 2004).

Em seus estudos Yang *et al.* (2002), informa que condutividade elétrica  $\sigma$  de filmes de NTCPM está em torno de  $1,6-5 \times 10^1 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$  a temperatura T de 300 K, sugerindo que o transporte térmico nesses NTCPM é controlado por fônons e ocorrendo de forma semelhante a balística. Kim *et al.* (2001), apresentaram a condutividade térmica k de NTCPM isolados, aproximadamente de 3000 W/m.K, na temperatura ambiente. Entretanto, o valor médio de k apresentado por Yang *et al.* (2002) para dispositivos de NTCPM foi 15 W/m.K. Conforme análises de Pinheiro (2017), o valor inferior é justificado pela dispersão do fluxo dos fônons dado ao acoplamento entre os tubos.

### 2.3.5 *Buckypapers*

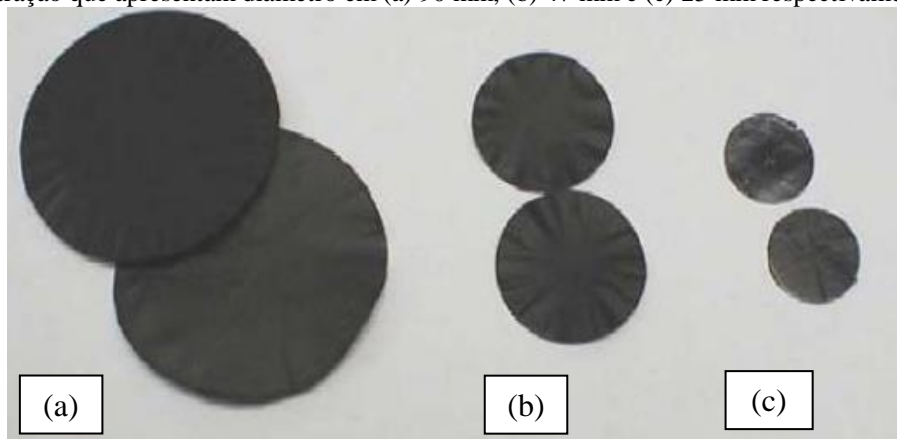
Desde as descobertas das propriedades únicas dos nanotubos de carbono, diversos estudos têm sido elaborados na tentativa de reprodução das propriedades microscópicas dos nanotubos de carbono em escala macroscópica, no entanto, esta prática apresenta desafios para a nanotecnologia devido à sua reduzida escala de tamanho (FERREIRA, 2017). Um dos recentes estudos quem vem sendo desenvolvido para resolver este problema, envolve a produção de folhas porosas macroscópicas compostas por redes nanotubos de carbono denominadas *Buckypaper* (BP) (ZAERI *et al.*, 2010).

Richard Smalley e seu grupo de pesquisa usaram o termo "*buckypaper*" pela primeira vez em 2003. BP é uma matriz de dispersão de nanotubos de carbono mantida por interações de van der Waals (MUNOS E DALTON, 2005). Os *buckypapers* são filmes finos constituídos por um arranjo macroscópico de emaranhados de nanotubos de carbono ou nanocompósitos (formulados em nanotubos de carbono), com espessura na faixa de  $\mu\text{m}$ , que formam uma estrutura de rede aleatória contínua e porosa, sobre uma membrana de filtração (semelhante ao papel) (PAPA, 2014; ZHANG, JIANG, E PENG, 2014), também pode apresentar-se em um filme autossustentável de forma livre, onde o substrato ou membrana é removido após a formação do filme. O produto obtido é um material com propriedades mecânicas, térmicas e elétricas inerentes aos nanotubos de carbono, tornando-o atrativo para diversas aplicações (eletrodos, retardantes de chama, músculos artificiais, e para purificação da água) (FRAYSSE, 2002; WOOD, 2006; WHITBY *et al.*, 2008; HU, 2010; PAPA, 2014).

O método de produção dos *buckypaper* influenciam diretamente as propriedades e aplicações industriais. Atualmente, sua tecnologia de fabricação pode ser dividida em método seco (destaque para *Domino Pushing* e *Shear Pressing*) e método úmido (destaque para Filtração e *Drop Casting*). O papel Bucky produzido por processos secos geralmente resulta em nanotubos de carbono com maior perfeição estrutural e menor aglomeração de tubos, entretanto do ponto de vista econômico o processo úmido é mais atrativo, devido ser economicamente mais viável (WHAG, 2008; BRADFORD, 2010; REIS, 2012; ZHANG, JIANG E PENG, 2014; PINHEIRO, 2017).

A propensão de aglomeração dos nanotubos de carbono dada às fortes interações de Van der Waals representa uma barreira à sua plena aplicação, neste caso foi criada uma solução permitindo a formação de aglomerados densos deste nanomaterial (WOOD, 2006). De acordo com Papa *et al.* (2014), o filme BP destaca-se por ser um material novo e avançado com propriedades piezoresistivas, eletroquímicas e mecânicas inovadoras (PAPA *et al.*, 2014). Na Figura 19, apresenta-se exemplos de filmes BPs com diferentes diâmetros produzidos com NCPS's.

Figura 19 – *Buckypapers* produzidos com NCPS's depositados sobre uma membrana de filtração que apresentam diâmetro em (a) 90 mm, (b) 47 mm e (c) 25 mm respectivamente.



Fonte: WANG (2005, p. 2)

### 2.3.6 Termistores Nanoestruturados

Nanotubos de carbonos do tipo NTCPS, NTCPD e NTCPM quando funcionalizados (covalente e não-covalente) possuem uma riqueza muito grande em termos de propriedades físico-químicas e têm sido usados nos mais engenhosos mecanismos para produzir sistemas nanoestruturados com arquiteturas complexas e com funções altamente especializadas

(WHITBY *et al.*, 2008; HU, 2010; PAPA, 2014; JIANG E PENG, 2014; FERREIRA, 2017; PINHEIRO, 2017).

A relação entre a temperatura e a resistência dos nanotubos de carbono é um tópico importante para aplicações técnicas. Seu entendimento está relacionado ao uso de redes de nanotubos de carbono como elementos sensores em nanosensores de temperatura. Sensores de tamanho nano podem fornecer medições locais precisas de temperaturas que mudam rapidamente, reduzindo a probabilidade de perturbar o ambiente ao redor, além do consumo de energia ser baixo.

Bartolomeo *et al.* (2008), em seu estudo de termistores nanoestruturados concluiu que os nanotubos de carbono são excelentes materiais para a manufatura de sensores de temperatura pois apresentam durabilidade, responsividade rápida e repetibilidade, cabe salientar que para um sensor ideal, repetibilidade significa recuperar a mesma resistência mínima/máxima quando a temperatura atinge os mesmos valores mínimo/máximo. Deste modo os filmes produzidos a partir dos nanotubos de carbono apresentam-se adequados para a aplicação em sensores de temperatura.

Ainda segundo o autor, o coeficiente de resistência da temperatura pode não ser tão bom em comparação com os dos sensores de temperatura de platina. No entanto, o tamanho nano dos sensores de nanotubos de carbono pode resultar em uma sensibilidade muito alta à mudança de temperatura ambiente e em uma excelente resposta de tempo, o que é altamente desejável para medições locais em sistemas com variações de temperatura muito rápidas e onde a perturbação introduzida pelo termistor tem que ser reduzido o máximo possível.

## **2.4 Hardware do Sistema baseado em Arduino**

Lunardelli (2014), aponta como um aspecto importante do Arduino que é um microcontrolador de prototipagem eletrônica criado em 2005, na cidade de Ivrea – Itália, com o objetivo de permitir o desenvolvimento de controle de sistemas interativos, de baixo custo e acessível a todos. Além disso, todo material (software, bibliotecas, hardware) é *open-source*, ou seja, pode ser reproduzido e usado por todos sem a necessidade de pagamento de direitos autorais.

Figura 20 – Placa Arduino



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

#### 2.4.1 Fonte de alimentação

A fonte de alimentação é responsável por receber a energia de alimentação externa, que pode ter uma tensão de no mínimo 7 V e no máximo 12 V e uma corrente mínima de 40 mA. A fonte filtra e depois regula a tensão de entrada para duas saídas: 5 V. O requisito deste bloco é entregar a tensão de 5 Vs para que a CPU e os demais circuitos funcionem.

#### 2.4.2 Núcleo de CPU

O núcleo de processamento de uma placa Arduino é um microcontrolador, uma CPU, um computador completo, com memória RAM, memória de programa (ROM), uma unidade de processamento de aritmética e os dispositivos de entrada e saída, tudo em um chip só. Esse chip possui todo hardware para obter dados externos, processar esses dados e devolver para o mundo externo.

#### 2.4.3 Entradas e saídas

No total temos disponíveis 22 pinos que podem ser utilizados como entradas. Os 14 pinos digitais mais os 8 pinos analógicos, podem ser programados para serem entradas digitais. Quando um pino é programado para funcionar como entrada digital, por meio do programa que escrevemos, adicionamos um comando que ao ser executado efetua a "leitura" da tensão aplicada ao pino que está sendo lido. Então, após a execução deste comando, sabemos se o pino encontra-se em um estado "alto" ou "baixo".

