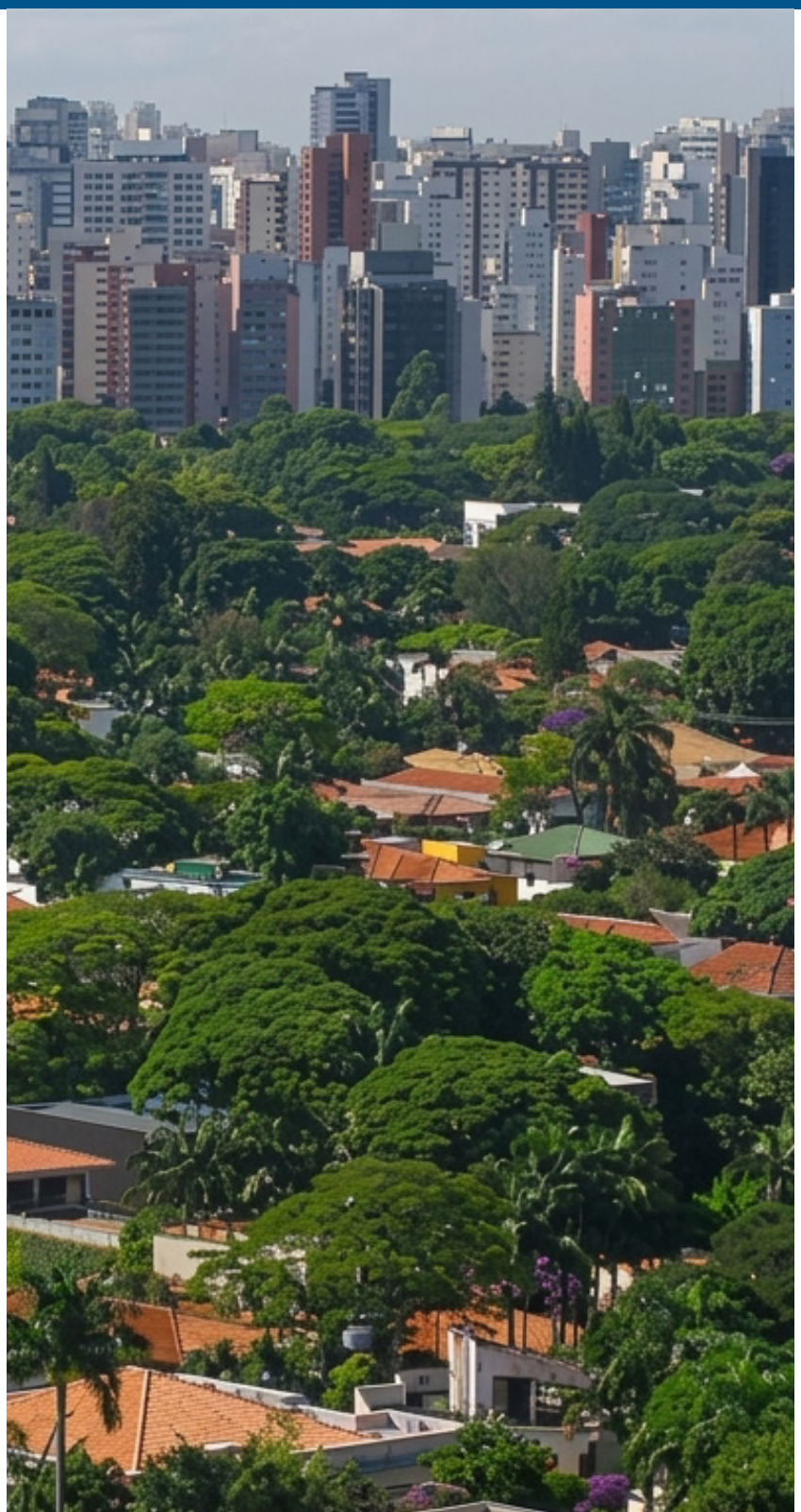
revista IPT
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

#31

v. 10, n. 31, out., 2026



FLORESTA URBANA
Aspectos da gestão e benefícios ambientais

COMPRIMIDOS REVESTIDOS
Melhor homogeneidade, solubilidade e desempenho do fármaco

SENSORES SEM FIO
Método de análise de dados identifica anomalias

ATERRAMENTOS ELÉTRICOS
Em perspectiva a evolução da norma ABNT NBR 7117

ipt INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS | ensino tecnológico

revista ipt
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

v.10, n.31, outubro, 2026
Quadrimestral

Editores-chefes
Eduardo Luiz Machado
Andreia Longuinho da Silva

Conselho Editorial
Eduardo Luiz Machado
Silas Derenzo

Assistentes Editoriais
Denis Martins Lemos
João Antonio Rodrigues Garcia

ISSN 2526-5830

ipt INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS | ensino tecnológico

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

Créditos técnicos

DIAGRAMAÇÃO E ARTE:
Laura Macellari

REVISÃO:
Eduardo Luiz Machado

sapiens.ipt.br
revista@ipt.br

Av. Prof. Almeida Prado, 532
Cidade Universitária - Butantã
05508-901 - São Paulo - SP

ISSN 2526-5830



na capa
Arte: Laura Macellari

revista IPT
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

#31

revistaIPT
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

SUMÁRIO

artigos técnicos

06 Gestão de floresta urbana: estudo de caso no campus do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, Brasil

Autores: Raquel Dias de Aguiar Moraes Amaral, Caroline Almeida Souza, Mariana Hortelani Carneseca, Ana Paula de Souza Silva, Ariadne do Nascimento

34 Desenvolvimento de formulação de comprimidos revestidos contendo acetato de noretisterona e estradiol pelo processo de granulação úmida em leito fluidizado tangencial

Autores: Celso Donizeti Vieira, Natalia Cristina Dalibera, Fagner Magalhaes Souza, José Luiz Aiello Ritto, Valker Araujo Feitosa, Natalia Neto Pereira Cerize

54 Identification of anomalies generated by sensors that use variants of the LEACH protocol

Autores: Haroldo da Silva Ferreira, Anderson Aparecido Alves da Silva, Kaique Almeida Justino da Silva, Adilson Eduardo Guelfi, José Ewerton da Cruz de Souza, Victor Orlando Toso de Oliveira Silveira

94 Uma análise da evolução da norma ABNT NBR 7117 para projeto de aterramentos elétricos do ponto de vista da geofísica

Autores: Vinícius Cardoso Monteiro de Souza, Otávio Coaracy Brasil Gandolfo

CONHECIMENTO E TRANSIÇÃO

O Brasil e o mundo passam por mudanças geopolíticas importantes. Guardadas as proporções, também é relevante para a comunidade de pesquisa esta 31ª edição da ´Revista IPT - Tecnologia e Inovação´ que chega às mãos dos leitores. Trata-se de um canal de excelência para compartilhar conhecimento científico e tecnológico de qualidade, fator indispensável nas transições. Confira a seguir os quatro artigos selecionados.

"Gestão de floresta urbana: estudo de caso no campus do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, Brasil" é o título do artigo que abre esta edição. São seus autores Raquel Dias de Aguiar Moraes Amaral, pesquisadora independente, autora principal e coordenadora deste trabalho; Caroline Almeida Souza, da Gerência de Risco Ambiental, Social e Governança do IPT; Mariana Hortelani Carneseca e Ariadne do Nascimento, do Laboratório de Avaliação Ambiental e Territorial na unidade Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente do IPT (Cima); e Ana Paula de Souza Silva, do Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética na unidade Energia do IPT (EN). O estudo relata as atividades e os resultados da gestão da floresta urbana do Instituto, visando apoiar seu gerenciamento e ampliar os benefícios ambientais, além de evidenciar o papel de áreas institucionais de acesso controlado e restrito na formação dessas florestas nas cidades.

O artigo "Desenvolvimento de formulação de comprimidos revestidos contendo acetato de noretisterona e estradiol pelo processo de granulação úmida em leito fluidizado tangencial", relata o desenvolvimento de comprimidos revestidos de liberação imediata contendo acetato de noretisterona (AN) e estradiol (ES), utilizando granulação úmida em leito fluidizado tangencial e copovidona, visando melhorar a homogeneidade, a solubilidade e o desempenho farmacotécnico. A autoria é de Celso Donizeti Vieira, do Mestrado Profissional em Processos Industriais do IPT e Biolab Sanus Farmacêutica; Natalia Cristina Dalibera, Insper Instituto de Ensino e Pesquisa; Fagner Magalhaes Souza e José Luiz Aiello Ritto, EMS; Valker Araujo Feitosa, Universidade de São Paulo; e Natalia Neto Pereira Cerize, docente do Mestrado Profissional do IPT em Processos Industriais.

Na sequência, artigo intitulado "Identification of anomalies generated by sensors that use variants of the LEACH protocol". Seus autores: Haroldo da Silva Ferreira, do Mestrado Profissional do IPT em Engenharia da Computação; Anderson Aparecido Alves da Silva, docente do Mestrado Profissional do IPT em Computação Aplicada, Tecnologia da Informação na Unip, Senac e Fiap e Engenharia de Sistemas Eletrônicos na USP; Kaique Almeida Justino da Silva, Mestrado Profissional do IPT em Computação Aplicada; Adilson Eduardo Guelfi e Victor Orlando Toso de Oliveira Silveira, Departamento de Ciência da Computação, Unoeste; José Ewerton da Cruz de Souza, Departamento de Ciência da Computação, UFRN. Os autores propõem um método de análise de dados de uma rede de sensores sem fio para detecção de anomalias.

"Uma análise da evolução da norma ABNT NBR 7117 para projeto de aterramentos elétricos do ponto de vista da geofísica" é o título do artigo que fecha esta edição. Nele apresenta-se uma análise das três diferentes versões da norma ABNT NBR 7117, publicadas em 1981, 2012 e 2020, avaliando suas principais diferenças no que diz respeito à aplicação de métodos geofísicos elétricos. Seus autores são: Vinícius Cardoso Monteiro de Souza, da empresa Brazilian RockHounds; e Otávio Coaracy Brasil Gandolfo, do Laboratório de Riscos, Investigações e Gestão Ambiental na unidade Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente do IPT (Cima).

Boa leitura!

Eduardo L. Machado

Eduardo Luiz Machado
Pesquisador do Ensino Tecnológico



Artigo Técnico

Gestão de floresta urbana: estudo de caso no campus do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, Brasil

Urban Forest Management: case study at the campus of the Institute for Technological Research - IPT, Brazil

Raquel Dias de Aguiar Moraes Amaral[a,b*], Caroline Almeida Souza[c], Mariana Hortelani Carneseca[d], Ana Paula de Souza Silva[e], Ariadne do Nascimento[d]

[a] Pesquisadora Independente, São Paulo - SP, Brasil.
[b] Autora principal e coordenadora do trabalho.
[c] Gerência de Risco Ambiental, Social e Governança, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo - SP, Brasil.
[d] Unidade de Negócios Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente, Laboratório de Avaliação Ambiental e Territorial, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo - SP, Brasil.
[e] Unidade de Negócios em Energia, Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo - SP, Brasil.

* e-mail: rdama4@gmail.com

Palavras-chave: benefício ambiental; infraestrutura verde; manejo; novo plantio; risco de queda.

Keywords: environmental benefit; green infrastructure; management; new planting; risk of falling.

Resumo

O estudo teve como objetivo relatar as atividades e os resultados da gestão da floresta urbana do IPT, visando apoiar seu gerenciamento e ampliar os benefícios ambientais, além de evidenciar o papel de áreas institucionais de acesso controlado e restrito na formação dessas florestas nas cidades. Foram realizados o inventário das árvores, a análise do risco de queda e a caracterização dos maciços arbóreos. Também foi aplicada uma pesquisa de opinião com a comunidade do IPT para avaliar a percepção sobre a floresta urbana. Definiram-se diretrizes para novos plantios, ações de manejo emergencial e intervenções nos maciços arbóreos. No total, foram analisadas 1.890 árvores, sendo 96% vigorosas. Das 532 avaliadas quanto ao risco de queda, 97% apresentaram risco baixo. O manejo resultou na remoção de 25 árvores. As intervenções nos maciços arbóreos incluíram a supressão de espécies exóticas invasoras e a substituição gradual dos eucaliptos. A pesquisa de percepção indicou que 99,5% dos participantes valorizam as árvores.

Abstract

The study aimed to report on the activities and results of IPT´s urban forest management, aiming to support its management and expand environmental benefits, in addition to highlighting the role of controlled and restricted-access institutional areas in the formation of these forests in cities. A tree inventory, a fall risk analysis, and characterization of the tree stands were conducted. An opinion survey was also conducted with the IPT community to assess perceptions of the urban forest. Guidelines were established for new plantings, emergency management actions, and interventions in the tree stands. A total of 1,890 trees were analyzed, 96% of which were vigorous. Of the 532 assessed for fall risk, 97% were at low risk. The management resulted in the removal of 25 trees. Interventions in the tree stands included the suppression of invasive alien species and the gradual replacement of eucalyptus. The perception survey indicated that 99.5% of participants value the trees.

1 Introdução

O planeta enfrenta grandes ameaças devido à interferência direta do ser humano na natureza, com inúmeras consequências, como desmatamento, perda de biodiversidade, superaquecimento global, entre outras, decorrentes da autodesignação do homem como dominador da natureza — a chamada era do Antropoceno (Planetary Health Alliance, 2022). Nas áreas urbanas, o avanço da urbanização exerce crescente pressão sobre os ecossistemas naturais, promovendo a perda e fragmentação de habitats, a redução da biodiversidade e alterações nos processos ecológicos, o que compromete a provisão de serviços ambientais e a qualidade ambiental das cidades (Wang *et al.*, 2024). A cobertura arbórea urbana contribui para a oferta de serviços ambientais relacionados à regulação climática, à melhoria da qualidade ambiental e à promoção da saúde (Woodward *et al.*, 2023); dessa forma, sua redução pode comprometer o bem-estar e a qualidade de vida da população.

Considerando que a maior parte da humanidade vive em cidades, e que essa tendência continuará, com grande parte do crescimento populacional ocorrendo em centros urbanos de economias em desenvolvimento, como São Paulo, torna-se urgente implementar ações que possibilitem uma vida mais saudável nas metrópoles (Universidade de São Paulo, 2021).

Define-se floresta urbana como o conjunto de árvores, formações florestais e demais recursos arbóreos presentes em áreas urbanas e periurbanas, públicas ou privadas, que, em interação com o ambiente construído, as instituições e a comunidade humana, constituem um sistema socioecológico responsável pela provisão de serviços ambientais e pela promoção da sustentabilidade e do bem-estar nas cidades (Vogt, 2024). A floresta urbana manifesta-se por meio de diferentes tipologias de vegetação distribuídas pela paisagem urbana, incluindo arborização viária, parques, praças, jardins, remanescentes florestais, áreas verdes institucionais e elementos de infraestrutura verde, como telhados e paredes verdes, que contribuem para a qualidade ambiental e a resiliência urbana (Vogt, 2024).

Diante dos benefícios oferecidos pela floresta urbana e da necessidade de o ser humano se reconectar com a natureza para enfrentar desafios ecológicos e de sustentabilidade, é evidente a importância de resgatar e garantir a natureza nas cidades. O reconhecimento, a conservação e o desenvolvimento da floresta urbana dependem de estratégias integradas de planejamento, gestão e governança, apoiadas pela atuação coordenada do poder público, instituições de pesquisa, universidades, organizações da sociedade civil e demais atores envolvidos na produção de conhecimento e na tomada de decisão, contribuindo para a conservação da biodiversidade e o fortalecimento da resiliência urbana (Konijnendijk *et al.*, 2021).

Segundo Cities4Forests (2019), algumas cidades desenvolvem planos de manejo florestal urbano para sintetizar visões, políticas e informações de diferentes órgãos governamentais, fornecendo histórico e contexto para as florestas urbanas. Esses planos podem delinear a visão de futuro, conter inventários das árvores urbanas e quantificar seus benefícios. Planos de manejo da floresta urbana devem integrar conhecimento técnico, objetivos estratégicos e mecanismos de governança capazes de orientar a tomada de decisão. Em geral, esses instrumentos são fundamentados em inventários e diagnósticos da vegetação urbana, estabelecem metas e ações prioritárias, definem responsabilidades entre os diferentes atores envolvidos e incorporam sistemas de monitoramento e avaliação contínua para apoiar uma gestão adaptativa e baseada em evidências (Konijnendijk *et al.*, 2021).

Melbourne, na Austrália, elaborou um plano estratégico para a floresta urbana diante das mudanças climáticas, visando aumentar a resiliência a seca, calor e eventos extremos. O plano integra instrumentos municipais e define seis estratégias, como elevar a cobertura do dossel a 40% e manter 90% das árvores em boas condições até 2040, com exames anuais de saúde para cada árvore (Cities4Forests, 2019).

No Brasil, Curitiba é considerada uma das cidades mais verdes da América Latina e, entre 2013 e 2016, plantou 139 mil árvores com base em conhecimento técnico, coordenação interdepartamental e planejamento criterioso (Curitiba City Hall, 2016). Para proteger as existentes, o Departamento de Produção de Plantas só autoriza remoções em casos de risco ou queda, exigindo o plantio de ao menos duas novas. Esse planejamento integrado consolidou as bases de uma floresta urbana saudável e funcional (Curitiba City Hall, 2016).

Entretanto, a maioria dos municípios brasileiros carece de informações básicas sobre sua floresta urbana, como número, espécies e localização das árvores (Hamamura, 2020), o que dificulta o manejo de podas e plantios (Amaral *et al.*, 2021). Nesse cenário, áreas institucionais de acesso controlado e restrito podem ser cruciais para manter e expandir as florestas urbanas e fornecer dados relevantes à gestão municipal.

Este trabalho apresenta os resultados das ações realizadas na floresta urbana do campus do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), com o objetivo de apoiar sua gestão e promover benefícios ambientais e o bem-estar dos funcionários. Busca-se contribuir para o avanço do conhecimento sobre gestão de florestas urbanas e seu impacto positivo na qualidade de vida dos cidadãos, destacando também a relevância das áreas institucionais de acesso controlado e restrito na composição da floresta urbana.

2 Procedimento metodológico

Caracterização da área de estudo

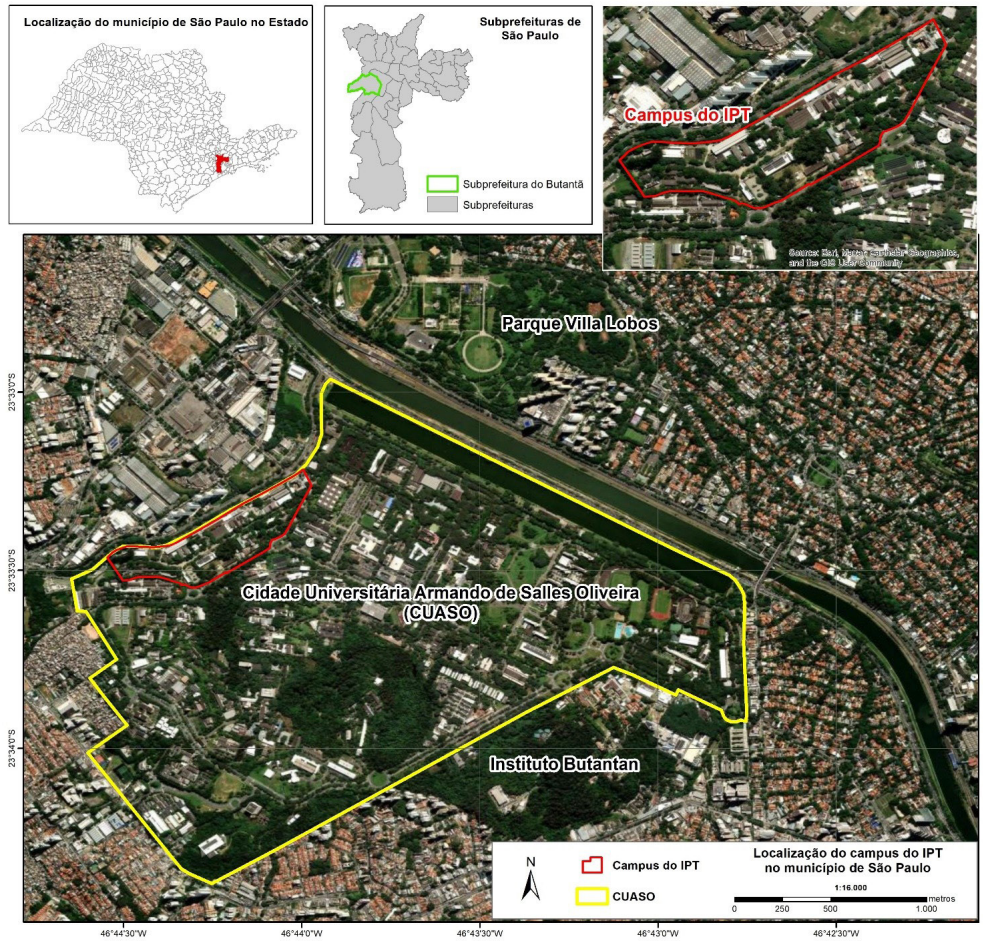
O estudo foi realizado no campus do IPT, localizado na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, na subprefeitura do Butantã, uma das 32 subprefeituras do município de São Paulo, Brasil (**Figura 1**), que representa 3,7% da área do município. A região é predominantemente residencial, com padrão médio e alto. Abriga importantes equipamentos públicos, institucionais e sociais.

Na **Figura 1**, destaca-se a expressiva área verde do IPT, classificada como vegetação significativa da cidade (Secretaria Estadual do Meio Ambiente, 1988), com 65.760 m , o que corresponde a 31% da área do campus.

A floresta urbana, com mais de 3 mil árvores em calçadas, bosques e entorno dos prédios, é monitorada desde 2018 para levantamento florístico, diagnóstico e análise de risco, visando uma floresta urbana segura e com todo o seu potencial de geração de benefícios ambientais.

Esses objetivos alinham-se às ações de responsabilidade socioambiental e governança do IPT, onde os dados do monitoramento da floresta urbana são utilizados para a elaboração de relatórios de sustentabilidade e atendimento aos indicadores da política institucional de responsabilidade socioambiental e governança, bem como aos princípios ambientais, sociais e de governança (ASG).

Figura 1. Localização do campus do IPT em relação à subprefeitura do Butantã, município de São Paulo, Estado de São Paulo, Brasil.

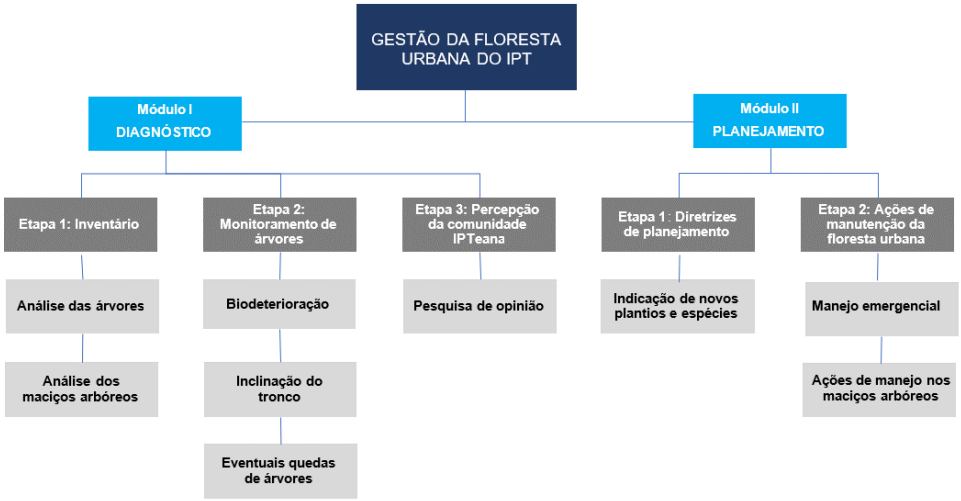


Fonte: Elaborado pelos autores

Etapas do trabalho

O fluxograma (**Figura 2**) indica os Módulos e Etapas que compreenderam as atividades realizadas para a gestão da floresta urbana do IPT, descritos na sequência, conforme adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (2020a) e Amaral *et al.* (2022).

Figura 2. Fluxograma da gestão da floresta urbana do IPT.



Fonte: Adaptado de Amaral *et al.* (2022)

No módulo I, a primeira etapa realizada foi o inventário, dividida em duas frentes principais de trabalho: a análise das árvores e a análise dos maciços arbóreos.

