



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

VINÍCIUS DE SENA SALES VIANA

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SISTEMA VESTÍVEL PARA
MONITORAMENTO DE CÃES DE BUSCA E RESGATE

FORTALEZA

2025

VINÍCIUS DE SENA SALES VIANA

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SISTEMA VESTÍVEL PARA
MONITORAMENTO DE CÃES DE BUSCA E RESGATE

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador (a): Prof. Dr. José Antonio Delfino
Barbosa Filho

FORTALEZA

2025

VINÍCIUS DE SENA SALES VIANA

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE SISTEMA VESTÍVEL PARA
MONITORAMENTO DE CÃES DE BUSCA E RESGATE

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador (a): Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho

Aprovada em 27/11/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Gurgel Pinheiro
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Nitalo André Farias Machado
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Prof. Dra. Katia Maria Zgoda Parizotto
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Dra. Nicolay Farias Gomes
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

RESUMO

A operacionalidade de binômios cinotécnicos em missões de busca e salvamento é condicionada pela eficiência da comunicação e pelo monitoramento dos padrões comportamentais do canino. Entretanto, a supervisão remota em cenários de alta complexidade estrutural ou vegetação densa ainda subsiste sob limitações táticas e tecnológicas. O presente estudo objetivou o desenvolvimento de um sistema de monitoramento dos cães de busca e resgate de pessoas, que compreendeu a engenharia de um protótipo transmissor baseado em um microcontrolador, integrando um acelerômetro e giroscópio e um detector de som. O sistema foi submetido a um protocolo experimental com cães da Companhia de Busca com Cães (CBCães/CBMCE). Os resultados evidenciaram que a fusão de dados cinemáticos e sonoros viabilizou a identificação de estados de repouso, deslocamento e latido de indicação com acurácia global de 98,70%. O protocolo LoRa assegurou a estabilidade da transmissão telemétrica em tempo real com desvio padrão reduzido ($\pm 0,35$), provendo métricas objetivas para a tomada de decisão do condutor. Conclui-se que o sistema apresenta elevada robustez técnica e operacional, mitigando a subjetividade da observação humana e otimizando a assertividade na localização de vítimas em cenários de desastre.

Palavras-chave: Cães de trabalho; Sistemas embarcados; Aprendizado de máquina; Biotelimetria; Pessoas desaparecidas; Desastres.

ABSTRACT

The operational efficiency of cynotechnical teams in search and rescue missions is conditioned by communication effectiveness and the monitoring of canine behavioral patterns. However, remote supervision in scenarios of high structural complexity or dense vegetation still faces tactical and technological limitations. This study aimed to develop a monitoring system for search and rescue dogs, which comprised the engineering of a transmitter prototype based on a microcontroller, integrating an accelerometer, a gyroscope, and a sound detector. The system underwent an experimental protocol with dogs from the Search Dog Company (CBCães/CBMCE). Results showed that the fusion of kinematic and sound data enabled the identification of resting, displacement, and alert barking states with an overall accuracy of 98.70%. The LoRa protocol ensured the stability of real-time telemetric transmission with a reduced standard deviation (± 0.35), providing objective metrics for the handler's decision-making. In conclusion, the device demonstrates high technical and operational robustness, mitigating the subjectivity of human observation and optimizing assertiveness in victim localization in disaster scenarios.

Keywords: Working dogs; Embedded systems; Machine learnin; Biotelemetry; Missing persons; Disasters.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1 A relação entre o homem e o cão	8
2.2 Sistema sensorial dos cães	9
2.2.1 Visão canina	10
2.2.2 Paladar canino	11
2.2.3 Audição canina	12
2.2.4 Olfato canino	13
2.3 Cães de busca e resgate	15
2.3.1 Histórico do uso de cães em busca e resgate	15
2.3.2 Critérios de seleção dos cães	17
2.3.3 Treinamento técnico e fases da formação	18
2.3.4 Modalidades de treinamentos dos cães de busca e resgate	19
2.4 Serviço de Cães de Busca e Resgate no Brasil	22
2.5 Utilização de cães de busca e resgate de pessoas perdidas e desaparecidas	23
2.6 Utilização de cães de busca e resgate em grandes desastres	25
2.7 Utilização da tecnologia na busca e resgate de pessoas	28
2.8 Integração entre tecnologia e habilidades caninas	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Instrumentação e preparação dos protótipos	35
3.2 Funcionamento do sistema de monitoramento	41
3.3 Animais e local experimental	45
3.4 Coleta de dados	46
3.5 Processamento e análise dos dados	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5. CONCLUSÃO	62
6. REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

A busca e o salvamento de pessoas desaparecidas e vítimas de tragédias naturais ou antrópicas, são atividades complexas que exigem muitos recursos, tempo, colaboração e logística operacional, seja na coleta de dados, planejamento, até na busca efetiva (Otto *et al.*, 2020). Os cães são animais de alta capacidade olfativa, tornando-os extremamente úteis na detecção e discriminação de odores, o que pode auxiliar na busca por pessoas vivas e mortas (Baker *et al.*, 2020; Wojtaś; Karpiński; Zieliński, 2021; Dargan *et al.*, 2024). Os cães são capazes de substituir muitas pessoas, excluir áreas de busca, reduzir tempo para localização de vítimas, além disso, podem ser eficazes em condições climáticas extremas e ambientes adversos (Greatbatch; Gosling; Allen, 2015; Arnold *et al.*, 2019; Santos, 2021).

Na busca e salvamento de pessoas o tempo é uma variável fundamental na otimização dos resultados, que prima pela localização da pessoa ainda com vida. Ocorrências dessa natureza exigem trabalho ágil, eficiente e altamente especializado, com integração de várias tecnologias para aumentar a precisão e o rigor das buscas (Hwang *et al.*, 2024), além disso, o trabalho das equipes com cães de busca e resgate são fundamentais para rapidez e eficiência nas buscas (Mazin; Fordyce; Otto, 2001; Bozkurt *et al.*, 2014; Otto *et al.*, 2020).

Os cães de busca e salvamento têm sido utilizados com sucesso por várias décadas na busca de vítimas, nos mais diversos cenários (Jones *et al.*, 2004; Greatbatch; Gosling; Allen, 2015; Contini; Martins, 2024). O trabalho dos cães é uma atividade extenuante e estressante, podendo exigir do binômio (homem e o cão) longos períodos de trabalho. Isto requer treinamento físico e mental dos cães e seus tutores, além de disciplina para desenvolver a habilidade olfativa do cão a um nível extremamente alto, pois a perícia do binômio será fundamental para salvar vítimas e recuperar corpos.

O termo "binômio" refere-se objetivamente a uma unidade de trabalho funcional, simbiótica e indivisível, composta por um cão e seu condutor humano. Nesta parceria, o cão atua como o principal sensor biológico, empregando suas capacidades sensoriais superiores para a detecção de um alvo específico. O condutor humano, por sua vez, assume o papel de estrategista, intérprete e suporte logístico, sendo responsável por direcionar taticamente a busca, decodificar os alertas comportamentais do animal e tomar as decisões operacionais subsequentes. A eficácia das operações de localização de pessoas não é meramente a soma das capacidades individuais, mas sim o produto da interdependência, confiança mútua e comunicação refinada, permitindo que o binômio execute tarefas complexas de detecção que seriam inatingíveis para o homem ou o cão atuando isoladamente.

O controle e supervisão do cão podem se tornar desafiadores durante as buscas, bem como, a avaliação da segurança do ambiente, do estado físico e bem-estar do animal. A integração entre recursos tecnológicos e a capacidade olfativa altamente desenvolvida dos cães podem contribuir significativamente para o aumento da eficácia dos binômios e na abrangência das operações de busca e resgate, visando o bem-estar do animal e a integridade física da população.

Diante do exposto, o objetivo geral desta tese foi desenvolver de um sistema para monitoramento de cães de busca visando aumentar a eficiência e assertividade na localização durante o resgate de pessoas. Para isso, a tese buscou avaliar a precisão e confiabilidade do sistema de monitoramento em classificar corretamente o comportamento real dos cães durante as atividades de busca; e estimar a autonomia da bateria durante as avaliações e atividades de busca. A presente tese fundamenta-se na hipótese principal de que a fusão de dados provenientes de sensores inerciais e acústicos, permite a classificação de comportamentos críticos de cães de busca com acurácia superior a 85%. Assume-se que a utilização do protocolo de comunicação LoRa assegura a transmissão estável de informações telemétricas em cenários de desastres, sem comprometer a autonomia energética do protótipo para um turno operacional de quatro horas. Adicionalmente, pressupõe-se que o design ergonômico do módulo transmissor não induz alterações fisiológicas significativas nem restringe a cinemática natural do animal durante as manobras de busca em terrenos irregulares.

A relevância deste estudo fundamenta-se na necessidade crítica de otimizar o monitoramento operacional de binômios em missões de busca e salvamento. O desenvolvimento de um sistema nacional, com suporte e calibração realizados no Núcleo de Estudos em Ambiência Agrícola e Bem-estar Animal (NEAMBE/UFC), representa um avanço em relação a soluções importadas, muitas vezes onerosas e de difícil manutenção técnica. Ademais, a pesquisa possui um impacto social e institucional direto para Estado do Ceará. Ao validar uma tecnologia capaz de identificar precisamente latidos (indicação ativa), mudanças no padrão de deslocamento do cão, reduz-se o tempo de resposta na localização de vítimas, fator determinante para o aumento das taxas de sobrevivência em cenários de catástrofe. Portanto, este trabalho não apenas contribui para a literatura científica sobre comportamento animal e telemetria, mas também fornece um subsídio tecnológico patenteável que fortalece a infraestrutura de segurança pública nacional.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A relação entre o homem e o cão

A relação entre o homem e o cão é uma das mais antigas e profundas interações entre espécies. Essa conexão remonta a milhares de anos e representa uma associação muito significativa para humanidade. Este elo transcende a domesticação, evoluindo para uma parceria baseada em confiança, lealdade e cooperação mútua nos mais diversos aspectos da vida humana e canina.

Essa relação começou quando lobos selvagens se aproximaram de acampamentos humanos em busca de restos de comida. Os animais menos agressivos e mais sociáveis, foram gradualmente domesticados, dando origem aos primeiros cães domésticos. Enquanto os humanos se beneficiavam da proteção e das habilidades de caça dos cães, estes obtinham alimento e abrigo (Herbeck *et al.*, 2022). Essa relação simbiótica foi fundamental para o sucesso, adaptabilidade e desenvolvimento de ambas as espécies.

Evidências paleontológicas e genéticas foram coletadas atestando que o cão foi um dos primeiros animais a ser domesticado, milhares de anos antes da transição humana de caçador-coletor para um estilo de vida sedentário, baseado na agricultura (Tancredi; Cardinali, 2023). Estudos genéticos e arqueológicos sugerem que os cães foram domesticados a partir de lobos cinzentos (Freedman; Wayne, 2017). Estudos que analisaram o genoma de cães antigos e modernos, sugerem que os cães foram domesticados na Ásia Oriental (Wang *et al.*, 2016). Além disso, alguns estudos sugerem que a domesticação pode ter ocorrido em múltiplas regiões, incluindo a Europa e a Ásia Central (Frantz *et al.*, 2016; Freedman; Wayne, 2017).

Na França, Alemanha e Espanha, estudos arqueológicos e paleontológicos de restos antigos de canídeos indicam que os primeiros cães domésticos identificados se originaram há pelo menos 13 e 15 mil anos (Pionnier-Capitan *et al.*, 2011; Thalmann *et al.*, 2013). Esses fósseis apresentam características distintas dos lobos, como dentes menores e crânios mais compactos, sugerindo uma adaptação à dieta e ao estilo de vida próximo aos humanos (Larson; Fuller, 2014).

Apesar das divergências sobre a origem da domesticação dos cães, de certo foi um processo gradual que envolveu mudanças físicas, comportamentais e genéticas. Alguns dos principais aspectos desse processo incluem a própria seleção natural e artificial, que inicialmente favoreceu lobos que eram menos agressivos e mais sociáveis. Posteriormente, os

humanos começaram a selecionar cães com características desejáveis, como habilidades de caça, proteção ou companhia.

A domesticação dos cães teve impactos profundos tanto para os humanos quanto para os próprios cães. Ao longo do tempo, os cães desenvolveram características distintas dos lobos, como orelhas caídas, focinhos mais curtos e uma maior variedade de cores e padrões de pelagem, resultantes da seleção genética e da adaptação ao convívio humano (Trut; Plyusnina; Oskina, 2004). Além disso, os cães domesticados apresentam maior capacidade de comunicação com humanos, habilidades sociais e cognitivas que os tornam altamente adaptados à vida com humanos (Tancredi; Cardinali, 2023). Essa capacidade foi crucial para o desenvolvimento de uma relação afetiva e cooperativa entre as espécies.

A seleção artificial de características fenotípicas específicas realizada pelos humanos, se tornou popular durante a era vitoriana, e ao longo dos séculos resultou na grande variabilidade de cães para diferentes funções, gerando as inúmeras raças de cães existentes hoje (Range; Marshall-Pescini, 2022). Ao longo do tempo, os cães assumiram diversos papéis, adaptando-se às necessidades humanas e contribuindo para o desenvolvimento das sociedades. Essas raças foram desenvolvidas para atender a diferentes necessidades, como: companhia, pastoreio, guarda, resgate e caça. Essa diversificação é testemunho da estreita relação entre humanos e cães, bem como da capacidade de adaptação desses animais.

A relação entre humanos e cães evoluiu de uma parceria utilitária para uma conexão emocional profunda. Hoje, os cães são considerados membros da família em muitas culturas, desempenhando papéis que vão além do funcional, com a maioria dos cães modernos criados como animais de estimação e companhia. Porém, também existem cães treinados para desempenhar funções específicas, como cães-guia para pessoas com deficiência visual, cães policiais, cães de terapia e cães de resgate. A ligação entre o cão e o homem se tornou tão forte que por séculos esses animais são especialistas fundamentais na nobre missão de buscar e salvar pessoas e resgatar corpos.

2.2 Sistema sensorial dos cães

Os seres vivos necessitam de ferramentas para entender e reagir aos estímulos gerados pelo ambiente que estão inseridos, a consciência ambiental é essencial para a sobrevivência. O sistema sensorial dos animais evoluiu para fornecer a capacidade sentir e entender seu ambiente, se moldando de acordo com as experiências e vivências que cada ambiente fornece e como cada animal é capaz de se adaptar. As informações sensoriais possuem uma integração, sendo

importante para o entendimento completo do ambiente ao redor. Cada sinal sensorial exige a detecção e, o processamento da informação, por meio de vias neurais, bem como, necessita do reconhecimento, e assim atingir um significado composicional (Singletary; Lazarowski, 2021).

O sistema sensorial dos cães é altamente especializado e adaptado para atender às suas necessidades como predadores, caçadores e animais sociais. Cães possuem sentidos aguçados que lhes permitem interagir com o ambiente de maneira eficiente e extremamente adaptável, muitas vezes superando as capacidades humanas em áreas específicas. Além disso, cães apresentam diversidade morfológica excepcional, principalmente quando comparados com outros animais (Hart, 1995; Wayne, 1986a, 1986b). Esta variedade morfológica e comportamental irá influenciar a forma como animal se comunica e experencia o ambiente em que está inserido, gerando uma variedade extraordinária de potencial sensorial entre as raças (Byosiere *et al.*, 2018).

2.2.1 Visão canina

Pouco sabemos sobre a visão dos cães, principalmente devido à falta de pesquisas sobre a percepção visual canina. Considerando que as raças caninas podem diferir em peso, altura, tamanho, tipo corporal, morfologia facial e comportamento, podemos inferir que essa diversidade promove diferentes capacidades de processamento visual entre as raças. Assim, podemos ter raças caninas com capacidade visual extremamente diferentes, dependendo da sua morfologia corporal, comportamento e da seleção que foi realizada para desempenhar determinada função.

Em geral, é consenso que o sistema visual dos cães é secundário e pouco desenvolvido, principalmente quando comparamos com a visão humana. Apesar disso, em alguns aspectos, ela possui características únicas que os ajudam a se adaptar ao seu ambiente e funções (Miller; Murphy, 1995; Byosiere *et al.*, 2018; Bräuer; Mann; Erlacher, 2025).

A acuidade visual está associada à clareza da visão e depende de mecanismos ópticos e neurais, como: estrutura do olho, saúde do olho e interpretação do cérebro. Embora a acuidade visual dos cães seja difícil de medir, estima-se que seja consideravelmente pior do que a dos humanos. Estudos sugerem que, a 6 metros de distância, um cão pode perceber um objeto que uma pessoa com visão normal pode diferenciar a 22 metros de distância (Byosiere *et al.*, 2018).

Sobreposição binocular refere-se à porção sobreposta de uma cena visual que é vista por ambos os olhos. Em cães, existem várias estimativas de sobreposição binocular, que variam conforme os diferentes tipos de morfologia facial. Em geral, a sobreposição binocular dos cães

foi estimada em aproximadamente 30 a 60° (Peichl, 1992). O posicionamento dos olhos dos cães permite que tenham grande alcance do campo visual no plano horizontal, ultrapassando os 260°. Isso pode significar que os cães têm uma vantagem de varredura horizontal maior, mas com percepção de profundidade reduzida devido ao grau reduzido de visão binocular (Miller; Murphy, 1995).

Os cães possuem uma visão dicromática expressando duas formas de pigmentos fotográficos sensíveis à luz nas células da retina, portanto, o espectro visual em cães permite a diferenciação de matizes no espectro azul e no espectro amarelo, além do preto, branco, cinza e suas variações, o que limita a decodificação e interpretação de imagens (Neitz; Geist; Jacobs, 1989). Essa condição é inferior em comparação aos humanos, que têm visão tricromática, o que permite que enxerguem bem espectros de verde e vermelho (Siniscalchi *et al.*, 2017).

A retina do cão é amplamente composta de células fotorreceptoras de bastonetes, que são extremamente úteis em luz fraca, pois podem funcionar em condições de luz menos intensas (Kemp; Jacobson, 1992). Os cães apresentam na pupila o *tapetum lucidum*, que é uma estrutura refletora de luz. Essa camada de tecido localizada superiormente no olho é um sistema refletor biológico comumente encontrado em vertebrados (Ollivier *et al.*, 2004), mas não em humanos. Esta estrutura oferece às células da retina uma oportunidade adicional para estimulação de fótons-fotorreceptores, assim, essa reflexão aumenta a sensibilidade visual em condições de pouca luz.

Em resumo, embora o sistema visual dos cães possa ser considerado inferior ao dos humanos, em alguns aspectos, sua visão é superior, ou pelo menos diferente. Além disso, muitas particularidades da visão canina permanecem pouco estudadas. Bem como, não é possível encontrar muitos artigos recentes sobre o tema. Geralmente os experimentos utilizam amostras pequenas, frequentemente abrangendo uma única raça, não considerando as diferenças individuais e morfológicas. Portanto, é prudente ponderar as particularidades de cada raça a fim de avaliar com precisão sua capacidade visual.

2.2.2 Paladar canino

A percepção do paladar é mediada por diferentes grupos de quimiorreceptores expressos na cavidade oral (Bachmanov; Beauchamp, 2007). A língua é um órgão muscular que detém a maioria dos receptores para o sentido da gustação, revestida por mucosa com pequenas protruções do epitélio, denominadas papilas, e que podem exercer função tanto mecânica quanto gustatória, intimamente relacionadas com a percepção do sabor (Dyce; Sack; Wensing, 2004).

Cães possuem cerca de 1,7 mil papilas gustativas, em comparação com mais de 9 mil nos humanos, sugerindo um paladar menos refinado (Levesque, 1998).

Para os cães, a palatabilidade dos alimentos é determinada por fatores tanto químicos quanto físicos, e baseia-se no odor, na textura, na temperatura e no sabor. Além disso, muitas vezes é possível relacionar as preferências alimentares caninas com as de seus tutores, bem como com o ambiente social no qual os animais estão inseridos (Massari; Barbosa; Resende, 2021). Quanto aos demais sentidos, sabe-se que nessa espécie a visão e a audição têm pouquíssima influência sobre a escolha dos alimentos, portanto a cor do que está sendo ingerido pouco importa para o cão (Pizzato; Domingues, 2008).

Cães são capazes de detectar sabores básicos, como doce, azedo e amargo. No entanto, sua preferência por alimentos é mais influenciada pelo olfato do que pelo paladar, bem como, têm preferências por sabores específicos, como carne e gordura, mas também podem desenvolver gostos por alimentos doces ou salgados (Bradshaw, 2006; Massari; Barbosa; Resende, 2021). Portanto, cães escolhem alimentos mais pelo cheiro e textura do que pelo sabor, como descendentes dos lobos, são onívoros oportunistas, com foco em sobrevivência e ingestão rápida de alimentos. Assim, desenvolveram um paladar mais simples, e priorizam o olfato e a textura na escolha do que comer.

2.2.3 Audição canina

O sistema auditivo é importante em cães, especialmente para o desempenho de cães de trabalho e adequação ao trabalho. Isso pode fazer referência à capacidade de responder a sinais verbais ou detectar o som de um veículo se aproximando (Singletary; Lazarowski, 2021). Os cães possuem uma maior sensibilidade ao som, sua audição é significativamente mais aguçada que a dos humanos, especialmente em frequências mais altas, e por longas distâncias (Fletcher, 1992; Rubel; Popper; Fay, 1998). Pequenos roedores e insetos são detectáveis na faixa ultrassônica, impossível de ser audível para humanos (High-Frequency Hearing, 2008).