Na prática, o programa pode saber se um pino está alimentado com 0 ou 5 V. Essa função é utilizada geralmente para identificar se um botão está pressionado, ou um sensor está "sentindo" alguma coisa no mundo externo.

Note que a função de entrada digital apenas entrega 0 ou 1, sem tensão ou com tensão. Não é possível saber quanta tensão está sendo aplicada no pino. Para isso usamos as entradas analógicas.

#### 2.4.4 Entradas analógicas

Temos disponíveis no Arduino Nano V.30 entradas analógicas. Ao contrário de uma entrada digital, que nos informa apenas se existe ou não uma tensão aplicada em seu pino, a entrada analógica é capaz de medir a tensão aplicada. Através da entrada analógica, conseguimos utilizar sensores que convertem alguma grandeza física em um valor de tensão que depois é lido pela entrada analógica.

#### 2.4.5 Saídas digitais

Com uma saída digital podemos fazer com que um pino libere 0 volts ou 5 V. Com um pino programado como saída digital, podemos acender um led, ligar um relé, acionar um motor, dentre diversas outras coisas. Podemos programar o Arduino para no máximo 14 saídas digitais, porém podemos utilizar um ou mais pinos para controlar um bloco de pinos.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

#### 3.1 Elementos sensor: Termistor nanoestruturado

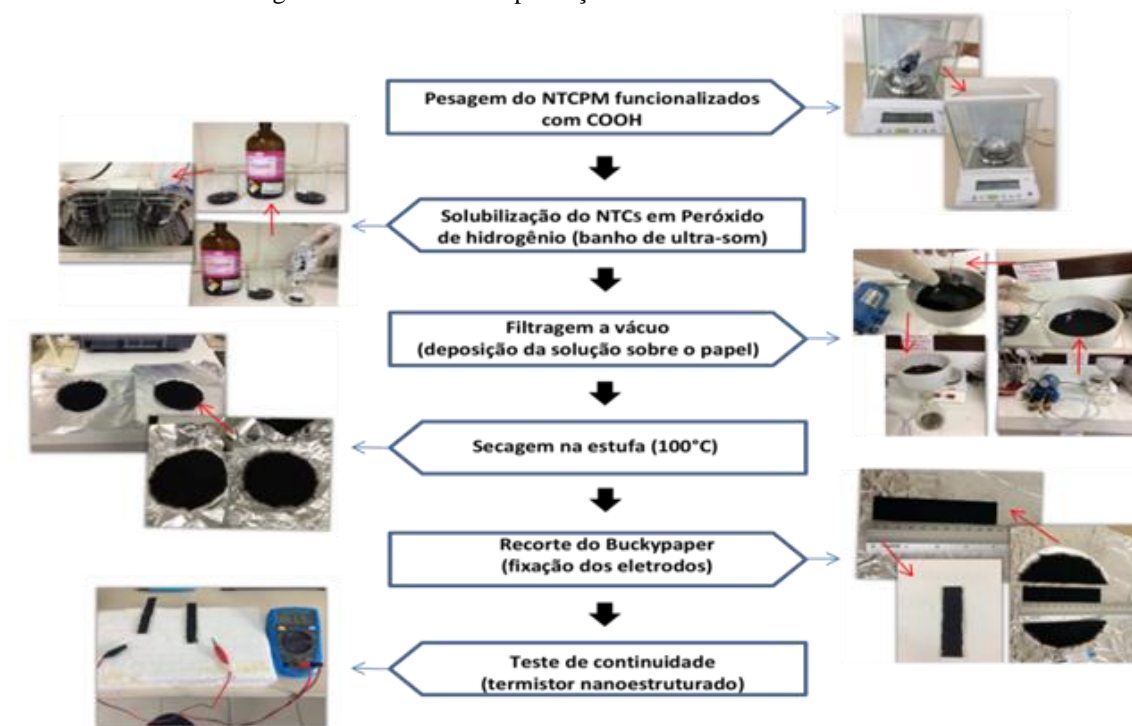
Como mencionado anteriormente, o sensor desenvolvido neste estudo está configurado como um dispositivo termistor, composto por dois eletrodos feitos de fio de cobre, cujo diâmetro é  $\varnothing 22,34$  mm, fixados com tinta condutiva de prata Griffin Dy-001 em uma tira de Buckypaper.

##### 3.1.1 Fabricação

Na produção de *Buckypaper* foi utilizado NTCPM sintetizados pelo método CVD e funcionalizados com COOH, o processo de fabricação dos *Buckypaper* foi realizado durante esta pesquisa na Universidade Federal do Pará (UFPA) do campus de Abaetetuba. No preparo da suspensão pesou-se 100 mg de NTCPM funcionalizados com COOH (NTCPM-COOH) e posteriormente solubilizou-se em 100 ml de peróxido de hidrogênio em dois béqueres de 200 ml por meio de um banho de ultra-som em uma lavadora ultra-sônica Soniclean 2PS a 40 kHz por 60 minutos, em seguida as soluções foram depositadas sobre um papel filtro qualitativo 37, sendo que esse filtro estava em um funil Buchner que foi alocado em um kitasato de 500 ml que estava conectado a uma bomba a vácuo, tendo como resultado um filme de aparência uniforme e logo em seguida foi levado à estufa (com temperatura de 100 °C) para secagem completa do solvente.

Como mostra o fluxograma foi retirada uma tira do *Buckypaper* com 800 mm de comprimento, 100 mm de largura, 205  $\mu\text{m}$  de espessura, após a retirada realizamos a fixação dos eletrodos de cobre com Tinta Condutiva De Prata Mechanic MCN DJ002 em seguida aguardando a secagem da tinta no fio de cobre, concluindo esse procedimento anterior verificou-se a resistência do *Buckypaper* torno de 55,7  $\Omega$ . O dispositivo resultante dos procedimentos descritos é ilustrado no fluxograma detalhado do processo é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Processo de produção do sensor nanoestruturado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

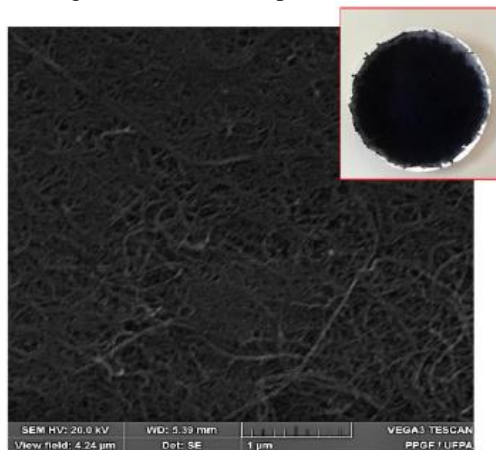
### 3.1.2 Caracterização MEV

Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um dispositivo capaz de produzir imagens de alta ampliação (até 300.000x) e resolução. As imagens fornecidas pelo MEV possuem recursos virtuais, pois o que é mostrado no monitor do aparelho é uma transcodificação da energia emitida pelos elétrons, diferente da radiação luminosa a que estamos acostumados (DEDAVID, GOMES E MACHADO, 2007; LMIC, 2021).

A tecnologia de microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma importante ferramenta para a caracterização dos nanotubos de carbono, fornecendo informações sobre a composição química, topografia da superfície e morfologia dos componentes (FONSECA, 2012). A técnica é baseada na detecção de elétrons incidentes e dispersos de um feixe de elétrons de alta energia em uma amostra (SOARES, 2011).

Para fornecer informações sobre composição química, topografia de superfície e morfologia de componentes, o modelo de microscópio eletrônico de varredura usado na Figura 22 é o modelo TESCAM VEGA 3, que usa um detector no modo de elétrons secundários com uma tensão de aceleração de 20 kV e uma corrente de feixe de elétrons corrente de 85-90  $\mu\text{A}$  (micro amper), de modo que a morfologia exibe uma dispersão uniforme de NTC de paredes múltiplas absorvidos pelos poros do papel (FERREIRA, 2017).

Figura 22 – Imagem de MEV da superfície do filme BP- NTCPM /COOH



Fonte: Ferreira, 2017.

### 3.1.2.1 Princípio de funcionamento

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) pode ser utilizada para uma ampla gama de estudos envolvendo a caracterização completa de materiais naturais, sintéticos, compostos inorgânicos, orgânicos e metálicos, avaliação do tamanho de partículas, análise de superfície fraturada e falhas, e na utilização de sensores de temperatura (LMIC, 2021).

O MEV funciona através da emissão um feixe de elétrons de um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo) aplicando uma diferença de potencial que varia de 0,5 a 30 kV. Essa mudança de voltagem permite mudanças na aceleração de elétrons, o que também faz com que o filamento aqueça. A parte do polo positivo associada ao filamento do microscópio (polo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando em aceleração em direção ao polo positivo. A correção do caminho do feixe é realizada alinhando o feixe com a lente condensadora da abertura da objetiva. A lente objetiva ajusta o foco do feixe de elétrons antes que os elétrons atinjam a amostra analisada (DEDAVID, GOMES, E MACHADO, 2007).