A análise das árvores refere-se ao diagnóstico dos exemplares arbóreos realizado a partir da Tecnologia IPT para inspeção de árvores, método estabelecido em patente (Amaral *et al.*, 2003), do sistema Arbio (Viríssimo *et al.*, 2013) para o cadastro das inspeções de análise externa, interna do fuste, e risco de queda para a ruptura no tronco, conforme Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019), Nível 2 e parte da Nível 3 no que se refere ao emprego de métodos e tecnologias avançadas da extensão ou da severidade das condições internas. A avaliação das árvores foi feita ao nível do solo, não sendo realizado qualquer trabalho em altura, segundo as definições da norma NR 35 - Trabalho em Altura (Ministério do Trabalho e Emprego, 2012). As árvores foram georreferenciadas e chapeadas no tronco para identificação e localização em mapa e as seguintes variáveis foram coletadas:

a. **Identificação botânica**: o levantamento florístico foi realizado ao nível taxonômico. Para alguns espécimes foi coletado material botânico (flor, fruto ou semente) com tesoura de poda manual. Os indivíduos arbóreos foram identificados ao nível de espécie e nome popular, com base na classificação de APG IV (Angiosperm Phylogeny Group IV). A identificação foi realizada por meio de uso de chaves taxonômicas e consultas bibliográficas para obtenção da densidade básica do lenho utilizada na análise de risco de queda de árvores. As espécies foram classificadas quanto à sua procedência em nativas ou exóticas;

b. **Dendrometria**: com auxílio de trena florestal e hipsômetro foram levantadas as seguintes características das árvores: altura total, altura da 1ª bifurcação, excentricidade e ângulo de inclinação do tronco aproximados, diâmetro à altura do peito (DAP) e diâmetro do colo (DC) quando a primeira bifurcação era inferior a 1,30 m;

c. **Estado geral**: para as raízes aparentes foi avaliada a ocorrência de dobra, ferida e barreira física. Na avaliação do tronco, observou-se a existência de múltiplos troncos, inclinação acentuada, casca inclusa, feridas, rachaduras e cavidade aparente, até a altura de dois metros. A avaliação do estado geral da copa consistiu na observação visual de epífitas e parasitas, desequilíbrio de copa, galhos secos ou com deterioração, toco de poda, ramos epicórmicos, podas inadequadas (em "V", drástica, lateral) e 1ª bifurcação com apodrecimento, ataque de insetos ou rachaduras. Foi verificada, ainda, a presença dos aspectos positivos de crescimento adaptado da árvore (biomecânica) para superar defeitos. A ocorrência das ações antrópicas, tais como anelamento;

d. **Condição externa geral**: esta análise visual, classificou os exemplares em árvore morta (sem fluxo de seiva); com declínio (apresentando sinais de doença, como casca solta) ou vigorosa (sem quaisquer sinais de doenças ou pragas).

e. **Condições de entorno**: os atributos analisados foram: interferências com a rede de energia elétrica aérea, caixa de inspeção, espécie arbórea, fachada de edificação, instalação subterrânea, mobiliário urbano e postes. Caso a árvore se encontrasse no sistema viário, informações da calçada e canteiro também foram coletados;

f. **Estado fitossanitário**: foi verificada a ocorrência de fungos apodrecedores, cupins xilófagos e brocas de madeira no sistema radicular, no tronco e copa, até a altura de dois metros. A presença dos fungos apodrecedores foi caracterizada pela observação de corpos de frutificação ou pelo ataque do lenho nas seguintes intensidades: superficial; moderado, quando atingia o alburno; ou intenso, quando progredia para o cerne. No caso dos cupins, sua identificação se baseou no hábito de nidificação, na ocorrência de estrutura de ninho, túneis, no ataque do lenho e na presença de resíduos e insetos vivos. A ocorrência de brocas de madeira foi observada pelo seu ataque no lenho ou pela presença do inseto. Quando presentes, os cupins e as brocas de madeira foram coletados com uma pinça e acondicionados em vidros com álcool a 70% e os corpos de frutificação dos fungos apodrecedores em sacos de papel. A identificação desses organismos foi realizada pela equipe do IPT.

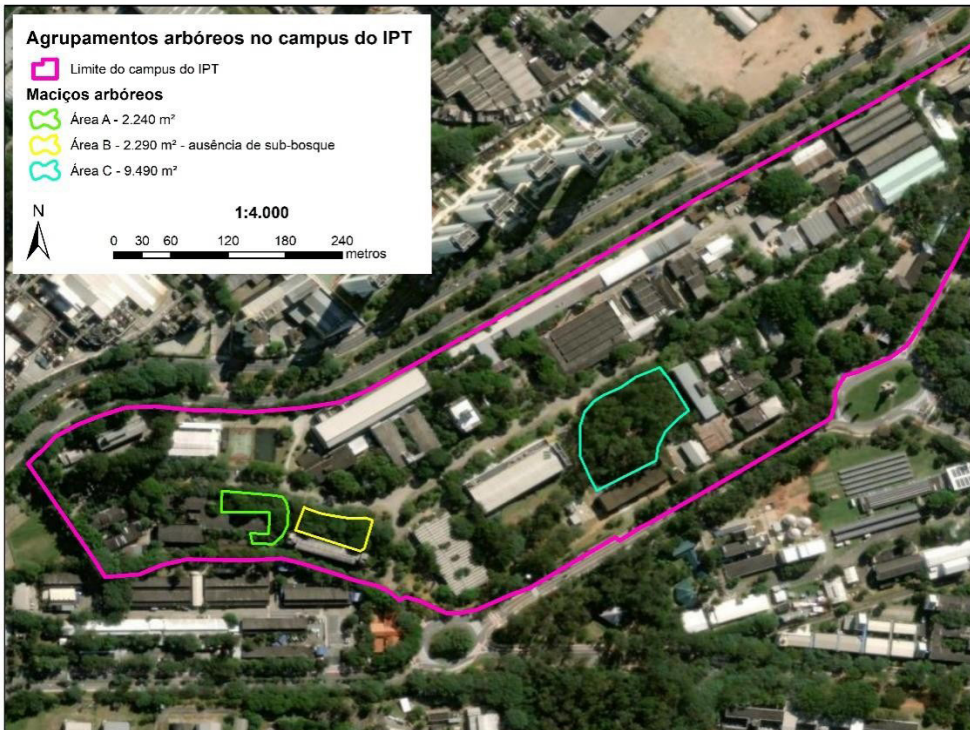
g. **Análise interna**: árvores vivas e com tronco único, foram analisadas internamente quanto à ocorrência de deterioração e quantificação do lenho sadio remanescente.

Esta análise foi feita por meio de prospecção não destrutiva, com auxílio de um aparelho tipo penetrógrafo, com uma broca de 1,5 mm de diâmetro. A análise com este equipamento baseia-se na informação de que, durante o processo de deterioração do lenho, ocorre a dimirea deteriorada aproximada em relação à área transversal do tronco, sendo estabelecidas as seguintes classes de deterioração: pequena, de 1,0 a 11,0%; média, de 11,1% a 44,0%; e grande, acima de 44,1%, conforme classificação proposta por Brazolin (2009).

h. **Análise do risco de queda**: realizada a partir das análises externa e interna do fuste, sendo restrita à possibilidade de ruptura das árvores no tronco, até a altura de dois metros. Para tal análise levaram-se em consideração as informações obtidas nas avaliações externas, relacionadas à condição biológica, estado geral e aspectos da biomecânica, e interna para categorização da árvore quanto ao seu risco de queda em: nível de alerta baixo, sem quaisquer defeitos significativos; ou nível de alerta alto, cujos defeitos representam risco iminente de ruptura no tronco. Para o risco de ruptura no tronco, até dois metros de altura, é utilizada a "regra do 1/3", ou seja, qualquer deterioração interna não pode exceder a 2/3 do raio, permanecendo, no mínimo, 1/3 do lenho sadio, a partir da superfície do tronco. Esse parâmetro é válido desde que não haja outros fatores, como: feridas, ocos, desequilíbrio da copa ou inclinação acentuada do tronco (Mattheck; Breloer, 1997). A relação entre altura total da árvore (H) e diâmetro do tronco (D), também conhecida como modelo de esbeltez, foi considerada, sendo o risco de ruptura indicado quando: H/D > 50, para árvores em locais de baixa incidência de ventos fortes ou protegidas por prédios e outras árvores; ou H/D>30, para árvores expostas aos esforços de ventos significativos. A análise de alvo foi feita considerando a área ao redor das árvores, circunscrita num raio de 1,5 vezes a altura total da árvore, caso ocorra sua queda. Nessa análise foram avaliados possíveis riscos aos bens materiais e à vida humana, pela frequência de circulação de pessoas ou veículos nas proximidades da árvore e tipo de via. A análise de alvo auxilia na priorização de ações de manejo, principalmente quando não há possibilidade de remoção do alvo ou isolamento da área a ser afetada pela possível queda da árvore ou de parte dela.

O campus do IPT apresenta três maciços arbóreos (áreas A, B e C), conforme apresentado na **Figura 3**.

Figura 3. Localização dos maciços arbóreos (bosques).



Fonte: Elaborado pelos autores

Nessas áreas, além da análise das árvores, foi realizada a análise dos maciços arbóreos, que consistiu na caracterização de sua vegetação, contemplando os aspectos de conservação e estágio sucessional a fim de propor ações de manejo para potencializar a geração de benefícios ambientais.

Para tal, nos maciços arbóreos com sub-bosque (Áreas A e C) foram instaladas parcelas de 4 m x 25 m para coleta dos seguintes dados: espécies identificadas; DAP e altura dos indivíduos arbóreos; quantidade de estratos; características da serapilheira; e presença de epífitas e lianas. Duas parcelas foram instaladas no maciço florestal da área A e três parcelas foram instaladas no maciço florestal da área C.

O maciço arbóreo localizado na área B, mesmo apresentando um estrato superior fechado formado por árvores, configurando uma situação de sombreamento constante da camada inferior, não apresenta sub-bosque devido às ações periódicas de roçadas e capinas. Por não apresentar regeneração natural, não foi realizada a caracterização dos aspectos de conservação e estágio sucessional, sendo considerada apenas a análise do maciço quanto a ações de manejo necessárias para potencializar a geração de benefícios ambientais.

Na área C, a análise foi realizada no sub-bosque para verificar o estado de conservação e estágio sucessional da vegetação que se desenvolveu sob o plantio de eucaliptos. A análise dessa área verde foi complementada com a avaliação integrada de oito aspectos: biodiversidade vegetal; uso de agroquímicos; conectividade na paisagem; organismos xilófagos; estoque de carbono; segurança de pessoas, bens e edificações; manutenção e custos envolvidos; e potencial de uso da madeira de eucalipto proveniente de seu manejo (supressão e poda). Para tal, foi utilizado um protocolo para avaliar a presença de eucaliptos em área verde com circulação de pessoas, e sua influência positiva e negativa, nos meios urbano e rural, conforme Spassapan e Souza (2022).

A segunda etapa do trabalho, consistiu no monitoramento de árvores, dividida em três frentes de atuação, a saber:

1. **Biodeterioração**: visando a aquisição de informações técnicas para apoiar a análise de risco de queda relacionada à segurança das pessoas e à recomendação do manejo, foi implantado monitoramento para essas árvores, cujos aspectos físicos foram identificados como críticos. Esse monitoramento consistiu em verificações da biodeterioração (ataque de cupins ou fungos).

2. **Inclinação do tronco**: realizada por práticas de topografia para medidas de deslocamentos horizontais de um ponto instalado no tronco da árvore, conforme Amaral *et al.* (2008). As medidas de deslocamentos horizontais tiveram como propósito buscar prever uma tendência de inclinação das árvores. Para realização dessa atividade foi utilizado um nível modelo Wild N3, régua milimétrica e hastes de aço. A instrumentação consistiu em dois pontos colineares fixos no solo, em região próxima à árvore, e um ponto fixado à meia altura de seu tronco. As leituras foram realizadas de forma direta, por meio da visada do ponto de medição instalado na árvore com a mira do nível. A instrumentação limitou-se à realização de medidas dos deslocamentos horizontais (eixo x), em um plano bidimensional (x; y), com o objetivo de associar as medições realizadas a uma eventual tendência de inclinação da árvore.

3. **Eventuais quedas de árvores**: permitirá o início de uma análise do desempenho das espécies arbóreas. Estas eventuais quedas de árvores foram registradas no Arbio, conforme os seguintes fenômenos meteorológicos: chuva leve, chuva moderada, chuva pesada, chuva violenta, intermitente ou sem informação (World Meteorological Organization, 2018); e/ou velocidade do vento: baixa, moderada, alta ou desconhecida, tendo como base a classificação de vento da Escala de Beaufort (World Meteorological Organization, 2019).

A última etapa do diagnóstico realizado, consistiu na análise da percepção da comunidade do IPT, realizada por meio de pesquisa de opinião. A pesquisa de opinião foi realizada para avaliar o potencial de geração de benefícios ambientais da floresta urbana no ambiente de trabalho do IPT, feita por meio de questionário no Google Forms, conforme descrito por Lima *et al.* (2023). A pesquisa foi realizada por meio de questionário on-line de participação voluntária, adotado por apresentar, entre outras vantagens, a garantia de anonimato aos respondentes (Lima *et al.*, 2023). O Comitê de Privacidade de Dados do IPT avaliou e aprovou a metodologia adotada. A chamada para a pesquisa de opinião teve ampla divulgação em diversos meios de comunicação do IPT. O detalhamento desta pesquisa está apresentado em Lima *et al.* (2023).

No módulo II, que visa ações de planejamento, duas etapas foram realizadas, a elaboração de diretrizes de planejamento e a manutenção da floresta urbana.

Nas diretrizes de planejamento foi elaborada a indicação de novos plantios e espécies, a partir da autorização do órgão responsável na Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de São Paulo para a supressão de algumas árvores com risco, pois foi necessária a realização de plantio compensatório. Para tanto, foram identificados locais em que as mudas pudessem ser plantadas sem que houvesse obras futuras e interferências de elementos urbanos. Para tal, foram solicitadas para a Coordenadoria de Gestão do Campus (CGC) do IPT as plantas da rede elétrica, de águas pluviais, da rede subterrânea de fibra ótica e das áreas verdes. A partir destas informações foi possível elaborar o mapeamento do campus do IPT, destacando os locais propícios para novos plantios, de acordo com as características das árvores. A partir da orientação da equipe do projeto, em conjunto com a CGC, novos plantios tiveram início. Para a definição de quais espécies botânicas seriam adquiridas foi necessário identificar onde as mudas seriam plantadas; se dentro de alguma área verde, neste caso, teria que ser uma espécie umbrófila; se na calçada ou em áreas abertas que se ambientariam em pleno sol. As espécies arbóreas foram definidas com base na lista de espécies nativas regionais do Estado de São Paulo, classificadas por formações florestais, publicada pela Secretaria do Meio Ambiente do Governo do Estado de SP (Pradella *et al.*, 2015). Foram selecionadas espécies da região Sudeste que tivessem características adequadas para os locais, fossem atrativas para fauna e que não tivessem frequência alta no campus do IPT. A partir desta definição, a CGC efetuou a compra de mudas de árvores nativas, no padrão do Departamento de Parques e Áreas Verdes da Prefeitura Municipal de São Paulo.

Para a manutenção da floresta urbana, duas frentes de trabalho foram adotadas:

1. *Manejo emergencial*: após o diagnóstico e a análise de risco de queda das árvores, as seguintes práticas de manejo foram consideradas: adequação de canteiro; faixa permeável; equipamentos urbanos, próximos de árvores; remoção de alvo; avaliação técnica especializada para doenças e outras pragas; instalação de sistemas de sustentação; poda de galhos; tratamento fitossanitário; transplante; monitoramento da árvore e supressão.

2. *Ações de manejo nos maciços arbóreos*: após a análise dos maciços arbóreos foram consideradas ações de manejo para otimizar a geração de benefícios ambientais, principalmente no que se refere à biodiversidade. Dentre essas ações podem ser citadas: a supressão de espécies exóticas invasoras; a suspensão de roçadas e capinas; e o planejamento da substituição gradativa dos eucaliptos por espécies nativas. Dessa forma, objetiva-se tornar a floresta urbana do IPT com características mais naturais, favorecendo a sucessão ecológica, melhorando a interação com os fragmentos do entorno, além de atrair a fauna.

3 Resultados e discussão

3.1 Cadastro, inventário e diagnóstico das árvores

Ao longo de três anos de monitoramento contínuo no campus do IPT, foram inspecionadas e cadastradas no sistema Arbio um total de 1.890 árvores. A avaliação visual das condições externas revelou uma ampla predominância de exemplares sadios: 96% das árvores apresentaram-se vigorosas, com copas bem desenvolvidas e estrutura preservada. Sintomas de declínio fitossanitário foram diagnosticados em apenas 2% da população, enquanto os exemplares mortos (sem fluxo de seiva) responderam por 2%. O cadastro no sistema Arbio permitiu a estruturação de um banco de dados dinâmico, organizado em quatro módulos operacionais: (i) inventário (identificação botânica, dendrometria, condição geral, ocorrência de organismos biodeterioradores, interferências com o entorno e risco de queda); (ii) recomendações de manejo (registro de podas, tratamentos e indicações de remoção); (iii) planejamento (definição de locais e espécies adequadas para novos plantios); e (iv) registro de quedas (anotação detalhada das causas e condições meteorológicas associadas a eventualidades).

A sistematização digital de inventários de florestas urbanas representa um avanço expressivo na sua gestão. Conforme apontado por Amaral *et al.* (2021), a imensa maioria dos municípios brasileiros carece de dados sistematizados sobre suas árvores, recorrendo frequen-

temente a fichas em papel ou registros fragmentados, o que inviabiliza ações preventivas e gera severos conflitos com a infraestrutura construída. Ademais, o inventário realizado neste trabalho, com o registro de dados das árvores que vão além de identificação botânica e do diâmetro, comumente observado globalmente (Bingqian *et al.*, 2021), oferecem mais informações que favorecem uma melhor tomada de decisão quanto ao seu manejo.

Sob a perspectiva conceitual de Vogt (2024), a floresta urbana do IPT opera como um sistema socioecológico, no qual a informação precisa sobre os atributos biofísicos das árvores fundamenta diretamente a tomada de decisão institucional e as práticas de manejo. Adicionalmente, Wang *et al.* (2024) destacam que o manejo adaptativo da infraestrutura verde exige um fluxo iterativo e contínuo de monitoramento e avaliação, permitindo que os gestores antecipem vulnerabilidades ecológicas antes que se convertam em falhas estruturais ou acidentes em áreas de circulação humana. Desse modo, a sistematização digital do inventário da floresta urbana do IPT também favorece a viabilização de seu manejo adaptativo.

3.2 Composição florística, diversidade e conservação ex situ de espécies ameaçadas

A identificação botânica permitiu a caracterização taxonômica de 92% da população arbórea até o nível de família ou espécie. A composição florística do campus é formada por 40 famílias botânicas, 103 gêneros e pelo menos 139 espécies. As famílias de maior representatividade foram Myrtaceae, englobando 28% do total de árvores, e Fabaceae (incluindo as subfamílias Caesalpinioideae, Cercideae, Faboideae e Mimosoideae), com 24%. Observou-se uma forte dominância do gênero Eucalyptus spp., que responde por 19% dos exemplares do campus. Do ponto de vista de origem, 34% dos indivíduos pertencem a espécies nativas regionais. As 20 espécies mais frequentes concentram 67% da população total, sendo que 7 das espécies mais abundantes são nativas. Além disso, 30% das árvores inventariadas são espécies frutíferas que fornecem recursos alimentares à fauna local e à comunidade humana.

A análise da diversidade florística resultou em um Índice de Diversidade de Shannon-Wiener de 3,758 e um Índice de Equitabilidade de Pielou de 0,7616. Esses valores indicam uma elevada riqueza de espécies quando comparada ao panorama da arborização urbana brasileira, onde frequentemente se verifica a concentração de indivíduos em poucas espécies (Esteves; Corrêa, 2018; Alves, 2023), porém refletem uma distribuição heterogênea do número de indivíduos

por espécie. Um dos achados de maior relevância para a conservação da biodiversidade foi o registro de quatro espécies nativas ameaçadas de extinção em âmbito nacional e estadual (Resolução SMA nº 57/2016; Portaria MMA nº 148/2022): Araucaria angustifolia (pinheiro-do-paraná), Cariniana legalis (jequitibá-rosa), Paubrasilia echinata (pau-brasil) e Cedrela fissilis (cedro-rosa). Em contrapartida, diagnosticaram-se 20 espécies exóticas com potencial invasor (totalizando 371 exemplares), destacando-se a alta densidade de Leucaena leucocephala (leucena) e Archontophoenix cunninghamiana (palmeira-seafórtia).

Os dados reforçam o papel estratégico de áreas institucionais de acesso controlado e restrito para a conservação ex situ para a flora ameaçada e para conectividade ecológica na paisagem urbana. Conforme discutido por Wang *et al.* (2024), a infraestrutura verde urbana desempenha papel essencial na manutenção da biodiversidade e na restauração da conectividade de habitats fragmentados pela expansão urbana. A presença de espécies nativas ameaçadas de extinção no campus evidencia o papel estratégico do IPT na conservação da flora regional. Esse achado reforça que áreas institucionais de acesso controlado e restrito podem desempenhar papel crucial na manutenção da biodiversidade e na infraestrutura verde urbana, complementando as unidades de conservação e parques públicos de uso comum (Woodward *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024). Por outro lado, a presença significativa de exóticas invasoras exige ações imediatas de erradicação e substituição, visto que a bioinvasão compromete a regeneração natural e a conservação da biodiversidade (Ziller, 2005), aumentando a vulnerabilidade do ecossistema e reduzindo a resiliência socioecológica necessária para a oferta continuada de serviços ambientais (Vogt, 2024).

3.3 Dendrometria e conflitos com o ambiente construído

O levantamento dendrométrico revelou um porte maduro para a floresta urbana do campus, indicando predominância de indivíduos adultos, com médias de Diâmetro à Altura do Peito (DAP) de 35 cm, de altura total de 12 m e de altura da primeira bifurcação de 4 m. Constatou-se que 31% dos exemplares possuem a primeira bifurcação a uma altura inferior a 1,30 m do solo e que 10% das árvores apresentaram inclinação acentuada do tronco (superior a 15º). A análise da qualidade das podas realizadas indicou que 12% das árvores exibia indícios de realização de podas inadequadas (incluindo tocos de poda, brotações epicórmicas, podas em 'V', laterais ou drásticas). Parasitas vegetais e epífitas sufocantes, como erva-de-passarinho (Loranthaceae) e figueira-mata-pau (Ficus spp.), foram observados em 11% das copas.

A análise do entorno das árvores da floresta urbana do IPT indicou os seguintes pontos de conflito com a infraestrutura do campus: proximidade ou contato com fachadas de edificações em 16% das árvores; interferência com caixas de inspeção (3%); redes subterrâneas (2%); fiação elétrica aérea primária (2%, sendo 1% em fiação convencional e menos de 1% em rede protegida); e mobiliário urbano (1%). Observou-se que a altura média superior à da rede elétrica aérea primária favoreceu o conflito, sendo corrigida com podas inadequadas. Segundo Hoehne (1944), citado por Velasco (2003), essas podas comprometem a função estética e estrutural da árvore, aumentando o risco de queda. Velasco (2003) defende que as árvores mantenham seu porte natural, o que exige espaço adequado. Verificou-se ainda que 31% das árvores apresentam a primeira bifurcação abaixo de 1,30 m, o que, dependendo da espécie e peso da copa, pode causar rompimentos. Sob a ótica de Woodward *et al.* (2023) e Vogt (2024), o planejamento espacial rigoroso focado na escolha adequada das espécies e nas características do local de plantio constitui uma diretriz essencial para reduzir interferências na infraestrutura e elevados custos de manutenção, além de assegurar a longevidade e resiliência da infraestrutura verde.

3.4 Diagnóstico fitossanitário e avaliação da deterioração interna

A avaliação do estado fitossanitário das 1.851 árvores vivas revelou que 62% dos exemplares apresentavam infestação por fungos apodrecedores e/ou cupins xilófagos na raiz, no tronco ou na copa. Os fungos decompositores de madeira foram diagnosticados em 56% das árvores. Quanto à severidade da degradação fúngica no lenho, 60% manifestaram ataque superficial, 36% moderado (atingindo o alburno) e 16% intenso (progredindo para o cerne). Corpos de frutificação da subdivisão Basidiomycotina foram observados em menos de 1% dos indivíduos, sempre associados a estágios avançados de podridão. A presença de cupins foi registrada em 19% das árvores, dos quais 9% correspondiam a cupins xilófagos de elevada destrutividade (gênero Coptotermes sp.).