O ouvido externo do cão forma um canal em forma de “L” que atua como um tubo de ressonância até atingir a membrana timpânica, que cobre a abertura para a bula timpânica e o ouvido médio. O ouvido externo é importante para amplificação passiva por meio da coleta, canalização e amplificação de comprimentos de onda seletivos e contém 3 ossículos (martelo, bigorna e estribo), que atuam como amplificadores de som, convertendo a energia das ondas que perturbam a membrana timpânica em energia mecânica por meio da vibração desses ossículos. O estribo é embutido na janela oval, que representa a abertura para o ouvido interno.

O ouvido interno consiste em dois aparelhos sensoriais principais, a cóclea e o sistema vestibular, que é extremamente importante para a deambulação e função normais no que diz respeito à propriocepção e ao equilíbrio, especialmente em cães de trabalho (Fletcher, 1992; Heffner, 1998; Rubel; Popper; Fay, 1998).

Além disso, alguns cães são capazes de localizar a origem de um som, graças à mobilidade de suas orelhas e à estrutura interna do ouvido (Gorlinskiï; Babushina, 1985; Heffner; Heffner, 1992). As orelhas eretas são consideradas especialmente boas em localizar sons em distâncias maiores devido à sua orientação e propriedades anatômicas acessíveis semelhantes a funis, mas geralmente essa diferença em relação aos cães de orelhas caídas é insignificante (Living with a deaf dog or cat., 2011).

A audição é um dos sentidos mais desenvolvidos nos cães e exerce papel fundamental na sua interação com o ambiente, na comunicação, no aprendizado e no desempenho em diversas funções operacionais. Porém, a capacidade auditiva pode variar significativamente de acordo com a raça, influenciada por fatores anatômicos, genéticos e funcionais. Portanto, o desempenho auditivo de um cão não é apenas uma característica da espécie, mas também pode ser fortemente condicionado pela sua raça, o que deve ser considerado em contextos operacionais, como busca e resgate, detecção e guarda.

2.2.4 Olfato canino

O olfato é o sentido mais desenvolvido nos cães, sendo fundamental para sua sobrevivência, comunicação e interação com o ambiente. Os cães dependem principalmente do olfato para interagir com o mundo ao seu redor. Ao contrário dos humanos, que são predominantemente visuais (Singletary; Lazarowski, 2021). O sistema olfativo é evolutivamente considerado um sistema mais primitivo, especialmente porque possui conexões diretas para se comunicar com áreas do cérebro relacionadas com as emoções e memória, diferente de outros sistemas sensoriais (Shepherd, 2005; RajMohan; Mohandas, 2007; Sokolowski; Corbin, 2012).

Os cães possuem cerca de 220 milhões a 300 milhões de receptores olfativos, em comparação com aproximadamente 5 milhões nos humanos. A área do epitélio olfativo, que é o tecido nasal responsável pela detecção de odores, pode ultrapassar os 200 cm² nos cães, enquanto nos humanos é de apenas 5 cm² (Nei; Niimura; Nozawa, 2008). Além disso, o bulbo olfativo, a região do cérebro responsável pelo processamento de odores, é proporcionalmente 40 vezes maior nos cães do que nos humanos. Essa estrutura altamente desenvolvida permite

uma análise detalhada e rápida dos odores (Moulton, 1976; Johnston, 1998; Craven; Paterson; Settles, 2010).

Quando um cão inspira, o ar entra nas narinas e passa pela cavidade nasal, que direciona o fluxo de ar em direção ao recesso olfativo coberto por tecido neuroepitelial olfativo, onde são processados para reconhecimento de odores. Moléculas odoríferas se ligam aos receptores olfativos, desencadeando sinais elétricos (Craven; Paterson; Settles, 2010). Os sinais elétricos gerados pelos receptores olfativos são transmitidos ao bulbo olfativo, onde são processados e enviados para outras regiões do cérebro, como o córtex olfativo e o sistema límbico, que estão envolvidos na identificação e na resposta emocional aos odores (Buck; Axel, 1991).

O olfato canino funciona através de um processo complexo que envolve a captação, transdução e processamento de moléculas odoríferas e seu alto número de células neuroepiteliais olfatórias (Issel-Tarver; Rine, 1997; Walker *et al.*, 2006; Dung *et al.*, 2018). Os odores funcionam como sinais químicos que podem permanecer em um local por longos períodos. Assim, um cão é capaz de detectar não apenas odores presentes no momento, mas também vestígios deixados anteriormente, conseguindo identificar e rastrear a origem do cheiro principal (Craven; Paterson; Settles, 2010; Singletary; Lazarowski, 2021). São ainda capazes de discriminar entre odores extremamente semelhantes, como diferentes tipos de flores ou indivíduos humanos. Essa habilidade é essencial para tarefas como rastreamento e detecção de substâncias específicas, como busca e resgate, detecção de drogas e explosivos, e até mesmo na identificação de doenças como câncer e diabetes (Johnston, 1998; Willis *et al.*, 2004).

As capacidades olfativas dos cães são extraordinárias e superam as dos humanos em várias ordens de magnitude. Cães podem detectar odores em concentrações de partes por trilhão (ppt). Por exemplo, eles são capazes de identificar certos compostos químicos em concentrações de 1 a 2 ppt, o que equivale a detectar uma gota de substância em 20 piscinas olímpicas (Johnston, 1998). Além disso, os cães possuem uma memória olfativa altamente desenvolvida, sendo capazes de reconhecer e lembrar odores específicos por longos períodos, sendo particularmente útil em tarefas de rastreamento e identificação (Thesen; Steen; Døving, 1993). Portanto, são capazes de discriminar entre odores complexos, como a mistura de diferentes compostos químicos.

No entanto, os cães possuem uma alta variabilidade das suas capacidades olfativas, e vários fatores podem influenciar a eficiência do olfato canino, incluindo raça, idade, saúde e treinamento. Algumas raças, como o Bloodhound, o Pastor Alemão e o Labrador Retriever, são conhecidas por suas habilidades olfativas superiores. A capacidade olfativa pode diminuir com a idade ou devido a problemas de saúde, como infecções nasais ou doenças neurológicas.

Manter a saúde geral do cão é essencial para preservar seu olfato (Craven; Paterson; Settles, 2010). Bem como, o treinamento para tarefas específicas, como detecção de odores, é essencial para aprimorar suas habilidades através de exercícios regulares e reforço positivo (Thesen; Steen; Døving, 1993).

Embora todos os cães tenham um olfato aguçado, alguns são naturalmente mais aptos para rastrear odores. Um bom faro em cães de busca e resgate depende de uma combinação de características físicas e anatômicas que facilitam a detecção e o rastreamento de odores. O olfato canino é uma das características mais notáveis desses animais, resultado de milhões de anos de evolução e adaptação. Sua capacidade de detectar e discriminar odores em concentrações extremamente baixas tem sido aproveitada em diversas áreas, desde busca e resgate até a detecção de doenças.

2.3 Cães de busca e resgate

O uso de cães em atividades de busca e resgate é uma prática consolidada em diversos países, com reconhecida eficácia em operações de salvamento, localização de vítimas soterradas, desaparecidas em matas ou áreas urbanas, e até mesmo em tragédias. A formação desses cães exige um conjunto complexo de etapas que envolvem seleção dos animais, socialização, treinamento técnico e fortalecimento do vínculo entre cão e condutor.

Os cães de busca são animais altamente treinados que desempenham um papel crucial em operações de salvamento, localizando pessoas desaparecidas em uma variedade de cenários, desde desastres naturais até áreas remotas e de difícil acesso. Suas habilidades sensoriais excepcionais, combinadas com um treinamento especializado, fazem deles ferramentas indispensáveis em emergências.

No Brasil, o uso de cães de busca e resgate tem se expandido nos últimos anos, tanto no âmbito das corporações militares como também em grupos civis voluntários. Apesar do crescimento da atividade, a literatura científica nacional ainda é incipiente quanto à sistematização das práticas de formação e aos critérios técnicos utilizados em diferentes instituições.

2.3.1 Histórico do uso de cães em busca e resgate

O emprego de cães em operações de salvamento remonta à Idade Média, nos Alpes suíços, onde cães auxiliavam monges a localizar viajantes perdidos em nevascas (The Role of

Dogs in Search and Rescue, 2022). Os primeiros relatos documentados do uso de cães para salvamento remontam ao século XI, no Hospício de São Bernardo de Menton, localizado na Suíça. Monges da Ordem de São Bernardo utilizavam cães da raça que posteriormente recebeu o nome de São Bernardo para localizar viajantes perdidos em nevascas. Esses cães, conhecidos por sua força, resistência e senso de orientação, foram responsáveis por salvar centenas de vidas ao longo dos séculos (Dickinson; Feuerbacher, 2025).

A partir do século XX, o uso tático de cães foi ampliado em cenários de guerra, desastres naturais e busca de desaparecidos, sendo aperfeiçoada ao longo dos séculos em função da utilidade do olfato canino em ambientes de difícil acesso, condições adversas e emergências.

Durante a Primeira e Segunda Guerra Mundial, cães foram amplamente utilizados por exércitos europeus e norte-americanos para funções diversas, como mensageiros, sentinelas e detectores de feridos em campos de batalha. O exército alemão foi um dos primeiros a sistematizar o treinamento de cães farejadores, utilizando cães para detectar soldados feridos e minas terrestres. Ao final da Segunda Guerra, o sucesso desses cães inspirou a criação de unidades especializadas em missões de busca civil, especialmente na Alemanha, Suíça, Áustria e Estados Unidos (Lemish, 2022).

A partir das décadas de 1970 e 1980, grandes desastres naturais, como: terremotos, deslizamentos e colapsos estruturais, impulsionaram a criação de organizações internacionais dedicadas à formação de cães de busca e resgate. O uso de cães em eventos como o terremoto de Kobe (Japão, 1995), o atentado de Oklahoma City (EUA, 1995) e o 11 de Setembro (2001) consolidou a presença desses animais em operações complexas, demonstrando sua superioridade sensorial frente a equipamentos eletrônicos em ambientes instáveis. No contexto moderno, organizações como a *International Rescue Dog Organisation* (IRO) e *Fédération Cynologique Internationale* (FCI) estabeleceram diretrizes para treinamento e certificação desses cães, o que impulsionou a profissionalização da atividade.

O uso de cães em operações de busca e resgate no Brasil teve origem na década de 1980, de forma esporádica, por iniciativa de bombeiros militares que buscavam alternativas para aumentar a eficácia na localização de vítimas em desastres naturais e desaparecimentos em áreas de mata. Inspiradas em experiências da Europa e dos Estados Unidos, algumas corporações começaram a estudar a possibilidade de empregar cães em atividades de salvamento.

A historiografia do serviço de cães nos Corpos de Bombeiros Militares do Brasil evoluiu de iniciativas descentralizadas no final da década de 1990, as iniciativas eram isoladas e careciam de regulamentação estatal, dependendo quase exclusivamente do voluntarismo de

militares que adaptavam técnicas de cães de guarda e faro de entorpecentes para a atividade de salvamento, gerando uma lacuna técnica significativa na sociabilidade e autonomia dos animais. O ano de 1998 constitui o marco zero da institucionalização do serviço no país, momento em que duas unidades da federação oficializaram suas estruturas cinotécnicas, conferindo legitimidade administrativa à atividade. No Distrito Federal, a publicação da Portaria nº 30, de 4 de setembro de 1998, o Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF, 1998), criou formalmente o Canil de Busca e Salvamento, retirando a atividade da informalidade. Simultaneamente, o Corpo de Bombeiros Militar do Estado de São Paulo (CBPMESP) estruturou seu serviço visando atender à crescente demanda por intervenções em colapsos estruturais e deslizamentos urbanos.

Nos anos 2000, houve um avanço significativo com a participação de militares brasileiros em cursos e certificações internacionais, especialmente pela IRO, o que levou à adoção de padrões mais técnicos e ao aprimoramento dos processos de formação. O protagonismo do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC), sinalizou uma reorientação doutrinária baseada na importação e adaptação das normas da IRO, visando padronizar a formação, o uso de equipamentos e os critérios de avaliação dos cães e condutores (Parizotto, 2013).

A heterogeneidade dos treinamentos regionais representava um risco à segurança das operações integradas, o que motivou o Conselho Nacional dos Corpos de Bombeiros Militares do Brasil (LIGABOM) a instituir o Comitê Nacional de Busca, Resgate e Salvamento com Cães (CONABRESC). A implementação de certificações nacionais rigorosamente padronizadas, foi crucial para garantir que binômios certificados em diferentes regiões do país possuísse a mesma proficiência técnica. Essa trajetória de profissionalização culminou na operação de Brumadinho, em 2019, que serviu como a grande validação histórica da doutrina nacional. A atuação integrada de diversas corporações, seguindo protocolos unificados de marcação e varredura em um cenário de extrema complexidade e ausência de pistas visuais, demonstrou que a cinotecnia brasileira havia superado sua fase experimental (Nunes; Parizotto, 2016).

2.3.2 Critérios de seleção dos cães

A escolha de cães para busca e resgate deve considerar fatores genéticos, comportamentais e físicos. Raças com alta motivação para trabalho, resistência física e bom olfato são frequentemente utilizadas. Contudo, mais do que a raça, características individuais

como capacidade de concentração, sociabilidade, ausência de medo e desejo por recompensa são determinantes para o sucesso na formação (Schoon; De Bruin, 1994).

Cães de busca e resgate precisam ser capazes de trabalhar por longos períodos em condições físicas desafiadoras, como terrenos irregulares, climas extremos e áreas de difícil acesso, exigindo boa resistência cardiovascular e muscular para cobrir grandes áreas e suportar longas horas de trabalho. Estes animais têm uma constituição robusta e ágil, permitindo-lhes trafegar por diferentes tipos de terreno. A inteligência e a capacidade de aprendizado são cruciais para o treinamento e a execução de tarefas complexas. Esses indivíduos devem ser capazes de aprender e executar comandos rapidamente, além de se adaptar a novas situações. A capacidade de resolver problemas e tomar decisões independentes é essencial em operações de busca, onde o cão pode enfrentar situações imprevistas (Helton, 2009).

A escolha do cão se inicia muito cedo, sendo interessante realizar a observação da ninhada, selecionando os filhotes que apresentam as características desejadas para o serviço de cães de busca. A seleção do filhote é uma etapa crítica, pois nem todos os cães têm as características necessárias para se destacar nessa função. A escolha envolve avaliar aspectos físicos, comportamentais e instintivos do animal. O cão deve ser forte o suficiente para trabalhar em terrenos difíceis, mas não tão grande que se torne difícil de transportar. Deve ter boa saúde e capacidade física para trabalhar por longos períodos.

O cão deve ser naturalmente curioso e disposto a explorar novos ambientes, capaz de enfrentar situações desafiadoras, ter o temperamento amigável com pessoas e outros animais, além disso, deve ser capaz de se concentrar em uma tarefa por longos períodos, sem se distrair facilmente, sabendo lidar com frustrações e continuar trabalhando mesmo em condições adversas (Parizotto, 2013; Cielusinsky, 2021).

Os traços fisiológicos como idade, tamanho e sexo promovem diferenças que devem ser avaliadas pelo cinotécnico, que é o especialista que domina e aplica técnicas, conhecimentos e metodologias ao estudo, criação, seleção, treinamento e utilização de cães para finalidades específicas. Este profissional possui profundo entendimento do comportamento canino (psicologia canina), das metodologias de adestramento e do manejo de cães, aplicando esse conhecimento em áreas como segurança, busca e resgate, terapia assistida, esportes caninos ou condução de cães de serviço (Cielusinsky, 2021).

2.3.3 Treinamento técnico e fases da formação

A base para um cão de busca bem-sucedido começa nos primeiros meses de vida, com foco na socialização, habituação sensorial e ambiental. Logo nos primeiros dias é crucial a adaptação a estímulos diversos, como ruídos, superfícies instáveis, presença de pessoas e outros animais (Marr, 1964). Durante essa fase, o filhote deve ser exposto a diferentes contextos de maneira controlada e positiva, promovendo segurança emocional e plasticidade cognitiva. Técnicas que estimulem o sistema neurológico dos filhotes precocemente também são indicadas para fortalecer o sistema imunológico e a tolerância ao estresse (Sinn; Gosling; Hilliard, 2010).

O processo de formação técnica de cães de busca e resgate é geralmente dividido em três grandes etapas: iniciação, condicionamento e operacionalização:

1. Iniciação: Nesta fase, o cão aprende os fundamentos da busca, por meio de jogos com o condutor e a construção da motivação intrínseca para encontrar uma "vítima" (geralmente escondida com reforços positivos como brinquedos ou petiscos).
2. Condicionamento: Introdz-se ambientes mais complexos, com presença de ruídos, odores variados, obstáculos físicos e vítimas escondidas em profundidade. O cão aprende a sistematizar a busca, manter a concentração e desenvolver sinalizações (latido, foco, parada).
3. Operacionalização: Já com estabilidade emocional e habilidade técnica, o cão é submetido a simulações de missões reais, buscando consolidar a autonomia, resistência física e cooperação com o condutor.

Treinamentos regulares são importantes para o aprendizado, para a resistência física e acuidade intelectual do cão. Geralmente, aos 24 meses, o cão deve estar apto a atuar em operações e realizar certificações que atestem a capacidade do cão na busca. O uso de reforço positivo, variabilidade de ambientes e a manutenção do vínculo com o condutor são elementos essenciais ao longo de todo o processo (Gerritsen, 2014).

2.3.4 Modalidades de treinamentos dos cães de busca e resgate

O treinamento de cães de busca e resgate é um processo complexo, moroso e oneroso, que pode levar mais de dois anos para ser concluído. O primeiro ponto a ser destacado é a formação e capacitação dos recursos humanos que irão formar a parceria com o animal. O cinotécnico deve conhecer os cenários de ocorrências, planejar as atividades, conduzir os treinamentos, avaliar o desempenho do cão e principalmente corrigir o cão com disciplina necessária para formação do animal. Portanto, a formação de um binômio de busca exige

inicialmente a formação do ser humano, que irá ajudar o cão a desenvolver as habilidades fundamentais para a busca e resgate de pessoas.

Os cinotécnicos devem ter uma formação multidisciplinar para desempenhar as atividades com os cães, alguns dos conhecimentos envolvem: noções básicas de orientação e navegação; conhecimento de operações em espaços confinados, espaço florestado, áreas deslizadas e estruturas colapsadas; conhecimentos de primeiros socorros, bem como, saber utilizar as tecnologias disponíveis que podem auxiliar nas buscas e salvamento de pessoas. Além disso, o estudo de searas que envolvem o animal é fundamental, como: fisiologia e anatomia canina, primeiros socorros em animais, etologia canina, profilaxia e parasitologia, cuidados com higiene e manejo na criação de animais e domínio das técnicas de adestramento. Existem diferentes tipos de treinamentos de cães de busca e resgate, cada um especializado em determinadas tarefas e ambientes, como: cães de varredura, cães de odor específico e cães de cadáver.

Os cães de varredura são treinados para percorrer amplas áreas de forma sistemática, atuando soltos, o que lhes confere maior autonomia e liberdade de movimento. Essa forma de atuação permite ampliar significativamente a área de cobertura e a eficiência na localização de seres humanos. A busca é realizada com base em padrões previamente estabelecidos, assegurando que nenhuma região da zona de atuação seja negligenciada. Esses cães utilizam a técnica de busca aérea (venteio), que consiste na detecção de partículas de odor humano vivo dispersas no ambiente, independentemente da posição exata da fonte. Em razão de sua versatilidade e rapidez, são amplamente empregados em operações de busca e salvamento, investigações policiais e ações em cenários de desastres (INSARAG, 2020; IRO, 2025; Fédération Cynologique Internationale, 2025)

Os cães de detecção por odor específico são treinados para localizar um indivíduo com base em partículas de odor deixadas no ambiente, seja no solo ou no ar. Essa técnica exige a utilização de uma amostra de referência, como uma peça de roupa ou objeto que contenha odor característico da pessoa procurada. A partir dessa amostra, o cão é capaz de seguir a trilha deixada pelo deslocamento do indivíduo, mesmo após longos períodos e sob condições ambientais adversas. Sua eficácia é especialmente notável em áreas rurais e florestais, onde há menor contaminação olfativa, mas esses cães também demonstram bom desempenho em ambientes urbanos, mesmo quando o rastro no solo encontra-se comprometido por interferências humanas ou climáticas. Essa especialização é extremamente complexa e valiosa em operações de busca por pessoas desaparecidas, fugitivos, vítimas de sequestro ou em

atividades forenses, contribuindo com alta precisão para a elucidação de casos complexos (Schoon; De Bruin, 1994; Woitke et al., 2023).

Cães de detecção de cadáveres são treinados para localizar remanescentes humanos, incluindo corpos inteiros, partes corporais, sangue e tecidos em variados estágios de decomposição, mesmo quando esses se encontram enterrados, submersos ou ocultos. Esses animais são especializados na identificação de odores característicos da decomposição humana e são empregados em operações de busca de pessoas desaparecidas, em desastres com vítimas fatais e em contextos forenses e criminais. Sua capacidade de detecção, mesmo em condições ambientais extremas ou em fases avançadas de decomposição, torna-os ferramentas indispensáveis para a investigação e a recuperação de corpos (Glavaš; Pintar, 2019; Fumagalli, 2021; Rebmann; Edward, 2021). Segue abaixo as especificações de cada modalidade de treinamento (Tabela 1):

Tabela 1 – Modalidades de Treinamento de Cães de Busca e Resgate de pessoas.