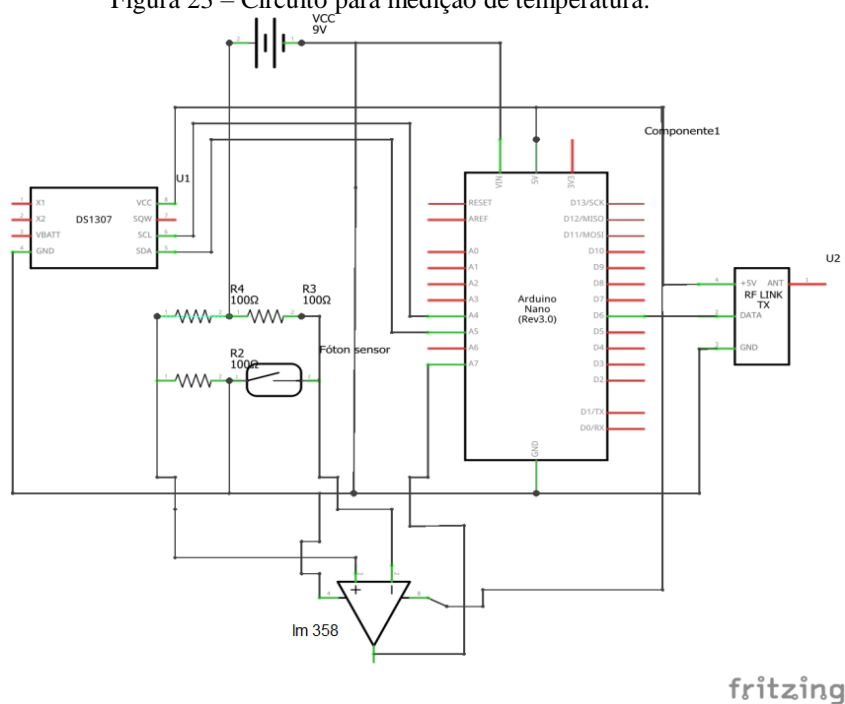
Quando o feixe de elétrons é focado na amostra, ocorrem colisões elásticas e inelásticas. As colisões elásticas apenas alteram a trajetória dos elétrons retroespalhados, enquanto as colisões inelásticas transferem energia para a amostra emitida por elas na forma de elétrons secundários (SE), raios X (LIMA, 2013).

### 3.2 Preparação do elemento sensor

Primeiramente foi utilizado o programa *fritzing*, aplicativo que serve para montar protótipos de circuitos elétricos, para elaborar a montagem do sensor e também o circuito elétrico do mesmo.

O circuito está composto por uma fonte de alimentação de 5 V, 3 resistores de 100  $\Omega$ , Arduino nano, modulo Rf link, Amplificador Operacional LM358 SMD, um Real Time Clock RTC DS1307 e o termistor.

Figura 23 – Circuito para medição de temperatura.



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

Após circuito montado deu-se o início da construção o sistema de monitoramento ambiental, os componentes necessários para a montagem do circuito.

Lista de material:

- Resistores 100  $\Omega$
- Termistor
- 1 protoboard
- Arduino nano
- Modulo Rf link
- Amplificador Operacional LM358 SMD

- Real Time Clock RTC DS1307
- Fios jumpers para as ligações.

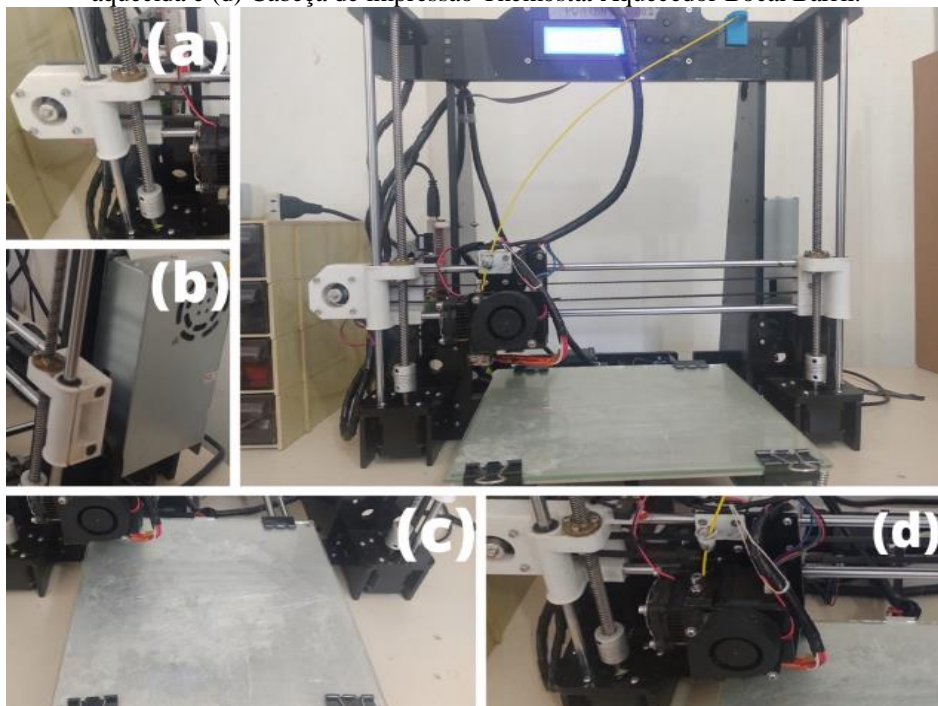
### 3.3 PARÂMETROS DE MODELAGEM E IMPRESSÃO 3D DAS PEÇAS DO SISTEMA

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, é o processo pelo qual objetos físicos são criados pela deposição de materiais em camadas de  $\pm 0,05$  mm -  $\pm 0,8$  mm, com base em um sólido digital. Todos os processos de impressão 3D requerem o trabalho conjunto de software, hardware e materiais.

A impressora utilizada no presente trabalho é do tipo FDM da marca Anet modelo ANET A8, apresentada na Figura 24, os materiais de filamento que pode ser utilizado na impressora são: PLA, ABS, HIPS, WOOD, PVA, NYLON e PET-G, sua resolução de camada e de 0,1 mm e com tamanho máximo de impressão de até 23 cm de altura, 22 cm de largura e 22 cm de comprimento.

Parte eletrônica da ANET A8 (fonte de alimentação, Mainboard, Painel de controle, Motores dos Eixos, dispositivos de fim de linha, e cama aquecida ou *hotbed*).

Figura 24 – Foto da impressora ANET A8 onde foram produzidas as peças, na figura (a) do motor responsável pelo movimento vertical e horizontal lateral, (b) a fonte de alimentação com potência de saída de 240W (c) mesa aquecida e (d) Cabeça de impressão Themoostat Aquecedor Bocal Barril.



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

Para a impressão do case do sistema de monitoramento e o case do sistema receptor, foi necessária a criação de dois modelos tridimensionais, por meio de programas específicos para isso, o primeiro software de modelagem e o cinema 4D criado em 1991 pela empresa MAXON Computer.

A Figura 25 mostra o case do sistema de monitoramento que possui dois seguimentos que unidos possuem as seguintes dimensões raio de 40 mm, 80 mm de diâmetro e  $2.6808 \times 10^2$  ml de volume.

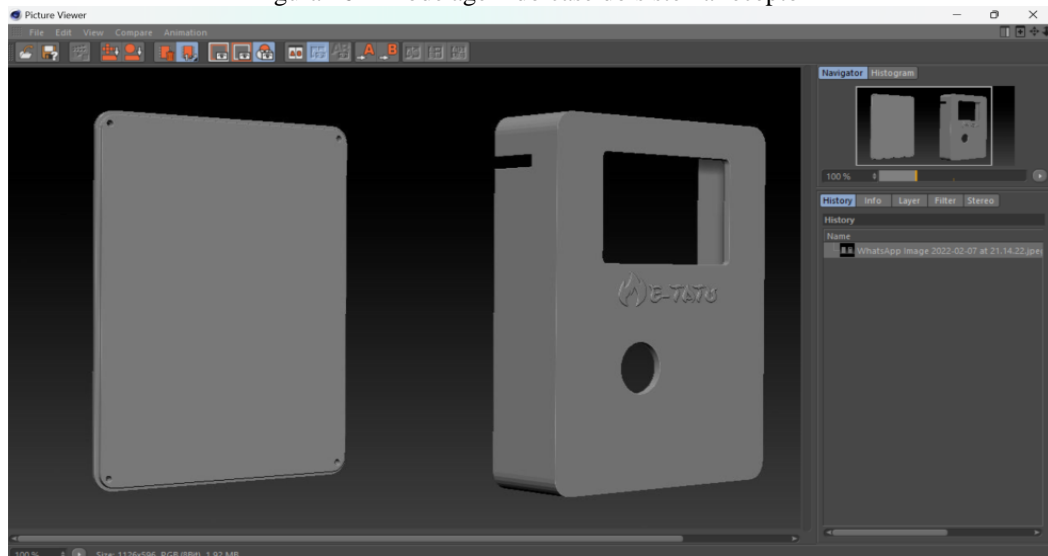
Figura 25 – Modelagem do case do sistema de monitoramento.