Para avaliar a perda de massa e a perda de resistência mecânica interna no fuste, aplicou-se a inspeção instrumental penetrográfica (Tecnologia IPT - Nível 3 da ABNT NBR 16246-3) em uma amostra de 574 árvores (31% dos indivíduos vivos do campus). A prospecção mostrou que 86% das árvores testadas encontravam-se internamente sadias, enquanto 14% apresentavam cavidades ou biodeterioração interna, com porcentagens de área deteriorada variando entre 11% (mínima) e 66% (máxima em relação à área transversal do tronco).

Os resultados reforçam que a avaliação exclusivamente visual é insuficiente para a gestão de riscos em florestas urbanas. Conforme demonstram Sales e Candian (2012) e Carvalho (2019), defeitos internos graves decorrentes do apodrecimento fúngico muitas vezes progridem sem sinais externos evidentes no fuste, podendo provocar rupturas repentinas. O estudo do IPT (2004) e a tese de Brazolin (2009) comprovam que a decomposição fúngica altera profundamente as propriedades físico-mecânicas do lenho, reduzindo a capacidade de suporte da árvore frente às solicitações mecânicas. Adicionalmente, Locosselli *et al.* (2021) documentaram que o apodrecimento interno combinado a podas inadequadas é o principal fator predisponente para quedas de árvores na cidade de São Paulo durante eventos meteorológicos adversos. No âmbito econômico e de manejo, a identificação precoce de cupins do gênero Coptotermes sp. é crucial, pois, como relatam Amaral (2002) e Freytag e Cink (2001), essas pragas xilófagas causam grandes prejuízos na arborização urbana e comprometem a estabilidade estrutural dos espécimes.

3.5 Análise de risco de queda, quedas registradas e governança frente a distúrbios climáticos (pulse disturbances)

A análise detalhada do risco de queda e probabilidade de ruptura no tronco (até 2,0 m de altura) foi realizada em 532 árvores prioritárias, aplicando-se a regra do 1/3 de lenho sadio remanescente, o modelo de esbeltez (relação Altura/DAP H/D > 50 para áreas protegidas e H/D > 30 para áreas expostas ao vento) e a análise de alvo (raio de 1,5 vezes a altura da árvore). Os resultados indicaram que 97% das árvores avaliadas apresentaram nível de alerta baixo, enquanto apenas 3% (16 árvores) foram diagnosticadas com nível de alerta alto (risco iminente de ruptura com presença de alvos valiosos ou circulação de pessoas). Paralelamente, o monitoramento instrumental experimental da inclinação do tronco em quatro árvores críticas não indicou tendências de deslocamento horizontal significativo no eixo x. Durante o período de acompanhamento de três anos, foram registradas apenas 7 quedas de árvores no campus: 3 quedas associadas a ventos fortes e chuvas intensas; 2 quedas sob vento e chuva moderados; e 2 quedas sem ocorrência de intempéries (causadas por pivotamento do sistema radicular e fratura no colo).

A baixa incidência de quedas no IPT (média de apenas 2,3 quedas por ano em um universo de 1.890 árvores) contrasta fortemente com o cenário da cidade de São Paulo, onde caem em média 6 árvores por dia (Locosselli *et al.*, 2021). Esse resultado reflete a efetividade da gestão preventiva, em oposição à atuação emergencial que caracteriza a maioria das políticas públicas municipais (IPT, 2020b).

Sob a perspectiva teórica de Konijnendijk *et al.* (2021) e Vogt (2024), eventos meteorológicos extremos (tempestades, vendavais e rajadas de vento) configuram distúrbios do tipo "pulso" (pulse disturbances), acontecimentos súbitos, de grande magnitude e de difícil previsão que testam a resiliência dos sistemas socioecológicos urbanos. Konijnendijk *et al.* (2021) e Roman *et al.* (2022) demonstram que cidades e instituições dotadas de programas estruturados de silvicultura urbana, planos formais de manejo e sistemas de informação georreferenciados conseguem gerenciar o pós-crise com muito maior eficiência, minimizando danos a vidas e bens materiais. Como enfatizam Carvalho *et al.* (2024) e Cumming *et al.* (2008), o monitoramento preventivo e contínuo da estabilidade biomecânica das árvores e o controle dos alvos reduzem drasticamente os custos operacionais de emergência e promovem a resiliência socioecológica institucional.

3.6 Diagnóstico dos maciços arbóreos

A caracterização da vegetação dos maciços arbóreos é apresentada a seguir:

- Maciço da Área A (2.240 m): Resultante do plantio misto de espécies nativas e exóticas e da regeneração natural via dispersão zoocórica. Apesar de possuir mais de 40 anos desde os primeiros plantios e cerca de 10 anos sem roçadas no sub-bosque, a área encontra-se em estágio inicial de sucessão ecológica, apresentando regeneração natural de espécies provenientes do entorno.

- Maciço da Área B (2.290 m): Embora apresente um dossel superior fechado formado por árvores de grande porte que garantem sombreamento constante, a área não apresenta sub-bosque em função das práticas periódicas de roçada e capina, prejudicando a regeneração natural da vegetação.

- Maciço da Área C - Bosque dos Eucaliptos (9.490 m): A avaliação da composição e estrutura do sub-bosque desenvolvido sob a copa dos eucaliptos, indicou que o sub-bosque encontra-se em estágio pioneiro de sucessão ecológica. A análise integrada pelo protocolo de Spassapan e Souza (2022) mostrou que os principais pontos positivos do eucaliptal incluem o elevado estoque de carbono e o potencial de geração de receita com a comercialização da madeira advinda de podas e supressões. Como pontos negativos, destacam-se: baixa riqueza florística no estrato arbóreo (aproximadamente metade da observada na Área A); dominância monoespecífica restringindo

o espaço para nativas; e alto risco operacional, com 40% das árvores com indicação de poda no Arbio e histórico de queda de galhos sobre vias e edificações.

A análise dos maciços do IPT demonstra a relevância de conservar e manejar pequenos fragmentos urbanos para restabelecer a conectividade ecológica. Conforme salientado por Silva (2012) e no Plano Municipal da Mata Atlântica de Apiaí (IPT, 2020c), os maciços arbóreos urbanos atuam como importantes fontes de propágulos para projetos de restauração e prestam serviços de regulação climática e conservação do solo. A aplicação do protocolo de manejo em eucaliptais (Spassapan; Souza, 2022; IPT, 2024) fundamenta a recomendação de substituição gradual dos eucaliptos por espécies nativas do bioma Mata Atlântica, iniciando pelos indivíduos já indicados para remoção no Arbio, incluindo os dominados ou com risco de queda. Essa transição orientada visa promover a sucessão ecológica sem desproteger o solo, alinhando-se aos princípios da infraestrutura verde adaptativa proposta por Wang *et al.* (2024). Na Área B, recomenda-se a interrupção das roçadas periódicas, a fim de permitir o desenvolvimento do sub-bosque por meio da regeneração natural, ampliando a oferta de serviços ambientais.

3.7 Percepção da comunidade institucional sobre a floresta urbana

A pesquisa de opinião pública voluntária e anônima conduzida com a comunidade do IPT (obtendo 212 respostas válidas) demonstrou uma forte valorização da floresta urbana do IPT, já que 99,5% dos respondentes declararam sentir-se bem com a presença das árvores no campus. Os serviços ambientais de regulação e culturais mais percebidos e valorizados no ambiente de trabalho (para 72% dos respondentes) foram: o provimento de "sombra" e "redução do calor" (conforto térmico), a "beleza cênica" e a oferta de "frutas". Por outro lado, os principais riscos percebidos pelos trabalhadores foram os seguintes: a "queda de galhos" foi citada por 33% dos participantes e a "queda de árvores" por 31%.

Quanto ao uso potencial das áreas verdes, 41% dos respondentes manifestaram o desejo de aproveitar mais os espaços do campus para atividades integradas de lazer, descanso, caminhadas e educação ambiental. O impacto da vegetação na saúde humana foi amplamente reconhecido: 73% acreditam que a ausência de árvores pode desencadear doenças, com destaque para problemas respiratórios, estresse e transtornos psicológicos. Demonstrando forte disposição a se engajar em ações de conservação da floresta urbana do IPT, 79% dos trabalhadores expressaram o desejo de participar pessoalmente do plantio de uma árvore no campus.

Os dados empíricos de percepção corroboram as evidências científicas de Lima *et al.* (2023), Woodward *et al.* (2023) e Wang *et al.* (2024), que demonstram que o contato diário com árvores e áreas verdes urbanas reduz os níveis de cortisol e estresse, diminui a incidência de doenças cardiorrespiratórias e melhora significativamente a saúde mental no ambiente corporativo. A concordância entre a percepção dos funcionários (medo de queda de galhos/árvores) e os laudos técnicos reforça a importância da governança transparente. Segundo Vogt (2024) e Konijnendijk *et al.* (2021), a integração dos atores locais e o envolvimento da comunidade em mutirões de plantio (mosaic governance) fortalecem o sentimento de pertencimento, educam sobre os riscos reais e asseguram o suporte social às intervenções de manejo e substituição arbórea.

3.8 Diretrizes de manejo e ampliação de serviços ambientais

Com base no diagnóstico integrado, definiram-se ações de manejo divididas em três horizontes temporais de planejamento:

- Manejo emergencial (curto prazo): Emissão de laudos técnicos para mais de 100 árvores críticas, culminando na supressão emergencial de 25 árvores com risco alto de queda e na execução de podas de emergência em 93 exemplares para eliminação de risco iminente a pedestres e edificações.

- Ações periódicas (médio e longo prazo): Recomendação de poda de limpeza em 1.076 árvores; monitoramento continuado da biodeterioração em 486 árvores; acompanhamento da inclinação do tronco em 109 árvores e da primeira bifurcação em 64 exemplares; poda de condução em 50 árvores jovens; e poda de adequação em 109 árvores em conflito com a rede elétrica ou com fachadas de edificações.

- Diretrizes para novos plantios e manejo dos maciços: Seleção prioritária de uma lista de 12 espécies nativas regionais atrativas à fauna e com apelo estético de floração. Recomendou-se o controle contínuo de espécies exóticas invasoras nas Áreas A e B, assim como o plantio de enriquecimento; a suspensão das roçagens e capinas na Área B; e o plano de substituição gradual dos eucaliptos na Área C por espécies nativas da Mata Atlântica. Cadastraram-se 8 novos plantios de árvores no sistema Arbio.

As intervenções propostas impactarão positivamente a provisão dos seguintes benefícios ambientais (Wang *et al.*, 2024; Woodward *et al.*, 2023):

- **Manutenção de habitat**: a supressão de árvores de espécies exóticas invasoras e de árvores de eucaliptos com risco de queda ou com menores diâmetros e dominadas, aliada ao plantio de enriquecimento com espécies nos maciços arbóreos do IPT, melhorarão as condições de abrigo, reprodução e alimentação para a fauna e para o desenvolvimento da flora nativa.

- **Manutenção da diversidade genética (fluxo gênico):** a supressão de árvores de espécies exóticas invasoras e de árvores de eucaliptos com risco de queda ou com menores diâmetros e dominadas, aliada ao plantio de enriquecimento com espécies nos maciços arbóreos e ao plantio de novas árvores nas calçadas do campus do IPT, melhorará a interação da floresta urbana do IPT com as áreas verdes do entorno, favorecendo o fluxo gênico na paisagem, por meio, por exemplo, da atração da avifauna dispersora de sementes de espécies vegetais nativas;

- **Manutenção do equilíbrio ecológico**: o manejo e supressão de árvores de espécies exóticas invasoras contribuirá com o controle da disseminação destas espécies na paisagem, favorecendo a conservação do patrimônio genético e biodiversidade local;

- **Recreação, saúde física e mental e provisão de alimentos, recursos medicinais e matéria-prima**: a supressão de árvores de espécies exóticas invasoras e de árvores de eucaliptos com risco de queda ou com menores diâmetros e dominadas, aliada ao plantio de enriquecimento com espécies nos maciços arbóreos do IPT, melhorará a condição de segurança para acesso de pessoas na área e diversificará seus atrativos (ex.: diversidade de flores) e potencial de provisão de produtos para consumo (ex.: diversidade de frutas).

Identificou-se apenas um impacto negativo temporário relacionado ao seguinte serviço ambiental:

- **Melhoria da qualidade do ar**: a supressão dos eucaliptos reduzirá a capacidade da barreira vegetal de atenuar a dispersão de material particulado proveniente das vias com grande trânsito de veículos que circundam o campus do IPT.

O plano de manejo adotado no IPT exemplifica a aplicação prática do Manejo Adaptativo de Infraestrutura Verde preconizado por Wang *et al.* (2024) e Li *et al.* (2022). A combinação de ações preventivas de curto prazo (supressão de risco) com diretrizes de longo prazo (enriquecimento e substituição de exóticas) amplia a segurança dos usuários do campus sem comprometer o valor ecológico e estético da floresta urbana. Como sintetizado por Carvalho *et al.* (2024) e Vogt (2024), a manutenção sistemática e o planejamento preventivo reduzem os custos operacionais de longo prazo, evitam acidentes catastróficos e asseguram que as áreas institucionais continuem desempenhando um papel vital na resiliência e sustentabilidade das cidades.

4 Conclusão

A gestão da floresta urbana do IPT evidencia a relevância de um planejamento sistemático e contínuo para garantir a segurança, sustentabilidade e a ampliação dos serviços ambientais. A metodologia adotada proporcionou um diagnóstico detalhado das árvores e maciços arbóreos, um planejamento estratégico para novos plantios e diretrizes de manutenção, além da implementação de ações emergenciais para mitigação de riscos. Os resultados mostraram que 96% das árvores analisadas estão vigorosas e que a floresta urbana do IPT conta com uma diversidade botânica significativa. Espécies ameaçadas reforçam a importância da área para a conservação, enquanto exóticas invasoras podem comprometer o equilíbrio ecológico.

Além disso, a análise de risco de queda revelou que 97% das árvores apresentaram baixo risco de ruptura, com as quedas registradas nos últimos três anos associadas a fatores climáticos extremos. A pesquisa de percepção dos trabalhadores do IPT mostrou alta valorização da floresta, com 99,5% reconhecendo seus benefícios ao bem-estar e 79% interessados em novos plantios. As diretrizes de manejo buscam fortalecer sua resiliência.

O estudo amplia o conhecimento sobre florestas urbanas de áreas institucionais de acesso controlado e restrito e sua relevância para a qualidade de vida, complementando unidades de conservação e áreas verdes públicas na oferta de serviços ambientais. Para viabilizar o manejo, são necessárias políticas públicas que incentivem a gestão com instrumentos econômicos, parcerias institucionais e acesso a editais de financiamento de ações.

Dessa forma, a experiência do IPT mostra o potencial das áreas institucionais de acesso controlado e restrito para contribuir com a sustentabilidade urbana, complementando áreas verdes públicas e integrando a infraestrutura verde. A gestão eficaz das florestas urbanas requer dados técnicos, monitoramento contínuo e engajamento comunitário, assegurando qualidade de vida e resiliência ambiental frente ao crescimento urbano.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio e financiamento do projeto pela Diretoria do Instituto de Pesquisas Tecnológicas e à Coordenadoria de Gestão do Campus do IPT pelo suporte logístico nas atividades de campo e compartilhamento de informações. Os autores também agradecem aos pesquisadores Aline Ribeiro Machado, Giuliana del Nero Velasco, Maria Lúcia Solera, Reinaldo Araujo de Lima e Sergio Brazolin, pelas valiosas contribuições nas discussões no âmbito do Núcleo Floresta.

6 Referências

Alves, L. P. (2023). **Arborização urbana nas cidades brasileiras e um estudo de caso em Teixeira de Freitas, Bahia**. [Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologias Ambientais]. Universidade Federal do Sul da Bahia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Porto Seguro.

Amaral, R. D. A. M. (2002). **Diagnóstico da ocorrência de cupins xilófagos em árvores urbanas do bairro de Higienópolis na cidade de São Paulo**. [Dissertação de Mestrado em Recursos Florestais]. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

Amaral, R. D. A. M. *et al.* (2003). **Patente: Metodologia para diagnóstico de cupins**. (BR patente nº PI PI0300643).

Amaral, R. D. A. M., Campos, G. C., Gandolfo, O. C. B., Santos, V. R. N., Lima, R. A., Fonseca, R. (2022, edição especial, novembro). I**nvestigação multidisciplinar do risco de queda de árvore: estudo de caso em pau-ferro, na Cidade de São Paulo, SP**. Rev. Gest. Ambient. e Sust. - GeAS, 11, 1-24, e22949. https://doi.org/10.5585/geas.v11i2.22949

Amaral, R. D. A. M., Moraes, J. T. L., Brazolin, S., Yojo, T., Oliveira, C. T., Neto, M. A. O. (2008). **Biodeterioração de Eucalyptus citriodora (Hook) e monitoramento com o auxílio de instrumentação topográfica**. Resumos do decimo segundo Congresso Brasileiro de Arborização Urbana.

Amaral, R. D. A. M., Morato, R. G., Mariano, R. S., Ferreira, J. M. R. (2021). **Ferramentas para gestão da floresta urbana**. Rev. Gest. Ambient. e Sust. - GeAS., 10(1), 1-10, e18131. https://doi.org/10.5585/geas.v10i1.18131.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). **Floresta urbana – Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas.** Parte 3: Avaliação de risco de árvores (ABNT NBR 16246-3: 2019).

Bingqian, M., Hauer R. J., R., J. H., Östberg J., Koeser A. K.X. Wei H., Xu C. (2021). **A global basis of urban tree inventories: What comes first the inventory or the program**. Urban Forestry & Urban Greening, 60, e127087. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127087.

Brazolin, S. (2009). **Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, Tipuana tipu (Benth.)** O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP. [Tese de Doutorado]. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

Carvalho, C. A. (2019). **Tomógrafo de impulso como método não destrutivo para determinação da sanidade de árvores plantadas às margens do rio Carahá no município de Lages, SC**. [Dissertação de Mestrado]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina.

Carvalho, T. S., Martini, A., Souza, M. M., Silva, A. C. N. (2024). **O efeito de rajadas de vento na inclinação da placa de raízes em árvores urbanas**. J. Environ. Manag. & Sust.,13(1), 1-28, e23715. https://doi.org/10.5585/2024.23715

Cities4Forests (2019). **Urban Forests for Healthier Cities: Policy, Planning, Regulations, and Institutional Arrangements**.

Cumming, A. B., Twardus, D. B., Nowak, D. J. (2008). U**rban forest health monitoring: large--scale assessments in the United States**. Aboriculture & Urban Forestry, 34(6), 341-346.

Curitiba City Hall (2016). **Afforestation plan has placed 139,000 trees in Curitiba since 2013**.

Esteves, M. C.; Corrêa, R. S. (2018). **Natividade da flora usada na arborização de cidades brasileiras**. Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo, Brasília, n. 22, p. 159-171. DOI: http://dx.doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n22.2018.11.

Freytag, E. D., Cink, J. H. (2001). **Field trials with premise (imidacloprid) termiticide for controlling formosan subterranean térmites in trees in New Orleans, Louisiana**. Proceedings the second International Symposium on Coptotermes Formosanus, (pp. 23). Department of Agriculture, New Orleans, Louisiana, United States.

Hamamura, C. (2020). **Sensoriamento remoto para identificação taxonômica e mapeamento de espécies arbóreas em ambiente urbano**. [Tese de Doutorado]. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. doi:10.11606/T.11.2020.tde-12082020-165438.

Hoehne, F. C. (1944). **Arborização urbana**. Secretaria da Agricultura, Indústria e Comércio.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2004). **Relatório técnico do Diagnóstico e Análise de Risco de Queda das Árvores de Vias Públicas da Cidade de São Paulo – Projeto Operação Árvore Saudável (Vol. 1)**.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2020a). **Gestão da floresta urbana do campus do IPT.**

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2020b). **Plano de Desenvolvimento Institucional na Área de Transformação Digital: Manufatura Avançada e Cidades Inteligentes e Sustentáveis.** Fapesp.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2020c). **Plano municipal de conservação e recuperação da Mata Atlântica - PMMA Apiaí (1. ed. Vol. 1)**. https://ipt.br/wp-content/uploads/2024/08/PMMA_Apiai.pdf

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2024). **Plano de manejo refúgio de vida silvestre Anhanguera (Vol. 1)**. https://ipt.br/wp-content/uploads/2024/12/2-Volume-I-–-Introducao-e-Conteudo-metodologico-2.pdf

Konijnendijk, C. C., Nesbitt, L., Wirtz, Z. (2021). **Urban forest governance in the face of pulse disturbances: Canadian experiences**. Arboriculture & Urban Forestry, 47(6), 267–283. https://doi.org/10.48044/jauf.2021.023

Li, H., Zhang, X., Li, Z.; Wen, J., Tan, X. (2022) **A Review of Research on Tree Risk Assessment Methods**. Forests,13, 1556. https://doi.org/10.3390/f13101556

Lima, B. V., Amaral, R. D. A. M., Souza, C. A., Longo, M. H. C. (2023). **Perception about urban forest and its influence on well-being in workplaces**. Ambiente & Sociedade, 26, e02201. https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0220r1vu2023L3OA

Locosselli, G. M., Miyahara, A. A. L., Cerqueira, P., Buckeridge, M. S. (2021). **Climate drivers of tree fall on the streets of São Paulo, Brazil.** Trees, 35, 1807-1815. doi:10.1007/s00468-021-02145-4

Mattheck, C., Breloer, R. C. (1997). **The body language of trees: a handbook for failure analysis**. Stationery Office.

Ministério do Trabalho e Emprego (2012). **NR 35: Trabalho em altura (Portaria SIT nº 313, de 23 de março de 2012 27/03/12)**.

Planetary Health Alliance. (2022, 03 de março). **Saúde Planetária**. https://www.planetaryhealthalliance.org/planetary-health.

Portaria MMA n° 148, de 7 de junho de 2022. (2022, de 07 de junho). **Altera os Anexos da Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014, da Portaria nº 444, de 17 de dezembro de 2014, e da Portaria nº 445, de 17 de dezembro de 2014, referentes à atualização da Lista Nacional de Espécies Ameaçadas de Extinção**. Presidência da República.

Pradella, D. Z. A., Silva, J. W. F., Nisi, T. C. C. (2015). **Cadernos de educação ambiental 21 - arborização urbana**. Governo do Estado de São Paulo.

Resolução SMA nº 57 de 05 de junho de 2016. (2016, 05 de junho). **Publica a segunda revisão da lista oficial das espécies da flora ameaçadas de extinção no Estado de São Paulo**. Diário Oficial do Estado de São Paulo, 126(120), 55-57.

Roman, L. A. *et al.* (2022). **Construction and proactive management led to tree removals on an urban college campus**. Forests, 13(6), 871.

Sales, A., Candian, M. (2012). **Árvores urbanas: técnicas não-destrutivas para o manejo e planejamento**. Congresso PLURIS2012 – Reabilitar o Urbano – Paranoá 6. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

Secretaria Estadual do Meio Ambiente de São Paulo (1988). **Vegetação Significativa do Município de São Paulo.**

Silva, J. M. (2012). **Floresta urbana: síndrome de dispersão e grupos ecológicos de espécies do sub-bosque.** Boletim de Geografia, 31, 135-144.

Spassapan, R. P., Souza, C. A. (2022). **Proposta de protocolo para avaliação de eucaliptais em ambientes urbanos para fins de manejo**. Resumo expandido do nono Congresso Florestal Brasileiro (pp. 1-4), Brasília, DF.

Universidade de São Paulo. Planetary Health Alliance (2021, 10 de outubro). **Declaração de São Paulo sobre Saúde Planetária**. https://drive.google.com/file/d/1M__7cuGJu9D7Hg_j3tlgkxPlR9-0428d/view

Velasco, G. D. N. (2003). A**rborização viária x sistemas de distribuição de energia elétrica: avaliação dos custos, estudo das podas e levantamento de problemas fitotécnicos**. [Dissertação de Mestrado]. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

Viríssimo, D. B., Russo, M. C., Machado, M. C., Brazolin, S., Amaral, R. D. A. M., Yojo, T. (2013). **Patente: Arbio - Programa de Computador**. (BR patente nº BR512013001323-2).