Item	Busca por Área	Odor Específico	Cães de Cadáver
Função Principal	Localizar pessoas vivas em grandes áreas	Encontrar uma pessoa específica usando um objeto de odor pessoal	Detectar restos humanos em decomposição
Odor Detectado	Odor humano genérico (qualquer pessoa viva)	Odor individual da pessoa desaparecida	Odor de decomposição humana
Método de Busca	Varredura ampla, seguindo o vento para captar odores dispersos no ar	Segue um rastro específico a partir de um objeto de referência	Detecta concentração de odor em locais de decomposição (ar ou solo)
Aplicações	Desaparecimentos em matas, resgates após desastres naturais	Buscas direcionadas em matas e áreas de vegetação	Investigação forense, desastres com vítimas fatais
Treinamento	Socialização, exposição a terrenos variados, busca por odores genéricos	Associação do artigo de odor a recompensas e treino em discriminação de cheiros	Exposição a odores de decomposição (natural/sintético)
Desafios	Vento forte, chuva ou terrenos muito extensos podem reduzir eficácia	Objetos contaminados com outros odores podem confundir o cão	Odor disperso em água ou enterrados (compactados)

Fonte: autor.

A eficácia de uma equipe de busca não depende apenas do cão, mas da sinergia entre cão e condutor. O binômio deve operar com comunicação não verbal, confiança mútua e entendimento técnico das respostas do animal. O condutor deve ser treinado não apenas em técnicas de adestramento, mas também em leitura comportamental, navegação, sobrevivência em ambientes hostis e primeiros socorros (Gerritsen, 2014). A consolidação do vínculo afetivo e profissional entre cão e condutor é um dos principais fatores de sucesso em operações. Segundo estudos neurocientíficos, esse vínculo favorece a liberação de ocitocina em ambos, aumentando a motivação e a coordenação (Tonoike *et al.*, 2022).

Manter as habilidades dos cães de busca requer treinamento contínuo e exposição regular a cenários de busca. Isso garante que os cães estejam sempre prontos para operações reais (Gerritsen, 2014). Os cães de busca e resgate são ferramentas indispensáveis em operações de localização de pessoas desaparecidas, combinando habilidades sensoriais excepcionais com treinamento especializado. Sua capacidade de detectar odores humanos em condições adversas e cobrir grandes áreas rapidamente os torna parceiros valiosos em emergências. Ao compreender e valorizar o trabalho desses animais, podemos aprimorar as estratégias de busca e resgate, aumentando as chances de sucesso e salvando vidas.

2.4 Serviço de Cães de Busca e Resgate no Brasil

No Brasil, o serviço de cães de busca e resgate é organizado e conduzido por diferentes instituições, incluindo o Corpo de Bombeiros, forças de segurança, organizações civis, organizações não governamentais e grupos de voluntários que treinam e disponibilizam cães para operações de busca. Esses grupos frequentemente atuam em parceria com autoridades locais e podem ser acionados para reforçar operações de resgate em grandes desastres.

A organização do serviço de cães de busca e resgate no Brasil segue um modelo integrado que envolve instituições públicas e privadas. Entre os principais atores responsáveis pelo uso de cães em missões de resgate, destacam-se: Os Corpos de Bombeiros Militares estaduais, que possuem unidades especializadas em busca e resgate com cães. Os cães são treinados para atuar em diferentes cenários, como áreas de difícil acesso, escombros e matas fechadas. No entanto, cada estado possui autonomia para organizar suas equipes, mas seguem diretrizes gerais estabelecidas por normativas nacionais e internacionais de salvamento. Algumas unidades da Polícia Civil e Militar mantêm cães treinados para busca e captura, bem como, detecção de drogas em operações da segurança pública.

O Corpo de Bombeiros Militar é uma instituição essencial para a segurança pública, responsável por atender emergências, combater incêndios, realizar resgates e atuar em desastres naturais. Dentre suas unidades especializadas, destacam-se as unidades de busca e resgate com cães, fundamentais na localização de vítimas desaparecidas em diferentes cenários. O Corpo de Bombeiros Militar de cada estado brasileiro opera de forma autônoma, mas segue diretrizes nacionais estabelecidas pelo Conselho Nacional de Comandantes-Gerais dos Corpos de Bombeiros Militares (LIGABOM). As unidades de busca com cães são formadas por binômios, compostas por um cão e seu condutor. Cada equipe passa por rigoroso treinamento e certificação para garantir alto nível de desempenho em operações reais.

A certificação dos cães de busca e resgate segue padrões rigorosos estabelecidos por órgãos nacionais e internacionais, que possui critérios específicos para a validação das equipes de busca, garantindo que os cães atendam aos requisitos operacionais exigidos. Os cães são submetidos a testes que avaliam sua capacidade de localizar vítimas em diferentes cenários, incluindo desmoronamentos, áreas de mata e corpos d'água, bem como, devem passar por testes de obediência, agilidade e destreza. Os cães certificados passam por reavaliações constantes para garantir que mantenham sua eficiência operacional ao longo do tempo.

Apesar da crescente valorização do serviço de cães de busca e resgate no Brasil, ainda existem desafios a serem superados, como a necessidade de maior investimento em infraestrutura, treinamentos contínuos e padronização dos protocolos de treinamentos entre diferentes estados. O fortalecimento das parcerias entre instituições públicas e privadas, bem como o incentivo ao voluntariado, são essenciais para aprimorar esse serviço. O aprimoramento contínuo dos treinamentos e a regulamentação da atuação desses cães são fundamentais para garantir operações de resgate mais eficientes e seguras para a população.

2.5 Utilização de cães de busca e resgate de pessoas perdidas e desaparecidas

O desaparecimento de pessoas é um problema global que afeta milhões de famílias todos os anos. As estatísticas variam de acordo com o país, os critérios de registro e a eficiência das autoridades em lidar com esses casos. A Interpol mantém um banco de dados global de desaparecidos, mas nem todos os países fornecem dados consistentes. Estima-se que milhões de pessoas desaparecem anualmente, incluindo crianças, adolescentes, idosos e adultos. Muitos casos estão ligados a tráfico humano, exploração sexual, violência doméstica, conflitos armados e problemas de saúde mental.

O Anuário Brasileiro de Segurança Pública (2024), registrou crescimento de pessoas desaparecidas em 2023, aumento de 3,2% em relação ao ano anterior, totalizando 80 mil notificações de pessoas desaparecidas em todo Brasil. A série histórica demonstra que número de desaparecidos no Brasil quase dobrou desde 2007, com variações proeminentes, e o maior número de notificações registrados durante o ano de 2013, estabelecendo mais de 90 mil pessoas desaparecidas. Os principais grupos afetados incluem pessoas com transtornos mentais, jovens, moradores de rua e mulheres vítimas de violência doméstica. O Brasil ainda não possui um banco de dados nacional unificado, dificultando o acompanhamento dos casos.

No ano de 2023 temos uma média de 220 desaparecimentos registrados por dia em todo Brasil. Já os dados para localização de pessoas desaparecidas foram coletados apenas a partir de 2016, sofrendo forte variação durante os anos, porém desde 2020 apresentou crescimento de mais de 160%, totalizando em números absolutos mais de 52 mil pessoas localizadas em 2023, com aumento de 22% em relação ao ano anterior (Fórum Brasileiro de Segurança Pública, 2024).

As operações de busca por pessoas desaparecidas são conduzidas com base na gravidade do caso, localização geográfica e recursos disponíveis, observando protocolos que envolvem a integração entre forças de segurança pública, familiares, voluntários e tecnologias especializadas. A crescente incorporação de tecnologias, tais como sistemas de georreferenciamento, inteligência artificial e análise de dados massivos, tem potencializado a eficácia das operações, possibilitando uma resposta mais rápida e precisa às demandas de busca.

A formalização do boletim de ocorrência (B.O.) é o primeiro passo para a mobilização das equipes responsáveis, sendo fundamental o fornecimento de informações detalhadas, tais como a última localização conhecida do desaparecido, características pessoais, vestimentas, e eventuais suspeitas ou circunstâncias especiais. Tais dados são cruciais para o planejamento eficiente das ações de busca e para a priorização dos recursos. No Brasil, a legislação permite o registro imediato do B.O. para pessoas desaparecidas, sem necessidade de aguardar o prazo de 24 horas, conforme disposto na Lei nº 13.812/2019, que institui a Política Nacional de Busca de Pessoas Desaparecidas e cria o Cadastro Nacional de Pessoas Desaparecidas. Além dela, a Lei nº 11.259/2005, conhecida como "Lei da Busca Imediata", determina a investigação policial imediata em caso de desaparecimento de crianças e adolescentes (Lei nº 11.259, 2005; Lei nº 13.812, 2019).

Após o registro, as forças de segurança iniciam a coleta sistemática de informações por meio de diferentes fontes. Entre estas destacam-se: análise de imagens de câmeras de segurança em espaços públicos, privados e meios de transporte; monitoramento tecnológico de

dispositivos móveis e redes sociais, considerando localizações georreferenciadas, mensagens e interações recentes; depoimentos de testemunhas e familiares; consulta a históricos médicos e psicológicos, visando identificar condições que possam ter contribuído para o desaparecimento, como depressão, Alzheimer e transtornos psiquiátricos; além da análise de movimentações financeiras que possam indicar deslocamentos ou intenções do desaparecido (Ministério da Justiça e Segurança Pública, 2023).

Em casos em que há evidências de ocorrência criminal, como sequestro, tráfico de pessoas ou homicídio, a investigação é remetida para delegacias especializadas, que adotam procedimentos investigativos específicos e técnicas avançadas para apuração dos fatos, conforme normativas da Polícia Civil e Federal (Lei nº 13.812, 2019). Não configurando crime, no Brasil, os bombeiros militares estaduais são as instituições acionadas para atuar nessas ocorrências.

Os bombeiros militares desempenham um papel fundamental nas buscas por pessoas desaparecidas, especialmente em casos que envolvem ambientes de risco, como florestas, montanhas, rios e desastres naturais. Assim que são acionados para uma operação de resgate, os bombeiros seguem um protocolo específico: coletam informações sobre a pessoa desaparecida (nome, idade, roupas, estado de saúde, última localização). Avaliam o tipo de terreno e os riscos envolvidos (florestas, rios, escombros). Montam uma equipe com especialistas adequados às particularidades de cada ocorrência (resgate terrestre, aquático ou aéreo). Utilizam mapas, GPS e drones para planejar a busca. Quanto mais rápido a busca começar, maiores as chances de sucesso, e casos envolvendo crianças, idosos e pessoas feridas devem ter prioridade no resgate.

Após encontrar a vítima, os bombeiros prestam os primeiros socorros no local e encaminham a pessoa para um hospital, se necessário. É muito importante realizar o registro de todos os detalhes da operação em relatórios da instituição. Caso a vítima não seja encontrada, as buscas podem ser ampliadas com outras forças de segurança, ou podem ser suspensas, caso as informações sejam imprecisas. Assim, os cães farejadores desempenham um papel fundamental nas operações de busca e resgate de pessoas desaparecidas. Graças ao seu olfato altamente sensível, eles conseguem detectar odores humanos mesmo em condições adversas, tornando-se aliados indispensáveis para equipes de resgate.

2.6 Utilização de cães de busca e resgate em grandes desastres

Os cães têm sido utilizados há séculos como aliados dos seres humanos em diversas atividades, desde a caça até a proteção de propriedades (Hiby *et al.*, 2023). No entanto, uma das aplicações mais notáveis e emocionantes desses animais é a sua participação em operações de resgate durante desastres naturais. Graças ao seu olfato apurado, audição sensível e capacidade de trabalhar em condições adversas, os cães são ferramentas indispensáveis em operações de emergência, como terremotos, deslizamentos de terra, enchentes e avalanches.

Os cães de busca e resgate têm um histórico extenso e impressionante de atuação em desastres ao redor do mundo. Sua capacidade de localizar vítimas em condições extremas os tornou uma ferramenta indispensável em operações de salvamento. A utilização de cães em operações de busca e resgate remonta ao século XIX, mas ganhou destaque durante as Guerras Mundiais, quando cães eram usados para localizar soldados feridos em campos de batalha (Lawrence *et al.*, 1991; Gardiner, 2014; Gordon, 2018). Após esse período, o treinamento de cães para desastres naturais e acidentes tornou-se mais estruturado, com organizações especializadas desenvolvendo protocolos e técnicas avançadas.

Desastres naturais e tragédias antrópicas são recorrentes no mundo inteiro, com destaque para: enchentes, deslizamentos de terra, furacões, vendavais, secas ou chuvas severas e desertificação (Chaudhary; Piracha, 2021), causando impacto profundo na natureza e na sociedade de todas as regiões do planeta (Santarsiero *et al.*, 2019; Moradi *et al.*, 2021). Em 2023, o Emergency Events Database registrou um total de 399 desastres relacionados a riscos naturais. Esses eventos resultaram em 86 mil fatalidades e afetaram 93,1 milhões de pessoas (Donatti *et al.*, 2024).

As mudanças climáticas são um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade atualmente, e são amplamente estudadas pela comunidade científica. Há um consenso de que as mudanças climáticas são reais, causadas principalmente por atividades humanas e representam uma ameaça significativa para o planeta, promovendo diversos efeitos significativos e interconectados com meio ambiente, na sociedade e na economia (Calvin *et al.*, 2023). As perdas econômicas passam de 1 trilhão em reais. Em destaque: os terremotos na Turquia e na República Árabe da Síria, em 2023, foram os eventos mais catastróficos do ano em termos de mortalidade e danos econômicos, com mais de 56 mil mortes relatadas e danos avaliados em mais de 239 bilhões de reais (Delforge *et al.*, 2025).

No Brasil diversas tragédias também foram observadas nos últimos anos, impactando diversas regiões, tais como: o rompimento de barragens; deslizamentos de terra e enchentes; e o caso mais recente no estado do Rio Grande do Sul, em 2024, que vivenciou episódio de chuvas extremas. Atualmente, existe atuação direta de equipes de buscas com cães nas catástrofes,

auxiliando nas buscas de vítimas com vida e localização de corpos ou segmentos humanos (Fundação Oswaldo Cruz *et al.*, 2019; W Silva Rangel; Parizotto, 2021).

A atuação de equipes de buscas com cães em eventos extremos, como desastres naturais (terremotos, deslizamentos, furacões, enchentes) ou acidentes de grande proporção (desabamentos, avalanches), é fundamental para localizar vítimas com rapidez e eficiência. Essas equipes combinam o treinamento avançado dos cães com a expertise de seus guias (ou condutores) para atuar em cenários complexos e de alto risco.

A capacidade olfativa do cão permite que sejam treinados para detectar o odor humano, mesmo em condições adversas, como sob escombros, neve ou lama, promovendo a localização de vítimas em tempo hábil, auxiliando a encontrar pessoas vivas (busca de sobreviventes) ou cadáveres (busca de corpos), dependendo do treinamento específico. O cão é um animal ágil e treinável, com boa capacidade de adaptação, fazendo com que os cães acessem áreas de difícil alcance para humanos, como escombros estreitos ou terrenos instáveis. A utilização de cães em desastres naturais e tragédias tem sido documentada em diversos eventos ao redor do mundo. Esses animais são frequentemente destacados por sua capacidade de localizar vítimas em condições extremamente desafiadoras, como escombros, áreas alagadas ou terrenos instáveis.

Entre os desastres e tragédias mais notáveis em que cães foram utilizados, destacando seu papel crucial nessas operações, o ataque ao World Trade Center, cães de busca e resgate foram enviados ao local para ajudar a localizar sobreviventes e, posteriormente, corpos. Os cães trabalharam incansavelmente para encontrar vítimas. Muitos desses cães sofreram ferimentos e problemas de saúde, devido às condições adversas. Embora poucos sobreviventes tenham sido encontrados após os primeiros dias, os cães foram cruciais para a recuperação de corpos e para fornecer conforto emocional aos familiares das vítimas (Hunt *et al.*, 2012; Gordon, 2018).

Quase uma década depois, um dos desastres mais devastadores do século XXI, o terremoto do Haiti em 12 de janeiro de 2010, atingiu 7.0 na escala Richter e deixou mais de 200 mil mortos e 1,5 milhão de desabrigados. Cães de busca e resgate foram enviados por equipes internacionais, incluindo dos Estados Unidos, México e Alemanha, para ajudar a localizar sobreviventes sob os escombros de edifícios colapsados. Os cães trabalharam em condições extremamente difíceis, com calor intenso e estruturas instáveis, sendo essenciais para encontrar vítimas presas em locais onde equipamentos pesados não podiam chegar, centenas de pessoas foram resgatadas com vida nos primeiros dias após o terremoto com o auxílio das equipes caninas (Aguilar, 2014).

Os terremotos na Turquia e na Síria, em 2023, foram os eventos mais catastróficos dos últimos anos em termos de mortalidade e danos econômicos, com mais de 56 mil mortes

relatadas e danos avaliados em mais de 239 bilhões de reais. No Brasil diversas tragédias também ocorreram nos últimos anos, cujo eventos culminaram em mais de 550 mortes. Em destaque: o rompimento da barragem em Brumadinho/MG; chuvas intensas e deslizamento de terra em Petrópolis/RJ, São Sebastião/SP e em Recife/PE; e o caso mais recente no estado do Rio Grande do Sul, que vivenciou episódio de chuvas extremas. Em todas as catástrofes mencionadas houve a atuação direta dos cães, auxiliando nas buscas de vítimas com vida e localização de corpos (Fundação Oswaldo Cruz *et al.*, 2019; W Silva Rangel; Parizotto, 2021; Marengo *et al.*, 2024).

A utilização de cães em desastres naturais e tragédias tem sido fundamental para salvar vidas e resgatar corpos com segurança, para proporcionar algum conforto para as famílias das vítimas. Sua capacidade de trabalhar em condições extremas, combinada com seu treinamento especializado, faz deles parceiros indispensáveis em operações de resgate. No entanto, é essencial garantir o bem-estar desses animais, e realizar o monitoramento e condução dos cães durante as buscas.

2.7 Utilização da tecnologia na busca e resgate de pessoas

A utilização da tecnologia em ações para localização de indivíduos tem se mostrado fundamental para aumentar a eficácia e a segurança das operações de resgate de pessoas desaparecidas ou vítimas de desastres, assim, as tecnologias têm desempenhado um papel cada vez mais importante nas operações, podendo auxiliar complementando as habilidades dos cães de busca e resgate.

Métodos modernos como geolocalização, drones, inteligência artificial (IA) e sensores térmicos tornaram as operações mais ágeis e precisas, aumentando as chances de sucesso. O emprego da IA, por exemplo, permite analisar dados reais de comportamento de pessoas perdidas para simular decisões e prever os locais mais prováveis de serem encontrados. Pesquisadores estudam formas de otimizar a alocação dos recursos de resgate e redução do tempo para localização das vítimas (Nasar *et al.*, 2023; Ewers; Anderson; Thomson, 2025).

Estudos com drones equipados com tecnologias como reconhecimento facial e comunicação têm sido amplamente utilizados, como: drones autônomos com estações base celulares, que localizam dispositivos móveis de vítimas mesmo em áreas sem infraestrutura de rede ativa. Esses drones posicionam-se estrategicamente para captar sinais e estabelecer comunicação direta com as equipes de resgate, aumentando as chances de sucesso nas operações. Essas tecnologias, integradas aos métodos tradicionais, têm transformado as

operações de busca e resgate, tornando-as mais rápidas, precisas e seguras, o que é essencial para salvar vidas em situações de emergência (Ewers; Anderson; Thomson, 2025). No Brasil, a Força Aérea Brasileira emprega drones para localizar vítimas em áreas de difícil acesso, como regiões afetadas por enchentes, e para entregar suprimentos essenciais, além de restabelecer comunicação com pessoas isoladas. Esses veículos aéreos não tripulados ampliam o alcance das equipes de resgate e permitem intervenções rápidas e seguras (Silva, 2023).

Outra inovação tecnológica relevante são os sensores de radar capazes de detectar sinais vitais, como respiração e batimentos cardíacos, mesmo quando as vítimas estão soterradas ou inconscientes. Esses equipamentos podem superar limitações visuais e ambientais, possibilitando a identificação precisa de pessoas em situações críticas. Complementarmente, helicópteros equipados com imageadores térmicos e guinchos elétricos auxiliam no resgate em locais isolados, especialmente em condições de baixa visibilidade (Park *et al.*, 2020).

Aplicativos e softwares de mapeamento também ajudam a planejar e monitorar as operações, garantindo que todos os recursos sejam utilizados da melhor maneira possível. Assim, a combinação de cães de busca e resgate com tecnologias modernas aumenta significativamente a eficiência e a eficácia das missões de resgate. Os cães são especialmente valiosos em situações em que a tecnologia pode ter limitações, como em escombros, áreas florestais ou após desastres naturais (Rocha, 2020).

Os cães demonstram elevada resiliência e adaptabilidade, sendo capazes de atuar de forma eficiente em contextos variados e hostis. Sua participação em operações de busca e resgate não se limita à eficiência olfativa e auditiva, esses animais também contribuem para a coesão emocional das equipes, promovendo conforto psicológico e auxiliando na manutenção da moral durante missões prolongadas e exaustivas. Apesar dos avanços significativos na tecnologia, os cães continuam a ser uma parte essencial das operações de busca e resgate por várias razões (Gordon, 2018).

Estudos recentes destacam que a utilização combinada de cães e tecnologia é fundamental para o aprimoramento das estratégias de segurança pública e para a proteção de vidas em contextos de risco (Fernandez-Lozano *et al.*, 2018; Kasnesis *et al.*, 2022; Contini; Martins, 2024). O emprego de cães farejadores, continuam desempenhando um papel insubstituível em determinadas situações operacionais. A sensibilidade e a precisão oferecidas por esses animais treinados permanecem superiores em diversos cenários, especialmente aqueles nos quais as limitações da tecnologia ainda comprometem a detecção eficaz de vítimas ou indícios relevantes. A interação entre seres humanos e cães de trabalho constitui um vínculo afetivo e funcional que ainda não pode ser plenamente replicado por sistemas tecnológicos.