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

A Figura 26 mostra a modelagem do case do sistema receptor que possui as seguintes dimensões de 42 mm de altura, 132 mm de largura e 172 mm de comprimento.

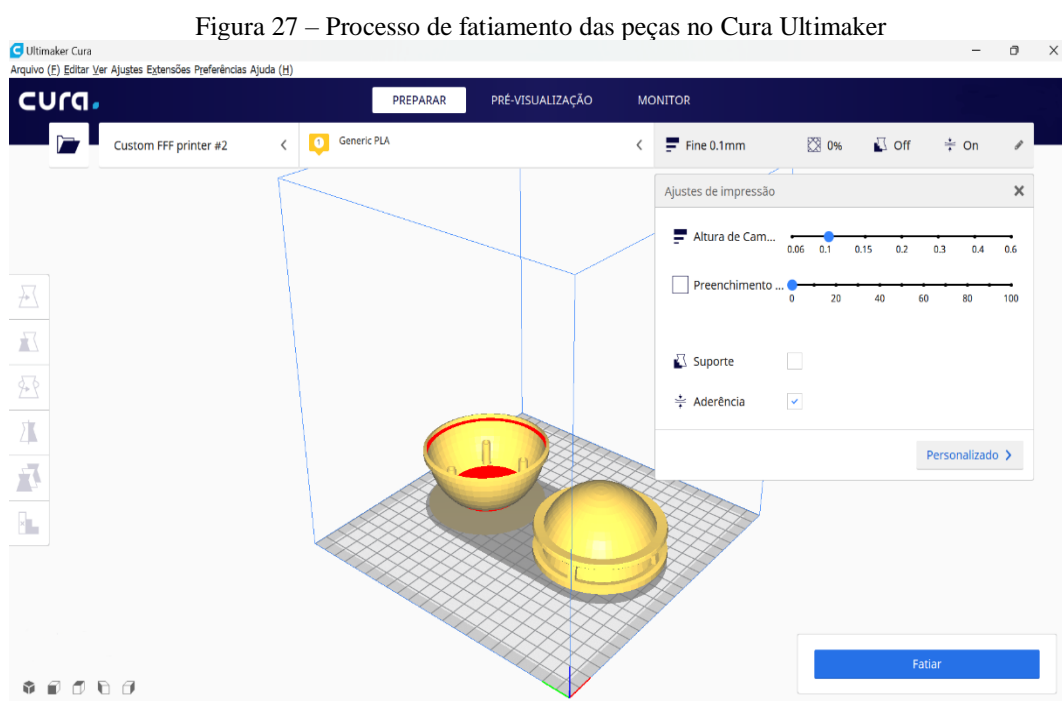
Figura 26 – Modelagem do case do sistema receptor



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

A etapa seguinte é exportar os arquivos modelados no formato STL para o software fatiador, denominado Cura Ultimaker 4.1.0, da empresa Ultimaker BV.

Na Figura 27 foram definidos os parâmetros como temperatura do bico extrusor, temperatura da mesa, velocidade de impressão, *layer* (espessura da camada de impressão), densidade de preenchimento, entre outros.



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

### 3.3.1 Receptor do Sistema de Comunicação Sem Fio dos Dados de Medição do E-tatu

O sistema receptor é responsável por mostrar os dados que o sistema está realizando a leitura em tempo real, o mesmo é composto pelos seguintes componentes (Joystick Arduino 3 Eixos, Arduino mega, modulo receptor Rf link, Display gráfico LCD 128×64 – ST7920, Potenciômetro 100Ω, placa, placa player baquelite perfurada, Antena Sim8001 Gprs Tcp Ip Com Fio e Módulo *Wi-fi* Esp01), a antena inserida no dispositivo aumenta o alcance de 100 m para 1990 m de acordo com o fabricante.

### 3.3.2 Processos de medição

O sistema atua em uma área de cobertura de detecção em torno de seu ponto de instalação, cujos sinais são processados um transmissor e um receptor de ondas eletromagnéticas de frequência de 433 MHz. O detector é localizado em ponto estratégico, com abrangência de uma área pré-determinada.

O dispositivo é um ponto fixo e móvel dentro da área. A fonte de calor produzida no ambiente deverá passar pelo dispositivo para sensibilizá-lo. O transmissor e o receptor podem ser colocados no solo, a uma distância de funcionamento entre o transmissor e receptor oscila entre 0,00 e 100,00 m no raio de 360°.

Figura 28 – Ilustração do funcionamento do sistema



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

#### Vantagens

- Facilidade de instalação;
- Flexibilidade na ampliação do sistema;
- Flexibilidade na alteração do Layout;
- Baixo custo de instalação;
- Manutenção somente nos pontos que sejam necessários;
- Manutenção com relatórios gerados pela central com data e hora dos eventos.

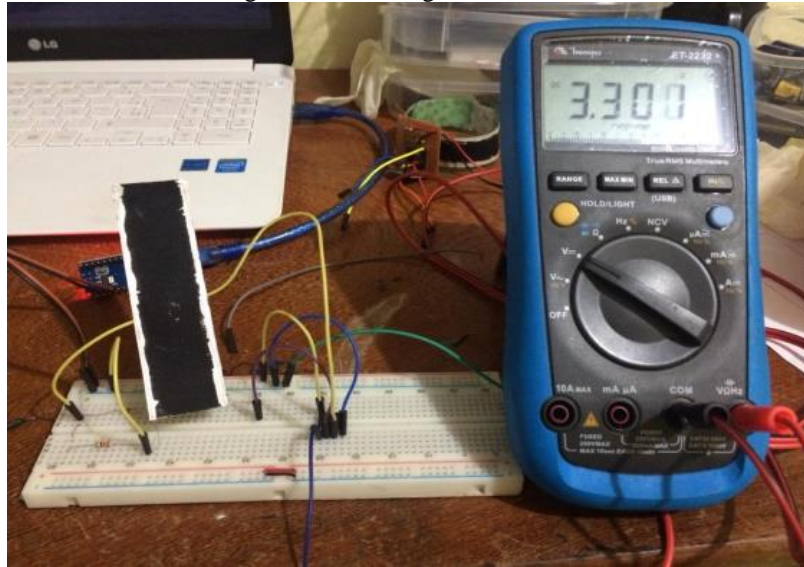
#### Desvantagens:

- Médio custo inicial.

### 3.4 Montagem do aparato experimental

Neste estudo os testes do sistema de monitoramento, e verificação da tensão foi gerada pelo circuito apresentado na Figura 29.

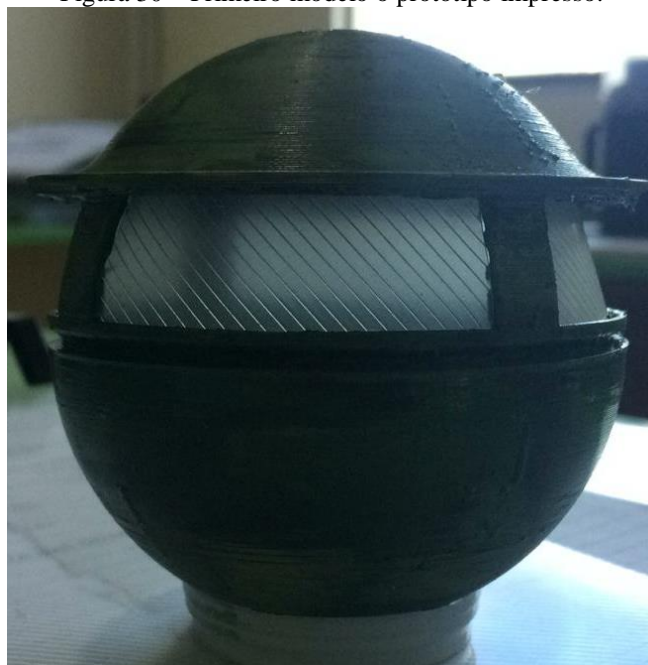
Figura 29 – Montagem do circuito.



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

Finalizado o circuito e os testes alocamos o mesmo em uma esfera impressa, como pode ser observado na Figura 30 e Figura 31.

Figura 30 – Primeiro modelo o protótipo impresso.



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

Figura 31 – Segundo modelo o protótipo impresso.



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

Após finalizado o processo de montagem inserimos a antena do modulo RF e com isso finalizamos o dispositivo, como observa-se na Figura 32 e Figura 33.