Vogt, J. (2024). **A comprehensive framework for understanding urban forests as social-ecological systems**. Arboriculture & Urban Forestry, 50(6), 427-469. https://doi.org/10.48044/jauf.2024.021

Wang D, Xu P-Y, An B-W and Guo Q-P (2024). **Urban green infrastructure: bridging biodiversity conservation and sustainable urban development through adaptive management approach**. Front. Ecol. Evol. 12:1440477. doi: 10.3389/fevo.2024.1440477

Woodward, A.; Hinwood, A.; Bennett, D.; Grear, B.; Vardoulakis, S.; Lalchandani, N.; Lyne, K.; Williams, C. (2023). **Trees, Climate Change, and Health: An Urban Planning, Greening and Implementation Perspective**. Int. J. Environ. Res. Public Health, 20, 6798. https:// doi.org/10.3390/ijerph20186798

World Meteorological Organization. (2019). **Beaufort scale of wind force**. WMO. https://community.wmo.int/en/activity-areas/wmo-beaufort-scale

World Meteorological Organization. (2018). **Guide to Instruments and Methods of Observation**. (pp. 548-57).

Ziller, S. R. (2005). Espécies exóticas da flora invasoras em Unidades de Conservação. In J. B. Campos, M. de G. P. Tossulino, C. R. C. Müller. **Unidades de Conservação: ações para valorização da biodiversidade (pp. 34-52)**. Instituto Ambiental do Paraná.

XXXXXXXXXXXXXXXX

Artigo Técnico

Desenvolvimento de formulação de comprimidos revestidos contendo acetato de noretisterona e estradiol pelo processo de granulação úmida em leito fluidizado tangencial

Development of a film-coated tablet formulation containing norethisterone acetate and estradiol using a tangential fluid-bed wet granulation process

Celso Donizeti Vieira[a*], Natalia Cristina Dalibera[b], Fagner Magalhaes Souza[c], José Luiz Aiello Ritto[c], Valker Araujo Feitosa[d], Natalia Neto Pereira Cerize[b,e]

[a] Egresso do Mestrado Profissional em Processos Industriais do IPT; Biolab Sanus Farmacêutica

[b] Insper Instituto de Ensino e Pesquisa

[c] EMS

[d] Universidade de São Paulo

[e] Docente do Mestrado Profissional do Processos Industriais do IPT

*e-mail: celsodonizeti@yahoo.com.br

Palavras-chave: acetato de noretisterona; estradiol; liberação imediata; granulação úmida; leito fluidizado.

Keywords: norethisterone acetate; estradiol; immediate release; wet granulation; fluidized bed.

Resumo

Medicamentos hormonais de baixa dosagem apresentam desafios de fabricação relacionados às baixas concentrações dos princípios ativos e às suas propriedades físico-químicas, que podem comprometer a uniformidade de dose e o desempenho biofarmacêutico. Este estudo desenvolveu comprimidos revestidos de liberação imediata contendo acetato de noretisterona (AN) e estradiol (ES), utilizando granulação úmida em leito fluidizado tangencial e copovidona, visando melhorar a homogeneidade, a solubilidade e o desempenho farmacotécnico. Foram avaliados três protótipos (P1, P2 e P3), com formulações qualitativa e quantitativamente idênticas ao medicamento de referência Natifa Pro®, variando-se a estratégia de adição dos insumos durante a granulação. No P1, IFAs e copovidona foram aplicados em uma única solução; no P2, em duas soluções separadas; e, no P3, 50% da copovidona foi previamente incorporada ao substrato, sendo o restante aplicado durante a granulação. Avaliaram-se propriedades dos granulados, desempenho na compressão e revestimento, desintegração, dissolução e estabilidade. O P3 apresentou os melhores resultados, com fluidez adequada, melhor desempenho na compressão, desintegração de 3min35s e dissolução muito rápida, atingindo em 15 minutos 86,4% de AN e 88,2% de ES. O protótipo também atendeu aos critérios de similaridade (F2) em relação ao medicamento de referência e demonstrou estabilidade por seis meses em condições aceleradas.

Abstract

Low-dose hormonal drug products present manufacturing challenges related to the low concentrations of active pharmaceutical ingredients (APIs) and their physicochemical properties, which may compromise dose uniformity and biopharmaceutical performance. This study developed immediate-release film-coated tablets containing norethisterone acetate (NA) and estradiol (ES) using tangential fluid-bed wet granulation and copovidone, aiming to improve homogeneity, solubility, and pharmaceutical performance. Three prototypes (P1, P2, and P3) were evaluated, with formulations qualitatively and quantitatively identical to the reference drug product Natifa Pro®, while varying the ingredient addition strategy during granulation. In P1, the APIs and copovidone were applied in a single solution; in P2, they were applied in two separate solutions; and in P3, 50% of the copovidone was incorporated into the substrate beforehand, with the remainder applied during granulation. Granule properties, compression and coating performance, disintegration, dissolution, and stability were evaluated. P3 showed the best results, with adequate flowability, improved compression performance, a disintegration time of 3 min 35 s, and a very rapid dissolution profile, reaching 86.4% NA and 88.2% ES release within 15 minutes. The prototype also met the similarity factor (f2) criteria compared with the reference drug product and demonstrated stability for six months under accelerated conditions.

1. Introdução

A administração oral é a via preferencial na farmacoterapia devido à sua praticidade, conforto do paciente e maior adesão ao tratamento (ASSIS, 2017). Comprimidos, em particular, destacam-se pela estabilidade, precisão na dosagem e facilidade de produção em larga escala. Para a eficácia terapêutica de medicamentos administrados por via oral, é essencial que o fármaco se dissolva adequadamente no trato gastrointestinal e seja absorvido, garantindo sua biodisponibilidade sistêmica (AMIDON *et al.*, 1995). A solubilização é, portanto, um pré-requisito para a absorção e, consequentemente, para a eficácia terapêutica do medicamento.

Medicamentos hormonais de baixa dosagem, como o acetato de noretisterona (AN) e o estradiol (ES), apresentam desafios significativos na fabricação devido à baixa solubilidade em água. A necessidade de garantir uniformidade de dose e biodisponibilidade adequada é dificultada pelas baixas concentrações dos princípios ativos e por suas características físico-químicas, como má fluidez e estrutura molecular apolar com ausência de grupos ionizáveis. Com isso, métodos de produção convencionais, como a mistura simples seguida de compressão direta, podem não assegurar a homogeneidade necessária, resultando em variações na dose, dissolução inadequada e potenciais falhas terapêuticas ou efeitos adversos (PARIKH *et al.*, 1997). A copovidona, um excipiente multifuncional, é amplamente empregada nesse contexto devido às suas propriedades aglutinantes e à capacidade de melhorar a solubilidade de fármacos pouco solúveis através da formação de dispersões sólidas, contribuindo para o aumento da biodisponibilidade (ASHLAND, s.d.).

Além de estratégias de melhoria na formulação com o uso de copovidona, a otimização no processo produtivo dos comprimidos também é uma alternativa para viabilizar a formulação com princípios que apresentam dificuldades na solubilização. A granulação úmida em leito fluidizado emerge como uma alternativa tecnológica promissora para superar esse desafio, melhorando as propriedades físicas dos grânulos, como escoabilidade, homogeneidade e compactabilidade. Este processo permite a formação de grânulos coesos, reduzindo a segregação dos componentes ativos e promovendo maior uniformidade de dose, ao mesmo tempo em que otimiza as propriedades de superfície, como a tensão superficial e o ângulo de contato, aumentando a área superficial do fármaco e, consequentemente, melhorando seu perfil de dissolução (PANDEY e BADAWY, 2015). Além disso, a tecnologia de granulação por leito fluidizado tangencial também se destaca pela sua versatilidade, integrando em um único equipamento as etapas de mistura, granulação, secagem e revestimento (HEMATI *et al.*, 2003). Essa abordagem é particularmente vantajosa para formulações complexas que exigem controle rigoroso sobre a morfologia e a qualidade dos grânulos.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma formulação de comprimidos revestidos de liberação imediata contendo 1 mg de estradiol e 0,5 mg de acetato de noretisterona, empregando a tecnologia de granulação úmida em leito fluidizado tangencial. A pesquisa visou alcançar um perfil de dissolução equivalente ao do medicamento de referência (Natifa Pro®) e garantir o cumprimento dos atributos críticos de qualidade exigidos pela legislação sanitária vigente, com foco na uniformidade de dose, dissolução eficiente e estabilidade da formulação.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Os insumos farmacêuticos ativos (IFAs) utilizados foram acetato de noretisterona 98,5% e estradiol 99,0% foram fabricados pela farmoquímica Aspen Pharma. Todos os excipientes foram adquiridos como de grau farmacêutico, incluíram lactose monoidratada (diluente), amido modificado (desintegrante), copovidona (aglutinante e solubilizante), estearato de magnésio vegetal (lubrificante e agente de fluxo), e um sistema de revestimento Opadry QX White® (composto por Macrogol (PEG), Talco, Dióxido de titânio, Glicerol e Álcool polivinílico (PVA)). Como solventes, foram empregados álcool etílico, acetona e água purificada. O medicamento de referência utilizado para comparação foi Natifa Pro® (Libbs Farmacêutica Ltda.).

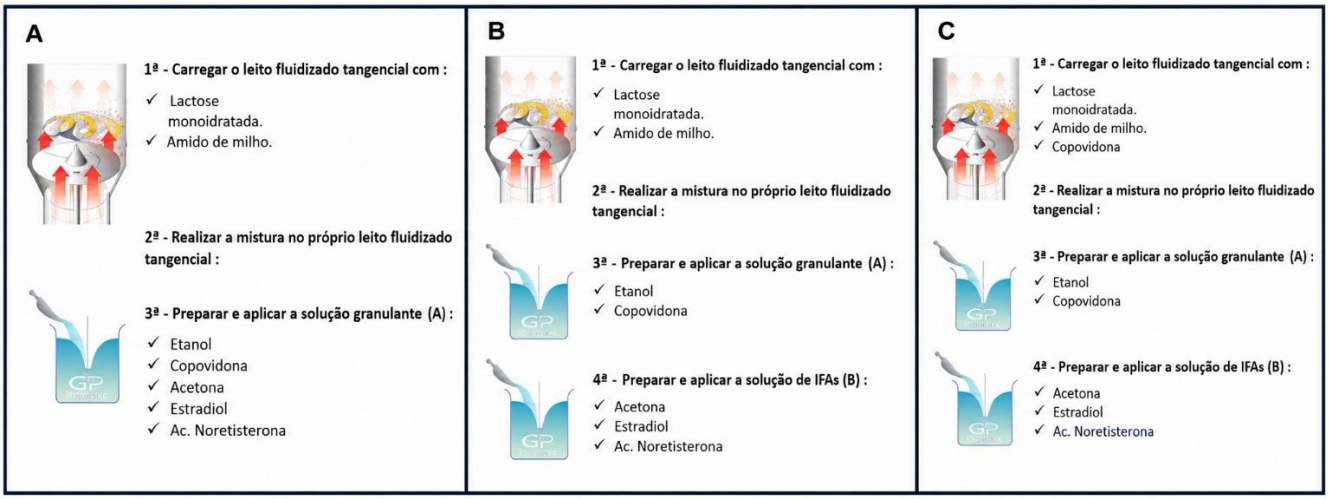
2.2. Formulação dos Protótipos

Três protótipos, P1, P2, P3 foram desenvolvidos em escala laboratorial (1 kg), mantendo-se a composição qualitativa e quantitativa idêntica ao medicamento de referência, a qual não é apresentada neste trabalho em razão de sigilo industrial. As formulações diferiram exclusivamente quanto à estratégia de adição da copovidona e dos IFAs durante a granulação úmida em leito fluidizado tangencial, conforme detalhado a seguir e ilustrado na **Figura 1**.

Os protótipos foram formulados a partir de um substrato constituído por amido e lactose monoidratada, diferenciando-se exclusivamente pela estratégia de adição da copovidona e dos ingredientes farmacêuticos ativos durante a etapa de granulação úmida. No Protótipo 1, a totalidade da copovidona, do acetato de noretisterona e do estradiol foi incorporada por meio de uma única solução granulante composta por acetona e álcool etílico. No Protótipo 2, a copovidona foi adicionada em uma solução granulante alcoólica, enquanto o acetato

de noretisterona e o estradiol foram previamente solubilizados em acetona e incorporados ao sistema por meio de uma segunda solução granulante. No Protótipo 3, adotou-se a mesma estratégia do Protótipo 2, com a diferença de que 50% da copovidona foi previamente incorporada na etapa inicial de mistura do substrato, sendo adicionada diretamente à fase interna do leito fluidizado tangencial juntamente com o amido e a lactose monoidratada.

Figura 1 - Esquema ilustrativo referente aos protótipos A) P1; B) P2; e C) P3.



Fonte: Elaboração própria.

2.3. Processo de Manufatura dos Protótipos

A granulação úmida foi realizada em leito fluidizado tangencial de bancada (Huttlin Bosch solidlab-1). As matérias-primas da fase interna foram misturadas e fluidizadas em ar aquecido a 70±10°C. As soluções granulantes foram aspergidas (bico de 0,5 mm, taxa de 25±5 g/min, pressão de atomização de 0,28 bar) enquanto o produto era mantido entre 35±5°C. Após a aplicação, o granulado foi seco até a porcentagem de voláteis residual de 2,0±0,5% e normalizado em moinho cônico com malha raladora de 1,25 mm. Os parâmetros empregados durante a aplicação, incluindo os valores teóricos (set points) e os valores efetivamente registrados ou dados reais, estão apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Valores teóricos e dados reais utilizados na etapa de aplicação das soluções no leito fluidizado tangencial.

Testes	Dados Teóricos	Dados reais		
		P1	P2	P3
Tamanho do lote (g)	500	500	500	500
Fluxo de ar (m^3/h)	40 a 50	49	47	48
Temp. ar de entrada (°C)	50 a 60	50	53	52
Temp. do produto (°C)	35 a 45	39	41	38
Temp. de exaustão (°C)	28 a 35	31	33	31
Velocidade bomba (g/min)	5 a 7	7	5	5
Pressão do ar de atomização (bar)	0,77	0,77	0,77	0,77
Pressão do ar de microclima (bar)	0,261	0,261	0,261	0,261
Tempo de pulso do filtro (s)	3 a 5	4	4	4
Pressão do pulso do filtro (bar)	0,5 a 0,7	0,6	0,5	0,5
Umidade Residual (%)	Máx 6,0%	3,1	3,4	3,2
Aspecto Final	Granulado livre de grumos, branco a quase branco, uniforme.	Granulado livre de grumos, branco a quase branco, uniforme.	Granulado livre de grumos, branco a quase branco, uniforme.	Granulado livre de grumos, branco a quase branco, uniforme.
Tempo de processo (min)	Informativo	75	83	85

Fonte: Elaboração própria.

O fluxo de ar obtido durante a etapa de fluidização durante todo o processo variou entre 47-49 m /h, a temperatura do ar de entrada entre 50-53 °C e a temperatura do produto entre 38-41 °C. A velocidade da bomba peristáltica durante a aplicação da solução granulante foi de 5-7 g/min, e a umidade residual dos granulados, determinada por perda por secagem, foi de 3,1% (P1) a 3,4% (P2), com P3 a 3,2%. O rendimento dos lotes variou entre 98,3% (P3) e 99,1% (P2).

Após a etapa de granulação, o granulado obtido foi submetido à mistura final em misturador do tipo "V", na qual foi incorporado estearato de magnésio de origem vegetal, previamente calibrado em peneira ASTM 60. A mistura foi conduzida por um período de 3 minutos, com rotação ajustada para 18 rpm. Em seguida, o processo de compressão foi realizado em compressora rotativa semiautomática (Bosch/Manesty XPRESS), empregando punções circulares bicôncavas de 6,5 mm de diâmetro. Os parâmetros de ajuste do processo, in-

cluindo peso, dureza e altura dos comprimidos, não são apresentados em detalhe neste estudo por razões de sigilo industrial, sendo, entretanto, continuamente monitorados de modo a assegurar o atendimento às especificações estabelecidas para peso médio (105 mg ± 5 mg), altura (3,0 mm ± 0,5 mm), diâmetro (6,5 mm ± 0,1 mm), dureza (65 N ± 25 N), desintegração (≤ 30 minutos) e friabilidade (≤ 1,5%). Posteriormente, os comprimidos foram submetidos à etapa de revestimento, a qual foi realizada em revestidora semiautomática de comprimidos (BOHLE BFC5), utilizando-se o sistema de revestimento Opadry QX White®.

2.4. Caracterização dos Granulados e Comprimidos

As seguintes propriedades físicas dos granulados e comprimidos foram avaliadas:

- Granulometria dos Granulados: O perfil granulométrico foi determinado por peneiramento em plataforma vibratória (Fritsch Analysette 3 PRO), utilizando peneiras de 840 µm, 600 µm, 400 µm, 250 µm e 90 µm. O ensaio foi conduzido sob condições experimentais controladas, com tempo de peneiramento de 5 minutos e amplitude de vibração ajustada para 1, assegurando a reprodutibilidade e a confiabilidade dos dados obtidos.

- Propriedades de Fluxo dos Granulados: A determinação do ângulo de repouso foi realizada utilizando um equipamento semiautomático (Granulate flow tester Erweka – modelo GT/GTB), configurado com funil de 250 mL, abertura nº 15, altura de 14 cm e base fixa. Para a medição, 50 g da amostra foram pesadas e transferidas para o funil, permitindo o escoamento livre do material até a formação do cone. As densidades aparente e compactada foram determinadas pelo método volumétrico, utilizando 50 g de granulado, com leitura direta do volume antes e após compactação padronizada em equipamento semiautomático (Granulate Flow Tester Erweka, modelo GT/GTB). Para essa análise, a mesma amostra utilizada na densidade aparente foi submetida a 1.250 batidas padronizadas, com posterior leitura do volume ocupado; os ensaios foram realizados em triplicata e os resultados expressos como média aritmética.

- Umidade dos Granulados e Comprimidos: A umidade dos materiais foi aferida por termogravimetria em balança termoanalítica (OHAUS MB35), utilizando amostras de 5 g submetidas à temperatura de 105°C até peso constante.

- Análise física dos comprimidos (não revestidos e revestidos): As características físicas dos comprimidos foram avaliadas por meio da determinação do peso médio, utilizando balança analítica, a partir da análise de 20 unidades. A dureza foi determinada em durômetro semiautomático, com a avaliação de 10 comprimidos. A friabilidade foi

avaliada em friabilômetro semiautomático, empregando-se 20 comprimidos, submetidos à rotação de 25 rpm por um período de 4 minutos. O ensaio de desintegração foi conduzido em desintegrador semiautomático, com a utilização de 6 comprimidos imersos em água purificada mantida a 37 °C ± 1 °C. A espessura dos comprimidos foi determinada com o auxílio de paquímetro, a partir da medição de 20 unidades. Todos os ensaios foram realizados de acordo com os métodos estabelecidos na Farmacopeia Brasileira, 6ª edição (BRASIL, 2019).

2.5. Determinação do Perfil de Dissolução Comparativo

A dissolução dos comprimidos foi feita em meio de tampão fosfato pH 6,8 em volume total de 1000 mL. O volume de injeção das amostras utilizado foi de 200 µL. A cuba de dissolução foi equipada com o aparato II (pás), a 50 rpm e temperatura de 37,0 ± 0,5ºC. O tempo de dissolução foi de 30 minutos, com amostras coletadas em 5, 10, 15, 20 e 30 minutos.

A quantificação do acetato de noretisterona e do estradiol nas amostras provenientes do ensaio de dissolução foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência (equipamento HPLC Thermo Fischer, modelo VANQUISH DUO), utilizando coluna Inertsil ODS-2 (4,6 150 mm, 5 µm), detector UV, fluxo de 2,0 mL/min, temperatura do forno de 45 °C, volume de injeção de 200 µL e fase móvel composta por água ultrapurificada (fase A) e acetonitrila grau HPLC (fase B). Para o acetato de noretisterona, empregou-se eluição isocrática (40:60, A:B), com detecção a 241 nm e tempo de retenção aproximado de 3,5 minutos, enquanto para o estradiol utilizou-se eluição em gradiente, com detecção a 280 nm e tempo de retenção aproximado de 3,0 minutos.

A dissolução foi avaliada conforme critérios constantes na RDC 31/2010, incluindo avaliação de dissolução "muito rápida" (>85% em 15 minutos com DPR <10%) e cálculo do fator de similaridade (F2) para perfis comparativos (F2 entre 50 e 100, com variabilidade de DPR ≤ 20% nos primeiros tempos e ≤ 10% nos últimos). A adequabilidade do sistema cromatográfico foi avaliada com base no número de pratos teóricos (≥ 1000), fator de cauda entre 0,8 e 1,8, desvio padrão relativo das injeções da solução padrão de calibração ≤ 5,0% e erro percentual das soluções padrão de verificação e confirmação dentro de ± 5%. A quantificação dos IFAs foi realizada por comparação das áreas dos picos cromatográficos das amostras com as soluções padrão correspondentes, conforme sequência de injeções previamente estabelecida.

2.6. Estudo de Estabilidade

O Protótipo P3 foi submetido a um estudo de estabilidade acelerado em câmara climática (Mecalor), sendo o medicamento acondicionado em sua embalagem primária (blister de alumínio e PVC/PVDC 250/120 µm) por um período de seis meses, sob condições de 40 °C ± 2 °C e umidade relativa de 75% ± 5%. As avaliações foram realizadas no período inicial, após 3 meses de incubação e finalizando em 6 meses de incubação, contemplando os atributos críticos de qualidade, como descrição, desintegração, umidade, teor de IFAs e perfil de dissolução. A descrição foi avaliada por inspeção visual quanto à cor, forma e integridade física dos comprimidos. A desintegração foi determinada conforme farmacopeia brasileira 6ª edição (BRASIL, 2019), utilizando desintegrador do fabricante Erweka, modelo ZT 304 com temperatura do banho de 37ºC ± 1ºC. A determinação do teor de umidade por termogravimetria e a quantificação dos IFAs por HPLC foram realizadas conforme método descrito anteriormente.

3. Resultados

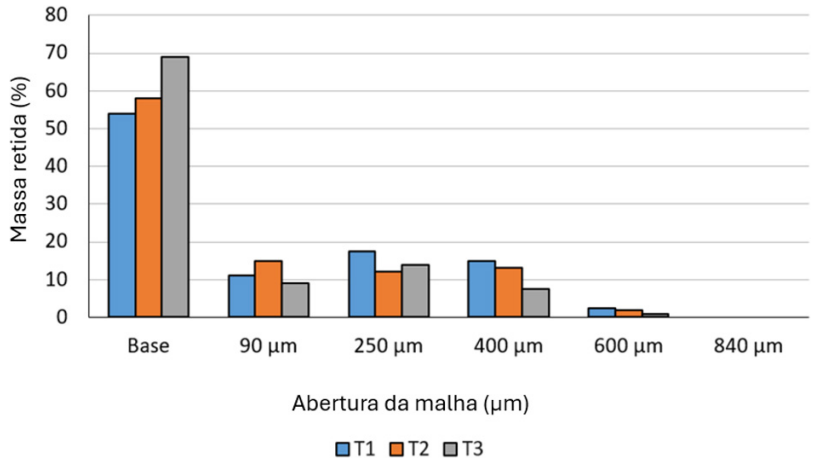
3.1. Processo de Granulação e Propriedades dos Granulados

Todos os protótipos obtiveram resultados de umidade inferior a 6 %, ideal para evitar aderência ao ferramental de punções no momento da compressão para formação dos comprimidos.

A análise granulométrica dos granulados finais (**Figura 2**) mostrou predominância de partículas finas, sendo: P1 - 54% retido na base (<90 µm), 11% em 90 µm, 17,5% em 250 µm, 15% em 400 µm, 2,5% em 600 µm; P2 - 58% retido na base (<90 µm), 15% em 90 µm, 12% em 250 µm, 13,2% em 400 µm, 1,8% em 600 µm; P3 - 69% retido na base (<90 µm), 9% em 90 µm, 13,8% em 250 µm, 7,4% em 400 µm, 0,8% em 600 µm. O Protótipo P3 apresentou a maior porcentagem de material fino (<90 µm), que foi de 69%, indicando um menor tamanho médio de partícula entre os protótipos avaliados. Para formulações contendo fármacos de baixa dosagem e baixa solubilidade, como o acetato de noretisterona e o estradiol, este perfil granulométrico atua como um Atributo Crítico de Qualidade (CQA) decisivo. A elevada proporção de finos promove um aumento exponencial na área superficial específica do sistema. De acordo com a cinética de Noyes-Whitney, essa maximização da área de contato é o mecanismo primário para elevar a taxa de dissolução, justificando o excelente desempenho do P3, que atingiu dissolução praticamente completa em 30 minutos (liberação "muito rápida") e garantiu a similaridade ($F_2 > 50$) com o medicamento de referência (WEWERS *et al.*, 2022). Além disso, a predominância de

grânulos finos obtidos via leito fluidizado tangencial assegura uma distribuição estatística otimizada dos IFAs na mistura pré-compressão. Em formulações de baixa dosagem, esta homogeneidade intrínseca da fase sólida é fundamental para mitigar riscos de segregação, garantindo reprodutibilidade na uniformidade de conteúdo e o atendimento aos rigorosos critérios compendiais (ROHRS *et al.*, 2006; ERVASTI *et al.*, 2020).