Nesse sentido, a tecnologia deve ser compreendida como um recurso complementar, mas não substitutivo, à atuação de cães devidamente treinados para atividades de salvamento.

A eficácia do binômio depende intrinsecamente da capacidade do cão em manter seu desempenho máximo, e da habilidade do condutor em interpretar os sinais do animal e do ambiente. Essa problemática se insere exatamente na interseção crítica entre a segurança do animal, a eficácia da missão e a tecnologia de monitoramento.

Em buscas de grandes áreas, como observar os sinais do cão que frequentemente trabalha "solto"? Como gerir as áreas cobertas pelo cão, evitando a redundância de esforços e identificando lacunas na busca? Como identificar o sinal de indicação de vítima treinado (latido) fora do campo de visão ou audição do condutor? A implementação de sistemas de monitoramento robustos atua como a solução direta para os gargalos críticos que limitam a eficácia e a segurança nas operações de busca e resgate, as tecnologias de monitoramento animal podem ajudar a solucionar esses desafios operacionais, permitindo que o condutor entenda o que o cão está encontrando e onde, sendo crucial para guiar as equipes de resgate.

Em cenários de desastres urbanos ou áreas de vegetação densa, o condutor perde o contato visual e auditivo com o cão, gerando perda de informação. A telemetria multimodal, microfones e sensores inerciais, podem auxiliar a preencher essa lacuna, permitindo que o condutor tenha uma percepção mais fiel do que o animal está experienciando. Isso é crucial para que o condutor possa interpretar o ambiente em que o cão está e identificar remotamente seu comportamento de alerta (indicação de vítima), possibilitando aumento da eficiência no salvamento e resgate de vítimas.

2.8 Integração entre tecnologia e habilidades caninas

A utilização da internet das coisas (*internet of things* – IOT) e aprendizado da máquina (*machine learnig* - ML) para auxiliar e aumentar a eficiência de cães de busca tem se apresentado como uma solução tecnológica promissora para otimizar operações de busca de pessoas. O ML é um subcampo da inteligência artificial, que emergiu como uma força transformadora em diversas áreas do conhecimento e da tecnologia, permitindo que sistemas aprendam a partir de dados, sem a necessidade de programação explícita, o que revolucionou a forma como abordamos problemas complexos, desde a classificação de imagens, detecção de padrões de comportamento e doenças e a otimização de processos industriais em geral.

O registro de informações sobre localização, comportamento e condições fisiológicas dos cães de busca e a transmissão dessas informações em tempo real para as equipes de resgate,

são desafios que precisam ser enfrentados e solucionados, visando o aumento da rapidez e eficiência das operações de busca. Assim a aplicação de tecnologias emergentes em operações de busca e resgate vem sendo bastante estudadas, principalmente quando utilizamos a tecnologia para auxiliar e potencializar a ação dos cães durante as buscas ((Tran *et al.*, 2008; Williams *et al.*, 2020; Hussain *et al.*, 2022; Taniguchi *et al.*, 2023).

O ML permite analisar grandes volumes de dados coletados, utilizando algoritmos de aprendizado supervisionado, como redes neurais artificiais, que podem classificar padrões de comportamento canino ou detectar movimentações, posicionamentos e estado fisiológico (Shinde; Shah, 2018). No entanto, a eficácia desses modelos depende da quantidade e qualidade dos dados, o que exige sensores precisos e posicionamento adequado no corpo do animal (Taniguchi *et al.*, 2023). A utilização de técnicas de ML nesse contexto é fundamental para transformar os dados brutos captados por sensores em informações significativas e acionáveis. Contudo, a implementação dessas tecnologias apresenta uma série de desafios metodológicos e operacionais.

A durabilidade e a resistência dos dispositivos são temas críticos no desenvolvimento de tecnologias, visto que os cães se movimentam de forma imprevisível, e muitas vezes em ambientes adversos (Tran *et al.*, 2008). Além disso, a miniaturização de sensores e a otimização de consumo de energia são essenciais para evitar sobrecarga aos animais, como evidenciado no sistema de monitoramento vital, visando a viabilidade de sistemas IOT de baixo custo, mas também a necessidade de melhorias na captação de sinais fisiológicos (Taniguchi *et al.*, 2023).

A compatibilidade entre dispositivos e a padronização de protocolos de comunicação também são obstáculos, principalmente porque elementos de diferentes fabricantes podem não ser capazes de se comunicar ou interagir entre si, portanto, a integração de soluções IOT de diferentes fornecedores pode se tornar complexa e custosa (Shinde; Shah, 2018). Em síntese, a combinação de IOT e ML oferece benefícios transformadores para o monitoramento de cães de busca, desde a transmissão de dados em tempo real até a análise preditiva de riscos, influenciando a tomada de decisão das equipes de busca. Contudo, desafios como robustez de hardware, eficiência energética e processamento de dados em ambientes dinâmicos exigem soluções inovadoras. Futuras pesquisas devem focar em sensores mais adaptáveis e algoritmos de aprendizado profundo (*deep learning*) para aprimorar a autonomia e a confiabilidade desses sistemas. A colaboração entre áreas como, segurança pública, ciência animal, engenharia e ciência da computação será fundamental para superar essas barreiras e maximizar o potencial dessas tecnologias.

Existem quatro métodos principais dentro das aplicações do ML, entre eles: o aprendizado supervisionado, aprendizado não supervisionado e aprendizado semi-supervisionado. Mais recentemente, o aprendizado auto-supervisionado tem ganhado destaque, oferecendo novas abordagens para lidar com a escassez de dados rotulados e aumentar a robustez dos modelos. Cada um desses paradigmas possui características distintas, algoritmos específicos e é adequado para diferentes tipos de problemas e conjuntos de dados (Saravanan; Sujatha, 2018; Thomas; Gupta, 2020; Alnuaimi; Albaldawi, 2024).

O aprendizado supervisionado consiste na utilização de conjuntos de dados rotulados para o treinamento de modelos que associem padrões observados a categorias ou valores previamente definidos. Em aplicações voltadas ao monitoramento de cães de busca, essa abordagem permite classificar comportamentos como “repouso”, “movimentação ativa” e “vocalização” a partir de dados de sensores inerciais e acústicos. Entretanto, a principal limitação dessa metodologia reside na necessidade de uma base de dados extensa e criteriosamente rotulada, cuja construção demanda tempo, recursos e mão de obra especializada (Jiang; Gradus; Rosellini, 2020).

O aprendizado não supervisionado tem como objetivo identificar padrões e estruturas subjacentes em dados sem rótulos, dessa forma, é possível mitigar a dependência de dados rotulados, técnicas de aprendizado não supervisionado podem ser empregadas. Em sistemas de monitoramento animal, essa abordagem possibilita a segmentação de padrões comportamentais de forma autônoma, favorecendo a detecção de comportamentos anômalos ou não previstos. Contudo, um dos desafios dessa metodologia está na interpretação dos agrupamentos formados, exigindo validações adicionais para garantir a coerência dos padrões identificados com os estados comportamentais de interesse operacional (Naeem *et al.*, 2023).

O aprendizado semi-supervisionado surge como uma solução intermediária, capaz de aliar a robustez do aprendizado supervisionado com a flexibilidade do aprendizado não supervisionado, que permite utilizar um pequeno conjunto de dados rotulados em combinação com uma grande quantidade de dados não rotulados, otimizando a acurácia dos modelos sem depender de um esforço extensivo de rotulagem manual, reduzindo significativamente os custos e o tempo de desenvolvimento, ao mesmo tempo que assegura uma boa capacidade de generalização dos modelos (Mallapragada *et al.*, 2009).

Entre os benefícios da utilização de ML no desenvolvimento de dispositivos para monitoramento de cães de busca, destacam-se a automação da detecção de comportamentos críticos durante as operações e a possibilidade de coleta de dados estruturados para análise no treino dos cães, durante as operações e pós-operação. Entretanto, desafios técnicos persistem,

como as limitações físicas dos dispositivos (peso, autonomia de bateria e robustez estrutural), as dificuldades na transmissão de dados em tempo real em ambientes de difícil acesso e a necessidade de validação dos modelos em cenários reais de operação (ASNICAR et al., 2024). Dessa forma, a integração de abordagens de ML, associadas a uma arquitetura de hardware eficiente, representa um caminho promissor para o desenvolvimento de dispositivos inteligentes capazes de monitorar, em tempo real, o desempenho e o bem-estar de cães de busca e resgate em operações de alta complexidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo propôs o desenvolvimento de um sistema de monitoramento comportamental animal, composto por protótipos equipados com microcontroladores e sensores embarcados a fim de desenvolver uma tecnológica viável para monitorar cães durante a busca e resgate de pessoas desaparecidas ou vítimas de desastres. O sistema de monitoramento é capaz de auxiliar o condutor do cão a identificar mudança de comportamento, indicação e localização de pessoas. Este sistema está em fase de patenteamento sob protocolo: BR1020260019291 (Barbosa Filho; Viana, 2026). O processo de desenvolvimento foi dividido em três fases, desde a concepção, prototipagem até a validação do sistema.

A partir do segundo semestre de 2023, iniciou-se a idealização e confecção do protótipo, concebido pelo Núcleo de Estudos em Ambiência Agrícola e Bem-estar Animal - NEAMBE, sediado no Campus do Pici, na Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza/CE. Esta pesquisa teve o apoio e parceria do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Ceará, que recebeu a equipe de pesquisa prontamente, tornando possível o estudo para desenvolvimento da tecnologia. O processo para obtenção do primeiro protótipo perdurou até o segundo semestre de 2024, só então sendo possível a realização dos primeiros testes de programação, calibração dos sensores e validação do equipamento em ambiente controlado. No ano de 2025 foram realizados todos os testes de validação do sistema de monitoramento.

Os animais utilizados para a realização dos testes de campo são vinculados a Companhia de Busca com Cães (CBCães), unidade operacional especializada do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Ceará (CBMCE), cuja missão principal é empregar binômios em operações de busca, localizando e salvando pessoas perdidas ou desaparecidas, em ambientes rurais, florestais ou em cenários de desastres. Os testes utilizando os animais foram submetidos para avaliação do Comitê de Ética sobre o Uso de Animais (CEUA/UFC), sendo aprovado sob o número de protocolo: 1408202501.

O presente estudo foi fundamentado em um protocolo experimental rigoroso, desenhado para validar um sistema embarcado de monitoramento canino em cenários simulados de buscas de pessoas, utilizando o aprendizado de máquina supervisionado (Barbosa Filho; Viana, 2026). A metodologia foi estruturada em fases sequenciais: (1) instrumentação e preparação dos protótipos; (2) delineamento experimental e caracterização dos sujeitos; (3) coleta de dados em campo; e (4) análise dos dados.

3.1 Instrumentação e preparação dos protótipos

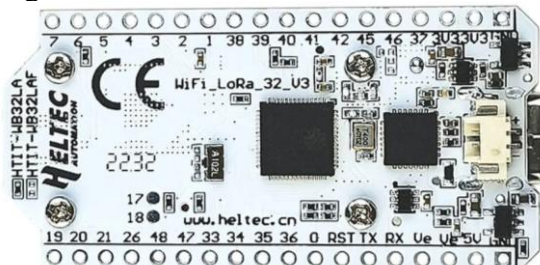
A tecnologia desenvolvida envolveu a construção de um módulo transmissor (TX) que atua como o centro de processamento inteligente do sistema, sendo responsável por realizar a coleta, o tratamento prévio das informações captadas pelos sensores embarcados, a classificação dos comportamentos. O módulo receptor (RX), por sua vez, recebe em tempo real as informações, permitindo à equipe de busca monitorar continuamente o comportamento e a atividade do cão. A transmissão contínua visa proporcionar subsídios objetivos para a tomada de decisão rápida e eficaz durante as operações de busca e resgate, contribuindo para o aumento da eficiência e da segurança da operação.

A preparação da estrutura do módulo TX exigiu os seguintes materiais: uma placa Heltec ESP32 LoRa V3; um sensor MPU-6050 (GY-521); um módulo detector de som KY-037; duas baterias 18650 (3.7V, 2600mAh); fios e solda; protoboard e conectores; cola termofusível e fita isolante; uma caixa plástica resistente a d'água; peitoral de busca ajustável para cães. O RX não possui o sensor MPU-6050 e o módulo detector de som KY-037, pois somente receberá os dados do módulo configuradas como transmissor (TX).

Na sequência são apresentados os principais componentes utilizados para construção dos protótipos, com informações, descrições e imagens dos produtos retiradas de documentos dos fabricantes dos componentes:

1. ESP32 LoRa V3 Heltec (Figura 1): é um módulo microcontrolado com capacidade de conexão em três tecnologias wireless diferentes: *Wifi*, *Bluetooth* e uma rede de comunicação a distância LoRa 863 a 928 MHz. O módulo também possui um display OLED 0,96" com resolução 128x64, ideal para desenvolvimento de projetos para mostrar informações em tempo real ao usuário.

Figura 1 – Módulo do microcontrolador *Heltec ESP32 LoRa WiFi V3 868/915MHz*.

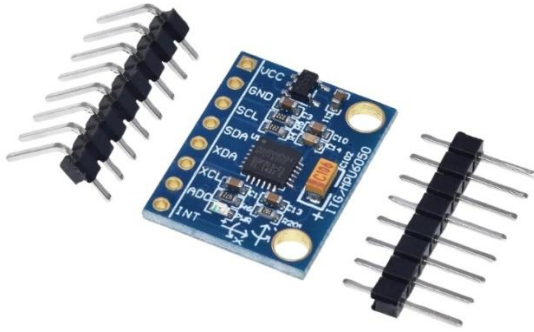


Fonte: Heltec Automation Technology Co., Ltd.

2. Acelerômetro e Giroscópio 3 Eixos MPU-6050 GY-521 (Figura 2): é um sensor de movimento que detecta a inclinação de um aparelho, mudança na interface e permite a

interação com aplicativos de acordo com os movimentos. Além de sua precisão, o sensor oferece faixas de medição ajustáveis tanto para aceleração quanto para giroscópio, permitindo uma personalização conforme a necessidade do projeto. A construção é compacta e leve, com dimensões de 21mm x 16mm x 1,2mm e peso de apenas 2g.

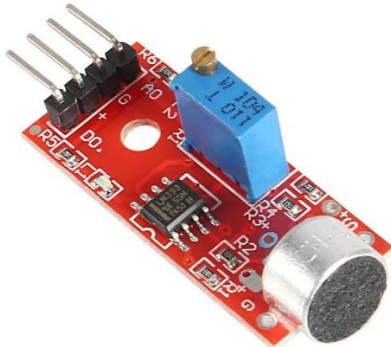
Figura 2 – Módulo MPU-6050 GY-521



Fonte: TDK InvenSense, Ltd.

3. Detector de Som/Ruído KY-037 (Figura 3): é um sensor que possui saída analógica e digital. O valor de saída digital poderá ser de nível lógico alto ou nível lógico baixo, ficando em nível lógico alto quando o som ambiente for maior que o valor analógico ajustado via *trimpot* e em nível lógico baixo quando o som ambiente estiver abaixo.

Figura 3 – Módulo sensor detector de som/ruído KY-037.



Fonte: JOY-IT, Ltd.

4. Baterias de lítio (Figura 4): é um componente de energia altamente eficiente e versátil, com uma tensão nominal de 3,7 volts (V) e uma capacidade de 2600 milliampere-hora (mAh). Este dispositivo produz corrente elétrica a partir de reações de oxirredução reversíveis, ou seja, que podem ser renovadas e continuar gerando energia.

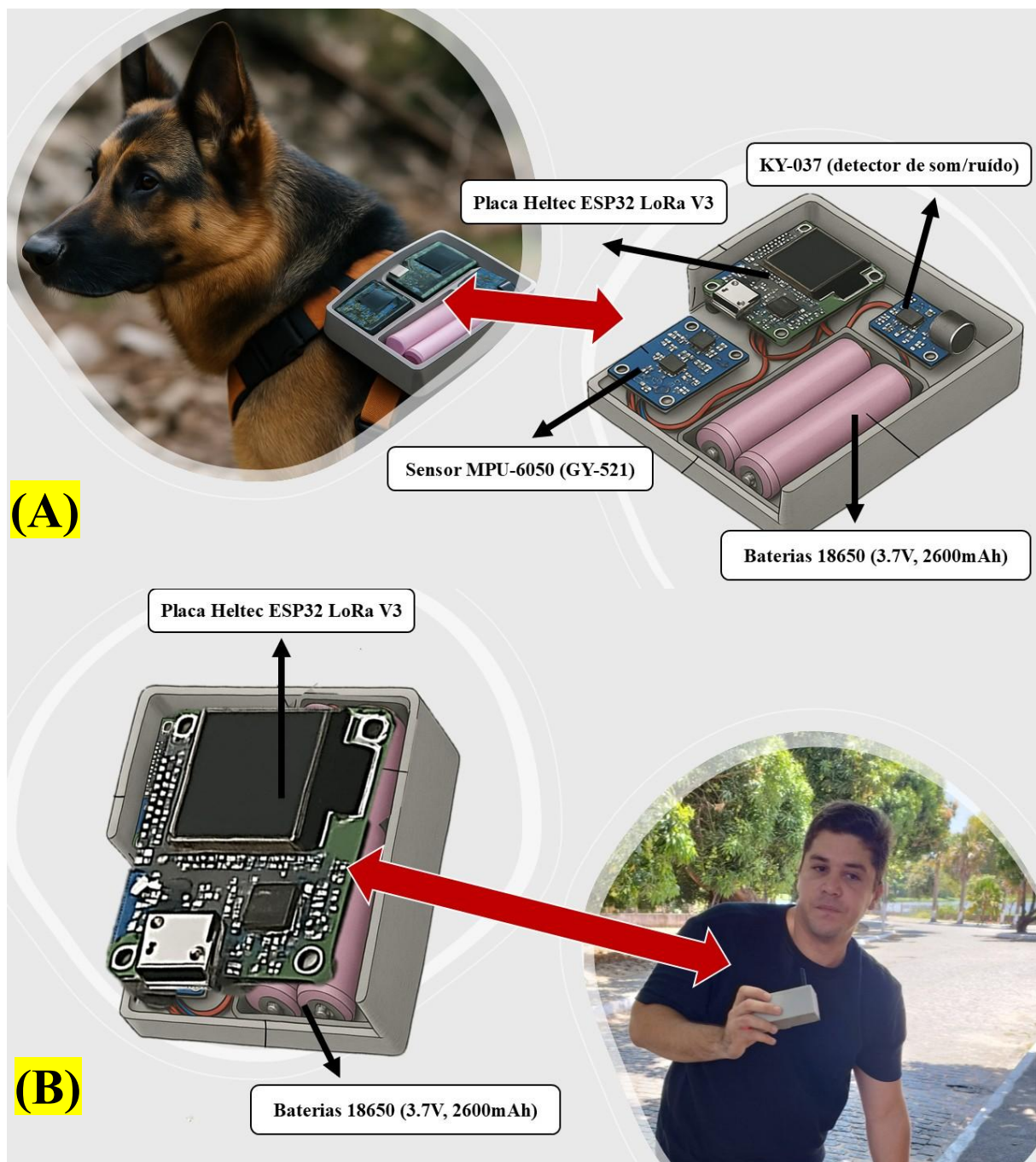
Figura 4 – Bateria Íon-Lítio 18650 - 3,7V x 2600mAh.



Fonte: Shenzhen Hondark Electronics Co., Ltd.

O módulo TX foi projetado para ser fixado ao peitoral do cão de busca (Figura 5A), sendo responsável pela coleta, interpretação e transmissão dos dados comportamentais para um módulo RX (Figura 5B), mantido sob posse do condutor, representados na Figura 5, abaixo:

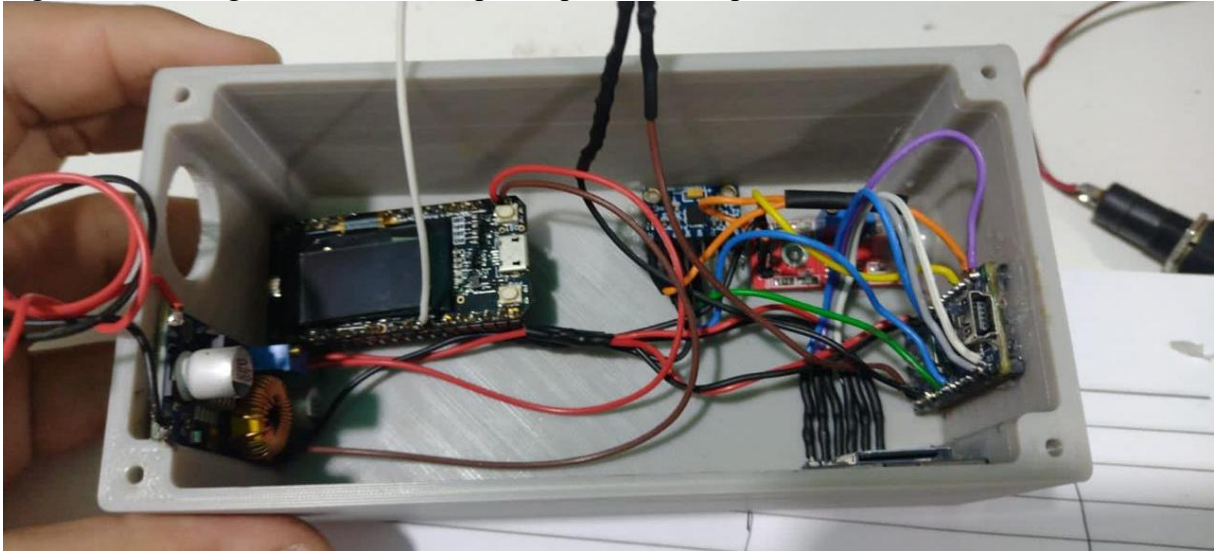
Figura 5 – Protótipo transmissor fixado no peitoral do cão (TX) e receptor (RX).