Figura 32 – Sistema aberto



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

Figura 33 – Sistema isolado



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

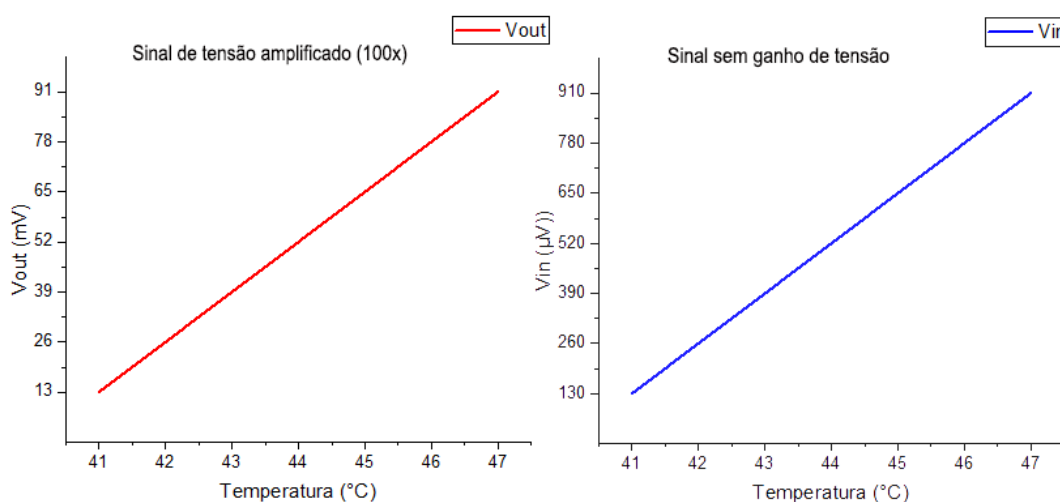
O Funcionamento do sistema de monitoramento ambiental de local está voltado principalmente para as Unidades de Conservação, Reflorestamento e outras áreas de interesse específico. Ele é realizado pelo próprio sistema. De todos os Sistemas de monitoramento apresentados, o monitoramento local, sob o ponto de vista tecnológico, comparativamente aos outros dois, é o que apresenta melhores resultados, o sistema é composto pelo termistor que realiza o monitoramento de incêndio em 360° e possui um módulo de rádio frequência que realiza a transmissão de dados em tempo real para o centro de comando, desta forma a extinção do foco do incêndio é feita de forma eficaz.

#### 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os testes em que o sistema foi submetido à variação de temperatura, observamos que o sensor durante o teste indoor sob a influência de uma fonte de calor, onde temos aumento de temperatura no sistema que resultou em diminuição da resistência devido o acoplamento elétrico-fônon e consequentemente um aumento de tensão no dispositivo. Isso já demonstra a sensibilidade do sensor dentro do sistema em condições ambientais sobre efeito de uma fonte de calor.

Devidos os valores fornecidos no sistema, verificamos a necessidade de trazer um ganho de sinal para o dispositivo, utilizamos o modulo amplificador operacional lm380 é um equipamento de tamanho reduzido, conhecido pelas suas características únicas, com a capacidade de realizar a amplificação de sinais com possibilidade de ganho de 100x, a Figura 34 mostra o sinal antes e depois da amplificação que as duas retas crescem de linearmente com a temperatura, devido o circuito de linearização que foi utilizado de modo a aproximar a variação da resistência de uma função linear. O Figura 25 mostra através de uma reta a relação entre a temperatura e tensão do dispositivo.

Figura 34 – Relação de Temperatura x Tensão sem ganho ( $\mu\text{V}$ ) de entrada e Temperatura x saída (mV) do amplificador



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Esse comportamento pode ser explicado pela capacidade dos nanotubos de carbono de absorver e reter calor, fazendo com que os eletrodos de *buckypaper* aqueçam mais do que os eletrodos de cobre, deste modo, criando um gradiente de temperatura entre eles.

#### 4.1 Experimento 1 – Teste do sensor

Realizamos a medição de tensão com uma fonte de energia de 5 V sobre o termistor de *Buckypaper*, antes de montar no sistema. Observamos que temperatura sobre o sensor na Figura 35 (a) e 41 °C e sua tensão de 3,39 V e após do sensor se submetido ao um aumento de temperatura como mostra a Figura 35 (b) a sua temperatura é no valor de 47 °C , na figura 36 mostra a sua tensão aumenta para 3,40V, diante do experimento temos uma diferença de tensão da Figura 35 (a) para Figura 35 (b) de 0,8 V e que a cada 1 °C a sua tensão aumenta em 0,13 mV.

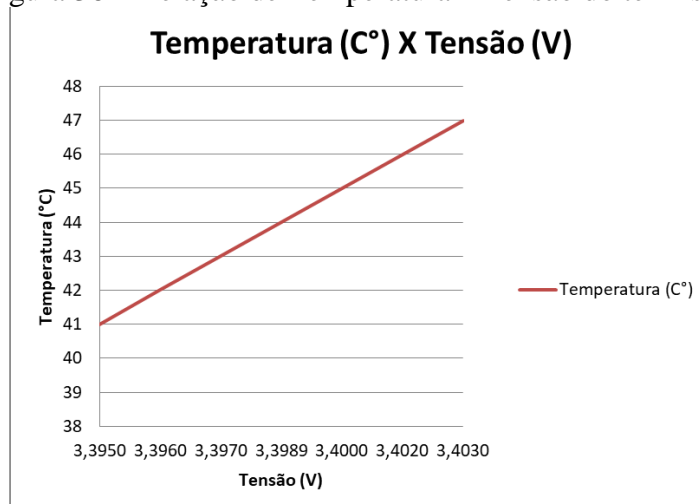
Figura 35 – Experimento 1



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

O Figura 36 mostra através de uma reta a relação entre a temperatura e tensão do dispositivo.

Figura 36 – Relação de Temperatura x Tensão do termistor

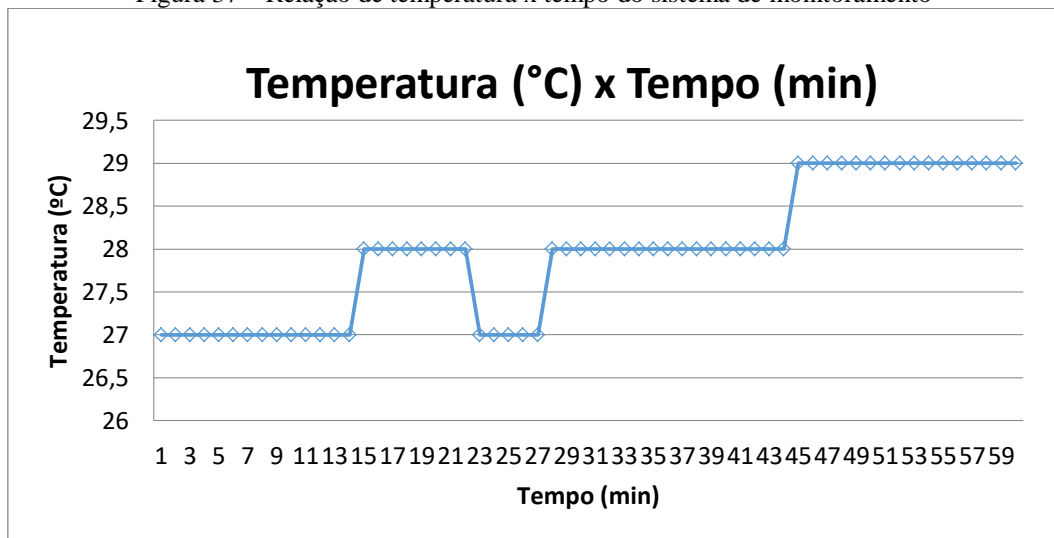


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

## 4.2 Experimento 2 – Captura de dados do sistema por 1 hora

No experimento 2 - o sistema foi exposto à temperatura ambiente (Figura 37), para captura de dados em um período de 1 hora, o dispositivo realizou o monitoramento com êxito e com os dados foi possível a montagem do Figura 36 onde mostra a relação de temperatura x tempo, a cada minuto o dispositivo gravava os dados, obtivemos a seguintes dados no do intervalo de 1 hora: a temperatura teve uma variação de 2 °C e o tempo de resposta entre o sensor e o arduino de 3 segundos.

Figura 37 – Relação de temperatura x tempo do sistema de monitoramento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 378 – Sistema realizando o teste no meio ambiente



Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

### 4.3 Tempo de resposta e valor comercial dos sensores disponíveis

Os resultados obtidos sugeriram que os dispositivos nanoestruturados de carbono são eficazes, apresentam uma resposta rápida e são uma solução viável técnico e financeiramente para os sensores existentes no mercado, visto que o custo médio para a fabricação do dispositivo foi inferior a R\$ 10,00, e o sensor possui um daley menor ou igual dos sensores que estão disponíveis no mercado, como mostra a Figura 39.