Figura 2 - Resultado do perfil granulométrico das misturas finais obtidas após etapa de mistura final.



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com os critérios propostos por Prista *et al.* (1995), as propriedades de fluxo dos granulados foram classificadas como razoáveis para todos os protótipos avaliados. Este nível de escoabilidade é altamente positivo e atesta a viabilidade industrial do processo, pois assegura a alimentação contínua e o enchimento uniforme das matrizes na compressora rotativa. Na prática, garante a mitigação de desvios críticos de peso médio e a manutenção da estabilidade operacional em alta escala.

O P1 apresentou densidade aparente de 0,64 g/mL e densidade compactada de 0,77 g/mL, ângulo de repouso de 38,6°, índice de Carr de 16,9% e fator de Hausner de 1,203. Para o Protótipo 2, observaram-se densidade aparente de 0,66 g/mL, densidade compactada de 0,79 g/mL, ângulo de repouso de 37,4°, índice de Carr de 16,5% e fator de Hausner de 1,197. Já o Protótipo 3 apresentou densidade aparente de 0,62 g/mL, densidade compactada de 0,74 g/mL, ângulo de repouso de 36,8°, índice de Carr de 16,2% e fator de Hausner de 1,194. Todos os parâmetros avaliados enquadraram-se nos intervalos de referência estabelecidos, indicando comportamento de escoamento aceitável dos granulados.

A escolha da granulação úmida em leito fluidizado tangencial mostrou-se uma abordagem tecnológica apropriada para esta formulação de baixa dosagem, permitindo um controle eficaz sobre a formação dos grânulos. As propriedades de fluxo "razoáveis" (ângulo de repouso entre 36,8° e 38,6°, índice de Carr entre 16,2% e 16,9% e fator de Hausner entre 1,194 e 1,203) para todos os protótipos foram suficientes para garantir um bom desempenho na compressão, minimizando problemas como segregação e falhas na compactação. A granulometria dos granulados, com uma alta proporção de finos (<90 µm), especialmente no P3 (69%), favoreceu uma maior área superficial para dissolução e contribuiu para a uniformidade da mistura.

O P3 apresentou a maior fração de partículas finas (< 90 µm), com 69% do material retido na base, indicando menor tamanho médio de partícula em comparação ao P2 (58%) e ao P1 (54%). De forma geral, todos os protótipos exibiram predominância de material fino, com valores superiores a 50%, destacando-se o P3, o que sugere maior potencial de homogeneidade do granulado.

3.3. Propriedades Físicas dos Comprimidos

Os comprimidos não revestidos (núcleos) produzidos atenderam as especificações descritas na Farmacopeia Brasileira 6ª edição (BRASIL, 2019), sendo: (i) a dureza média de 55 N ± 0,3% (P1) e 52 N ± 0,2% (P2); (ii) a friabilidade de 0,08% (P1) e 0,05% (P2), bem abaixo do máximo de 1,5%; (iii) os tempos de desintegração de 252 s para P1 e 230 s para P2, dentro do máximo de 30 minutos; (iv) a espessura de 2,8 mm para ambos os protótipos; (v) a umidade média de 3,56% ± 0,5% (P1) e 3,45% ± 0,2% (P2), abaixo do máximo de 6,0%.

Os comprimidos revestidos também atenderam às especificações estabelecidas pela Farmacopeia Brasileira, 6ª edição (BRASIL, 2019). O peso médio foi de 110 mg para P1 e P3, com desvio padrão relativo (DPR) de 0,69% e 0,88%, respectivamente, e de 108 mg para P2 (DPR de 0,93%), indicando uniformidade de massa entre os lotes avaliados. Os tempos de desintegração foram de 295 s (P1), 253 s (P2) e 215 s (P3), todos significativamente inferiores ao limite máximo de 30 minutos recomendado para comprimidos revestidos, evidenciando que o revestimento não exerceu efeito limitante sobre a desintegração do sistema. A umidade média dos comprimidos revestidos variou de 3,56% (P2) a 3,91% (P3), com desvio padrão relativo (DPR) de 0,53% e 0,64%, respectivamente, permanecendo em níveis compatíveis com a estabilidade física da forma farmacêutica. Esses resultados sugerem que o processo de revestimento foi adequadamente controlado, não comprometendo as propriedades físico-farmacêuticas dos comprimidos, além de indicar potencial impacto positivo na proteção do núcleo e na reprodutibilidade do processo.

3.4. Perfil de Dissolução Comparativo

O medicamento de referência Natifa Pro®, avaliado conforme a RDC nº 31/2014, apresentou perfil de dissolução classificado como "muito rápido" para ambos os insumos farmacêuticos ativos em todos os ensaios comparativos, conforme resultados agrupados na **Tabela 2**. Em todas as condições avaliadas, observou-se liberação superior a 85% dos ativos do produto de referência em até 15 minutos, com valores de desvio padrão relativo consistentemente inferiores a 10%, evidenciando elevada reprodutibilidade dos ensaios.

Tabela 2 - Resultados de perfil de dissolução comparativo do medicamento referência versus os Protótipos P1, P2 e P3 para ambos os IFAs o acetato de noretisterona (AN) e estradiol (ES)

				Dissolução média (%)	
Protótipo	IFA	Velocidade de rotação (rpm)	Tempo (min)	Referência	'Protótipo
P1	AN	50	5	42,0 ± 23,8	26,4 ± 9,9
		50	10	82,2 ± 9,1	49,8 ± 3,3
		50	15	92,3 ± 4,3	70,6 ± 2,2
		50	20	97,0 ± 1,9	86,6 ± 1,8
		50	30	98,8 ± 0,9	98,9 ± 2,5
		150	30 (spín)	100,2 ± 0,8	101,0 ± 1,4
	ES	50	5	42,3 ± 27,2	23,0 ± 10,9
		50	10	84,2 ± 9,7	50,9 ± 4,1
		50	15	92,3 ± 4,0	72,8 ± 1,8
		50	20	94,5 ± 1,5	89,9 ± 2,4
		50	30	98,5 ± 0,5	101,8 ± 2,8
		150	30 (spín)	98,0 ± 0,6	104,5 ± 1,6
P2	AN	50	5	38,7 ± 22,1	26,0 ± 10,1
		50	10	77,3 ± 8,3	49,8 ± 4,2
		50	15	88,9 ± 4,1	70,8 ± 2,2
		50	20	94,7 ± 1,7	87,4 ± 1,9
		50	30	97,5 ± 1,1	99,3 ± 2,7
		150	30 (spín)	98,8 ± 0,9	100,4 ± 1,6
	ES	50	5	34,3 ± 26,2	23,1 ± 23,1
		50	10	75,2 ± 9,9	50,0 ± 4,5
		50	15	89,5 ± 3,8	72,1 ± 2,2
		50	20	93,2 ± 1,5	90,6 ± 2,4
		50	30	96,5 ± 0,9	101,6 ± 3,1
		150	30 (spín)	97,7 ± 0,7	103,7 ± 1,4
P3	AN	50	5	49,6 ± 35,3	54,4 ± 10,4
		50	10	86,1 ± 9,7	76,0 ± 5,3
		50	15	94,1 ± 3,9	86,4 ± 3,7
		50	20	96,8 ± 1,6	91,3 ± 2,7
		50	30	98,3 ± 1,1	95,5 ± 1,7
		150	30 (spín)	101,1 ± 0,9	100,9 ± 0,5
	ES	50	5	49,4 ± 35,6	57,5 ± 10,4
		50	10	86,2 ± 9,4	79,0 ± 5,2
		50	15	94,2 ± 3,8	88,2 ± 3,6
		50	20	96,5 ± 1,4	93,1 ± 3,1
		50	30	97,9 ± 1,0	97,0 ± 1,9
		150	30 (spín)	99,3 ± 0,8	102,4 ± 0,8

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados do perfil de dissolução do P1 para o AN evidenciam uma liberação progressiva do fármaco ao longo do tempo, porém inferior à observada para o medicamento de referência nos tempos iniciais. Em 15 minutos, o P1 apresentou dissolução média de 70,6%, valor abaixo do critério de 85% =estabelecido para a classificação de dissolução "muito rápida". Ao apresentar 70,6% de liberação em 15 minutos, o P1 não atende ao critério de dissolução 'muito rápida' (≥ 85% em 15 minutos) preconizado pela RDC 31/2010 e alcançado pelo medicamento de referência. A implicação direta deste descompasso inicial em um fármaco de baixa solubilidade é a alta probabilidade de reprovação no cálculo do Fator de Similaridade (F2) in vitro e o risco crítico de falha em estudos in vivo de Bioequivalência (impacto em Cmax).

De forma semelhante ao observado para o AN, o P1 contendo ES apresentou uma cinética de dissolução mais lenta nos tempos iniciais em comparação ao medicamento de referência. Em 15 minutos, a liberação média foi de 72,8%, permanecendo abaixo do limiar de 85% requerido para dissolução "muito rápida". A partir de 20 minutos, o perfil do P1 torna-se comparável ao do medicamento de referência, atingindo 89,9% de dissolução, com completa liberação em 30 minutos. Esses achados indicam que, apesar de atingir a liberação completa aos 30 minutos, o comportamento do estradiol no P1 reflete a mesma limitação técnica e regulatória observada para o acetato de noretisterona. O valor de 72,8% em 15 minutos impede a classificação do perfil como 'muito rápido' segundo as diretrizes da RDC 31/2010, distanciando-se do comportamento do medicamento de referência.

O perfil de dissolução do P2 para o AN apresentou comportamento semelhante ao observado para o P1, caracterizando uma liberação gradual do fármaco. Em 15 minutos, a dissolução média foi de 70,8%, valor inferior ao observado para o medicamento de referência e abaixo do critério de dissolução "muito rápida". A partir de 20 minutos, observou-se convergência entre os perfis, com liberação superior a 85% e completa dissolução em 30 minutos. Esses resultados classificam o P2 como de dissolução "rápida", porém indicam que a formulação não favoreceu uma liberação inicial suficientemente acelerada para atender aos critérios mais restritivos da RDC nº 31/2010.

Para o ES, o P2 apresentou desempenho equivalente ao observado para o AN, com liberação inicial limitada e maior variabilidade no primeiro tempo avaliado, evidenciada pelo DPR de 23,1% em 5 minutos. Em 15 minutos, a dissolução média atingiu 72,1%, permanecendo abaixo do critério de 85% exigido para a classificação da dissolução como "muito rápida". Contudo, a partir de 20 minutos, o perfil do P2 tornou-se semelhante ao do medicamento de referência, atingindo 90,6% de dissolução, com liberação completa em 30 minutos. Esses resultados indicam que, embora o P2 apresente desempenho adequado em termos de liberação total e reprodutibilidade nos tempos posteriores, a cinética inicial de dissolução do ES mostrou-se desfavorável quando comparada ao medicamento de referência.

O P3 apresentou desempenho significativamente superior aos demais protótipos para o AN, com perfil de dissolução classificado como "muito rápido". A liberação de 86,4% em 15 minutos, associada a valores de DPR inferiores a 10% nos tempos críticos, atende plenamente aos critérios estabelecidos pela RDC nº 31/2010. Embora a liberação inicial em 5 e 10 minutos tenha sido ligeiramente inferior à do medicamento de referência, observou-se rápida convergência entre os perfis a partir de 15 minutos, com completa dissolução ao final do ensaio. Esses resultados indicam que a formulação do P3 favoreceu uma cinética de dissolução adequada, compatível com a do produto de referência.

O mesmo foi observado para o ES, tendo o P3 também demonstrado perfil de dissolução "muito rápido", atingindo 88,2% de liberação em 15 minutos, com DPR de 3,6%, valor comparável ao observado para o medicamento de referência. A liberação inicial foi superior à observada nos Protótipos P1 e P2, evidenciando melhoria significativa na cinética de dissolução. A partir de 15 minutos, os perfis do P3 e do material de referência mostraram-se altamente semelhantes, com dissolução praticamente completa em 30 minutos. Adicionalmente, o cálculo do fator de similaridade (F_2 = 58 para AN e F_2 = 61 para ES) confirmou a equivalência entre os perfis de dissolução do P3 e do medicamento de referência para ambos os IFAs, reforçando a adequação da formulação e seu potencial para atendimento aos requisitos regulatórios.

O papel da copovidona como aglutinante e solubilizante foi determinante. A estratégia de particionar sua adição, com metade na fase interna e a outra metade na solução granulante, otimizou a interação entre o polímero, os IFAs e os excipientes. Essa abordagem resultou em granulados com granulometria predominantemente fina (69% das partículas < 90 µm) e um perfil de dissolução adequado à RDC 31/2010, classificado como "muito rápido". A comprovação da similaridade do perfil (F2) entre o Protótipo 3 e o medicamento de referência é um forte indicativo de equivalência farmacêutica. Em paralelo, a tecnologia avançada do leito fluidizado tangencial atuou como o grande diferencial mecânico do processo. A força de cisalhamento característica deste equipamento impediu a formação de grânulos densos e grosseiros, garantindo uma distribuição de partículas finas altamente uniformes. Essa maximização da área de superfície de contato, operando em perfeita sinergia com a rápida molhabilidade induzida pela copovidona, foi o fator determinante para contornar a baixíssima solubilidade dos fármacos. O sucesso desta abordagem consolida o leito tangencial como uma tecnologia imprescindível para viabilizar formulações desafiadoras frente aos mais rigorosos padrões normativos.

3.5. Estudo de Estabilidade

Devido ao melhor resultado nos estudos do perfil de dissolução comparativo, o P3 foi submetido ao estudo de estabilidade acelerada por 6 meses, cujos resultados estão consolidados na **Tabela 3**, demonstrando a estabilidade físico-química da formulação.

Tabela 3 - Resultados de estudo de estabilidade acelerado do P3 em 6 meses, com umidade relativa de 75% ± 5%

Produto: Acetato de noretisterona + Estradiol 0,5:1,0mg/ comp. revestido	Data de fabricação: 04/2024
Apresentação: Comprimido revestido	Data de início do estudo: 05/2024
Embalagem primária: Blister de PVC/PVDC 250:120 + Aluminio 25µm	Protótipo P3

Testes	Especificação de Estabilidade	Inicial	03 meses	06 meses
Descrição	Comprimido revestido branco, circular, biconvexo, liso, com núcleo branco	De acordo	De acordo	De acordo
Desintegração em água a 37°C	Máximo 30 minutos	02'42"	01'45"	01'38"
Umidade	Máximo 6,0 %	3,6%	3,9%	4,0%
Teor: Estradiol	95,0 – 105,0%	102,3%	100,6%	100,0%
Teor: Acetado de Noretisterona	92,5 – 105,0%	100,0%	99,6%	99,5%
Dissolução: Estradiol	Mínimo 80% (Q) em 30 minutos	Mín.97% Méd.100%±0,4%	Mín.95% Méd.95%±0,3%	Mín.96% Méd.98%±0,5%
Dissolução: Acetato de Noretisterona	Mínimo 80% (Q) em 30 minutos	Mín.92 Méd.96%±0,2%	Mín.89 Méd.91%±0,6%	Mín.91% Méd.93%±0,4%

Fonte: Elaboração própria.

Ao longo do estudo de estabilidade acelerada de 6 meses, os comprimidos mantiveram inalteradas suas características de descrição visual, apresentando-se brancos, circulares, biconvexos, lisos e com núcleo branco. O tempo de desintegração apresentou redução progressiva, passando de 162 s no tempo inicial para 105 s aos três meses e 98 s aos seis meses, permanecendo amplamente abaixo do limite farmacopéico máximo de 30 minutos. O teor de umidade apresentou discreto incremento ao longo do período avaliado, variando de 3,6% no tempo inicial para 3,9% aos três meses e 4,0% aos seis meses, mantendo-se dentro da especificação estabelecida de até 6,0%.

Os teores dos IFAs permaneceram estáveis durante todo o estudo, com o ES apresentando valores de 102,3%, 100,6% e 100,0% nos tempos inicial, três e seis meses, respectivamente, dentro da faixa especificada de 95,0–105,0%. De forma semelhante, o teor de AN variou de 100,0% no tempo inicial para 99,6% aos três meses e 99,5% aos seis meses, atendendo à especificação de 92,5–105,0%. A dissolução manteve-se estável ao longo do estudo, com percentuais mínimos de dissolução do estradiol de 97%, 95% e 96% e médias de 100%±0,4%, 95%±0,3% e 98%±0,5% nos respectivos tempos, enquanto o AN apresentou percentuais mínimos de 92%, 89% e 91% e médias de 96%±0,2%, 91%±0,6% e 93%±0,4%. Em todos os tempos avaliados, os resultados de dissolução atenderam ao critério mínimo de 80% em 30 minutos.

Os resultados do estudo de estabilidade físico-química do P3, conduzido por 6 meses sob condições aceleradas (40 °C/75% UR), portanto, demonstraram a manutenção dos atributos críticos de qualidade ao longo do período avaliado. Foram observadas a preservação da descrição visual, a redução dos tempos de desintegração, o atendimento contínuo às especificações de teor dos ingredientes farmacêuticos ativos (IFAs) e a manutenção do perfil de dissolução classificado como rápido. Esses resultados indicam que a formulação mantém desempenho consistente ao longo do tempo, sustentando sua adequação aos requisitos regulatórios.

5. Conclusão

O presente trabalho demonstrou que a granulação úmida em leito fluidizado tangencial é uma alternativa tecnológica eficaz para a formulação de comprimidos de acetato de noretisterona e estradiol. Essa técnica permitiu a obtenção de granulados com propriedades físicas adequadas para o processo produtivo, como propriedades de fluxo, densidade, perfil granulométrico e umidade, garantindo a qualidade do produto final e o cumprimento dos requisitos técnicos e regulatórios. Os resultados obtidos ao longo de seis meses sob condições aceleradas de estabilidade (40 °C/75% UR) evidenciaram a conformidade contínua com os requisitos técnicos estabelecidos na Farmacopeia Brasileira (BRASIL, 2019). A aplicação da técnica de granulação empregada possibilitou a obtenção de granulados com propriedades físicas compatíveis com o processo produtivo, incluindo comportamento de fluxo, densidades aparente e compactada, distribuição granulométrica e teor de umidade controlado, contribuindo para a manutenção da qualidade do produto. Adicionalmente, os dados gerados atendem às exigências regulatórias da Anvisa para a comprovação da estabilidade físico-química e do desempenho biofarmacêutico da formulação.

A alteração na ordem de adição da copovidona mostrou-se um parâmetro determinante no desempenho da formulação. A estratégia empregada no Protótipo 3, com a incorporação de metade da copovidona na fase interna e a outra metade na solução granulante foi possível atingir o perfil de dissolução classificado como muito rápido, tal qual o medicamento de referência, classificando-o como equivalente farmacêutico, de acordo com a RDC 31/2014.

Concluiu-se que o Protótipo 3 atingiu um perfil de dissolução "muito rápido", liberando 86,4% do acetato de noretisterona (DPR de 3,7%) e 88,2% do estradiol (DPR de 3,6%) em até 15 minutos, de acordo com a RDC 31/2014. Além disso, demonstrou similaridade (F2) com o medicamento de referência para ambos os princípios ativos. A estabilidade físico-química da formulação foi confirmada por meio do estudo de estabilidade acelerada de 6 meses, que demonstraram a manutenção dos atributos críticos de qualidade do Protótipo 3, incluindo características físicas, desintegração, teor de umidade, teor dos IFAs e perfil de dissolução classificado como "muito rápido". Esses resultados confirmam a estabilidade físico-química da formulação e sua conformidade com os requisitos técnicos e regulatórios.

Como etapa subsequente, recomenda-se a realização de estudos de escalonamento do processo, visando avaliar a viabilidade técnica da formulação em escala industrial, bem como a reprodutibilidade do processo, a robustez dos parâmetros críticos e a manutenção dos atributos críticos de qualidade, subsidiando a transferência de tecnologia e a aplicação industrial da formulação.

6. Referências

AMIDON, Gordon L.; LENNERNÄS, Hans; SHAH, Vinod P.; CRISON, John R. **A theoretical basis for a biopharmaceutic drug classification: the correlation of in vitro drug product dissolution and in vivo bioavailability**. Pharmaceutical Research, v. 12, n. 3, p. 413-420, mar. 1995. DOI: 10.1023/A:1016212804288.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (Brasil). Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 31, de 11 de agosto de 2010. **Dispõe sobre a realização dos Estudos de Equivalência Farmacêutica e de Perfil de Dissolução Comparativo**. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 12 ago. 2010.

ASHLAND INC. **Plasdone™ S-630 copovidone**. Wilmington, DE: Ashland, [s. d.]. Disponível em: https://www.ashland.com/industries/pharmaceutical/oral-solid-dose. Acesso em: 13 jan. 2025.

ASSIS, João Marcos Cabral de. **Preparação e caracterização físico-química de dispersões sólidas de flubendazol obtidas por extrusão a quente**. 2017. Dissertação (Mestrado em Fármaco e Medicamentos) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. DOI: 10.11606/D.9.2018.tde-29012018-145326.

BRASIL. **Agência Nacional de Vigilância Sanitária**. Farmacopeia Brasileira. 6a. ed. Brasília, DF: ANVISA, 2019. v. 2.

ERVASTI, T. *et al.* **The comparison of two challenging low dose APIs in a continuous direct compression process**. Pharmaceutics, Basel, v. 12, n. 3, art. 279, mar. 2020. DOI: 10.3390/pharmaceutics12030279.

HEMATI, M.; CHERIF, R.; SALEH, K.; PONT, V. **Fluidized bed coating and granulation: influence of process-related variables and physicochemical properties on the growth kinetics.** Powder Technology, v. 130, n. 1-3, p. 18-34, 2003. DOI: 10.1016/S0032-5910(02)00221-8.

PANDEY, Preetanshu; BADAWY, Sherif. **A quality by design approach to scale-up of high-shear wet granulation process**. Drug Development and Industrial Pharmacy, v. 42, n. 2, p. 175-189, 2015. DOI: 10.3109/03639045.2015.1100199.

PARIKH, D. M.; BONCK, J. A.; MOGAVERO, M. **Batch fluid bed granulation**. In: PARIKH, D.

M. (ed.). **The handbook of pharmaceutical granulation technology**. New York: Marcel Dekker, 1997.

PRISTA, L. N. *et al.* **Tecnologia farmacêutica**. 5. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1995.

ROHRS, Brian R. *et al.* **Particle size limits to meet USP content uniformity criteria for tablets and capsules**. Journal of Pharmaceutical Sciences, v. 95, n. 5, p. 1049-1059, maio 2006. DOI: 10.1002/jps.20587.

WEWERS, Martin *et al.* **Evaluation of the formulation parameter-dependent redispersibility of API nanoparticles from fluid bed granules**. Pharmaceutics, Basel, v. 14, n. 8, art. 1688, ago. 2022. DOI: 10.3390/pharmaceutics14081688.

XXXXXXXXXXXXXXXX

Artigo Técnico

Identification of anomalies generated by sensors that use variants of the LEACH protocol

Haroldo da Silva Ferreira[a*], Anderson Aparecido Alves da Silva[f g h i j], Kaique Almeida Justino da Silva[b], Adilson Eduardo Guelfi[c], José Ewerton da Cruz de Souza[d], Victor Orlando Toso de Oliveira Silveira[e]

[a] Egresso do Mestrado Profissional em Engenharia da Computação, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.
[b] Egresso do Mestrado Profissional em Computação Aplicada, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.
[c] Departamento de Ciência da Computação, Unoeste, Presidente Prudente-SP, Brasil.
[d] Departamento de Ciência da Computação, UFRN, Natal-RN, Brasil.
[e] Departamento de Ciência da Computação, Unoeste, Presidente Prudente-SP, Brasil.
[f] Docente do Mestrado Profissional em Computação Aplicada, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.
[g] Departamento de Tecnologia da informação, UNIP, São Paulo-SP, Brasil.
[h] Departamento de Tecnologia da informação, SENAC, São Paulo-SP, Brasil.
[i] Departamento de Tecnologia da informação, FIAP, São Paulo-SP, Brasil
[j] Departamento de Engenharia de sistemas eletrônicos, USP, São Paulo-SP, Brasil

* e-mail: haroldo.ferreira@wilsonsons.com.br

Keywords: networks, sensors, energy, security, efficiency.