Fonte: o autor.

Após o desenvolvimento dos protótipos foram realizados testes de bancada, avaliando quanto a funcionalidade de cada componente individualmente e a integração entre eles. Foram realizados testes de conectividade e precisão dos sensores em ambiente controlado. Após a conexão dos sensores foi realizado a programação da placa ESP32 LoRa V3 com as principais funções (Figura 6).

Figura 6 – Montagem do circuito do protótipo fixado no peitoral do cão.



Fonte: o autor.

Em seguida, foram realizados testes de funcionamento do desenvolvimento do programa de computador e protótipo (Figura 7). O *firmware* do microcontrolador foi desenvolvido para gerenciar a leitura dos sensores, o processamento dos dados e a comunicação com o módulo de transmissão. O *software* para a interface do usuário foi desenvolvido para receber, visualizar e analisar os dados em tempo real. O *firmware* do microcontrolador foi elaborado especificamente para o presente estudo por meio de plataforma de desenvolvimento de *software* de código aberto (Ambiente de Desenvolvimento Integrado – IDE), disponível gratuitamente pela internet e usando a linguagem C++.

Figura 7 – Programação e teste de bancada do protótipo.



Fonte: o autor.

Após validação técnica em laboratório foram realizados estudos e projetos para o armazenamento do circuito e melhor forma de fixação no animal, correção dos padrões de direcionamento e velocidade do cão durante a movimentação, além disso, foram utilizados cães de busca induzindo latidos reais e ruídos ambientais para calibrar o limiar do potenciômetro no protótipo, e assim ser considerado apto para o teste de campo com os cães de busca e resgate (Figura 8).

Figura 8 – Teste no cão para padronização de movimento e transmissão de dados.



Fonte: o autor.

A arquitetura do módulo TX foi projetada sob os princípios da biomecânica aplicada, garantindo que o dispositivo não atue como um agente estressor ou restritor de movimentos. A acoplagem no peitoral é ajustável, permitindo a distribuição equitativa das forças de tensão, diferente de coleiras cervicais, o peitoral transfere o peso e os impactos para a estrutura torácica, protegendo a região da traqueia e as vértebras cervicais de traumas durante deslocamentos bruscos ou frenagens em terrenos acidentados.

A fixação do módulo ocorre no plano sagital mediano, especificamente sobre a cernelha (região dorsal entre as escápulas), ponto de menor oscilação vertical durante a locomoção, o que é imperativo para a estabilidade dos dados inerciais coletados pelo sensor MPU-6050. Sob a perspectiva da ergonomia funcional, o peitoral foi confeccionado com materiais sintéticos de alta tenacidade e revestimento interno em tecido. Este material promove maior ventilação e dissipação de calor, evitando o superaquecimento localizado da derme, que em climas tropicais poderia resultar em dermatites de contato ou desconforto térmico.

As fitas de ajuste possuem largura suficiente para distribuir a pressão superficial, evitando o estrangulamento de tecidos moles ou a interferência na amplitude de movimento da

articulação escápulo-umeral, mitigando o "efeito chicote" do módulo, que poderia gerar ruídos nos sensores e atrito mecânico excessivo contra o pelo do animal.

A integração do sistema de monitoramento no peitoral foi estrategicamente posicionada a para exposição do sensor KY-037, garantindo a fidelidade da captura acústica. O posicionamento do microfone do detector de som possibilita o sistema receber adequadamente a onda sonora do latido sem obstruções significativas pela estrutura têxtil do equipamento.

A caixa que abriga a eletrônica possui perfil aerodinâmico e baixo centro de gravidade, minimizando o momento de inércia durante saltos ou mudanças rápidas de direção. Essa configuração assegura que o sistema permaneça como uma extensão passiva do corpo do animal, permitindo que o cão de busca execute suas funções de varredura e detecção sem consciência da presença da instrumentação, garantindo assim a veracidade dos dados comportamentais coletados em tempo real.

O TX apresentou um peso de aproximadamente 170 gramas, o que representa aproximadamente 0,56% a 0,84% do peso corporal dos cães (20-30 kg), o que torna o protótipo extremamente seguro sob a perspectiva de carga. Os cães não devem carregar equipamentos que excedam 10% da massa corporal do animal, essa recomendação é baseada em estudos de cinemática e energética que identificam alterações significativas nos padrões de locomoção a partir desse limiar. O estudo de Lee *et al.* (2004), demonstrou que massas acima a 10% do peso do cão reduzem significativamente a velocidade de trote em superfícies planas, especialmente quando a carga é posicionada de forma mais cranial. Em decorrência dessas evidências, foram adotados o valor de 10% como a magnitude de carga padrão para induzir respostas biomecânicas mensuráveis sem comprometer a integridade física imediata do animal (Lee *et al.*, 2004; Kilbourne; Carrier, 2016; Charles *et al.*, 2025).

3.2 Funcionamento do sistema de monitoramento

O sistema é composto por módulos de aquisição de dados, um processador central e um sistema de transmissão (TX) para módulo de recepção dos dados (RX), culminando em uma interface de visualização intuitiva para o condutor. O coração da coleta de informações reside em dois sensores primários, cada um com uma função específica para capturar dados relevantes sobre o estado e o comportamento do cão:

O módulo MPU-6050 atuará como o sistema de percepção de movimento do módulo TX. Equipado com um acelerômetro e um giroscópio, ele é capaz de medir a aceleração linear e a velocidade angular do cão em três eixos. Essas medições são fundamentais para determinar

a movimentação do animal. Ao analisar os dados de aceleração, o módulo pode inferir se o cão está em repouso, caminhando de forma constante ou correndo em alta velocidade. As informações de rotação, por sua vez, complementam essa análise, permitindo uma compreensão mais completa da orientação e dos movimentos do cão no espaço. A combinação desses dados oferece uma visão dinâmica do comportamento do animal, essencial para contextualizar outras informações coletadas pelo sistema durante a operação de busca.

Os dados de aceleração e rotação podem ser suscetíveis a ruídos e flutuações, especialmente em ambientes dinâmicos como os de uma operação de busca e resgate. Para mitigar esse problema e garantir a precisão das informações de movimento, o ESP32 emprega um Filtro de Kalman. Este algoritmo avançado de estimativa é capaz de combinar as medições ruidosas dos sensores com um modelo preditivo do movimento do cão, resultando em uma estimativa mais precisa e suavizada da posição, velocidade e orientação do animal. A aplicação do filtro é fundamental para diferenciar movimentos intencionais de pequenas vibrações ou interferências, proporcionando uma interpretação mais confiável do comportamento do cão.

O módulo KY-037 é o componente responsável por identificar a vocalização do cão, especificamente os latidos. Este sensor de som opera de forma binária, fornecendo um sinal digital de alta ou baixa intensidade. Quando um latido é detectado, o sensor gera um sinal de alta intensidade, indicando a presença de som acima de um determinado limiar. A simplicidade de sua operação permite uma detecção rápida e eficiente, que é crucial em situações de busca e resgate, onde a vocalização do cão pode ser um indicativo direto da localização de uma vítima. A capacidade de registrar esses eventos sonoros adiciona uma camada vital de informação ao monitoramento.

A detecção de latidos, embora eficiente, pode ser suscetível a falsos positivos, como ruídos ambientais ou outros sons que não são latidos do cão. Para contornar essa questão, o ESP32 implementa um sistema de temporização de latidos. Este mecanismo analisa a duração e a frequência dos sinais de alta intensidade recebidos do sensor de som, distinguindo padrões de latidos reais de ruídos esporádicos. O sistema foi configurado para considerar um latido válido apenas se o sinal de alta intensidade persistir por um determinado período ou se uma sequência ocorrer em um intervalo específico (2 segundos). Essa temporização inteligente aumenta significativamente a confiabilidade da detecção de latidos, garantindo que apenas as vocalizações relevantes do cão sejam consideradas e transmitidas.

O módulo TX envia pacotes de dados contendo informações sobre o comportamento do cão a cada dois segundos. Essa cadência regular assegura que o condutor tenha acesso a informações atualizadas sobre a atividade do animal, mesmo em momentos de menor

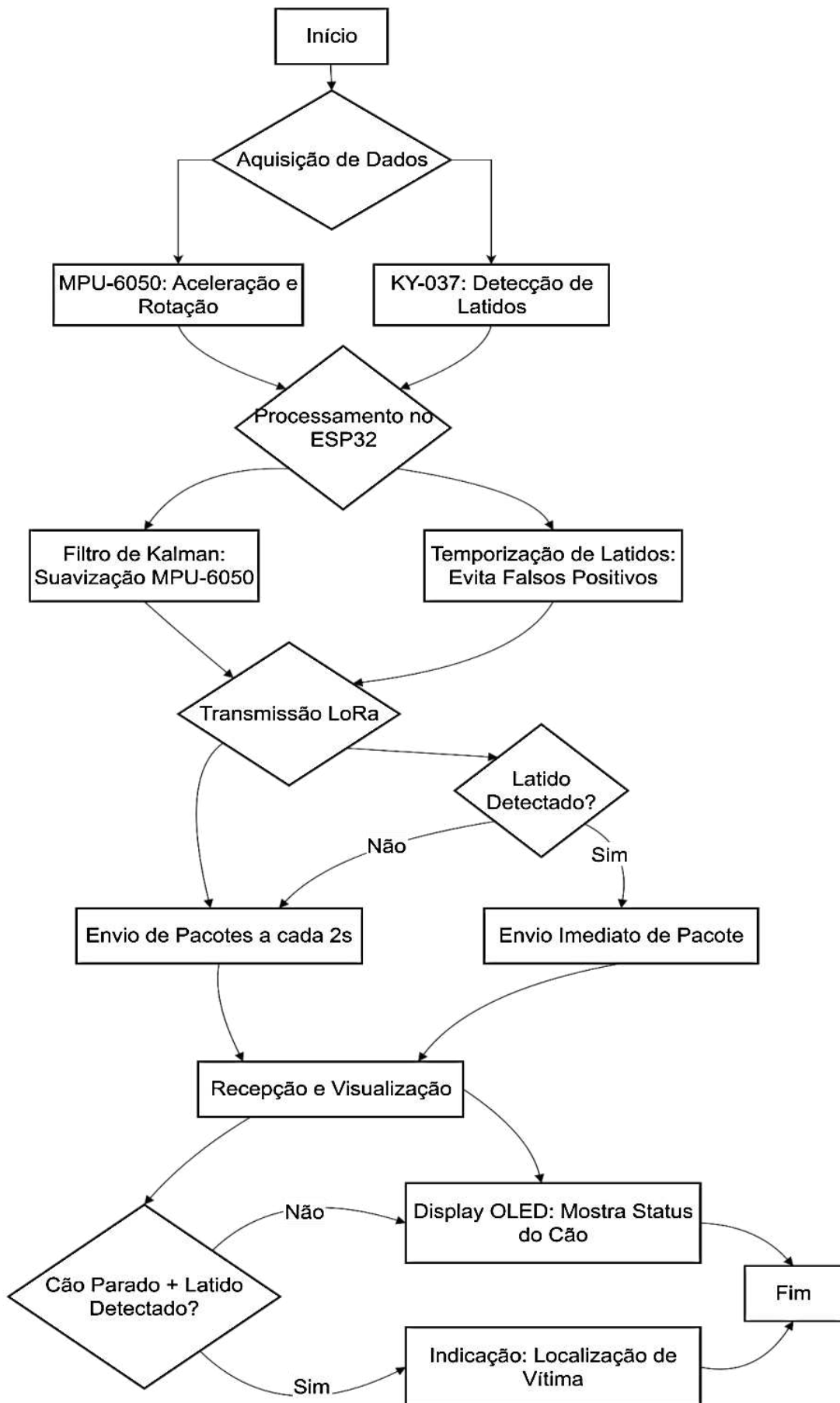
intensidade na busca. A frequência de dois segundos oferece um equilíbrio entre a atualização dos dados e a otimização do consumo de energia, prolongando a vida útil da bateria. Em situações críticas, como a detecção de latidos, a transmissão de dados é acionada imediatamente, independentemente do intervalo periódico. Essa funcionalidade é vital, pois um latido pode indicar que o cão localizou uma vítima. A priorização da transmissão de latidos garante que o condutor seja alertado rapidamente, permitindo uma resposta eficiente e coordenada da equipe de resgate. Essa capacidade de resposta em tempo real é fundamental para o desenvolvimento da pesquisa.

Na outra ponta do sistema, o condutor recebe os dados transmitidos pelo módulo fixado no cão e os visualiza através de um display OLED do módulo RX. Esta interface foi projetada para ser clara e concisa, fornecendo informações essenciais de forma imediata. A tela mostra informações descritivas que resumem os comportamentos detectados. Por exemplo, o display pode indicar:

1. Repouso: indicando que o cão está parado e sem latir.
2. Busca Ativa: indicando que o cão está em movimento e sem latir.
3. Encontrou: indicando que o cão está parado e latindo.

A combinação de informações é o diferencial do sistema de monitoramento dentro do cenário de busca, utilizando as informações detectadas pelos sensores MPU-6050 (movimentação) e KY-037 (indicação ativa). A mensagem “Encontrou”, é um alerta crítico para o condutor. Ela sugere fortemente que o cão encontrou algo de interesse e está vocalizando para indicar sua descoberta, o que na maioria dos casos, em um cenário de busca e resgate, significa a localização de uma vítima. Essa funcionalidade integrada permite que o condutor tome decisão rapidamente a situação e direcione a equipe de resgate para o local, otimizando o tempo de resposta e aumentando as chances de sucesso na operação de salvamento. Abaixo temos um diagrama que sintetiza o funcionamento do sistema (Figura 9):

Figura 9 – Diagrama de funcionamento padrão do sistema de monitoramento



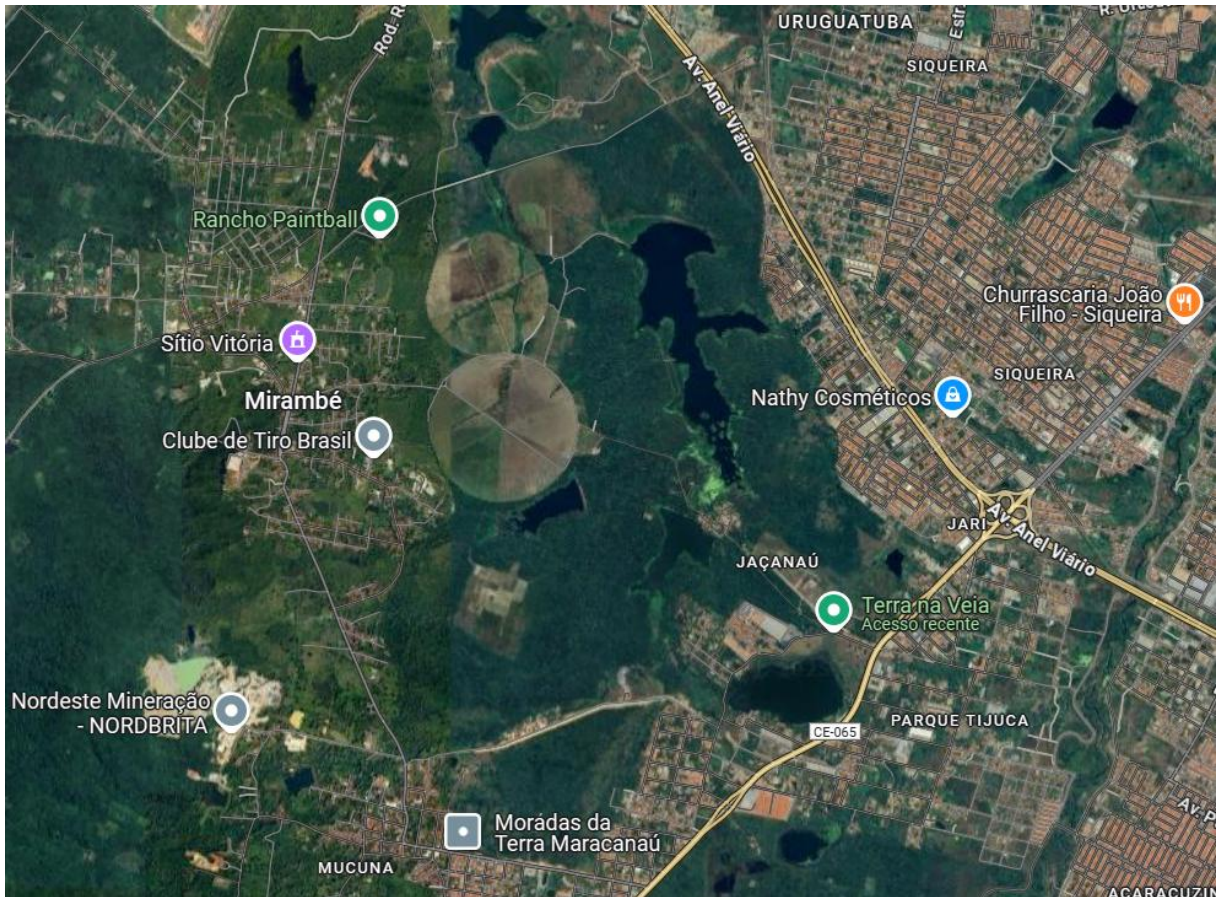
3.3 Animais e local experimental

Os testes foram conduzidos em colaboração com equipes de busca e resgate e cães da Companhia de Busca com Cães (CBCÃES), garantindo a relevância e a aplicabilidade dos resultados. A companhia está sediada em Fortaleza/CE, integrando a estrutura do Batalhão de Busca e Salvamento (BBS), unidade referência em atividades especializadas como salvamento terrestre, aquático, em altura e operações com cães. Os cães passam por treinamento específico nas técnicas de busca por odor específico, busca de varredura e detecção de cadáveres. A unidade mantém planos de instrução contínuos, com base em protocolos internacionais, como os da International Rescue Dog Organisation (IRO) e INSARAG/ONU. Os bombeiros condutores são capacitados em cinotecnia, comportamento animal e participam de certificações estaduais e nacionais, com avaliação de desempenho técnico dos cães em diferentes ambientes e condições.

Utilizou-se três machos e três fêmeas, totalizando 6 cães (n=6) clinicamente saudáveis, pesando entre 20 e 30 kg, e com idade de 3 a 6 anos. Os animais eram da raça Labrador Retriever, Pastor Belga Malinois, Pastor Alemão e Border Collie. Todos com experiência operativa prévia em busca e resgate, de forma a garantir que os comportamentos exibidos fossem representativos de uma operação real.

As avaliações ocorreram em áreas rurais, ambientes em que as equipes de busca costumam atuar em operações reais. A área escolhida para realização dos testes de campo está localizada entre o distrito de Mirambé, do município de Caucaia, na Região Metropolitana de Fortaleza, e o bairro Jaçanaú, do município de Maracanaú, no estado do Ceará, no Brasil (Figura 10). O local é rotineiramente utilizado para realização de treinamento dos cães e da equipe de busca da CBCÃES, com acesso para rodovias estaduais, mas com grandes áreas florestais preservadas, com vegetação densa, áreas de plantio e vegetação nativa rasteira, ideal para simular condições reais de operação, combinando elementos urbanos e naturais típicos da região. Delimitou-se uma área de 500m x 500m, caracterizada por uma zona mista, com vegetação densa e rasteira característica do semiárido e uma zona aberta plana e desobstruída. Essa configuração permite testar o sistema de monitoramento plenamente, garantindo que os resultados sejam representativos e reprodutíveis.

Figura 10 – Local experimental dos testes de campo



Fonte: Adaptado Google Maps.

O protocolo experimental definiu três classes de eventos comportamentais (Repouso, Busca Ativa e Encontrou), com rotulação dos dados assegurada mediante observação direta, permitindo uma comparação fidedigna entre a resposta do sistema e o comportamento real do animal. A metodologia foi estruturada para gerar uma base de dados balanceada, permitindo que o modelo de aprendizado de máquina (árvore de decisão) fosse treinado com igual exposição a todos os eventos comportamentais, mitigando assim o viés amostral.