Figura 39 – Sistema realizando o teste no meio ambiente

<b>SENSORES</b>	<b>Daley (segundos)</b>	<b>Valor (R\$)</b>
Termistor NTC	3 s	R\$10,00
DHT11	3 s	R\$22,50
DTH22	5 s	R\$52,50
LM35	3 s	R\$35,30

Fonte: Acervo da pesquisa, 2022.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos sugeriram que os dispositivos nanoestruturados de carbono são eficazes, apresentam uma resposta rápida e são uma solução viável técnico e financeiramente para os sensores existentes no mercado, visto que o custo médio para a fabricação do dispositivo foi inferior a R\$ 10,00.

O sensor desenvolvido é constituído por NTCPM sintetizados pelo método CVD e funcionalizados com COOH, o processo de fabricação de folhas porosas macroscópicas compostas por redes nanotubos de carbono denominadas *Buckypaper* foi realizado por meio da suspensão, onde foram pesado 100 mg de NTCPM funcionalizados com COOH (NTCPM-COOH) e posteriormente foi solubilizados em 100 ml de peróxido de hidrogênio em dois béqueres de 200 ml por meio de um banho de ultra-som em uma lavadora ultra-sônica Soniclean 2PS a 40 kHz por 60 minutos, em seguida as soluções foram depositadas sobre um papel filtro qualitativo 37, sendo que esse filtro estava em um funil Buchner que foi alocado em um kitasato de 500 ml que estava conectado a uma bomba a vácuo, tendo como resultado um filme de aparência uniforme e logo em seguida foi levado à estufa (com temperatura de 100 °C) para secagem completa do solvente.

O *Buckypaper* produzido possui 800 mm de comprimento, 100 mm de largura, 205 µm de espessura, a fixação dos eletrodos de cobre foi realizada com Tinta Condutiva De Prata Mechanic MCN DJ002, a resistência deste *Buckypaper* é de aproximadamente 55,7 Ω.

O sistema proposto foi submetido a diversos teste onde é possível verificar o controle do Arduino nos sensores, bem como a leitura dos sensores quando submetidos à variação de temperatura e a comunicação via rádio frequência. Em todos os testes submetidos o sistema funcionou corretamente, atendendo assim o propósito inicial.

Durante os testes com a alternância da temperatura no sensor, observou-se um aumento da tensão no dispositivo (de 3,39 V a 41 °C e de 3,40 V a 47 °C) à medida que a temperatura aumentava próximo à fonte da chama e sob o *buckypaper*, a cada 1 °C a sua tensão aumenta em 0,13 mV. Esse comportamento pode ser explicado pela capacidade dos nanotubos de carbono de absorver e reter calor, fazendo com que os eletrodos de *buckypaper* aqueçam mais do que os eletrodos de cobre, deste modo, criando um gradiente de temperatura entre eles.

O sistema projetado informa a partir do dado captado pelos sensores, a temperatura no ambiente. Com isso os órgãos de controle ambientais poderão sempre verificar em que estado se encontra a temperatura ambiente. Essas informações são de grande importância para os

órgãos ambientais, uma vez que o mesmo não precisará se deslocar até a área monitorada para analisar se há risco de incêndio.

Em suma, a pesquisa alcançou os objetivos propostos, pois a partir desse estudo foi possível desenvolver um sistema de monitoramento ambiental baseado em sensor termistor nanoestruturado cujo seu objetivo é monitorar os focos de calor e o risco de incêndios florestais.

Percebe-se que a utilização de sistemas de monitoramentos para pesquisas de focos e áreas queimadas torna-se de grande importância para Região Amazônica, assim como para o país como um todo, considerando que o Brasil sofre recorrentemente com queimadas principalmente em período de seca. Espera-se que esta pesquisa venha auxiliar no planejamento de ações de combate e prevenção de incêndios florestais e que o uso dessas ferramentas possa contribuir para a identificação das áreas propensas a ação do fogo, e assim possibilita melhores tomadas de decisão para minimização das queimadas.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FILHO, R.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoring biomass burning in the Brazilian Amazônia. **International Journal of Remote Sensing**, 25(24), pp. 5537-5542, 2004.
- ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, **Global Biogeochemical Cycles**, n. 15, v.4, 2001. Arduino.cc. Arduino nano, 2010.
- ARAÚJO, J. S. **Estudo das propriedades eletrônicas e estruturais de defeitos topológicos e fronteiras de grão em grafeno por primeiros princípios**. Tese de doutorado (Doutorado em física) Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- ARAÚJO, L. C. **Estudo de materiais nanoestruturados para aplicação como sensores de gases**. Monografia (Bacharel em Engenharia de Energia). Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF, 2015.
- ASSIS, R. F. A. **Projeto de um Anemômetro Térmico Baseado em Termistor NTC com Modelo Linearizado por Realimentação**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN, Natal – RN, 2018.
- BARBOSA, R. I. **Avaliação preliminar da área dos sistemas naturais e agroecossistemas atingida por incêndios no estado de Roraima** (01.12.1997 A 30.04.1998) EM 16.05.1998: Relatório Técnico II. Boa Vista: INPA/Roraima, 1998.
- BATISTA, A. C. **Deteção de incêndios florestais por satélites**. FLORESTA 34 (2), Mai/Ago, 2004, 237-241, Curitiba, PR. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/floresta/article/viewFile/2402/2010>>. Acesso em: 20 de fev. de 2022.
- BEZERRA, M. B. M. **Plataforma de Instrumentação Eletrônica para Caracterização Estática de Termistores**. Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2019.
- BOND, W. J., WOODWARD, F. I. & MIDGLEY, G. F. The global distribution of ecosystems in a world without fire. **New Phytologist**, v. 165, p. 525-538. 2005.
- BOWMAN, D. M. J. S., *et al.* Fire in the Earth System. **Science**, v. 324, p. 481-484. 2009.
- BRADFORD, P. D. *et al.* A novel approach to fabricate high volume fraction nanocomposites with long aligned carbon nanotubes. **Composites Science and Technology**, v. 70, issue 13, p. 1980-1985, 2010.
- BRAGA, J. V. **Mapeamento de áreas queimadas usando séries temporais normalizadas derivadas de dados NBR-MODIS durante o período 2001-2014 no Parque Nacional das Emas**. 2015. 65 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade de Brasília - UnB, Brasília, 2015.

BRASIL. **Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. 2012. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Ano CXLIX, n. 102, 28 maio 2012. Seção 1, p.1. Disponível em: <<http://portal.in.gov.br/>>. Acesso em: 10 mar. de 2022.

CÂMARA, GILBERTO; *et al.* **Análise espacial e geoprocessamento**, 1996. Disponível em:<<http://www.dpi.inep.br/gilberto/livro/analise/cap.1-intro-pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CASTRO, F. C. SERRA, G. PAROLA, J. REIS, J. LOURENÇO, L. CORREIA, S. **Combate a incêndios florestais**. 2. ed. Sintra: Escola Nacional de bombeiros. 2003 94p.

COCHRANE, M. A. O Significado das queimadas na Amazônia. **Ciência Hoje**, V. 27, N. 157, P. 26-31, 2000.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL - CBMDF. **Manual de Perícia em Incêndio e Explosões: Módulo II**. Brasília/DF, 2019.

DE MORAIS, F. & DE CRISTO, S. S. V. **Jalapão: Sedimentary Heritages in Central Brazil**. In: Landscapes and landforms of Brazil. Editors: Vieira, B. C., Salgado, A., Santos, L. (Eds.). Springer Verlag NY. 2014.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, Giovanna. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. EdIPUCRS, 2007.

DIAS, G.F. “**Mudança Climática Global e Educação Ambiental**”, Prelo, 2007.

DYER, Stephen A, Wiley survey of instrumentation and measurement, John Wiley & Sons, 2004.

FERREIRA, L. M. P. **Estudo do transporte de carga quase-2d em Buckypapers**. Monografia (Licenciatura Plena Em Física) Universidade Federal do Pará – UFPA, Abaetetuba – PA, 2017.

FONSECA, E. M. B.; RIBEIRO, G. A. **Manual de prevenção e controle de incêndios florestais**. Belo Horizonte, CEMIG, 2003.

FORSYTH, G. G. & VAN WILGEN, B. W. **The recent fire history of the Table Mountain National Park and implications for fire Management**. Koedoe: African Protected Area Conservation and Science, v. 50, n. 1, p. 3-9. 2008.

GABRIEL, M. V. **Análise de Sensibilidade de Anemômetros a Temperatura Constante Baseados em Sensores Termo-Resistivos**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2004.

GIGLIO, L.; LOBODA, T.; ROY, D. P.; QUAYLE, B.; JUSTICE, C. O. **An active fire based burned area mapping algorithm for the modis sensor.** Remote sensing of environment, V. 113, P. 408–420, 2009.

GIGLIO, LG. R., *et al.* Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. **Atmospheric Chemistry and Physics.** 2006, pp. 957- 974.

GOLDAMMER, J. G. **Incêndios florestais: prevenção, controle e uso do fogo.** Curitiba: [s.n.], 1982. 93p.

GOLDAMMER, J. G. PREFACE. IN: GOLDAMMER, J. G. (ED.). **Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges.** Heidelberg: Springer-Verlag, 1990.