Abstract

A Wireless Sensor Network is composed of several sensor nodes that are usually energized by a battery. Many studies direct their efforts to the possibility of these devices consuming less energy. Protocols such as LEACH are used to optimize device energy consumption and minimize security features. The FTE-LEACH protocol is a variant of LEACH, which acts to mitigate failures. In this way, we propose a statistical model that uses standard deviation to identify anomalies in the collected data that could harm the behavior of the network. Through the analysis of data collected from a Wireless Sensor Network implemented with FTE-Leach protocol, we were able to detect anomalous behavior. In experiments, anomalous nodes increase the network lifetime, but create holes in the perimeter, which, depending on where the Sensor Network is applied, can become compromised or ineffective.

1 Introduction

Research on Wireless Sensor Networks (WSN) has a large range of applications. For example, there are technological applications that use the infrastructure of a WSN for the power grid, water grid, transportation, and smart homes (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2014; NARAYANAN; SARATH; VINEETH, 2016). The WSN is a concept linked to the Internet of Things (IoT). While IoT does not assume a specific communication technology, wireless communication technologies play a very important role in building optimized, scalable, secure, and efficient WSN environments (SILVA *et al.*, 2019; FERRAZ JUNIOR *et al.*, 2021). WSN allows the sensing and control of more critical environments, or inhospitable access to wired networks and support applications that require many devices, in the order of tens to hundreds of sensors (OLIVEIRA, 2015).

Even with the benefits brought using WSN, there are some issues that still deserve attention, such as problems associated with performance, security, and energy savings. Performance assurance is often a more discussed issue than power consumption in WSN (OLIVEIRA, 2015). However, since energy consumption is a security issue (FERRAZ JUNIOR *et al.*, 2021), many sensor networks currently use techniques to optimize the energy consumption of sensor nodes (SINGH; SORAM; KHAN, 2016). The data processing and transmission steps to the base station provide study opportunities to save energy and improve the efficiency of the use of network resources. Authors such as Razaque *et al.* (2016) and Handy, Haase and Timmermann (2002) state that the data transmission

step is responsible for most of the energy consumption of the sensor node batteries. According to Singh, Soram and Khan (2016), sensor nodes are able to collect data and then route it to the base station. Using this type of communication model implies high energy consumption, as some nodes are far from the base station, and, as a result, consumption is disproportionate among the sensor nodes of a WSN.

The Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) is a cluster-based protocol that uses random cluster head rotation to evenly distribute the energy load between sensor nodes (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000). For Razaque *et al.* (2016), a protocol for creating network clusters is essential in WSN that need to save energy. It is the task of the cluster head to collect the information sent by the nodes and transmit it in a grouped way to a base station, thus avoiding data transmission over very long paths, making energy consumption more equitable between the nodes.

Another energy issue occurs when a node (outlier) transmits anomaly data to the base station due to low energy (ABO-ZAHHAD *et al.*, 2015). In addition to erroneous data, sensors can transmit false data when targeted by intruders. It is difficult to provide security in WSN as sensor nodes have limited hardware resources. Therefore, it is sometimes not advantageous to use encryption mechanisms (EL-SAADAWY; SHAABAN, 2012). Thus, the recognition of anomalous nodes is a critical and challenging issue for the reliable and secure dissemination of data in WSN (ZHANG; MERATNIA; HAVINGA, 2010).

Some protocols derived from LEACH are event-driven, such as the Energy Efficient Clustering Algorithm (EECED) (BUYANJARGAL; KWON, 2009), Energy Efficient Heterogeneous Clustered (EEHC), and Fault-tolerant and Energy efficient LEACH (FTE-LEACH) for example. The FTE-LEACH protocol uses the Received Signal Strength Indicator (RSSI) to make its probabilistic choice of a new cluster head. Thus, the change of this information due to a faulty sensor node or intrusion target jeopardizes the entire performance of a WSN (OLIVEIRA, 2015). Assuming that a base station has abundant computing power and capacity, the collected data could be properly analyzed by the base station (ALI; DEY; BISWAS, 2008). This ensures the integrity of the submitted data and makes the environment more qualified for behavioral analysis. Behavior analysis is a technique that can be used to detect statistical limits, identify anomalous data, guarantee integrity, and also serve to improve the reliability of the data collected (SONGMA *et al.*, 2012).

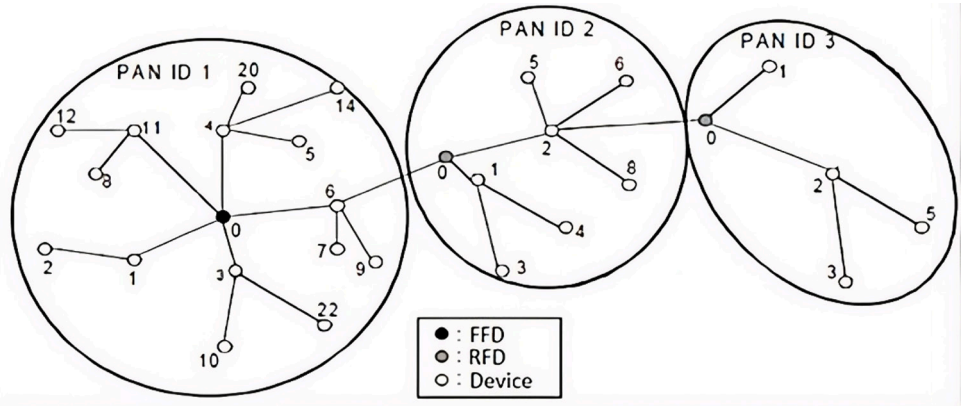
As can be seen in the referenced works, there is a need for research aimed at improving the security of the LEACH protocol variants, more specifically the analysis of energy consumption and the consequences that arise from this management, such as anomalous energy measurements. The creation of statistical models emerges as a viable alternative to alleviate these negative aspects.

This work intends to identify anomalies related to false information that is either maliciously inserted or sent unintentionally by devices with low power in variants of the LEACH protocol, working as an additional integrity layer to the information exchanged between the cluster head nodes and the base station. In addition to the Introduction, this work contains sections 2-Background and 3-Related Works, which deal respectively with the theory and the state of the art of research on LEACH. The proposal is described in section 4-Proposal, while the experiment and results are discussed in section 5-Experiments and Results and section 6-Results and general discussion. Finally, section 7-Conclusion brings conclusions about the paper.

2 Background

In a standard IEEE 802.15.4 network, two types of devices can be identified, Full Function Devices (FFD) and Reduced Function Devices (RFD). The FFD is a full-function device, as the name implies. These devices have greater processing and storage capacity on the network, in addition, the sensing function can have different activities, such as being a Cluster Head (SANTOS, 2017). For Santos (2017), the RFD, a reduced function device, is simpler, with less storage capacity, and is used at the ends of the networks, without a message resend function. These devices can only communicate with one FFD device and are not recommended for networks with many sensor nodes (IEEE 802.15.4, p. 4). **Figure 1** illustrates the IEEE 802.15.4 nodes and topology (SANTOS, 2017).

Figure 1 – IEEE 802.15.4 Topology



Source: Santos (2017)

As can be seen in **Figure 1**, the FFD node has hardware resources that meet the demand of its function, with continuous energy supply, characterizing itself as a base station – it is a Cluster Head. In turn, the RFD sensor node has sectored coordination and is generally used in clustered networks to communicate between the cluster sensor nodes and the FFD node.

The sensor node can be an FFD or RFD device, it has sensing functions and produces data to feed the WSN, and there can be several in each cluster. Since the IEEE 802.15.4 standard specifies only the physical layer and MAC, the network protocol responsible for delivering messages belongs to the network layer (OLIVEIRA, 2015). The biggest challenge is minimizing the energy consumption spent on routing tasks and maintaining aspects that preserve the quality of the network service (OLIVEIRA, 2015).

It is worth highlighting the definition of anomalous nodes in this paper. These are nodes that exhibit abnormal behaviors. These behaviors may be related to energy, processing, or even the dissemination of false messages. These nodes are called outliers precisely because they do not conform to normal patterns of behavior. Anomalous nodes pose a critical and challenging problem for WSN reliability, as they can be difficult to identify (ZHANG *et al.*, 2010).

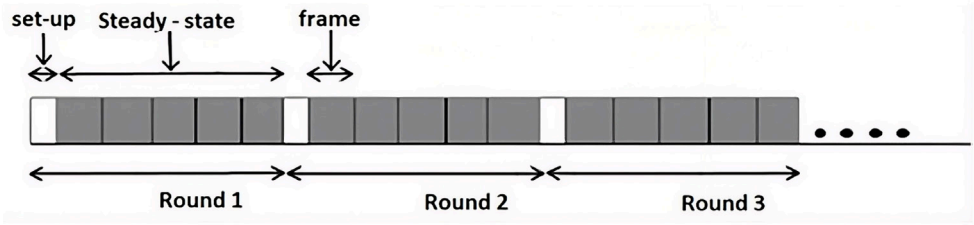
2.1 LEACH Protocol

The work of Heinzelman, Chandrakasan and Balakrishnan (2000) developed a cluster-based protocol that uses random Cluster Head rotation to evenly distribute the power load between sensor nodes. This type of protocol, called LEACH, uses coordination to allow scalability and robustness, in addition to incorporating data fusion into the routing protocol to reduce the amount of information that needs to be transmitted to the base station. Conventional direct broadcast, minimal power transmission, multi-hop routing, and static grouping protocols can be up to 80% less efficient when compared to LEACH (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000). The work of Handy, Haase and Timmermann (2002) describes the structure of the LEACH protocol, which works in two stages:

1) Set-up: corresponds to the configuration, comprising the stages of Cluster Head selection and the formation of clusters;

2) Steady-state: encompasses the aggregation and transmission of data to the base station, corresponding to the communication phase, as shown in **Figure 2**.

Figure 2 –LEACH Operation timeline



Source: Singh, Soram e Khan (2016).

As shown in **Figure 2**, the two phases (Set-up and Steady-state) take place during one round and each round has a fixed time duration. In the LEACH configuration phase, the algorithm selects the Cluster Heads, forming the cluster of nodes and assigning a Time Division Multiple Access (TDMA) slot to each member node. Each node participates in the Cluster Head election process, generating a priority value between 0 and 1.

When the generated value number for a node is less than the threshold value, then that node becomes a Cluster Head. This process is pertinent to avoid fixed Cluster Heads, which would accelerate energy consumption. The probability equation for a node to become a Cluster Head is presented below, as shown in **Equation 1**.

$$T(n) = \frac{P}{1-P\left(r \bmod \left(\frac{1}{p}\right)\right)}, \forall n \in G, T(n) = 0, \forall n \notin G \quad \textbf{(1)}$$

Where:

T(n) = probability threshold value for node n (dimensionless);

p = predefined probability of a node becoming a Cluster Head (dimensionless);

r = current round number (dimensionless);

mod = mathematical operator, which returns the remainder of a division;

n = unique identifier of the sensor node in the network (dimensionless);

G = mathematical set of sensor nodes that have not been elected as Cluster Heads in the last 1/p rounds (dimensionless);

∀= mathematical universal quantifier meaning "for all" or "for each";

∈ e ∉ = mathematical set operators meaning "belongs to" and "does not belong to", respectively".

Equation 1 shows the probability equation for electing a Cluster Head where r is the current round, T(n) is the probability of a node becoming Cluster Head in r, p is the desirable percentage of Cluster Heads, and $n \in G$ is the node which can be a candidate for Cluster Head in round r (HANDY; HAASE; TIMMERMANN, 2002).

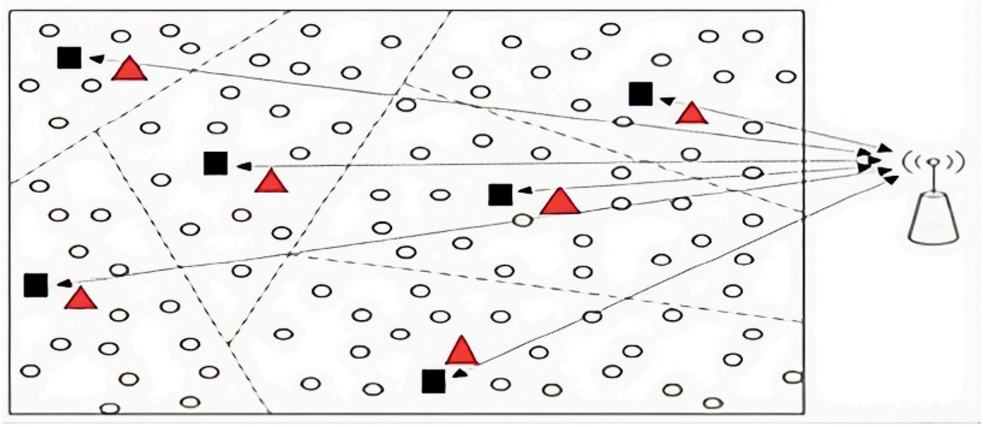
The LEACH protocol uses a probabilistic method for Cluster Head election, not based on the amount of energy that each node has, which can cause problems in the cluster formation process, giving priority to a node with low energy. If a node is used inefficiently, it is necessary to have more Cluster Heads **to form the clusters**, increasing energy consumption. In addition to the cluster creation step, the Cluster Head election determines the number of turns a network reaches (RAFIQ *et al.*, 2015). A turn is the cycle that begins with the choice of Cluster Head, followed by the formation of clusters, and ending when the last Cluster Head sends its data to the base station. A sensor is considered dead when it does not have enough power to communicate on the network and is no longer present for the next few turns. The number of turns is used to determine the lifetime of a WSN or can be used as a metric to determine the death (total power outage) of the first sensor node, the death of half of the network, and the end of the cycle of the entire network, when the last sensor dies. This metric is used by several authors, such as Abidi and Ezzedine (2017) and Abo-Zahhad *et al.* (2015), to determine the efficiency of an experiment.

To overcome this type of difficulty, Razaque *et al.* (2016) proposed an adaptation to the LEACH protocol, in its algorithm, considering the residual energy of each node to elect a Cluster Head. The algorithm, called Hybrid-Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (H-LEACH), is used to find the lifetime of each node and the WSN.

2.2 FTE-LEACH Protocol

The FTE-LEACH protocol, developed in the works of Oliveira (2015) and Souza (2017), is another variation of LEACH protocol, with **fault-tolerant and event-driven characteristics** and event driven. The purpose of FTE-LEACH is to be an energy efficient protocol while maintaining efficiency in communication and data dissemination on the network. This protocol was developed based on the IEEE 802.15.4 standard. FTE-LEACH is designed to operate on medium and large industrial WSN networks with limited energy resources. A feature that stands out in this protocol is the use of Vice Cluster-Head (VCH). This is a sensor node that will take the place of the Cluster Head in case of failure. **Figure 3** highlights each element of a network topology using FTE-LEACH.

Figure 3 – FTE-LEACH Network topology.



Source: Oliveira (2015)

In **Figure 3**, the nodes represented by circles indicate the nodes that are members of the network. The nodes represented by squares are the Cluster Heads of the round, while the nodes represented by triangles are the VCH. A differential used in FTE-LEACH to reduce interference is the use of the Four Color Theorem (HEAWOOD, 1949), distributing the clusters in a kind of map, where each cluster is represented by a color and allocated in channels. **Table 1** shows the distribution of the channels.

The channel distribution table in jumps considers the IEEE 802.15.4 standard, where there are 15 available channels on the 2.4 GHz frequency, starting at 2 and ending at 16, since channel 1 is considered the common channel of a WSN. The channels are distributed in jumps of 4, associating each color with a jump, the 4 colors represented are: Blue (B), Green (Gr), Pink (P), and Gray (G).

Table 1 – Distribution of the 15 available channels for the clusters, in steps of four, related to the Four Color Theorem.

Channels	2	6	10	14	3	7	11	15	4	8	12	16	5	9	13
Colors	B	Gr	P	G	P	Gr	P	G	B	Gr	P	G	B	G	P

Source: Oliveira (2015)

According to Oliveira (2015), the main contributions of FTE-LEACH are: reliability and availability of the network, sensing through the Cluster Head, scalability, event-driven data acquisition, prevention of intra-cluster interference, and active participation of the base station. In addition, it promises 20% more network lifetime compared to LEACH, although there is no simulation in the annexes of its work to evidence this claim.

3 Related Works

In this section, we seek to compare some relevant works that over time are related to the issues analyzed in this paper: studies on energy optimizations in WSN resulting from the application of the LEACH protocol and/or its variants; and the study of the influence of anomalies in these environments, as well as the identification of these malicious elements. **Table 2** contains a comparison between the studied references and the present paper.

Table 2 – Comparisons between related works.

Factors→ / References↓	Anomaly identification tool	Energy Saving method	Uses dataset	Simulation environment	LEACH Additional contributions	Uses LEACH	LEACH Variants
Rajasegarar *et al.* (2007)	Covariance, Mahalanobis distance	No	IBRL (INTEL BERKELEY RESEARCH LAB, 2004)	No	No	No	No
Sharma e Sharma (2012)	No	EEE-LEACH power analysis	No	MATLAB	Introduces Master Cluster Heads concept	Yes	EEE-LEACH
Tripathi *et al.* (2013)	No	Based on efficiency of protocol	No	NS-2	Yes	Yes	EELEACH-C
Abo-Zahhad *et al.* (2015)	No	Adaptative Immune Algorithm (AIA)	No	MATLAB	Introduces a mobile sink-based clustering protocol	Yes	MSIEEP
Xie, Hu e Guo (2015)	Covariance, Sperman correlation	No	IBRL (INTEL BERKELEY RESEARCH LAB, 2004)	No	No	No	No
Ferraz Junior *et al.* (2019)	Covariance, Mahalanobis, Euclidean distance	6LoWPAN Power Analysis	IBRL (INTEL BERKELEY RESEARCH LAB, 2004)	No	No	No	No
Almomani, Al-Kasasbeh e Al-Akhras (2016)	IDS, Neural Network	No	WSN-DS	NS-2	Develops a dataset	Yes	No
Ahmed *et al.* (2017)	No	Based on efficiency of protocol	No	NS-3	CH assigns a data transmission slot to each node	Yes	EESNR

Factors→ / References↓	Anomaly identification tool	Energy Saving method	Uses dataset	Simulation environment	LEACH Additional contributions	Uses LEACH	LEACH Variants
Almeida (2018)	Cluster, Mehalanobis distance	No	IBRL (INTEL BERKELEY RESEARCH LAB, 2004), LWSNDR (SUTHAHARAN *et al.*, 2010)	No	No	No	No
Mohapatra e Rath (2019)	Analyzes fault caused by power	Analyzes power depletion	No	MATLAB	Comparison with LEACH variants	Yes	PE-LEACH
Bhola, Soni e Cheema (2020)	No	Based on efficiency of protocol	No	MATLAB	Implements optimization with Genetic Algorithm	Yes	O-LEACH
Mittal *et al.* (2021)	IDS, SVM	Applies LMNN	NSLKDD	MATLAB	Comparison with EESR protocol	Yes	LEACH-LMNN
Bharany *et al.* (2021)	No	Based on efficiency of protocol	No	MATLAB	Comparison with LEACH variants, based on a flying ad-hoc network	Yes	No
Radhika e Sivakumar (2021)	No	Based on efficiency of protocol	No	MATLAB	Implements optimization with micro genetic algorithm	Yes	µGA-LEACH
Mittal *et al.* (2022)	SVM, KNN, LR	Based on efficiency of protocol and QoS	NSLKDD	MATLAB	Applies QoS	Yes	Sub-cluster LEACH
Nagarajan, Janakiraman e Balasubramanian (2022)	No	Based on efficiency of protocol	No	MATLAB	Implements optimization with Sail Fish Optimization and Jaya Algorithm	Yes	L-JSFO-LEACH
Ramya *et al.* (2022)	No	Based on efficiency of protocol	No	Yes	Analyses thermos-electrical efficiency	Yes	TN-LEACH
Ramesh *et al.* (2022)	No	Based on efficiency of protocol	No	Yes	Improvements with K-means	Yes	No
This Paper	Standard Deviation	Measurements in malicious and optimized scenarios	No	NS-3	Creates an attack environment	Yes	FTE-LEACH

Source: Elaborated by the author

The idea behind studying time frame references is simply to see if there are trends that come or go. However, as can be seen in Table 2, there is no predominance of trends over time. It is possible to see that a large part of the references, including this paper, use simulated environments to validate the results. The explanation is that since it is a driven--oriented protocol, LEACH is easily simulated, a fact that facilitates research. Although there are several variants of LEACH, the purpose of this paper is not to contribute or create a specific variant, so the choice of using FTE-LEACH happens simply because it is a protocol already used in a study focused on security (OLIVEIRA, 2015).

As it is essential in our proposal, we researched studies that carried out some type of analysis of energy consumption, including some that did not use LEACH. A point to be emphasized in this paper are the energy measurements performed in malicious (anomalous) situations and their comparison with the scenarios considered normal. Indeed, creating malicious scenarios and analyzing how anomalies can influence LEACH energy performance is one of the main contributions of this paper. There are few references that focus on security within the context studied. It is also important to point out that the anomaly identification method suggested here (standard deviation) is one of the simplest and fastest.

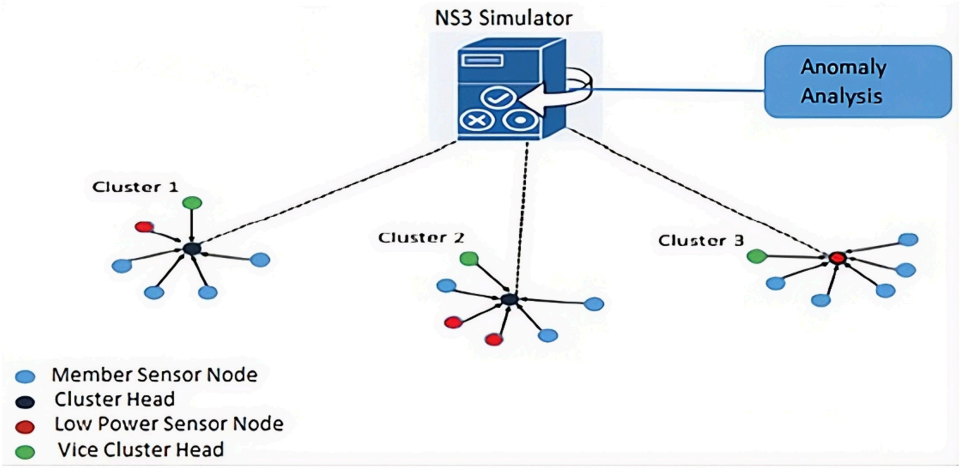
4 Proposal

It is considered that the occurrence of anomalous data (as stated in section 2) in WSN impairs the correct functioning of the environment, in addition to possibly increasing the energy consumption of the sensors and leading to the premature termination of the activities of a network (RASSAM; ZAINAL; MAAROF, 2013). The objective of the current work is to identify anomalies related to false information, maliciously inserted, or sent unintentionally by devices with power problems, in networks that use the LEACH protocol or its variants.

4.1 WSN topology using LEACH-based protocols

The topology applied to perform the simulation of a WSN that uses the LEACH protocol or its variants is shown in **Figure 4**. The base station is responsible for the analysis of anomalies, and the standard deviation model is used to identify them.

Figure 4 – WSN network topology using FTE-LEACH protocol.



Source: Elaborated by the author

The topology shown in **Figure 4**, elaborated in the NS-3 simulator, is the basis for the elaboration of the other scenarios used in this work. The scenario shows the low power nodes, which can unintentionally send false data, representing just one of the scenarios that are simulated and observed. An example of an anomalous scenario is sensor nodes that send opposite information about the current power state to other WSN nodes.

Each scenario studied uses twice as many Cluster Head sensor nodes elected in a round, when compared to normal scenarios. The works of Almomani, Al-Kasasbeh and Al-Akhras (2016), Oliveira (2015) and Souza (2017) provide the basis for using a scenario with LEACH and FTE-LEACH protocols, since the codes compiled for the simulation environments in the research are used with few alterations and serve to collect data from a standard environment. After executing the WSN lifecycle, a file with the network information is generated. Considering that energy resources are limited, anomaly identification must occur within the network itself and within the anomaly identification model executed in the base station.

4.2 Anomaly Identification Model

The purpose of anomaly detection is to identify data that does not conform to the patterns displayed by the majority of data in a set.