3.4 Coleta de dados

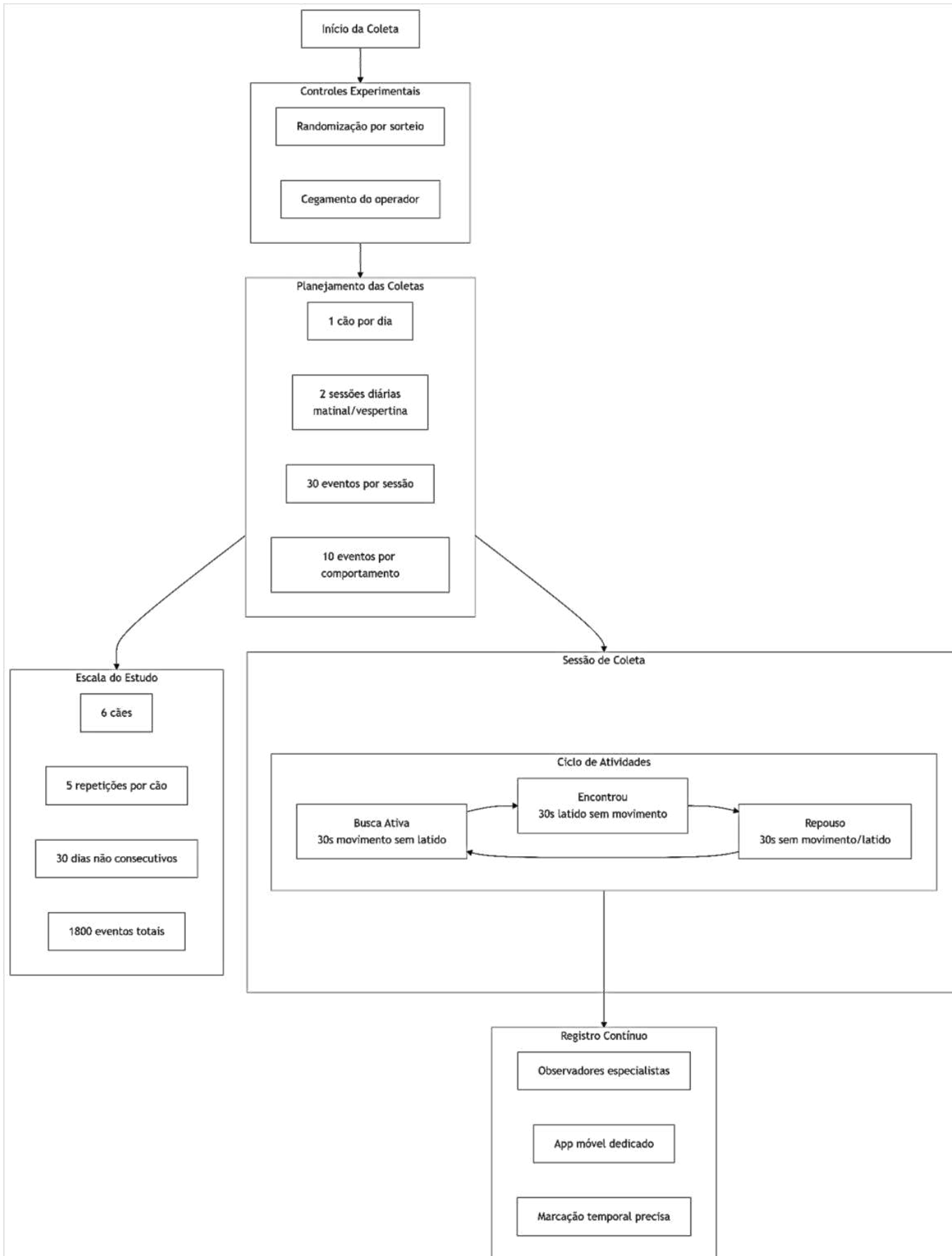
Em todas as coletas experimentais foram adotados controles de dados que visam garantir a confiabilidade e a reprodutibilidade dos dados obtidos durante a validação do protótipo. A randomização das condições experimentais foi conduzida por sorteio, a fim de evitar vieses relacionados à ordem de execução dos testes. Além disso, foi adotado o procedimento de cegamento, no qual o operador responsável pela análise dos dados no módulo receptor (RX) não terá conhecimento prévio sobre o comportamento real do cão, assegurando uma avaliação imparcial dos registros.

A aquisição dos dados ocorreu de acordo com disponibilidade da equipe de coleta e condutores. Apenas um cão foi avaliado por dia, e este animal realizou duas sessões de coleta (matinal e vespertina). Cada sessão teve duração aproximada entre 60 e 75 minutos, embora apenas 15 minutos foram dedicados efetivamente à coleta de dados. Cada um dos seis cães repetiram as coletas cinco vezes, totalizado cerca de 30 dias não consecutivos de coletas de campo. Essa estrutura foi planejada de modo a preservar a motivação dos cães e garantir o uso consistente de reforços positivos, evitando fadiga e mantendo a qualidade dos comportamentos observados, e garantindo o bem-estar do animal.

A amostras foram coletadas por ciclo de observação, que era composto pela execução dos eventos comportamentais, iniciando com o animal em repouso (aguardando comando/descanso), seguido do cão realizando procurando a vítima (busca ativa), finalizando o ciclo com a indicação do figurante pelo latido (indicação ativa). Durante a coleta os animais eram avaliados buscando equilibrar o esforço físico e permitir a recuperação dos cães entre os diferentes tipos de tarefa. Durante toda a coleta, os dados foram registrados por observadores humanos especialistas treinados, utilizando um aplicativo móvel dedicado, com anotações com marcação temporal precisa, garantindo a integridade do processo de treinamento supervisionado e da subsequente validação (Figura 11).

Cada amostra foi estruturada partir de uma janela de análise de 2 segundos, com cada evento comportamental padronizado em um período de 30 segundos. Dessa forma, cada evento comportamental gerou 15 amostras ($30 \div 2 = 15$). O cão repetia o ciclo 20 vezes por dia, divididos igualmente entre o turno da manhã e tarde. Foram utilizados 6 cães diferentes, com cada um repetindo 5 vezes a coleta. Os testes de campo resultaram e 9 mil amostras por evento comportamental ($15 \text{ amostras} \times 20 \text{ ciclos} \times 6 \text{ cães} \times 5 \text{ repetições} = 9.000$). Considerando os 3 eventos comportamentais avaliados, o total alcançado é de 27 mil amostras.

Figura 11 – Diagrama da coleta de dados da classificação de eventos comportamentais.



Fonte: o autor.

A avaliação da autonomia energética do sistema foi realizada em ensaios de bancada controlados e testes de campo. No teste de bancada, os módulos foram submetidos a um ciclo de descarga controlada sob estresse máximo (todos os sensores e processamento ativos) em ambiente com temperatura estabilizada, estabelecendo a linha de base de consumo. Subsequentemente, a validação em campo foi realizada durante simulações operacionais reais, expondo os módulos a variáveis ambientais não controladas e a um perfil de uso dinâmico, onde a frequência de acionamento dos algoritmos e da transmissão de dados variou conforme o comportamento do cão. Esta etapa visou identificar potenciais desvios no consumo energético induzidos por variáveis reais, como flutuações na demanda de processamento durante eventos de alta atividade (latidos intensos e movimentação simultânea) e variações de temperatura ambiente. Os dados obtidos permitiram calcular a autonomia média operacional do sistema em condições reais de desgaste.

A curva de descarga da bateria foi monitorada continuamente até que a tensão atingisse o limiar crítico de desligamento do módulo, estabelecendo assim a linha de base de duração máxima teórica. A coleta dos eventos foi realizada com o mesmo carregamento de bateria, sem recargas intermediárias. O horário exato de início da operação foi registrado, e a bateria foi utilizada continuamente ao longo da rotina de testes, assim, calculou-se o tempo total de funcionamento da bateria em condição de uso real.

3.5 Processamento e análise dos dados

A análise dos dados foi estruturada em duas etapas distintas e complementares: a validação dos algoritmos de reconhecimento dos eventos comportamentais e a avaliação da autonomia energética do sistema.

O processamento dos dados foi realizado em linguagem Python (v3.x), utilizando as bibliotecas Pandas (v1.x) para manipulação de dados e Scikit-learn (v1.x) para modelagem. A escolha deste algoritmo fundamentou-se na sua interpretação lógica e no baixo custo computacional para execução embarcada no microcontrolador ESP32. Para avaliar a capacidade de generalização do modelo e mitigar o viés de sobreajuste decorrente de características individuais dos animais, utilizou-se a estratégia de validação cruzada do tipo Leave-One-Subject-Out (LOSO). Neste protocolo, os dados foram particionados em seis subconjuntos correspondentes aos seis cães participantes ($k=6$). O processo de treinamento e teste foi iterativo: em cada rodada, o modelo foi treinado com os dados de cinco cães e testado exclusivamente com os dados do sexto cão (inédito para o modelo). Esta abordagem foi

utilizada para avaliar a capacidade de generalização do sistema frente à variabilidade inter-sujeito, simulando a aplicação da tecnologia em um "cão desconhecido" e evitando o vazamento de dados comum em validações aleatórias tradicionais.

A avaliação quantitativa baseou-se na construção de uma matriz de confusão, resultante da soma das previsões de todas as iterações do LOSO. A partir desta matriz, foram calculadas as métricas de acurácia global, precisão, sensibilidade e *F1-Score*. Além disso, realizou-se análise dos erros fora da diagonal principal da matriz de confusão para identificar sobreposições biomecânicas entre classes, especificamente investigando a incidência de falsos positivos e falsos negativos.

A quantificação do desempenho do classificador fundamentou-se na decomposição analítica da matriz de confusão, extraíndo-se indicadores que refletem diferentes dimensões da eficácia do sistema. A acurácia global representa a métrica mais abrangente de avaliação, definindo a proporção total de acertos do sistema em relação ao universo completo de amostras testadas. Matematicamente, ela é calculada pela razão entre a soma de todas as previsões corretas (a diagonal principal da matriz) e o número total de instâncias avaliadas. No contexto desta pesquisa, a acurácia serve como um termômetro holístico da capacidade do modelo em generalizar o aprendizado para os três comportamentos monitorados, indicando a probabilidade geral de o sistema realizar uma classificação correta em uma janela de tempo aleatória.

A sensibilidade assumiu um papel central na validação operacional do sistema de monitoramento, dada a natureza crítica das operações de busca e resgate, onde a omissão de um evento pode ter consequências fatais. Essa métrica mensura a capacidade do sistema em identificar corretamente todas as ocorrências de uma classe específica, sendo calculada pela razão entre os verdadeiros positivos e a soma de verdadeiros positivos com os falsos negativos.

Complementarmente à Sensibilidade, a métrica de precisão foi empregada para avaliar a confiabilidade e a "pureza" dos alertas gerados pelo sistema. Ela é definida pela razão entre os verdadeiros positivos e o total de previsões positivas (a soma de verdadeiros positivos e falsos positivos). Essa métrica atua como um filtro de qualidade, assegurando que os alertas transmitidos sejam acionáveis e fidedignos.

Para sintetizar o equilíbrio entre a capacidade de detecção (sensibilidade) e a confiabilidade do alerta (precisão), utilizou-se o *F1-Score*, esta calculada como a média harmônica entre a precisão e a sensibilidade, penalizando valores extremos onde uma das métricas é muito baixa em detrimento da outra. O *F1-Score* é particularmente valioso em sistemas de classificação complexos, pois oferece uma medida única de robustez, validando a estabilidade do classificador frente às nuances biomecânicas de cada comportamento.

Os resultados foram avaliados através de medidas de tendência central (média das iterações) e dispersão (desvio padrão), conferindo robustez estatística aos achados. Além disso, foram calculados os intervalos de confiança (IC) de 95% para a média de cada métrica. O cálculo do IC baseou-se na distribuição “t” de Student. Este procedimento estatístico permite afirmar, com 95% de confiança, a faixa de valores dentro da qual se encontra a verdadeira acurácia do sistema, mitigando a possibilidade de os resultados serem fruto de aleatoriedade amostral.

A análise da autonomia energética foi conduzida através de testes comparativos em dois cenários distintos: bancada e campo, com autonomia determinada pelo tempo decorrido até o sistema atingir a tensão de corte da bateria. A análise quantitativa da autonomia energética fundamentou-se em um modelo determinístico de descarga, correlacionando a capacidade nominal da fonte de energia com a demanda de corrente dinâmica do sistema. Para tratar estatisticamente a variação do consumo em função do comportamento do cão, adotou-se o método do consumo médio ponderado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação estatística do desempenho global do sistema demonstrou uma estabilidade e robustez (Tabela 2). A métrica de acurácia global, que sintetiza a eficácia do modelo sobre todo o espectro de testes, atingiu a marca de 98,7%. Sob uma ótica inferencial, este resultado apresenta um intervalo de confiança (IC) de 95% extremamente estreito, calculado em $\pm 0,13$ (variando entre 98,57% e 98,83%). Estatisticamente, isso indica uma precisão elevada na estimativa do desempenho; há 95% de probabilidade de que a verdadeira eficácia do sistema, caso fosse aplicado a uma população infinita de cães com características similares, permanecesse dentro desta margem restrita.

A estabilidade inter-sujeitos representada pelo desvio padrão (σ) baixo para a acurácia ($\pm 0,35$), o que evidencia que o sistema mantém um comportamento homogêneo e previsível, independente das variações individuais do cão monitorado. A sobreposição dos intervalos de confiança entre as três classes corrobora a conclusão de que não há disparidade estatística significativa na capacidade do modelo; o sistema é equilibrado, robusto e confiável em todo o espectro operacional avaliado.

Tabela 2. Métricas estatísticas dos eventos comportamentais.

Evento	Métrica	Média (\bar{x})	IC (95%)	Desvio Padrão (σ)
Global	Acurácia	98,70%	$\pm 0,13\%$	$\pm 0,35\%$
Repouso	Precisão	98,76%	$\pm 0,22\%$	$\pm 0,58\%$
	Sensibilidade	98,34%	$\pm 0,26\%$	$\pm 0,68\%$
	F1-Score	98,55%	$\pm 0,25\%$	$\pm 0,63\%$
Busca Ativa	Precisão	99,29%	$\pm 0,17\%$	$\pm 0,30\%$
	Sensibilidade	98,78%	$\pm 0,23\%$	$\pm 0,55\%$
	F1-Score	99,03%	$\pm 0,20\%$	$\pm 0,40\%$
Encontrou	Precisão	98,06%	$\pm 0,29\%$	$\pm 0,75\%$
	Sensibilidade	98,97%	$\pm 0,21\%$	$\pm 0,42\%$
	F1-Score	98,51%	$\pm 0,25\%$	$\pm 0,65\%$

Fonte: o autor.

As métricas de desempenho revelaram um sistema de classificação eficiente e equilibrado, com os três eventos comportamentais alcançando F1-Scores (a média harmônica entre precisão e sensibilidade) superiores a 98%, indicando que o modelo é preciso e robusto. O sistema de monitoramento de cães de busca e resgate classificou corretamente 26.650 das 27.000 amostras avaliadas, resultando numa acurácia global de 98,70%. A acurácia global

obtida (98,70%) supera os índices reportados por Li et al. (2021), que alcançaram 94,4% na detecção específica de comportamentos de farejamento. Além disso, o sistema de monitoramento proposto nesta tese demonstrou uma capacidade superior de generalização ao integrar múltiplos sensores para distinguir outros comportamentos, típicos de cães de busca. Portanto, o estudo segue uma tendência atual: a criação de sistemas que operem como uma extensão sensorial do animal, onde a precisão estatística se traduz diretamente em eficiência tática.

Este resultado, evidencia elevada capacidade de generalização do sistema e a eficácia dos sensores embarcados em capturar os padrões biomecânicos essenciais dos comportamentos alvos desse sistema de monitoramento, independentemente das variações individuais entre os seis sujeitos caninos, o que denota que o sistema não apenas aprendeu os padrões, mas foi capaz de generalizá-los com sucesso através da variabilidade individual dos 6 cães (Tabela 2).

Tabela 3. Medidas de desempenho do sistema de monitoramento.

Evento comportamental	Precisão	Sensibilidade	F1-Score
Repouso Silencioso	98,76%	98,34%	98,55%
Busca Ativa	99,29%	98,78%	99,03%
Vítima Localizada	98,06%	98,97%	98,51%

Fonte: o autor.

Os raros erros de classificação dos eventos comportamentais, que incluem tanto os falsos positivos quanto os falsos negativos, representaram apenas 1,30% do total de amostras testadas. Este resultado demonstra que o sistema de monitoramento é viável, e a assinatura sensorial e motora dos três comportamentos é suficientemente distinta para ser capturada pelos sensores e aprendida pelo modelo, independentemente das peculiaridades de cada animal.

A análise detalhada, no entanto, expõe nuances importantes sobre o funcionamento interno do modelo. O evento “Busca Ativa” apresentou o desempenho mais robusto do sistema, atingindo o F1-Score mais elevado (99,03%) e uma precisão de 99,29%. Este evento comportamental é caracterizado por movimentos contínuos e de alta variância (locomoção, movimentos de cabeça para farejar), que são facilmente discerníveis pelos sensores inerciais (acelerômetro e giroscópio) quando comparados aos outros dois estados, que são majoritariamente estáticos. Esse nível de precisão, sugere que o sistema quase nunca gera um “alarme falso” de busca, distinguindo com clareza quando o animal está, de fato, em repouso ou em estado de “Encontrou”.

A distinção biomecânica dos eventos, corrobora com os achados de outros estudos, os quais destacam que atividades de alta variância cinética, como a locomoção e o farejamento ativo, produzem assinaturas nos acelerômetros e giroscópios que são facilmente discerníveis de estados estáticos (Brugarolas *et al.*, 2013; Griffies *et al.*, 2018). Essa facilidade em separar "movimento" de "não-movimento" também é uma constante no trabalho de Amano e Ma (2021), onde a precisão na detecção de atividades dinâmicas foi significativamente superior à de posturas estáticas. Isso sugere que a assinatura biomecânica é uma das métricas mais confiáveis para a automação do monitoramento, superando sistemas multimodais mais complexos, como o proposto por Foster *et al.* (2022), que obteve métricas com resultados de 84% ao integrar sensores corporais e aéreos.

O evento comportamental “Encontrou”, que é operacionalmente a mais crítica, também apresentou eficiência. O sistema alcançou a maior sensibilidade de todas as classes (98,97%), indicando que ele é extremamente eficaz em não perder um evento de “Encontrou” real. Este resultado é importante, pois transcende a mera análise estatística de uma análise de dados em um sistema de monitoramento. No entanto, a análise crítica da classe "Encontrou" revela a complexidade intrínseca de discretizar comportamentos biológicos em janelas temporais curtas. Esta dicotomia entre sensibilidade e precisão em estados de imobilidade é um problema recorrente na literatura; Eerdeken *et al.* (2022) enfatizam que o desafio central reside na distinção entre posturas que compartilham assinaturas gravitacionais semelhantes. O uso de um sensor acústico no sistema de monitoramento para detectar latidos de supera as limitações de sistemas baseados exclusivamente em unidades de medida inercial, embora a ansiedade pré-operacional dos cães aponte para a necessidade de refinar a lógica contextual.

Em situações de busca por pessoas desaparecidas ou vítimas de desastres, a falha tem custo humano, a métrica mais importante não é a acurácia geral. Nesse contexto, o falso positivo (alertar “vítima” inexistente) ou o falso negativo (falhar em detectar uma vítima real), são inconvenientes que gera desgaste da equipe e perda de tempo que culminam numa falha operacional absoluta. O valor de 98,97% traduz-se diretamente no recurso mais escasso e precioso em uma operação de resgate: o tempo. Para a vítima soterrada ou perdida, a probabilidade de sobrevivência é ditada pela “janela de ouro”, cuja cada minuto economizado é crítico. Gordon (2018), ao analisar a atuação de cães nas buscas após o 11 de setembro, enfatiza o custo psicológico e operacional de falhas na localização de sobreviventes. Portanto, a mitigação de falsos negativos e a precisão na detecção de odores e eventos críticos é vital na detecção de restos mortais humanos, bem como, no treinamento de cães, garantindo a fidedignidade do trabalho canino em contextos forenses e humanitários (Dargan *et al.*, 2024).

A quase certeza (98,97%) de que o sistema não falhará em alertar o tutor no exato instante do “encontro” mitiga o risco devastador de uma equipe de resgate perder um sobrevivente. Para os familiares, este dado transcende a estatística; ele representa a confiança na operação. A angústia da espera é frequentemente agravada pela incerteza da eficácia das buscas. Um sistema com esta sensibilidade comprovada oferece uma garantia tangível de que as ferramentas tecnológicas associadas ao faro do cão, garantindo uma operação com fidelidade máxima ao esforço do cão, reduzindo a “dupla incerteza” (a incerteza do encontro e a incerteza da falha tecnológica).

Em uma seara de gestão de desastres, este resultado tem implicações diretas na alocação de recursos e na eficiência operacional. Operações de busca e resgate são logisticamente complexas, de alto risco para os socorristas e extremamente dispendiosas para o Estado ou agências humanitárias. Os gestores de crise necessitam tomar decisões sob pressão, baseadas em informações fidedignas. O sistema de monitoramento animal proposto transforma efetivamente o binômio (cão-homem) em um “sensor biotecnológico” com 98,97% de confiabilidade de reporte. Isso permite ao gestor alocar equipes com maior assertividade, otimizar a cobertura de área (evitando repetições) e, em última instância, prestar contas à sociedade (o contexto social mais amplo), demonstrando que o investimento em tecnologia de ponta está gerando eficiência e maximizando as chances de salvamento.

Este dado estatístico reflete ainda na validação de uma verdadeira simbiose homem-animal-tecnologia. A proposta não tenta, e não deve substituir a biologia superior do cão (seu olfato incomparável). Pelo contrário, o 98,97% de sensibilidade prova que o sistema é um tradutor e amplificador de alta fidelidade dessa biologia. Ele supera a limitação humana, que pode estar distante, em condições de baixa visibilidade (noite, fumaça, poeira), em terreno acidentado, ou simplesmente fatigado, sendo incapaz de perceber o “alerta” comportamental do cão. A tecnologia, portanto, atua como uma ponte digital robusta, capturando o evento biológico (o “encontro”) e transmitindo-o como um dado acionável e inequívoco, garantindo que a extraordinária capacidade do cão não seja perdida pela falibilidade da percepção humana.

No entanto, entre os resultados podemos observar que o evento comportamental “Encontrou” apresentou a menor precisão (98,06%) entre os três eventos. A causa provável para esta dicotomia (alta sensibilidade, menor precisão) está ligada à classe “Repouso”. O modelo parece ter sido implicitamente otimizado para, na dúvida entre um estado de imobilidade, tender a classificá-lo como “Encontrou”. Isso garante que o sistema raramente falhe em sua tarefa principal, mas ao custo de gerar um número ligeiramente maior de “alertas falsos” do que nas outras classes.