GOLDAMMER, J. G.; SEIBERT, B. **The impact of droughts and forest fires on tropical lowland rain forest of east kalimantan.** in: goldammer, j. g. (ed.). Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges. Berlin-Heidelberg: Springer-Velarg, p. 11-31, 1990. (Ecological Studies, v. 84).

GOMES, A. H. A. **Comportamento eletroquímico de nanotubos de carbono suportados sobre diferentes substratos.** Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal de Viçosa- UFV, 2010.

GONTIJO, A. B; PEREIRA, A. A; OLIVEIRA, D.S.O; JUNIOR, F.W.A; **Detecção de queimadas avaliação de focos de calor utilizando produtos de Sensoriamento Remoto.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7966.

GONZÁLEZ - CABÁN, A.; FENN, M.E. e S CATENA, F.N. **Concepts, criteria, and indicators for monitoring sustainability.** In: MEXICO /U S B IENNIAL S YMPOSIUM, 5, Partnerships for sustainable forest ecosystem management, October 1994. USDA. Forest Service. RM general technical report, n.266, p. 13-23, 1995.

GUIMARÃES, P. P.; SOUZA, M. S.; FIEDLER, C. N.; SILVA, G. A. **“Análise dos impactos ambientais de um incêndio florestal”.** (2014) AGRARIAN ACADEMY, Centro científico conhecer. Goiânia, v.1, n.1, p.38-60, jan./abr. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/Agrarian%20Academy/2014a/analise%20dos%20impactos.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

HENNRICH, F.; CHAN, C.; MOORE, V.; ROLANDI, M.; O`CONNELL, M. **The Element Carbon in Carbon Nanotubes.** Ed. Taylor and Francis Group LLC, New York; Cap.1, pp. 1-16, 2006.

HU, R. *et al.* **Harvesting Waste Thermal Energy Using a Carbon-Nanotube-Based Thermo-Electrochemical Cell.** Nano Letters, v. 10, issue 3, p. 838–846, 2010.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Institui a Autorização para Queima Controlada.** Portaria IBAMA nº 94-N de 1998.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Centro Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais (Prevfogo)**, 2017. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/prevfogo>>. Acesso em: 20 de mar. de 2022.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **PREVFOGO**. Pereira, A. de M. M. et. al. Investigação de Incêndio Florestal. Brasília/DF, 2010.

IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, v. 354, p. 56-58, 1991.

INPE - Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais. **Monitoramento dos Focos Ativos por Bioma, 2021**. Disponível em: <[https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas\\_estados/](https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/)>. Acesso em: 25 mai. 2022.

JAGTAP, S. *et al.* ‘Study on i–v characteristics of lead free ntc thick film thermistor for self-heating application’, **Microelectronic Engineering** 88(1) 2011, 82–86.

KIM, P. *et al.* Thermal Transport Measurements of Individual Multiwalled Nanotubes. *Physical Review Letters*, v. 87, n. 21, p. 215502(1-4), 2001.

KOHLHEPP, G. **O programa piloto internacional de proteção das florestas tropicais no Brasil (1993-2008): as primeiras estratégias da política ambiental e de desenvolvimento regional para a Amazônia brasileira**. Revista NERA: Núcleo de Estudos, Pesquisas e Projetos de Reforma Agrária, Presidente Prudente, v.21, n.42, p.308-330, 2018.

KROTO, H.W.; HEATH, J. R.; O'BRIEN, S. C.; CURL, R. F.; SMALLEY, R. E. C60: Buckminsterfullerene. **Nature**, v. 318, n. 6042, p.162–163, 1985.

LAGARES, R. O. **Análise da efetividade e eficácia do plano de prevenção e combate a incêndios florestais no Distrito Federal**. Dissertação de mestrado, 2007. Centro de desenvolvimento sustentável, Universidade de Brasília, 2007.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750 p.

LIMA, G. S.; FÉLIX, G. A.; TORRES, F. T. P.; COSTA, A. G.; SILVA JÚNIOR, M. R. Avaliação da eficiência de combate aos incêndios florestais em unidades de conservação brasileiras. **Revista Floresta**, Curitiba, v.48, n.1, p.113-122, 2018.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Editora UNIDERP, 2007. 881p.

LMIC – Laboratório de Microscopia e Microanálises. **Microscopia Eletrônica**. Departamento de Geologia - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto, 2021. Disponível em: <<https://lmic.degeo.ufop.br/microscopia-eletr%20C3%B4nica#:~:text=O%20princ%20ADpio%20de%20funcionamento%20do,0%2C5%20a%2030%20KV>>. Acesso em: 25 de mar. de 2022.

LOHMAN, D. J., BICKFORD, D. & SODHI, N. S. The Burning Issue. **Science**, v. 316, p. 376. 2007.

MALMSTRÖM, A. **The importance of measuring fire severity** – Evidence from microarthropod studies. *Forest Ecology and Management*, v. 260, p. 62-70. 2010.  
McRoberts, M. *Beginning Arduino*. New York: Apress, 2010.

MMA - Ministério do Meio Ambiente e da Amazônia Legal. **PREVFOGO** – Sistema Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais. Disponível em: <[https://ambientes.ambientebrasil.com.br/florestal/programas\\_e\\_projetos/prevfogo\\_-\\_sistema\\_nacional\\_de\\_prevencao\\_e\\_combate\\_aos\\_incendios\\_florestais.html](https://ambientes.ambientebrasil.com.br/florestal/programas_e_projetos/prevfogo_-_sistema_nacional_de_prevencao_e_combate_aos_incendios_florestais.html)>. Acesso em: 20 de mar. de 2022.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Monitoramento**. REDD+ Brasil, 2016. Disponível em: <<http://redd.mma.gov.br/pt/monitoramento>>. Acesso em: 25 mai. 2022.

MONTEIRO, F.; FÉ, L. M.; CARMAGO, L. TAFURI, M. Efeito Piroelétrico – Termistores. **Apostila da disciplina de Circuitos eletromagnéticos**, do curso de Engenharia. UFMS – Campo Grande – MS, 2019. Disponível em:< <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-de-mato-grosso-do-sul/circuitos-eletromagneticos/efeito-piroeletrico-e-termistores-final/4625942/download/efeito-piroeletrico-e-termistores-final.pdf>>. Acessado em: 21 mai. 2022.

MOTTA, D. S. **Identificação dos fatores que influenciam no comportamento do fogo em incêndios florestais**. 2008. 32f. Monografia (Graduação em Engenharia Floresta) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. **Aims and methods of vegetation ecology**. New York: John Wiley, 1974. 547 P.

NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A. G.; ALENCAR, A. A. Flames in the rain forest: origins, impacts and alternatives to Amazonian fires. Brasília, Brazil: The pilot program to conserve The Brazilian rain forest, **World Bank**, 1999. 190 P.

PAPA, H. *et al.* **Fabrication of Functionalized Carbon Nanotube Buckypaper Electrodes for Application in Glucose Biosensors**. *Biosensors*, v. 4, issue 4, p. 449-460, 2014.

PARENTE, E. Termistores – NTC. **Apostila da Disciplina de Instrumentação Eletrônica, Universidade Federal do Paraná**. Curitiba – PR, 2000. Disponível em:<<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/brenno/>>. Acessado em: 21 mai. 2022.

PEREIRA, J.M.C.; CHUVIECO, E.; BEAUDOIN, A.; DESBOIS N. **Remote sensing of burned areas: a review**. In: Chuvieco, E.; Ed. *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*. Alcalá de Henares. p. 127-183, 1997.

PINHEIRO, P. F. P. **Desenvolvimento de sensor de temperatura capacitivo nanoestruturado**. Monografia (Bacharel em Engenharia Industrial) Universidade Federal do Pará – UFPA, Abaetetuba – PA, 2017.

REIS, M. A. L. *et al.* Study of Ink Paper Sensor Based on Aluminum/Carbon Nanotubes Agglomerated Nanocomposites. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 12, p. 1–6, 2012.

RESENDE, F. C. **Análise da distribuição espacial das áreas queimadas na porção nordeste do bioma Cerrado**. 2017. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2017. Disponível em: <<https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgeog/Fernanda.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2022.

RIBEIRO, G. A. **Formação e Treinamento de Brigada de Incêndio Florestal**. Viçosa: CPT, 2002. 182 p.

RIBEIRO, A. T. **A influência da adição de nanotubos de carbono nos compósitos de cimento Portland**. Monografia (Licenciatura Plena Em Física) Universidade Federal do Paraíba – UFPB, Patos – PB, 2017.

SANTOS JÚNIOR, D. R. **Aplicação do método dos elétrons finitos no estudo da estrutura eletrônica e interação elétron-fônon em pontos quânticos**. Dissertação em Física, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/27060/1/Aplica%C3%A7%C3%A3oM%C3%A9todoElementos.pdf>>. Acesso em: 25 de mar. de 2022.

SANTOS, J. F. **Estatística de incêndios florestais em áreas protegidas no período de 1998 a 2002**. Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba, 2004.