To perform this task, the current work presents the model for identifying anomalies. **Figure 5** shows its activity cycle, composed of 4 steps:

1) Preparation;
    a) Scenario compilation;
    b) Training and definition of statistical measures and limits;

2) Collection;
    a) Sending data from nodes;
    b) Receipt of data at the base station;
    c) Data formatting (period);
    d) Extraction of statistical characteristics;

3) Analysis;
    a) Statistical calculations of the standard deviation;

4) Comparison;
    a) General comparison of scenarios;
    b) Identification of anomalies.

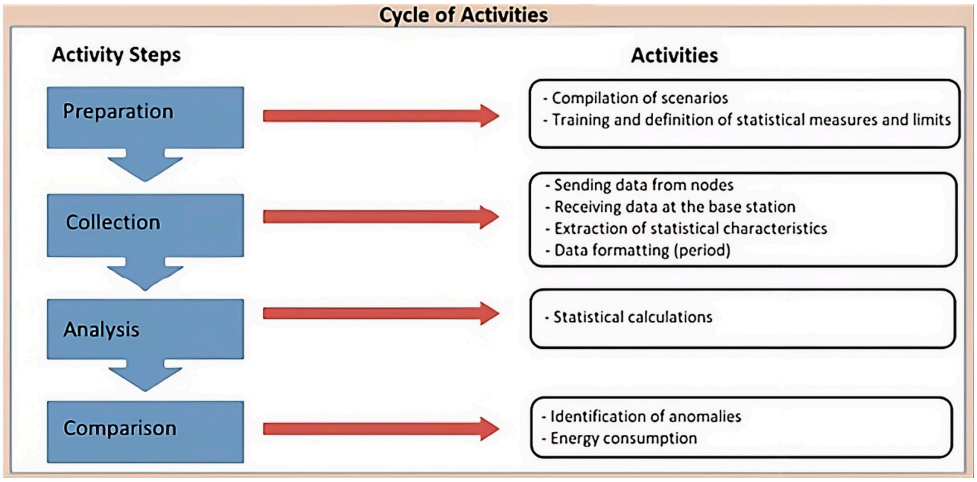
Preparation: Compile the proposed scenarios with the characteristics mentioned in Section 4.1. After the execution of the life cycle of a WSN in the simulation environment, which consists of sending the data made by the nodes, in the aggregation of the data made by the CH and sending it to the base station. A database is structured that aims to store the measurements collected.

Collection: The volume of measurements is considered and the time intervals necessary to obtain the measurements are defined. Time intervals assess temporal correlation, which combined with the number of measurements, allows standard deviation analysis.

Analysis: Next comes the definition of statistical measures, with the objective of providing the input of the analysis that will find the behavior of normal and anomalous measurements. The variability (standard deviation) of the measurements is observed.

Comparison: Compare the variability of energy measurements between normal nodes and poisoned nodes, using standard deviation.

Figure 5 – Activity cycle of the anomaly identification model.



Source: Elaborated by the author

5 Experiment and Results

To make the experiment feasible, the FTE-LEACH simulator is used (SOUZA, 2017). It is an adaptation with improvements for NS-3 on Linux Ubuntu made to the FTE-LEACH protocol (OLIVEIRA, 2015), emulated in MATLAB. The protocol is encapsulated within WHART and according to the author, this proves that in a simulation environment the protocol is more efficient and can be better analyzed.

Three identical virtual machines based on VMWare Workstation software are used, hosted on a desktop. A script (bash/Linux) is utilized to automate the simulation routines. Python's Random library is used to generate random numbers in some scenarios. The CC2500 transceiver (https://www.ti.com/product/CC2500) is used as a model of energy consumption for the sensors simulated in the experiments, working with different scales of its energy capacity measured in milliampere-hours (mAh). **Table 3** presents the equipment, software, and hardware used in the simulation environment.

For the choice of scenarios, different characteristics are important to simulate environments closer to the real situation and extract samples for later analysis, among these characteristics are: number of sensors (nodes), perimeter size, battery capacity (mAh), and the status of the sensors (anomalous or normal). All these properties are determined in the simulator source code before the simulation is compiled and run. **Table 4** details the 8 scenarios used.

Table 3 – Equipment, software and hardware used.

Hardware/Software	Function
Desktop Dell Core i7-8700, 2.4GHz, 16GB RAM, 120 HD SSD and Windows 10	Base equipment for the structure of experiments and virtual machine host.
VMWare Workstation 15.0 Player	Software for using virtual machines.
Linux Ubuntu 14.04 LTS	Base Operating System running on the virtual machine.
NS-3 3.26	Simulator Used.
Python and C++	NS-3 support and code compilation.

Source: Elaborated by the author.

Table 4 – Setup of scenarios

Simulation without anomalous sensors				
Scenario	Qty. Sensors	Perimeter	Same Initial Battery	Varying Initial Battery
1	20	100x100	S	S
2	20	200x200	S	S
3	100	100x100	S	S
4	100	200x200	S	S

Simulation with anomalous sensors				
Scenario	Qty. Sensors	Perimeter	Same Initial Battery	Varying Initial Battery
5	20	100x100	S	S
6	20	200x200	S	S
7	100	100x100	S	S
8	4	100	200x200	S

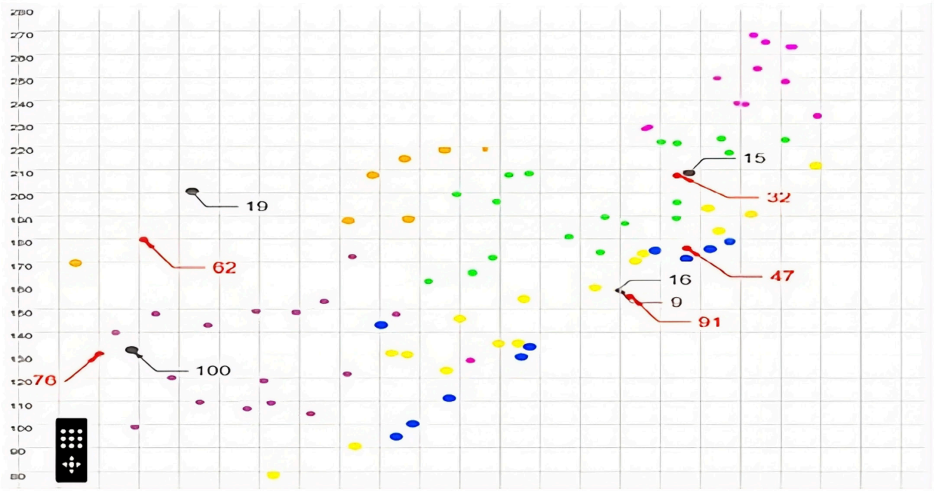
Source: Elaborated by the author.

In the experiments, 1800mAh batteries are used for scenarios with 20 sensor nodes and 3500mAh for scenarios with 100 sensor nodes. In scenarios with varying initial battery levels, the Python random library is used to generate random numbers and determine the initial percentage of battery level for sensor nodes. **Figure 6** shows how the nodes are distributed along the network perimeter, dividing their clusters by color, with the base station in the lower left corner.

The black sensor nodes 19, 100, 16, 9, and 15 are cluster heads. In red, the sensor nodes 76, 62, 91, 47, and 32 are the vice cluster head type. The clusters are divided by different colors. In the second round onwards in the scenarios with anomalous nodes, the sensor nodes further away from the base station always report having 5% more battery than the normal sensor node with the most battery in the round, thus forcing their election as cluster head while their real battery does not run out. The LEACH protocol chooses an ideal number of cluster heads; this number is determined by the number of sensor nodes in the network.

To simulate scenarios with anomalous nodes, double the number of anomalous nodes is adopted in relation to the ideal number of cluster heads. That is, when there are 5 cluster heads in the normal scenario, there are 10 poisoned nodes in the anomalous scenario. After all anomalous sensor nodes are depleted of energy, the network continues to function normally until the end of its life cycle. **Figure 6** shows setup with 100 nodes and 200x200 perimeter.

Figure 6 - Setup with 100 nodes and 200x200 perimeter.



Source: Elaborated by the author

5.1 Data collection

Each simulation starts after setting the scenario. The end is determined when all sensor nodes are out of power or when there are no nodes communicating with the base station. After the initialization phase, the simulation follows the steps determined by the LEACH protocol:

1) The protocol configuration phase, where the cluster heads and their clusters are elected;

2) The communication phase, when the cluster heads gather the information received and send it to the base station.

This process is repeated until the end of the network. After the end, the simulation environment extracts the output files, which contain information such as: number of turns, node consumption, node status, RSSI, number of packets sent, number of packets received, and residual energy per round.

Theoretically, the LEACH protocol tends to transform all nodes into CH or VCH over time, evenly dividing the energy consumption in each round. Therefore, to calculate the standard deviation of nodes, the number of rounds adopted is exactly the number of nodes in the network. In scenarios with 20 nodes, the standard deviation of each node is calculated every 20 runs. Likewise, in scenarios with 100 nodes, the calculation occurs every 100 rounds.

5.2 Comparison of the network characteristics

Some characteristics observed between the normal and anomalous scenarios are compared in **Table 5**. It maps some characteristics of the network, showing which data are collected and in what ways they are used in this research, in addition to describing the purpose of collecting each piece of data.

Table 5 - Characteristics of scenarios

Data collected	How it is used	Objective
Rounds	Check the number of the last round	Determine the size of the network lifetime
Consumption	Sum of node consumption per round	Check total network consumption per round and CH consumption per round.
Packets Sent	Sum of packets sent	Check the sum of all packets sent to the base station per round
Residual Energy	Mean Residual Energy of each sensor node	Check the average residual energy for each round
RSSI	Mean RSSI value of sensor nodes	Check the average RSSI value of each round
Sensor Node Status	Checks if the node is alive, dead, or has stopped communicating with the base station	Add up all dead nodes in each round.
Standard deviation	Checks for variability between anomalous and normal scenarios	Standard deviation of every n rounds (n = number of nodes)

Source: Elaborated by the author

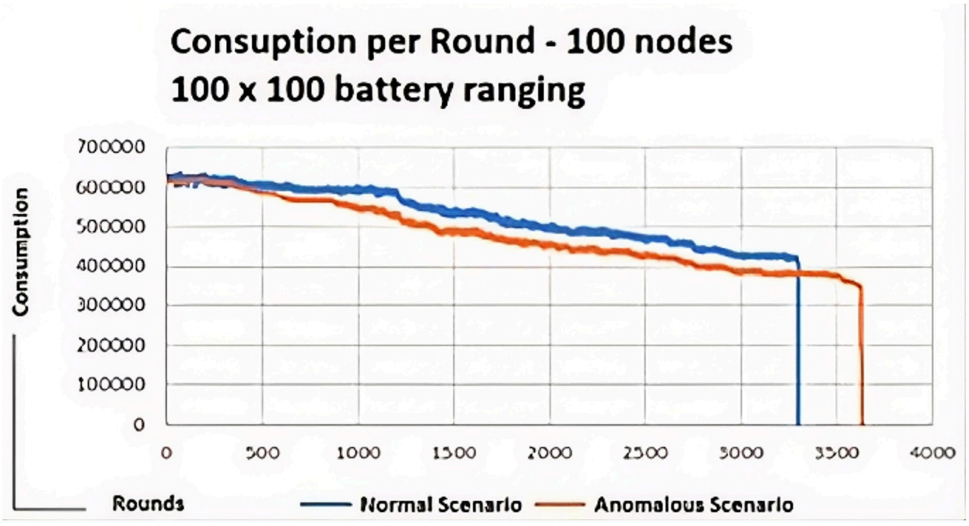
6 Results and general discussion

In total there are 8 scenarios created for the experiments. However, the comparisons involve only 3 normal scenarios with their respective anomalous versions, as these summarize the results found. **Figures 7, 8,** and **9** are a compilation of these 3 scenarios, called here A, B, and C.

It is worth noting that this choice is made precisely because A, B, and C represent all the results achieved in the other scenarios. Essentially, the results are repeated; therefore, to avoid unnecessary repetition, only these scenarios are discussed.

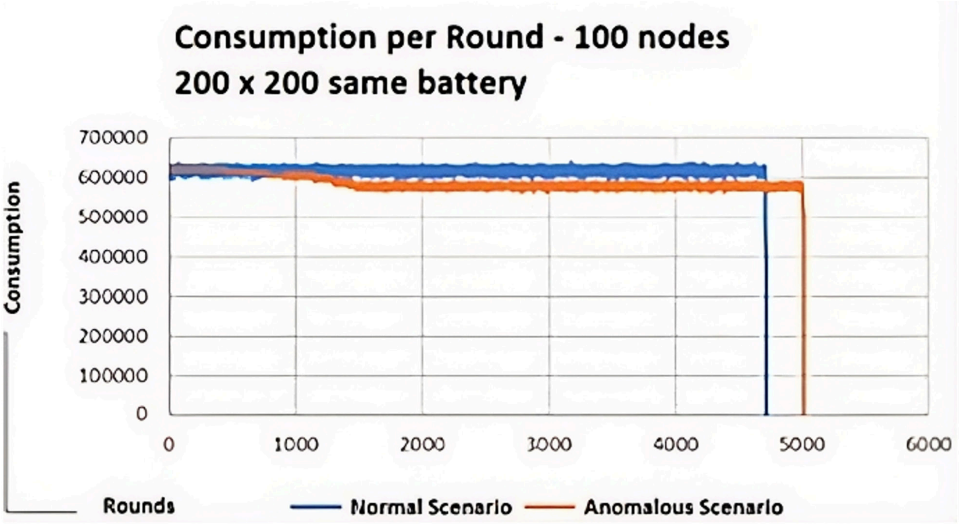
In **Figures 7, 8,** and **9,** the average consumption of nodes in anomalous scenarios is lower than in normal scenarios. The increase in the useful life of the network is around 10%, contrary to the initial expectations of this work. This occurs because the first sensor nodes to die are the nodes furthest from the base station, which were intentionally placed as anomalous nodes in the experiment, leaving the network more compact and generating cluster heads closer to the base station, which consume less energy because they are closer to the base station, which increases the life of the network.

Figure 7 – Consumption per round scenario A



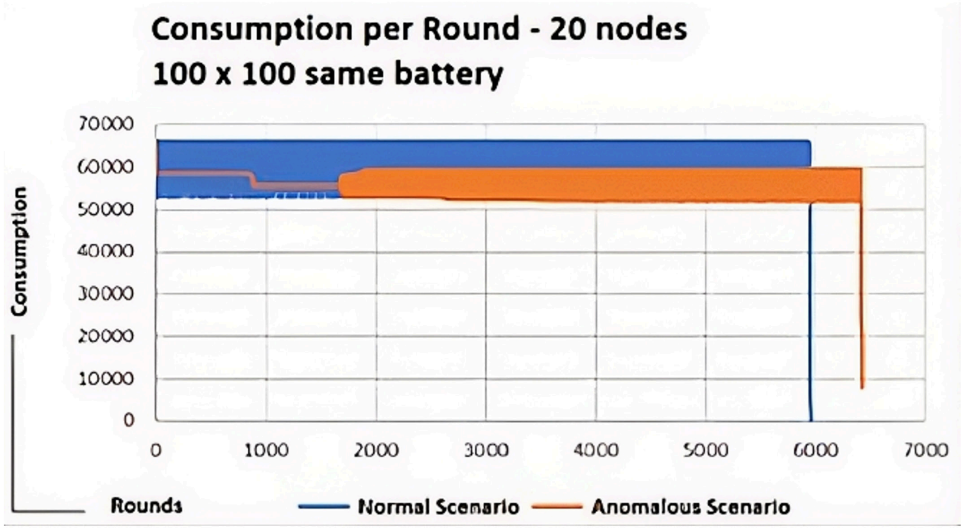
Source: Elaborated by the author

Figure 8 - Consumption per round scenario B



Source: Elaborated by the author

Figure 9 - Consumption per round scenario C

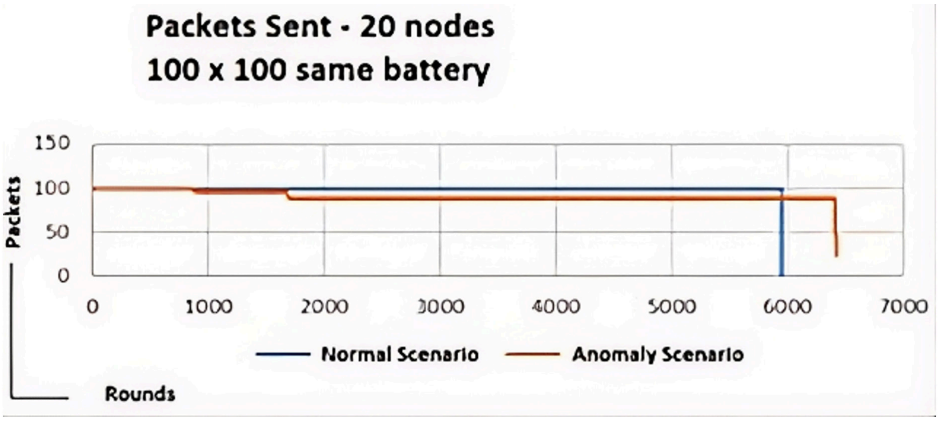


Source: Elaborated by the author

On the other hand, this causes holes in the network, leaving spaces around the perimeter without sensing. This result also contradicts the very reason for using variants of the LEACH protocol, which is to distribute the load between nodes – even if this decreases the network lifetime, holes in coverage tend not to occur. **Figures 10, 11,** and **12** show the compilation that deals with the number of packets sent by the sensor nodes.

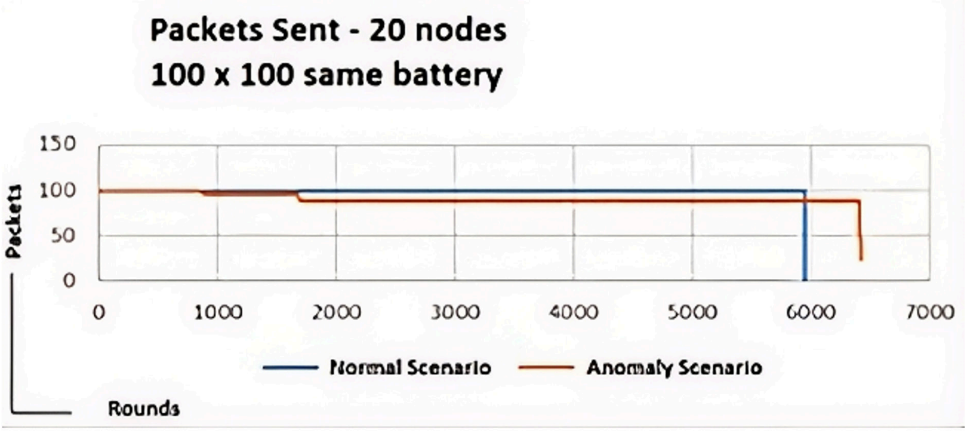
The number of packets sent refers to the packets transmitted by the sensor nodes to the cluster head and from the cluster head to the base station. As seen in **Figure 9**, all scenarios (normal and anomalous) start with the same number of packets sent. In anomalous scenarios, poisoned nodes run out of power before normal nodes. This ends up decreasing the number of active nodes in anomalous scenarios more quickly, as the anomalous sensor nodes die before half of the network's useful life, leaving areas without sensing.

Figure 10 – Packets sent scenario A.



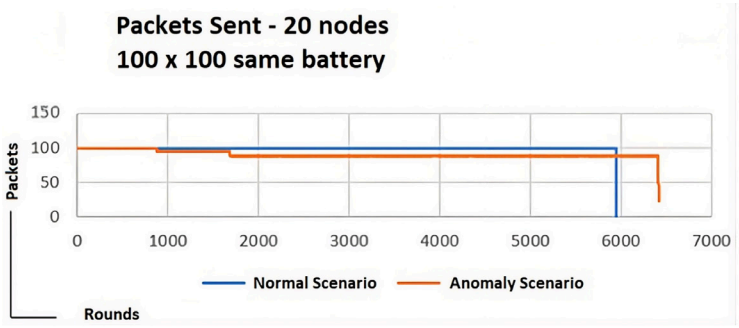
Source: Elaborated by the author

Figure 11 - Packets sent scenario B.



Source: Elaborated by the author

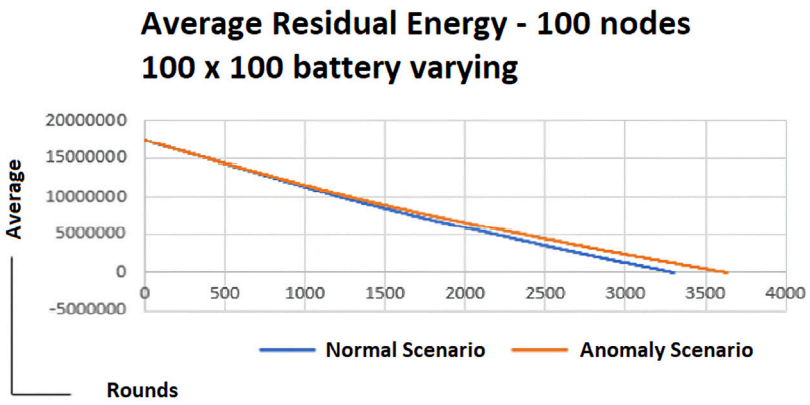
Figure 12 - Packets sent scenario C.



Source: Elaborated by the author

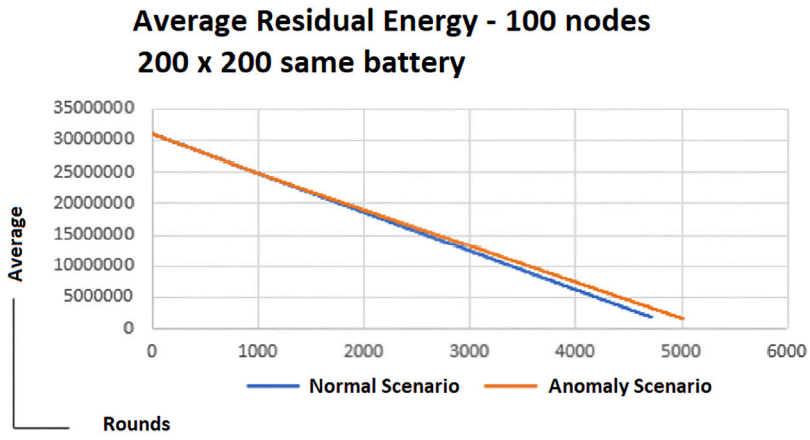
Figures 13, **14**, and **15** deal with the average residual energy of each sensor node per round.

Figure 13 – Mean residual energy scenario A.



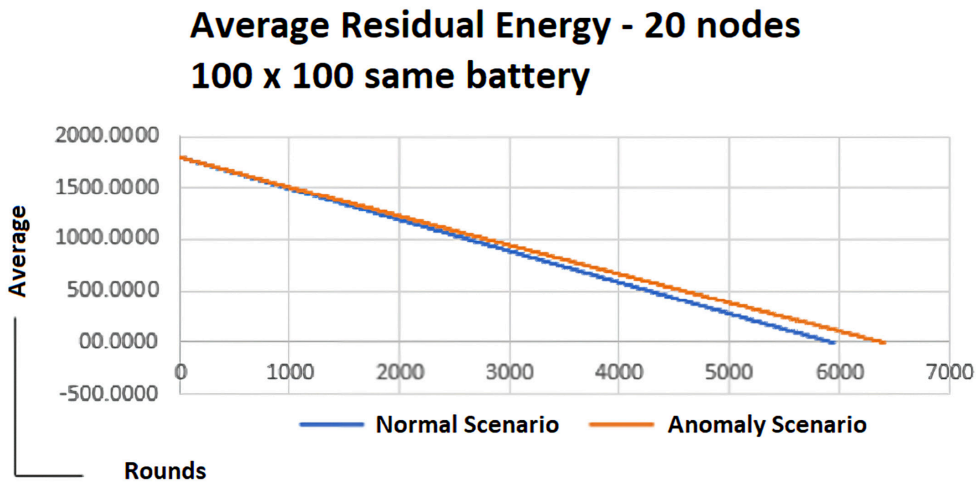
Source: Elaborated by the author

Figure 14 – Mean residual energy scenario B.



Source: Elaborated by the author

Figure 15 - Mean residual energy scenario C.