Este padrão é confirmado pela análise da classe “Repouso”, que apresentou o valor mais baixo de sensibilidade (98,34%) e um F1-Score (98,55%) ligeiramente inferior ao da “Busca Ativa”. O “Repouso” foi evento que mais apresentou amostras erroneamente para a classe “Encontrou”. O erro mais frequente do sistema foi classificar um “Repouso” real como um “Encontrou”. Em suma, o desafio central do modelo não é diferenciar movimento (“Busca Ativa”) de imobilidade, mas sim discernir com perfeição os diferentes tipos de imobilidade.

Para entender melhor os resultados, e tornar o entendimento mais visível, a Tabela 3 mostra a matriz global de eventos comportamentais, organizada de modo que as linhas representam as classes reais (eventos observados de fato durante a coleta de dados) e as colunas representam as classes previstas pelo sistema (eventos classificados automaticamente pelos sensores e algoritmos embarcados):

Tabela 4. Matriz global de eventos comportamentais do sistema de monitoramento.

		Evento previsto			
		Repouso	Busca Ativa	Encontrou	Total Real
Evento real	Repouso	8.851	33	116	9.000
	Busca Ativa	49	8.891	60	9.000
	Encontrou	62	30	8.908	9.000
Total previsto		8.962	8.954	9.084	27.000

Fonte: o autor.

A matriz de confusão revelou que os erros de classificação mais frequentes ocorreram na distinção entre os estados de “Repouso” e “Encontrou”, confirmando os resultados apresentados acima, sendo o erro absoluto mais frequente confundiu “Repouso” com “Encontrou” (116 amostras). Ainda assim, a taxa de falsos positivos foi inferior a 2%, o que não comprometeu a eficácia operacional do sistema de monitoramento.

Durante as coletas em campo, observou-se que cães de busca são altamente motivados para o trabalho, e quando fisicamente ancorados, aguardando o comando inicial para realizar a busca, tendem a exibir um comportamento híbrido caracterizado por restrição de deslocamento físico e intensa vocalização. Estes falsos positivos podem estar associados à ansiedade pré-operacional ou momentos de frustração antes do início da busca. Além disso, é um erro que pode ser facilmente corrigido na prática, pois o animal está próximo do condutor, sendo por ele controlado e supervisionado.

Nessas condições, os animais permanecem restritos ao movimento, o que os sensores inerciais interpretam corretamente como ausência de movimentação significativa de busca, enquanto o sensor acústico registrou altos níveis de decibéis devido aos latidos copiosos de excitação. O sistema, portanto, operou corretamente dentro de sua programação lógica,

cruzando dados de baixo movimento com alta vocalização. O erro, neste contexto específico, não deriva de uma falha de sensoriamento, mas sim de uma limitação contextual do modelo atual, que não diferencia a imobilidade tática (encontrar a vítima) da imobilidade restritiva (estar preso à guia antes da busca).

Em menor escala, observou-se casos em que o “Repouso” foi confundido com “Busca Ativa” (33 amostras). Estes erros pontuais podem ser atribuídos a movimentações não relacionadas à varredura, como o ato vigoroso de se coçar, sacudir-se para secar o pelo, ou ajustes bruscos de postura. Estas ações geram picos momentâneos de aceleração e rotação que, dentro de uma janela curta de análise de 2 segundos, podem superar os limiares de movimentação, levando o classificador a interpretar erroneamente o evento como início de movimentação tática de busca.

O desempenho no evento comportamental de “Busca Ativa” foi verificado uma alta eficácia. O modelo alcançou uma sensibilidade de 98,78% e a maior precisão (99,29%) entre todos os eventos. Esta alta precisão significa que, quando o sistema disse que o cão estava em “Busca Ativa”, ele estava correto em 99,29% das vezes, gerando um número baixíssimo de falsos positivos. Este resultado sugere que a “Busca Ativa” possui a assinatura biomecânica mais inconfundível, cujo sistema é capaz de diferenciar facilmente outros dois eventos, que são majoritariamente estáticos (“Repouso” e “Encontrou”). O modelo achou trivial a tarefa de separar “movimento” de “não-movimento”.

A análise dos erros associados ao evento comportamental de “Busca Ativa” revela desafios intrínsecos à modelagem computacional de comportamentos biológicos complexos. Os episódios em que a “Busca Ativa” foram confundidos com “Encontrou” (60 amostras) denotam situações de sobreposição comportamental transitória. Estes eventos geralmente ocorrem quando o cão vocaliza enquanto ainda está em movimento, seja por frustração em buscas, ansiedade, ou como um alerta preliminar de proximidade da vítima, ao detectar o cone de odor à distância antes de chegar à vítima. Além disso, durante uma vocalização, quando houver uma desaceleração momentânea para mudança de direção, o algoritmo pode interpretar a combinação de latido presente e ausência de movimento como evento comportamental “Encontrou”, gerando um alarme falso. Neste caso, podemos ainda considerar que o cão deve estar próximo da vítima, informação igualmente importante, cuja equipe de busca pode aumentar a atenção, e fazer uma busca minuciosa na área em que o animal demonstrou maior interesse e excitação.

As ocorrências em que a atividade de “Busca Ativa” foi erroneamente classificada como “Repouso Silencioso” (49 amostras) podem ser atribuídas a “pausas táticas” realizadas pelos

cães. Durante varreduras olfativas intensas, conhecidas operacionalmente como “ventilação”, o animal pode permanecer momentaneamente estático para processar partículas de odor no ar. Nessas breves janelas de 2 segundos, a ausência de deslocamento físico significativo leva os sensores inerciais a registrarem valores abaixo dos limiares de movimento, resultando em uma classificação técnica de repouso, embora o cão esteja cognitivamente em plena atividade de busca. Esses erros marginais não indicam falhas de sensoriamento, mas sim a complexidade de discretizar o comportamento animal contínuo em categorias dentro de janelas temporais curtas. Para aumentar ainda mais a precisão do sistema, a mitigação desses falsos positivos poderia ser alcançada implementando uma exigência de confirmação sequencial, onde o alerta “Encontrou” só é disparado se o estado persistir por múltiplas janelas consecutivas, filtrando assim vocalizações esporádicas durante a movimentação.

O achado mais crítico é o desempenho do sistema em identificar o evento comportamental de localização da vítima (“Encontrou”), que em termos operacionais, significa que o sistema foi capaz de detectar com sucesso 8.908 dos 9.000 eventos reais de localização da vítima nos testes independentes. Este é um indicador de altíssima confiabilidade, pois o número de eventos críticos perdidos (falsos negativos) foi de apenas 92 (1,03%). Complementarmente, a Precisão de 98,06% demonstra a fidedignidade do alerta; em 9.084 ocasiões que o sistema sinalizou um “Encontrou”, apenas 176 (1,94%) foram alarmes falsos (falsos positivos).

Em termos operacionais, isto significa que o sistema foi capaz de detectar corretamente aproximadamente 99% de todas as vezes que um cão de fato encontrou a vítima. Os 92 “erros” (falsos negativos) são o ponto de maior atenção: 62 foram confundidos com “Repouso” e 30 com “Busca Ativa”. A confusão com “Busca Ativa” (30 amostras) é mínima e compreensível (o cão pode ainda estar em movimento ao encontrar). A confusão com “Repouso” (62 amostras) é a falha operacional mais crítica, sugerindo situações limítrofes onde o animal, possivelmente devido à fadiga ou treinamento específico, realizou uma indicação da vítima (latidos) de baixa intensidade, com movimentação e vocalização insuficientes para superar os limiares de detecção padrão.

O monitoramento automatizado permite identificar precocemente sinais de fadiga ou ansiedade pré-operacional, o que é fundamental para a manutenção da eficiência dos cães. Assim, o sistema de monitoramento não apenas salva vítimas, mas preserva o ativo biológico mais valioso das equipes de resgate, garantindo que o cão opere dentro de seus limites fisiológicos, promovendo uma eficiência operacional que é, simultaneamente, tecnologicamente avançada e eticamente responsável. Nas operações de localização de vítimas

e logística humanitária, a disponibilidade de informações fidedignas em tempo real é o fator determinante para a alocação assertiva de recursos, reduzindo a incerteza em operações de busca e salvamento, conforme preconizado nas análises de tecnologias para gestão de crises no cenário brasileiro (Monteiro *et al.*, 2019; Nasar *et al.*, 2023).

Na avaliação em que o evento comportamental real é “Encontrou” classificada como “Busca Ativa” (30 amostras), este é um falso negativo crítico (o cão achou, mas o sistema não avisou). Observaram-se que alguns cães, ao localizar a vítima, mantêm uma movimentação intensa ao redor da vítima (circulando, pulando de excitação) enquanto late, em vez de ficar parado realizando a indicação ativa. O sensor acústico detecta o latido, mas os sensores inerciais continuam registrando alta aceleração e rotação devido à excitação do animal. A árvore de decisão prioriza o movimento e classifica como “Busca Ativa”. Cães de busca e resgate apresentam picos elevados de cortisol durante operações, refletindo um estado de estresse e excitação intensa. Conforme demonstrado por Diverio et al. (2016), missões de busca e resgate, mesmo que simuladas, induzem mudanças fisiológicas e comportamentais temporárias significativas, incluindo picos de cortisol e frequência cardíaca, que refletem um estado de alta prontidão e excitação. A ansiedade pré-operacional e os latidos observados em momentos de imobilidade física, é um reflexo direto desse estresse adrenérgico, sendo comportamentos muito comuns nas atividades de busca (Wojtaś; Karpiński; Zieliński, 2021). Portanto, o "erro" do sistema não é uma falha de engenharia, mas um reflexo fiel da complexidade neurofisiológica do animal em trabalho, o que sugere que futuros algoritmos devem incorporar variáveis de "estado emocional" para refinar a distinção entre alerta real e excitação.

Para avaliação da autonomia da bateria em regime de bancada em estresse máximo (sensores ativos), o sistema sustentou operação contínua por uma média de 4 horas e 37 minutos, até atingir a tensão crítica de desligamento. Na validação operacional em campo, onde variáveis ambientais como temperatura e demanda oscilante de processamento incidem sobre o sistema de monitoramento, observou-se uma autonomia média de 3 horas e 49 minutos.

Durante o teste de bancada (autonomia de 4 horas e 37 minutos), o sistema de monitoramento foi submetido a um ciclo de trabalho simulado, alternando entre ociosidade (63,7% do tempo) e processamento de “Busca Ativa” (36,3% do tempo), sem ativar o modo de alerta “Vítima Localizada”. Este resultado serve como a base de desempenho energético sob carga controlada (Tabela 4).

Tabela 5. Dados de autonomia de bateria do sistema de monitoramento.

Cenário de Teste	Distribuição Comportamental	Consumo Médio Ponderado (mA)	Autonomia Resultante (Horas)	Autonomia Resultante (hh:mm)
Teste de Bancada	63,7% Repouso 36,3% Busca Ativa 0% Encontrou	259,9	4,617	4h 37m
Teste de Campo	18,0% Repouso 73,0% Busca Ativa 9,0% Encontrou	314,4	3,817	3h 49m

Fonte: o autor.

No teste de campo, o perfil de uso foi alterado, refletindo uma operação real de busca. O protótipo permaneceu em “Repouso” por apenas 18% do tempo, esteve em “Busca Ativa” por 73% do tempo, e entrou em modo de “Encontrou” por 9% do tempo. O consumo médio ponderado para este cenário foi significativamente maior. Este consumo, substancialmente mais alto, drenou a bateria em 3,817 horas (3h 49m).

Os dados simulados demonstram uma queda de 17,3% na autonomia (de 4h 37m para 3h 49m) ao utilizar o sistema no campo. Este resultado pode sugerir que o aumento na atividade de processamento (execução constante da árvore de decisão), podem afetar o consumo. Os resultados indicam que, embora a acurácia do sistema seja alta, a otimização do consumo de energia é um ponto crítico para a viabilidade operacional do protótipo.

A fonte de energia do sistema é um dispositivo químico, com desempenho dependente da temperatura. Nas condições climáticas características da região Nordeste do Brasil, um dispositivo exposto ao sol direto pode facilmente ultrapassar 40°C ou 50°C. Embora o calor diminua a resistência interna (melhorando momentaneamente a entrega de corrente), pode acelerar a autodescarga da bateria, aumentar a corrente de fuga nos semicondutores, fazendo com que o *hardware* consuma mais energia para realizar as mesmas tarefas. Bem como, podem degradar permanentemente a vida útil da bateria, reduzindo a capacidade máxima de carga em ciclos futuros. Portanto, os resultados sugerem que a perda de autonomia a campo pode ter sido gerada por uma combinação da carga operacional e das condições ambientais submetidas. O desafio da autonomia, é um gargalo tecnológico comum em sistemas de alta taxa de amostragem, assim, novos estudos visando a transição para protocolos de comunicação mais eficientes e na gestão térmica do hardware em climas tropicais devem ser desenvolvidos, para otimizar a comunicação em áreas extensas sem comprometer excessivamente a bateria (Bravo-Arrabal *et al.*, 2022).

A análise dos dados de autonomia revela um ponto de vulnerabilidade do sistema: uma queda de desempenho energético de 17,3% ao transitar da bancada (4h 37m) para o campo (3h 49m). O perfil de uso em campo, onde o estado "Busca Ativa" é responsável por 73% do tempo operacional, é o dado mais relevante para a otimização. Ele demonstra que qualquer esforço de economia de energia focado nos modos ociosos ("Repouso", 18% do tempo) terá um impacto marginal. A viabilidade energética de longo prazo do sistema é, portanto, inteiramente dependente da otimização do consumo durante o processamento de alta intensidade.

O sistema de monitoramento, no seu estado atual, opera em estresse máximo (sem modos de sono) precisamente no estado em que mais passa o tempo, justificando a autonomia reduzida. Com base nestes resultados, as estratégias de melhoria devem priorizar a eficiência do estado dominante. A otimização de firmware pode ser primeira linha de intervenção, podendo utilizar de sono nos sensores durante o estado "Repouso". Contudo, o ganho mais substancial virá da otimização do loop de "Busca Ativa": deve-se avaliar a redução da frequência do uso do microcontrolador e a implementação de modos de economia de energia nos periféricos que possam reduzir o consumo médio sem comprometer a acurácia da classificação ou do rastreamento. O sistema de monitoramento para cães deve considerar não apenas a precisão algorítmica, mas a resiliência física do equipamento diante da alta variação cinética do animal (Valentin; Alcaidinho; Jackson, 2015).

A implementação de um invólucro modular com um sistema de troca rápida de bateria pode ser uma solução viável. Esta abordagem aceita a autonomia de aproximadamente 4 horas como uma característica de design (uma bateria = um turno), transferindo a responsabilidade da longevidade do protótipo para o protocolo operacional (a troca de bateria). Para mitigar o estresse ambiental (a queda de 17,3%), a arquitetura do invólucro poderia incorporar princípios de gestão térmica passiva, como o uso de cores claras (para refletir radiação solar) e isolamento térmico interno para proteger a bateria do calor gerado pelo processador. Relatórios operacionais como o do sistema Digger DTR (2019) reforçam que as condições de campo (calor, terreno e demanda de processamento) são variáveis determinantes que frequentemente reduzem a performance teórica estimada em laboratório.

Estes resultados sugerem boa viabilidade do sistema para intervenções táticas rápidas e varreduras preliminares. Contudo, para operações estendidas (turnos superiores a 4 horas), os dados indicam a necessidade operacional de substituição da fonte de energia em campo.

5. CONCLUSÃO

O monitoramento classificou corretamente a grande maioria das amostras (98,70% de acurácia global), atestando sua alta capacidade de generalização entre os múltiplos sujeitos caninos e confirmando a eficácia dos sensores em capturar os padrões biomecânicos. O principal resultado de confiabilidade foi a alta sensibilidade para o evento comportamental "Encontrou", indicando que o sistema é extremamente robusto em sua função operacional mais crítica: falhando em detectar um alerta real de vítima em apenas 1,03% das vezes. Embora os erros de classificação tenham sido mínimos (1,30% do total), a análise diagnóstica identificou que o desafio residual do modelo não é a distinção entre movimento, mas sim a diferenciação entre os estados de imobilidade, que constituiu a principal fonte de erros. O protótipo sustentou operação contínua por 4 horas e 37 minutos em testes de bancada sob estresse simulado. Na validação em campo, refletindo um perfil de uso operacional real (com 73% do tempo em "Busca Ativa"), observou-se uma autonomia média de 3 horas e 49 minutos. A queda de 17,3% na autonomia é atribuída à combinação da maior carga de processamento e transmissão exigida no ambiente real e ao impacto de variáveis ambientais, como a temperatura, no desempenho da fonte de energia.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, Sérgio Luiz Cruz. **Gerenciamento de crises: o terremoto no Haiti**. [S. l.]: Porto De Idéias, 2014.
- ALNUAIMI, Amer F.A.H.; ALBALDAWI, Tasnim H.K. An overview of machine learning classification techniques. **BIO Web of Conferences**, [s. l.], v. 97, p. 00133, 2024.
- ARNOLD, Solvi *et al.* An image recognition system aimed at search activities using cyber search and rescue dogs. **Journal of Field Robotics**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 677–695, 2019.
- BACHMANOV, Alexander A.; BEAUCHAMP, Gary K. Taste Receptor Genes. **Annual Review of Nutrition**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 389–414, 2007.
- BAKER, Janice *et al.* Body Temperature Responses During Phases of Work in Human Remains Detection Dogs Undergoing a Simulated Deployment. **Animals**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 673, 2020.
- BARBOSA FILHO, José Antonio Delfino; VIANA, Vinícius de Sena Sales. **Sistema de monitoramento comportamental para cães de busca e resgate**. Depositante: UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. BR 10 2026 001929 1. Concessão: 2026.
- BOZKURT, Alper *et al.* Toward Cyber-Enhanced Working Dogs for Search and Rescue. **IEEE Intelligent Systems**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 32–39, 2014.
- BRADSHAW, John W S. The Evolutionary Basis for the Feeding Behavior of Domestic Dogs (*Canis familiaris*) and Cats (*Felis catus*). **The Journal of Nutrition**, [s. l.], v. 136, n. 7, p. 1927S-1931S, 2006.
- BRÄUER, Juliane; MANN, Véronique; ERLACHER, Josepha. Eyes or nose: Domestic dogs (*Canis familiaris*) prefer vision over olfaction when searching for food. **Journal of Comparative Psychology**, [s. l.], 2025. Disponível em: <https://doi.apa.org/doi/10.1037/com0000415>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- BRAVO-ARRABAL, Juan *et al.* Realistic Deployment of Hybrid Wireless Sensor Networks Based on ZigBee and LoRa for Search and Rescue Applications. **IEEE Access**, [s. l.], v. 10, p. 64618–64637, 2022.
- BRUGAROLAS, Rita *et al.* Behavior recognition based on machine learning algorithms for a wireless canine machine interface. *In*: 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON BODY SENSOR NETWORKS (BSN), 2013, Cambridge, MA, USA. **2013 IEEE International Conference on Body Sensor Networks**. Cambridge, MA, USA: IEEE, 2013. p. 1–5. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6575505/>. Acesso em: 31 jan. 2026.
- BUCK, Linda; AXEL, Richard. A Novel Multigene Family May Encode Odorant Receptors: A Molecular Basis for Odor Recognition. **Cell**, [s. l.], v. 65, n. 1, p. 175–187, 1991.
- BYOSIERE, Sarah-Elizabeth *et al.* What do dogs (*Canis familiaris*) see? A review of vision in dogs and implications for cognition research. **Psychonomic Bulletin & Review**, [s. l.], v. 25, n. 5, p. 1798–1813, 2018.

CALVIN, Katherine *et al.* **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.: IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. [S. l.]: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 12 jul. 2025.

CBMDF. **Criação do serviço de Busca de Pessoas e cadáveres em geral com a utilização de cães adestrados do 1º BBS.** [S. l.]: CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL, 1998.

CHARLES, James P. *et al.* The biomechanics of working dog locomotion II: Loaded trotting. **Journal of Experimental Biology**, [s. l.], v. 228, n. 17, p. jeb250524, 2025.

CHAUDHARY, Muhammad T.; PIRACHA, Awais. Natural Disasters—Origins, Impacts, Management. **Encyclopedia**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 1101–1131, 2021.

CIELUSINSKY, Alan Delei. **A Regulamentação da atividade de Busca e Salvamento com Cães no Estado de Santa Catarina.** Florianópolis, 2021. Monografia.

CONTINI, Marcello Scarpel; MARTINS, Luiz Eduardo G. Development of a wearable device to provide electronic assistance to search and rescue dogs. **Research on Biomedical Engineering**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 265–280, 2024.

CRAVEN, Brent A.; PATERSON, Eric G.; SETTLES, Gary S. The fluid dynamics of canine olfaction: unique nasal airflow patterns as an explanation of macrosmia. **Journal of The Royal Society Interface**, [s. l.], v. 7, n. 47, p. 933–943, 2010.

DARGAN, Rushali *et al.* Using ethically sourced training aids for human remains detection dog training. **Forensic Chemistry**, [s. l.], v. 40, p. 100589, 2024.

DELFORGE, Damien *et al.* EM-DAT: the Emergency Events Database. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 124, p. 105509, 2025.

DICKINSON, Sally; FEUERBACHER, Erica N. Frustration and its impact on search and rescue canines. **Frontiers in Veterinary Science**, [s. l.], v. 12, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2025.1546412/full>. Acesso em: 7 jul. 2025.

DONATTI, Camila I. *et al.* Global hotspots of climate-related disasters. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 108, p. 104488, 2024.

DUNG, Tran *et al.* Applications and Advances in Bioelectronic Noses for Odour Sensing. **Sensors**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 103, 2018.