SARKAR, ALOKE RAJ, DEBANGSHU DEY & SUGATA MUNSHI. ‘Linearization of ntc thermistor characteristic using op-amp based inverting amplifier’, **IEEE Sensors Journal** 13(12), 4621–4626, 2013.

SCHUMACHER, M. V. *et al.* **Incêndios Florestais**. 2. ed. rev. Santa Maria: Editora UFSM, 2013. 129p. (Coleção ciências rurais, 13).

SCHUMACHER, M. J.; Brun, E. J e Calil, F. N. **Caderno Didático CFL 506 – Proteção Florestal**. Ministro da Educação e Cultura Universidade Federal de Santa Maria – Departamento de Ciências Florestais; Santa Maria, 2005.

SETZER, A.; MORELLI, F.; LOMBARDI, R. **Estimativa quinzenal de áreas queimadas nas imagens modis do INPE**. In: Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. (eds.). *O sensor modis e suas aplicações ambientais no Brasil*. São José dos Campos: a. Silva ed., 2007. P. 403-417.

SHESHMANI, S.; ASHORI, A.; FASHAPOYEH, M. A. Wood plastic composite using graphene nanoplatelets. **International journal of biological macromolecules**, v. 58, p. 1-6, 2013.

SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R.; NOVO, E. M. L. M.; KRUG, T.; HESS, L. **Estimativa da área de cobertura florestal afetada pelo incêndio em Roraima, utilizando dados multi-sensores**. São José dos Campos: INPE, 1999. 65 P. (INPE-7119- RPQ/697).

SILVA, R.G. da. **Manual de prevenção e combate aos incêndios florestais**. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 1998.

SIMPSON, J.B.; PETTIBONE, C.A.; KRANZLER, G.A. **Instrumentation and measurement for environmental sciences**. 1991.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. London: Addison-Wesley, 1980. 575 p.

SOARES, R. V.; SANTOS, J. F. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1994 a 1997. **Revista Floresta**, Curitiba, v.32, n.2, p.219-232, 2002.

SOUZA, A. R.; COSTA, H. B.; DANTAS, F. R.; TUPINAMBÁ, M. K. F. **Monitoramento por satélite do risco de queimadas na região sul do Piauí**. Anais. Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto – Geonordeste, 2014.

SOUZA, F. **Queimadas podem prejudicar o meio ambiente e a saúde humana**. **Secretaria Da Comunicação Do Estado Do Tocantins**. Disponível em: <<https://www.to.gov.br/secom/noticias/queimadas-podem-prejudicar-o-meio-ambiente-e-a-saude-humana/2wciptzt7u22>>. Acesso em: 25 mai. 2022.

STEINHART, J. S.; STANLEY, R. H. Calibration curves for thermistors, em '**Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts**', Vol. 15, Elsevier, pp. 497–503, 1968.

TAYLOR, R. (Ed.). **The Chemistry of Fullerenes**. v. 4 of Advanced series in fullerenes. Singapore: World Scientific, 1995.

THOMÉ, R. **Interoperabilidade em geoprocessamento: conversão entre modelos conceituais de sistemas de informação geográfica e comparação com o padrão Open Gis**. 1998.193 f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais – INPE, São José dos Campos, 1998.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Landsat Missions: Frequently Asked Questions about the Landsat Missions**. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/about\\_project\\_descriptions.php](http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php)>. Acesso em: 30 abr. 2022.

VAN DER WERF, G. R., RANDERSON, J. T., COLLATZ, G. J., AND GIGLIO, L.: Carbon emissions from fires in tropical and subtropical ecosystems, **Global Change Biol.**, 9, 547–562, 2003.

VIEGAS, A. **Empresa investe em 21 torres alimentadas por energia solar para monitorar focos de incêndio em MS**. G1, Morena, 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ms/mato-grosso-do-sul/noticia/2019/10/31/empresa-investe-em-21-torres-alimentadas-por-energia-solar-para-monitorar-focos-de-incendio-em-ms.ghtml>>. Acesso em: 25 mai. 2022.

VON BEHR, M. **Jalapão: Sertão das águas**. São José dos Campos, SP: Somos Editora, 207 p., il., Mapas. (Título: Série Ecossistemas Brasileiros. Vol.: 3). 2004.

WANG, D. *et al.* **Highly oriented carbon nanotube papers made of aligned carbon nanotubes**. *Nanotechnology*, v. 19, n. 7, p. 1-6, 2008.

WEBSTER, J. G.; HALIT E. **Measurement, instrumentation, and sensors handbook: spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement**, Vol. 1, CRC press, pp. 976–982, 2014.

WHITBY, R. L. D. *et al.* **Geometric control and tuneable pore size distribution of Buckypapers and buckydiscs**. *Carbon*, 46 (6), p. 949 – 956 (2008).

WHITLOCK, C., SHAFER, S. L. & MARLON, J. The role of climate and vegetation change in shaping past and future fire regimes in the northwestern US and the implications for ecosystem management. **Forest Ecology and Management**, v. 178, p. 5-21. 2003.

WOOD, W. “Paper promise”. **Research in Review Magazine**, Florida State University, 2006. Disponível em: < [www.rinr.fsu.edu/spring2006/features/paperpromise.html](http://www.rinr.fsu.edu/spring2006/features/paperpromise.html) >. Acesso em: 18 mai. 2022.

YANG, D. J. *et al.* Thermal conductivity of multiwalled carbon nanotubes. **Physical Review B**, v. 66, issue 16, p. 165440 (1-6), 2002.

ZHANG, J.; JIANG, D.; PENG, H. A pressurized filtration technique for fabricating carbon nanotube buckypaper: Structure, mechanical and conductive properties. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 184, p. 127-133, 2014.

ZOU, J.; ZHANG, Q. **Fundamental Properties of Carbon Nanotubes**. In: ZHANG, Q. (Ed.). *Carbon nanotubes and their applications*. v. 1 of Pan Stanford Series on Carbon-Based Nanomaterials. Singapore: Pan Stanford, 2012. p. 1-30.

## APÊNDICES

### Apêndice A – Algoritmo na linguagem C++ para O SENSOR de temperatura

Tendo o circuito montado o código de comando para o circuito como segue abaixo:

#### Código do circuito de medição de temperatura

```

/*-----
Fóton sensor e RF 433 MHz
*
* RF TX - 433 MHz
*
-----*/

#include <VirtualWire.h>

// Declarando pinos para transmissao (RF TX 433 MHz)
const int SENSOR = A0;
const int LED = 13;
const int TX = 10;

void setup() {
// Comunicacao com o Serial Monitor
Serial.begin(9600); // baud-rate
Serial.println("Transmissor");

// Inicializando E/S do transmissor
vw_set_tx_pin(TX);
vw_set_ptt_inverted(true); // Requerido para DR3100
vw_setup(2000); // Bits por segundos
}

void loop() {
// Funcoes do Sensor - Calculos
int D = analogRead(SENSOR);
int T = (D * 5 * 100) / 1023;

Serial.print(T);
Serial.println(" *C");
delay(1000);

// Funcoes para transmissao

//Lendo e armazenando o valor da temperatura
// Convertndo int para char
char SensorCharMsg[10];
itoa(T, SensorCharMsg,10);

```

```

digitalWrite(LED, HIGH); // Pisca LED no pino 13 enquanto esta transmitindo
vw_send((uint8_t *)SensorCharMsg, strlen(SensorCharMsg));
vw_wait_tx(); // Espera o envio da informacao
digitalWrite(LED, LOW);
delay(1000);
}

```

Receptor:

IDE do Arduino e configure a para a porta */dev/ttyUSB0*.

```

/*-----
*Termistor sensor e RF 433 MHz
*
* RF RX - 433 MHz
*
-----*/

#include <VirtualWire.h>

const int LED = 13;
const int RX = 12;

void setup() {
// Comunicacao com o Serial Monitor
Serial.begin(9600);
Serial.println("Receptor");

// Inicializando E/S do receptor
vw_set_rx_pin(RX);
vw_set_ptt_inverted(true); // Requerido para DR3100
vw_setup(2000); // Bits por segundo

vw_rx_start(); // Inicia a recepcao
}

void loop() {
uint8_t buf[VW_MAX_MESSAGE_LEN];
uint8_t buflen = VW_MAX_MESSAGE_LEN;

if (vw_get_message(buf, &buflen)) { // Sem bloqueios na recepcao
digitalWrite(LED, HIGH); // Pisca LED no pino 13 se receber a mensagem integra
Serial.print("Msg. OK - "); // Verifica checksum. Se mensagem integra, escreve Msg.
OK - :

char SensorCharMsg[10]; // conteudo da transmissao
for (int i = 0; i < buflen; i++) {
SensorCharMsg[i] = (char)buf[i];
}
//verifica se terminou a transmissao

```

```
SensorCharMsg[bufLen] = '\0';

//Convertendo char para inteiro
int T = atoi(SensorCharMsg);

Serial.print("temp.: ");
Serial.print(T);
Serial.println(" *C");
digitalWrite(LED, LOW);
}
}
```