DYCE, K. M.; SACK, W. O.; WENSING, C. J. G. **Tratado de anatomia veterinária.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

EWERS, Jan-Hendrik; ANDERSON, David; THOMSON, Douglas. Deep reinforcement learning for time-critical wilderness search and rescue using drones. **Frontiers in Robotics and AI**, [s. l.], v. 11, 2025. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2024.1527095/full>. Acesso em: 12 jul. 2025.

FÉDÉRATION CYNOLOGIQUE INTERNATIONALE. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.fci.be/en/FCI-Rescue-Dogs-Commission-74.html>. Acesso em: 16 jul. 2025.

FERNANDEZ-LOZANO, J.J. *et al.* Integration of a Canine Agent in a Wireless Sensor Network for Information Gathering in Search and Rescue Missions. *In: 2018 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS), 2018, Madrid, Spain. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Madrid, Spain: IEEE, 2018. p. 5685–5690. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8593849/>. Acesso em: 12 jul. 2025.

FLETCHER, Neville H. **Acoustic Systems in Biology**. New York: Oxford University Press, Incorporated, 1992.

FÓRUM BRASILEIRO DE SEGURANÇA PÚBLICA. **Anuário Brasileiro de Segurança Pública: 2024**. [S. l.], 2024.

FRANTZ, Laurent A. F. *et al.* Genomic and archaeological evidence suggest a dual origin of domestic dogs. *Science*, [s. l.], v. 352, n. 6290, p. 1228–1231, 2016.

FREEDMAN, Adam H.; WAYNE, Robert K. Deciphering the Origin of Dogs: From Fossils to Genomes. *Annual Review of Animal Biosciences*, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 281–307, 2017.

FUMAGALLI, Ronaldo. **Cães de cadáver: Manual técnico para formação de cães especialistas em restos mortais**. Curitiba, SC: Camus, 2021.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ *et al.* Acidentes de trabalho que se tornam desastres: os casos dos rompimentos em barragens de mineração no Brasil. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 21–29, 2019.

GARDINER, A. The “Dangerous” Women of Animal Welfare: How British Veterinary Medicine Went to the Dogs. *Social History of Medicine*, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 466–487, 2014.

GERRITSEN, Resi. **K9 Search and Rescue: A Manual for Training the Natural Way**. 2nd eded. Edmonton: Brush Education, 2014.

GLAVAŠ, Vedrana; PINTAR, Andrea. Human Remains Detection Dogs as a New Prospecting Method in Archaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory*, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 1106–1124, 2019.

GORDON, L.E. The contribution of rescue dogs during natural disasters: -EN- -FR- La contribution des chiens de secours lors des catastrophes naturelles -ES- Aportación de los perros de rescate en las catástrofes naturales. *Revue Scientifique et Technique de l’OIE*, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 213–221, 2018.

GORLINSKIĀ, I. A.; BABUSHINA, E. S. Directionality of sound perception in the external ear of the dog. *Biofizika*, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 133–136, 1985.

GREATBATCH, Ian; GOSLING, Rebecca J.; ALLEN, Sophie. Quantifying Search Dog Effectiveness in a Terrestrial Search and Rescue Environment. **Wilderness & Environmental Medicine**, [s. l.], v. 26, n. 3, p. 327–334, 2015.

GRIFFIES, Joel D. *et al.* Wearable sensor shown to specifically quantify pruritic behaviors in dogs. **BMC Veterinary Research**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 124, 2018.

HEFFNER, Henry E. Auditory awareness. **Applied Animal Behaviour Science**, [s. l.], v. 57, n. 3–4, p. 259–268, 1998.

HEFFNER, Rickye S.; HEFFNER, Henry E. Visual factors in sound localization in mammals. **Journal of Comparative Neurology**, [s. l.], v. 317, n. 3, p. 219–232, 1992.

HELTON, William S. **Canine ergonomics: the science of working dogs**. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009.

HERBECK, Yury E. *et al.* Fear, love, and the origins of canid domestication: An oxytocin hypothesis. **Comprehensive Psychoneuroendocrinology**, [s. l.], v. 9, p. 100100, 2022.

HIBY, Elly *et al.* Impact Assessment of Free-Roaming Dog Population Management by CNVR in Greater Bangkok. **Animals**, [s. l.], v. 13, n. 11, p. 1726, 2023.

HIGH-FREQUENCY HEARING. *In*: HEFFNER, H.E.; HEFFNER, R.S. **The Senses: A Comprehensive Reference**. [S. l.]: Elsevier, 2008. p. 55–60. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123708809000049>. Acesso em: 7 jul. 2025.

HUNT, Melissa *et al.* Interactions between Handler Well-Being and Canine Health and Behavior in Search and Rescue Teams. **Anthrozoös**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 323–335, 2012.

HUSSAIN, Ali *et al.* Activity Detection for the Wellbeing of Dogs Using Wearable Sensors Based on Deep Learning. **IEEE Access**, [s. l.], v. 10, p. 53153–53163, 2022.

HWANG, Hochul *et al.* Towards Robotic Companions: Understanding Handler-Guide Dog Interactions for Informed Guide Dog Robot Design. *In*: CHI '24: CHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS, 2024, Honolulu HI USA. **Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. Honolulu HI USA: ACM, 2024. p. 1–20. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3613904.3642181>. Acesso em: 16 jul. 2025.

INSARAG. **DIRETRIZES INSARAG 2020**. Genebra: UN OCHA, 2020. v. II Disponível em: <https://insarag.org/methodology/insarag-guidelines/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

IRO. **International Search and Rescue Dog Organisation**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.iro-dogs.org/en/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

ISSEL-TARVER, Laurie; RINE, Jasper. The Evolution of Mammalian Olfactory Receptor Genes. **Genetics**, [s. l.], v. 145, n. 1, p. 185–195, 1997.

JIANG, Tammy; GRADUS, Jaimie L.; ROSELLINI, Anthony J. Supervised Machine Learning: A Brief Primer. **Behavior Therapy**, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 675–687, 2020.

JOHNSTON, Robert E. Pheromones, the Vomeronasal System, and Communication: From Hormonal Responses to Individual Recognition. **Annals of the New York Academy of Sciences**, [s. l.], v. 855, n. 1, p. 333–348, 1998.

JONES, Katherine E. *et al.* Search-and-rescue dogs: an overview for veterinarians. **Journal of the American Veterinary Medical Association**, [s. l.], v. 225, n. 6, p. 854–860, 2004.

KASNESIS, Panagiotis *et al.* Deep Learning Empowered Wearable-Based Behavior Recognition for Search and Rescue Dogs. **Sensors**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 993, 2022.

KEMP, C.M.; JACOBSON, S.G. Rhodopsin levels in the central retinas of normal miniature poodles and those with progressive rod-cone degeneration. **Experimental Eye Research**, [s. l.], v. 54, n. 6, p. 947–956, 1992.

KILBOURNE, Brandon M.; CARRIER, David R. Manipulated Changes in Limb Mass and Rotational Inertia in Trotting Dogs (*Canis lupus familiaris*) and Their Effect on Limb Kinematics. **Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology**, [s. l.], v. 325, n. 10, p. 665–674, 2016.

LARSON, Greger; FULLER, Dorian Q. The Evolution of Animal Domestication. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 115–136, 2014.

LAWRENCE, Darien *et al.* Hyperthyroidism associated with a thyroid adenoma in a dog. **Journal of the American Veterinary Medical Association**, [s. l.], v. 199, n. 1, p. 81–83, 1991.

LEE, David V. *et al.* Effects of mass distribution on the mechanics of level trotting in dogs. **Journal of Experimental Biology**, [s. l.], v. 207, n. 10, p. 1715–1728, 2004.

LEI Nº 11.259. [S. l.], 2005. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11259.htm. Acesso em: 14 jul. 2025.

LEI Nº 13.812. [S. l.], 2019. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/lei/113812.htm. Acesso em: 14 jul. 2025.

LEMISH, Michael G. **War Dogs: Canines in Combat**. Place of publication not identified: University of Nebraska Press, 2022.

LEVESQUE, A. The sense of taste in dogs and cats. **Point Veterinaire**, [s. l.], v. 28, p. 45–53, 1998.

LIVING WITH A DEAF DOG OR CAT. In: STRAIN, G. M. **Deafness in dogs and cats**. 1. ed. UK: CABI, 2011. p. 117–124. Disponível em: <http://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/9781845937645.0117>. Acesso em: 7 jul. 2025.

MALLAPRAGADA, P.K. *et al.* SemiBoost: Boosting for Semi-Supervised Learning. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, [s. l.], v. 31, n. 11, p. 2000–2014, 2009.

MARENGO, José A. *et al.* O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. **Estudos Avançados**, [s. l.], v. 38, n. 112, p. 203–228, 2024.

MARR, John N. Varying Stimulation and Imprinting in Dogs. **The Journal of Genetic Psychology**, [s. l.], v. 104, n. 2, p. 351–364, 1964.

MASSARI, Catia Helena De Almeida Lima; BARBOSA, Laleska; RESENDE, Henrique Ribeiro Alves De. O órgão de gustação dos cães domésticos (*Canis lupus familiaris* Linnaeus, 1758). **Pubvet**, [s. l.], v. 15, n. 03, p. e778, 2021.

MAZIN, Robin M; FORDYCE, Hilary H; OTTO, Cynthia M. Electrolyte Replacement in Urban Search and Rescue Dogs: A Field Study. **Veterinary Therapeutics**, [s. l.], v. 2, n. 2, 2001.

MILLER, Paul e.; MURPHY, Christopher J. Vision in dogs. **Journal of the American Veterinary Medical Association**, [s. l.], v. 207, p. 12, 1995.

MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA (org.). **Caderno temático de referência : fundamentos da busca de pessoas desaparecidas e investigação de desaparecimento de pessoas**. Brasília, DF: Ministério da Justiça e Segurança Pública, 2023.

MONTEIRO, Vera Lúcia *et al.* ESTUDO SOBRE O USO DE TECNOLOGIAS DA IOT ASSOCIADAS AOS CÃES EM OPERAÇÕES DE BUSCA E RESGATE. **CIMATech**, [s. l.], v. 1, n. 6, p. 373–384, 2019.

MORADI, Seyed Mobin *et al.* Risk analysis and safety assessment of hospitals against disasters: A systematic review. **Journal of Education and Health Promotion**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 412, 2021.

MOULTON, D. G. Spatial patterning of response to odors in the peripheral olfactory system. **Physiological Reviews**, [s. l.], v. 56, n. 3, p. 578–593, 1976.

NAEEM, Samreen *et al.* An Unsupervised Machine Learning Algorithms: Comprehensive Review. **International Journal of Computing and Digital Systems**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 911–921, 2023.

NASAR, Wajeelha *et al.* The Use of Decision Support in Search and Rescue: A Systematic Literature Review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 182, 2023.

NEI, Masatoshi; NIIMURA, Yoshihito; NOZAWA, Masafumi. The evolution of animal chemosensory receptor gene repertoires: roles of chance and necessity. **Nature Reviews Genetics**, [s. l.], v. 9, n. 12, p. 951–963, 2008.

NEITZ, Jay; GEIST, Timothy; JACOBS, Gerald H. Color vision in the dog. **Visual Neuroscience**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 119–125, 1989.

NUNES, Henrique José Schuelter; PARIZOTTO, Walter. CERTIFICAÇÃO DE CÃES DE BUSCA, RESGATE E SAIVAMENTO: AnÁLISE SOBRE A EFICÁCIA DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO ADOTADA PELO CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA. [s. l.], v. 9, n. 1, 2016.

OLLIVIER, F. J. *et al.* Comparative morphology of the tapetum lucidum (among selected species). **Veterinary Ophthalmology**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 11–22, 2004.

OTTO, Cynthia M. *et al.* Fifteen-year surveillance of pathological findings associated with death or euthanasia in search-and-rescue dogs deployed to the September 11, 2001, terrorist attack sites. **Journal of the American Veterinary Medical Association**, [s. l.], v. 257, n. 7, p. 734–743, 2020.

PARIZOTTO, Walter. **Parâmetros técnicos para a aprendizagem dos cães de busca, resgate e salvamento**. Florianópolis, 2013. Monografia.

PARK, Jae-Hyun *et al.* Short-Range Radar Sensor System Using Continuous Wave Signals. **The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 143–153, 2020.

PEICHLER, Leo. Topography of ganglion cells in the dog and wolf retina. **Journal of Comparative Neurology**, [s. l.], v. 324, n. 4, p. 603–620, 1992.

PIONNIER-CAPITAN, Maud *et al.* New evidence for Upper Palaeolithic small domestic dogs in South-Western Europe. **Journal of Archaeological Science**, [s. l.], v. 38, n. 9, p. 2123–2140, 2011.

PIZZATO, Diogo Almeida; DOMINGUES, José Luiz. **PALATABILIDADE DE ALIMENTOS PARA CÃES**. [s. l.], 2008.

RAJMOHAN, V; MOHANDAS, E. The limbic system. **Indian Journal of Psychiatry**, [s. l.], v. 49, n. 2, p. 132, 2007.

RANGE, Friederike; MARSHALL-PESCINI, Sarah. Comparing wolves and dogs: current status and implications for human ‘self-domestication’. **Trends in Cognitive Sciences**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 337–349, 2022.

REBMANN, Andrew; EDWARD, David. **CADAVER DOG HANDBOOK: forensic training and tactics for the recovery of human remains**. S.l.: CRC PRESS, 2021.

ROCHA, Rafael Sanches. **Rede ad hoc em desastres naturais: especificação e simulação de uma solução baseada em smartphones para localização das vítimas**. 2020. 186 f. - Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2020.

RUBEL, Edwin W.; POPPER, Arthur N.; FAY, Richard R. (org.). **Development of the Auditory System**. New York, NY: Springer New York, 1998-. ISSN 0947-2657. (Springer Handbook of Auditory Research). Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4612-2186-9>. Acesso em: 7 jul. 2025.

SANTARSIERO, G. *et al.* Performance of the healthcare facilities during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. **Bulletin of Earthquake Engineering**, [s. l.], v. 17, n. 10, p. 5701–5727, 2019.

SANTOS, Luiz Ricardo Dos. **A CONTRIBUIÇÃO DOS ANIMAIS NAS AÇÕES DE SEGURANÇA PÚBLICA: REFLEXÕES SOBRE AMPLIAÇÃO DE FORÇAS LABORAIS**. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [s. l.], v. 7, n. 12, p. 1353–1361, 2021.

SANTOS SILVA, Iane Thalia; DOS SANTOS FREITAS, Taís; LÚCIA MONTEIRO, Vera. ANÁLISE DE TECNOLOGIAS DA IOT PARA USO EM LOGÍSTICA HUMANITÁRIA E BUSCA E SALVAMENTO DE PESSOAS: UMA REVISÃO DA LITERATURA RECENTE. *In: V CONGRESS OF INDUSTRIAL MANAGEMENT AND AERONAUTICAL TECHNOLOGY - TECNOLOGIA PARA A REDUÇÃO DAS DESIGUALDADES*, 2019. (Adriana Da Silva Jacinto, Org.) **Anais do V**. [S. l.]: Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal - Fatec, 2019. p. 1–1. Disponível em: <https://publicacao.cimatech.com.br/index.php/cimatech/article/view/106/20>. Acesso em: 31 jan. 2026.

SARAVANAN, R.; SUJATHA, Pothula. A State of Art Techniques on Machine Learning Algorithms: A Perspective of Supervised Learning Approaches in Data Classification. *In: 2018 SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTING AND CONTROL SYSTEMS (ICICCS)*, 2018, Madurai, India. **2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)**. Madurai, India: IEEE, 2018. p. 945–949. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8663155/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

SCHOON, G.A.A.; DE BRUIN, J.C. The ability of dogs to recognize and cross-match human odours. **Forensic Science International**, [s. l.], v. 69, n. 2, p. 111–118, 1994.

SHEPHERD, G. M. Outline of a Theory of Olfactory Processing and its Relevance to Humans. **Chemical Senses**, [s. l.], v. 30, n. Supplement 1, p. i3–i5, 2005.

SHINDE, Pramila P.; SHAH, Seema. A Review of Machine Learning and Deep Learning Applications. *In: 2018 FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING COMMUNICATION CONTROL AND AUTOMATION (ICCUBEA)*, 2018, Pune, India. **2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA)**. Pune, India: IEEE, 2018. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8697857/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

SILVA, Eduardo Araújo da. **Operações aéreas especiais: drones, busca e salvamento e resposta a desastres**. São Paulo, SP: Editora Dialética, 2023.

SINGLETARY, Melissa; LAZAROWSKI, Lucia. Canine Special Senses. **Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice**, [s. l.], v. 51, n. 4, p. 839–858, 2021.

SINISCALCHI, Marcello *et al.* Are dogs red–green colour blind?. **Royal Society Open Science**, [s. l.], v. 4, n. 11, p. 170869, 2017.

SINN, David L.; GOSLING, Samuel D.; HILLIARD, Stewart. Personality and performance in military working dogs: Reliability and predictive validity of behavioral tests. **Applied Animal Behaviour Science**, [s. l.], v. 127, n. 1–2, p. 51–65, 2010.

SOKOLOWSKI, Katie; CORBIN, Joshua G. Wired for behaviors: from development to function of innate limbic system circuitry. **Frontiers in Molecular Neuroscience**, [s. l.], v. 5, 2012. Disponível em: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnmol.2012.00055/abstract>. Acesso em: 7 jul. 2025.

TANCREDI, Domenico; CARDINALI, Irene. Being a Dog: A Review of the Domestication Process. **Genes**, [s. l.], v. 14, n. 5, p. 992, 2023.

TANIGUCHI, Masanao *et al.* A Vital Sign Monitoring System Using a MEMS Microphone for Dog. *In: 2023 IEEE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANO/MICRO ENGINEERED AND MOLECULAR SYSTEMS (NEMS), 2023, Jeju Island, Korea, Republic of. 2023 IEEE 18th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS).* Jeju Island, Korea, Republic of: IEEE, 2023. p. 70–73. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10190878/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

THALMANN, O. *et al.* Complete Mitochondrial Genomes of Ancient Canids Suggest a European Origin of Domestic Dogs. **Science**, [s. l.], v. 342, n. 6160, p. 871–874, 2013.

THE ROLE OF DOGS IN SEARCH AND RESCUE. *In: KUMAR, Amit. Management of Animals in Disasters.* Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 177–188. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-981-16-9392-2_16. Acesso em: 7 jul. 2025.

THESEN, Aud; STEEN, Johan B.; DØVING, Kjell B. Behaviour of Dogs During Olfactory Tracking. **Journal of Experimental Biology**, [s. l.], v. 180, n. 1, p. 247–251, 1993.

THOMAS, Rincy N.; GUPTA, Roopam. A Survey on Machine Learning Approaches and Its Techniques. *In: 2020 IEEE INTERNATIONAL STUDENTS' CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS AND COMPUTER SCIENCE (SCEECS), 2020, Bhopal, India. 2020 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS).* Bhopal, India: IEEE, 2020. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9087123/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

TONOIKE, Akiko *et al.* Identification of genes associated with human-canine communication in canine evolution. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 12, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-11130-x>. Acesso em: 7 jul. 2025.

TRAN, James *et al.* Enhancing canine disaster search. *In: 2008 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM OF SYSTEMS ENGINEERING (SOSE), 2008, Monterey, CA, USA. 2008 IEEE International Conference on System of Systems Engineering.* Monterey, CA, USA: IEEE, 2008. p. 1–5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4724181/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

TRUT, L. N.; PLYUSNINA, I. Z.; OSKINA, I. N. An Experiment on Fox Domestication and Debatable Issues of Evolution of the Dog. **Russian Journal of Genetics**, [s. l.], v. 40, n. 6, p. 644–655, 2004.

VALENTIN, Giancarlo; ALCAIDINHO, Joelle; JACKSON, Melody Moore. The challenges of wearable computing for working dogs. *In: THE 2015 ACM INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE, 2015, Osaka, Japan. Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers - UbiComp '15.* Osaka, Japan: ACM Press, 2015. p. 1279–1284. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2800835.2807925>. Acesso em: 31 jan. 2026.

W SILVA RANGEL, Luciano; PARIZOTTO, Walter. POTENCIALIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS EQUIPES K-SAR ATRAVÉS DE PRÁTICAS NUTRICIONAIS E CONDICIONAMENTO FÍSICO CANINO: UMA ANÁLISE DA LITERATURA. **Revista FLAMMAE**, [s. l.], v. 7, n. 20, p. 123, 2021.

WALKER, Dianne Beidler *et al.* Naturalistic quantification of canine olfactory sensitivity. **Applied Animal Behaviour Science**, [s. l.], v. 97, n. 2–4, p. 241–254, 2006.

WANG, Guo-Dong *et al.* Out of southern East Asia: the natural history of domestic dogs across the world. **Cell Research**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 21–33, 2016.

WILLIAMS, Evan *et al.* A Smart Collar for Assessment of Activity Levels and Environmental Conditions for Guide Dogs. *In*: 2020 42ND ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY (EMBC) IN CONJUNCTION WITH THE 43RD ANNUAL CONFERENCE OF THE CANADIAN MEDICAL AND BIOLOGICAL ENGINEERING SOCIETY, 2020, Montreal, QC, Canada. **2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)**. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020. p. 4628–4631. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9175814/>. Acesso em: 27 jul. 2025.

WILLIS, Carolyn M *et al.* Olfactory detection of human bladder cancer by dogs: proof of principle study. **BMJ**, [s. l.], v. 329, n. 7468, p. 712, 2004.

WOJTAŚ, Justyna; KARPÍŃSKI, Mirosław; ZIELIŃSKI, Damian. Salivary cortisol levels in search and rescue (SAR) dogs under rescue examination conditions. **Journal of Veterinary Behavior**, [s. l.], v. 42, p. 11–15, 2021.