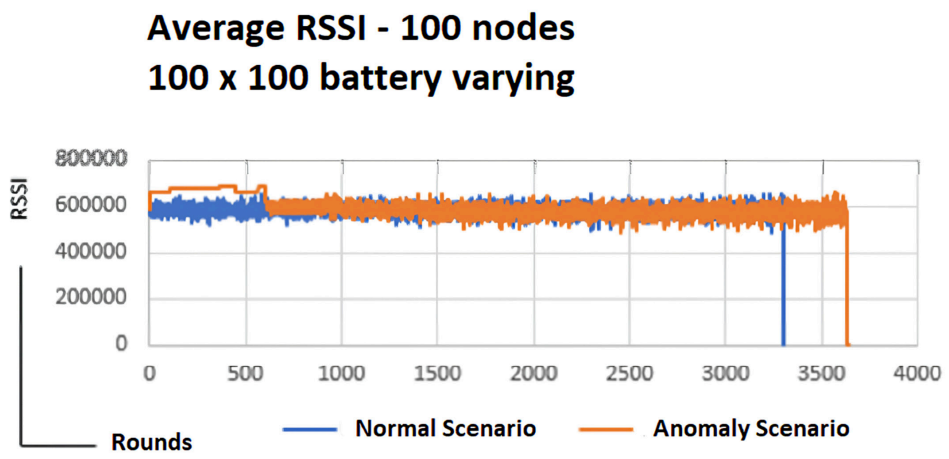


Source: Elaborated by the author

As seen in **Figures 13, 14** and **15**, in all scenarios the mean residual energy is linear. The actual consumption measured in this scenario uses the actual residual energy of each sensor node as given. Note that an anomalous sensor node sends a false energy value to the base station, however, **Figure 10** shows the real residual energy value of the nodes. As can be seen, the residual energy in both scenarios follows the same decreasing pattern, with the difference that in the anomalous scenario the useful life of the network is longer. **Figures 16, 17,** and **18** show the mean RSSI value of sensor nodes per round.

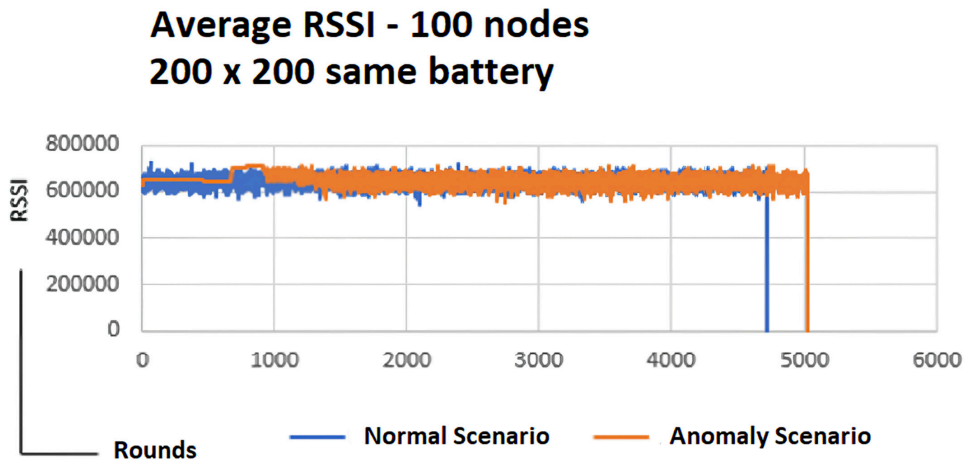
The mean RSSI is higher at the beginning of the anomalous scenarios, due to the fact that the cluster heads are the most distant sensor nodes from the base station in these scenarios. This fact is evident in the scenario with 100 sensor nodes and 100x100 perimeter, in the scenario with a 200x200 perimeter this accentuation is not so strong because sensor nodes with more than 224 meters do not communicate with the base station. When this occurs, the simulation algorithm chooses intermediate sensor nodes, that is, sensor nodes that are closer to the base station, to ensure that these anomalous sensor nodes communicate with the base station. As they are at distances close to normal sensor nodes, the RSSI average is very similar in both scenarios.

Figure 16 – Mean RSSI scenario A.



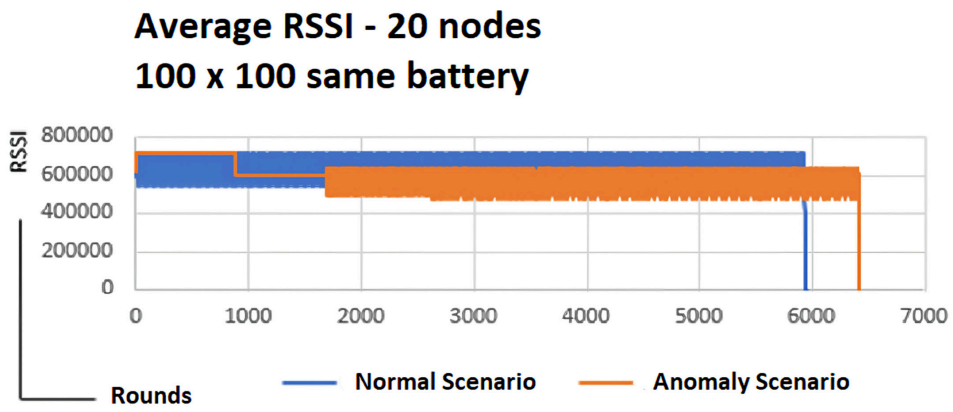
Source: Elaborated by the author

Figure 17 – Mean RSSI scenario B.



Source: Elaborated by the author

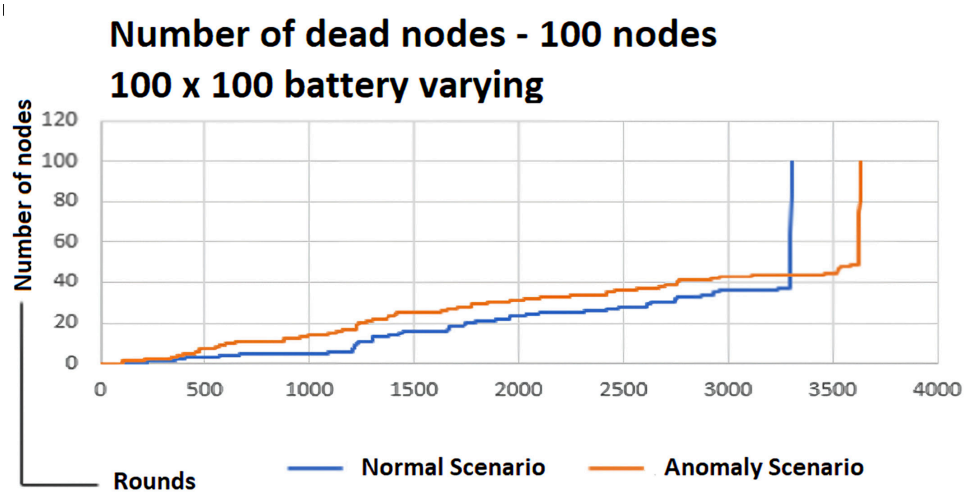
Figure 18 - Mean RSSI scenario C.



Source: Elaborated by the author

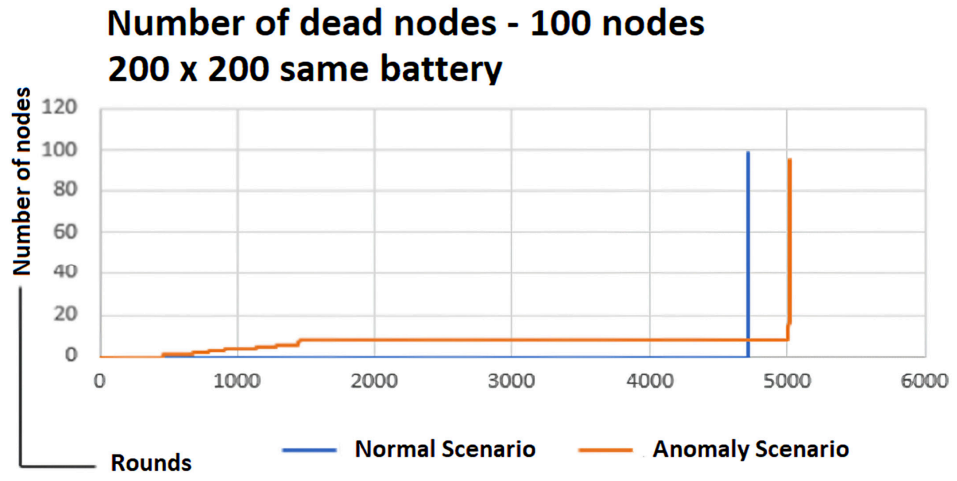
Next, in **Figures 19, 20,** and **21**, the beginning of sensor node deaths is shown.

Figure 19 – Death of sensor nodes scenario A.



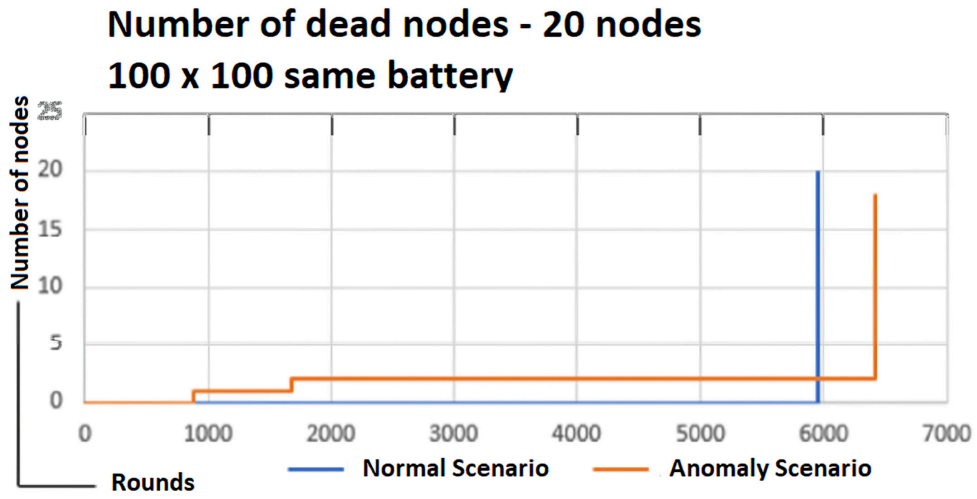
Source: Elaborated by the author

Figure 20 – Death of sensor nodes scenario B.



Source: Elaborated by the author

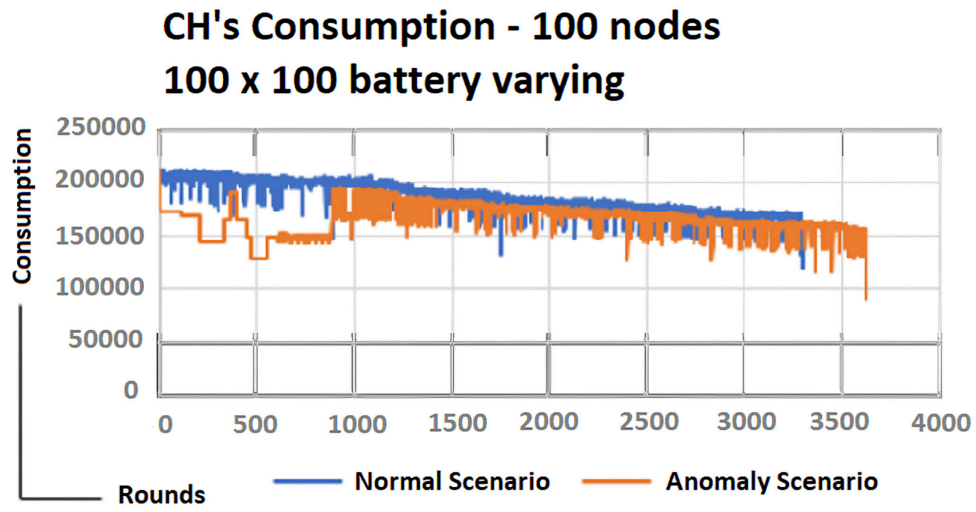
Figure 21 – Death of sensor nodes scenario C.



Source: Elaborated by the author

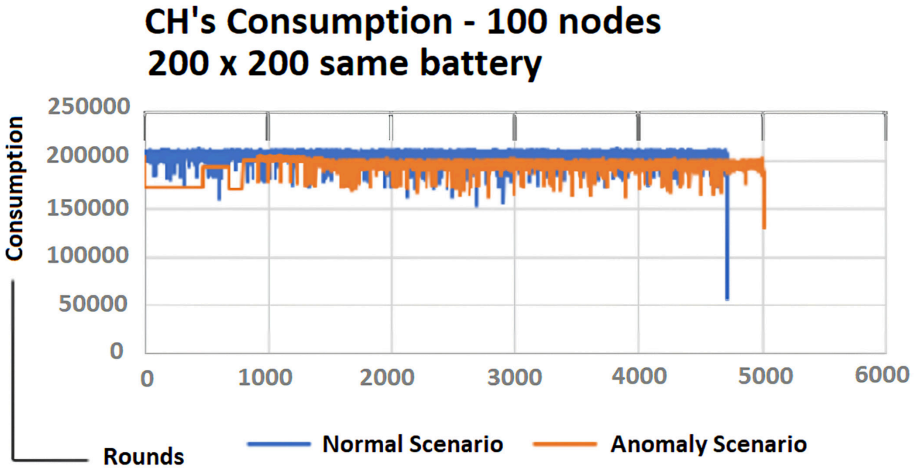
As seen in **Figures 19, 20,** and **21**, in anomalous scenarios, sensor nodes die well in advance of normal nodes, since they are the nodes that have cluster head status until the end of their life cycle. The final graphs, comparing the characteristics of the network (**Figure 22**, **23,** and **24**), deal with the cluster head consumption per round.

Figure 22 – Cluster head consumption scenario A.



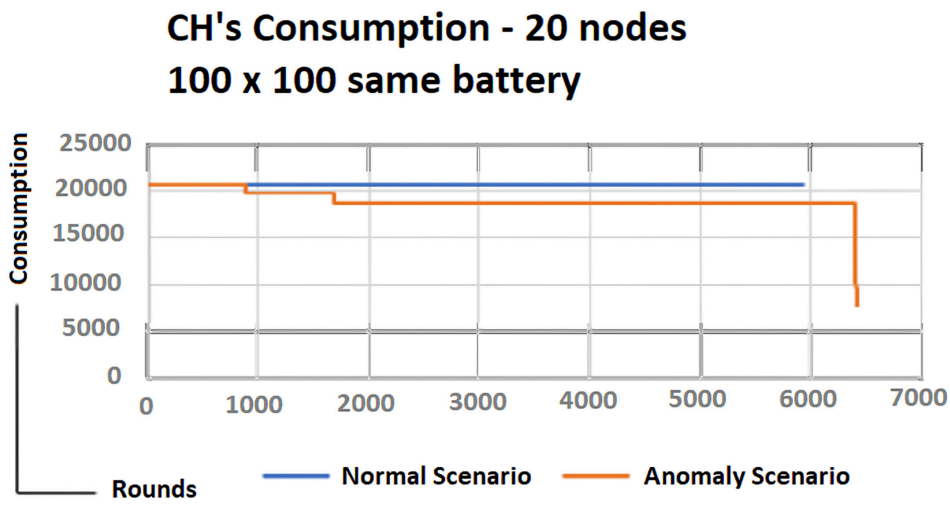
Source: Elaborated by the author

Figure 23 - Cluster head consumption scenario B.



Source: Elaborated by the author

Figure 24 - Cluster head consumption scenario C.



Source: Elaborated by the author

As seen in **Figures 22, 23,** and **24,** cluster head consumption in anomalous scenarios with 100 sensor nodes (**Figure 22** and **23**) is lower than in scenarios with 20 nodes (**Figure 24**). This is because when the most distant sensor nodes inform the false power status, the LEACH protocol elects them as cluster head. Thus, the protocol itself, based on the residual energy and distance from the sensor nodes, starts to use fewer clusters in the network, reducing the number from 5 to 4 cluster heads. In the scenario with 20 sensor nodes (**Figure 24**), initial consumption is the same, but after the death of the anomalous sensor nodes (which are the nodes furthest from base station) the live sensor nodes become the cluster head closer to the base station. The shorter the distance from the cluster head to the base station, the lower the consumption of this sensor node for transmitting the grouped data. Thus, a lower mean RSSI value is maintained in anomalous scenarios when compared to normal scenarios.

6.1 Identification of anomalies

As in the previous section, the comparison involves a reduced number of normal scenarios with their respective anomalous scenarios, as these summarize the results found in all scenarios. For each scenario, the graphs of 4 analyses performed are presented:

1) Standard deviation and a set of n rounds (n=number of nodes);

2) Mean of the standard deviation of the set of rounds;

3) Total standard deviation of the set of rounds;

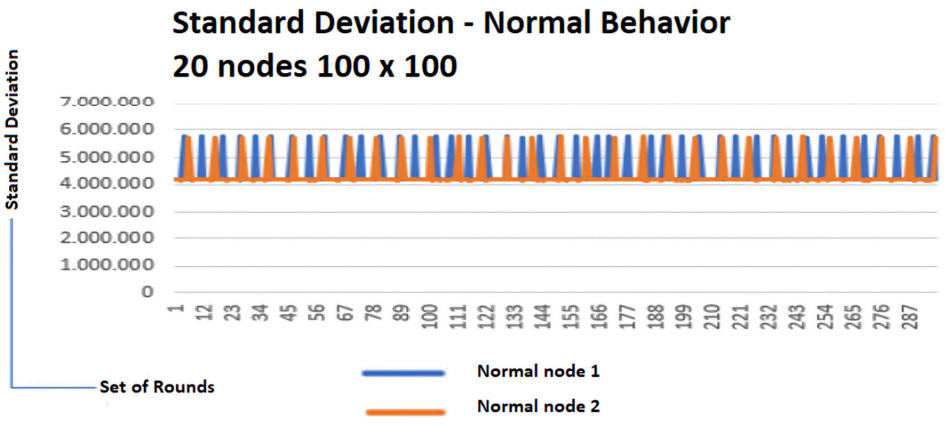
4) Number of times each sensor node is elected cluster head.

A set of rounds is used for scenarios with 20 sensor nodes, each set consists of 20 rounds. This section demonstrates more clearly how to identify anomalous behavior.

Figures 25 and **26** compare the standard deviation per round between 2 normal sensor nodes and 2 anomalous sensor nodes.

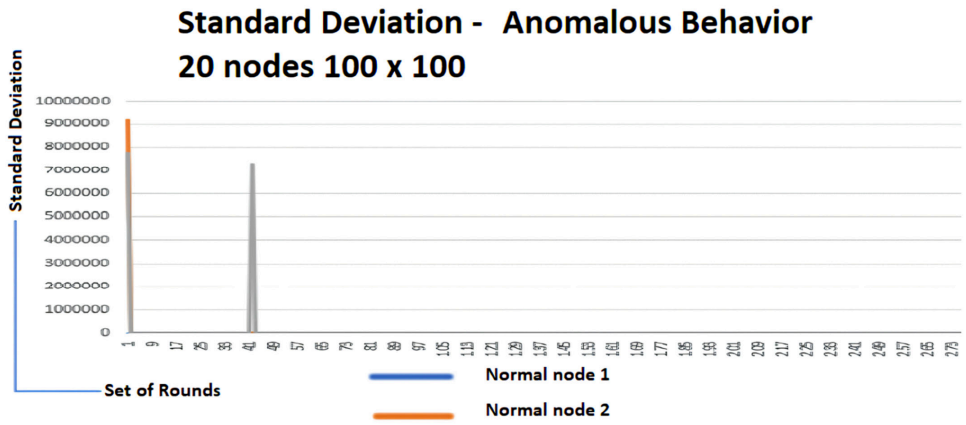
In the graph in **Figure 25**, a pattern of behavior is observed that occurs due to the alternation of the cluster head proposed by the FTE-LEACH protocol. The sensor node alternates its consumption, varying between high and low until the end of the network's useful life. In **Figure 26**, the graph with 2 sensor nodes with anomalous behavior, very little changes in the standard deviation over time, except for two gigantic peaks, one at the beginning and another between rounds 41 and 49.

Figure 25 - Standard deviation scenario A



Source: Elaborated by the author

Figure 26 - Standard deviation scenario B



Source: Elaborated by the author

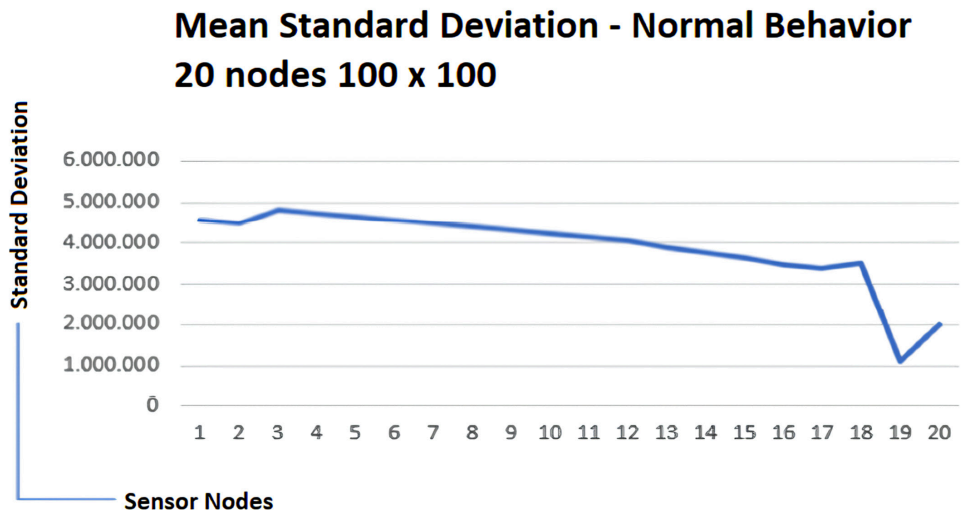
The explanation is that the two anomalous nodes assume the cluster head function precisely at these peaks. This radically alters the consumption pattern of these anomalous nodes. However, as these are constantly chosen as cluster head, due to the false energy value propagated in the network, the variability in the nodes decreases sharply in later rounds. This is repeated until the real power of the first anomalous node runs out and the second malicious node is chosen as cluster head, yielding the same results. It is important to note that the standard deviation of consumption of the other nodes in the network is also low, since they do not transform into cluster head during the periods of poisoning and almost always consume the same (little) energy during the rounds.

The graphs presented in **Figures 27** and **28** deal with the mean of the standard deviation of all sensor nodes in the network in the scenario with 20 nodes, with a perimeter of 100x100 and the same initial battery.

It is observed that the mean standard deviation found in the graph of **Figure 27** is linear and has a more accentuated decrease at the end, as nodes 19 and 20 are rarely used as cluster head due to the simple choice of protocol. Thus, these have a low mean standard deviation, while the others have a high mean standard deviation. In the graph of **Figure 28**, the highest point of the mean occurs in sensor nodes 11 and 12, which are anomalous sensor nodes, leaving the graph irregular, due to the mean standard deviation of these nodes being high.

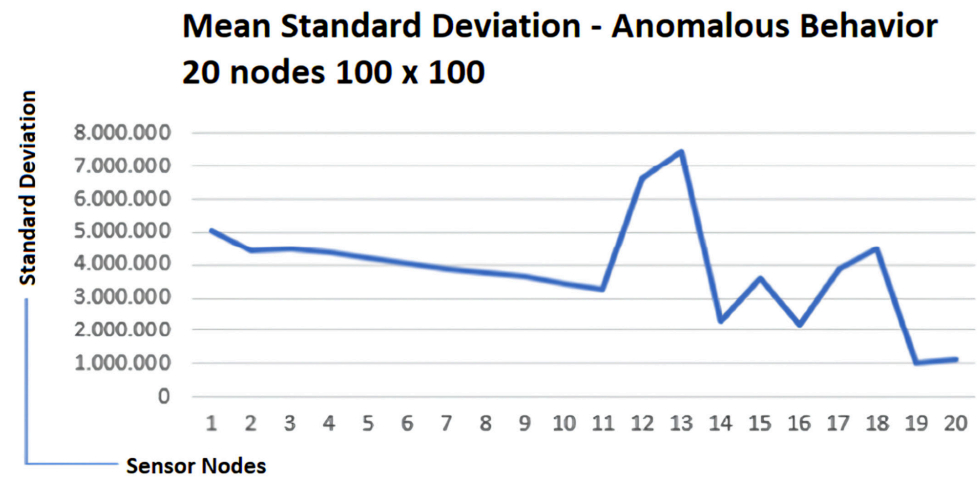
The increase in the mean standard deviation in the anomalous nodes occurs precisely because they were chosen as cluster head and alternating high and low consumption values, as previously observed in the peaks of **Figure 28.**

Figure 27 – Mean standard deviation scenario A



Source: Elaborated by the author

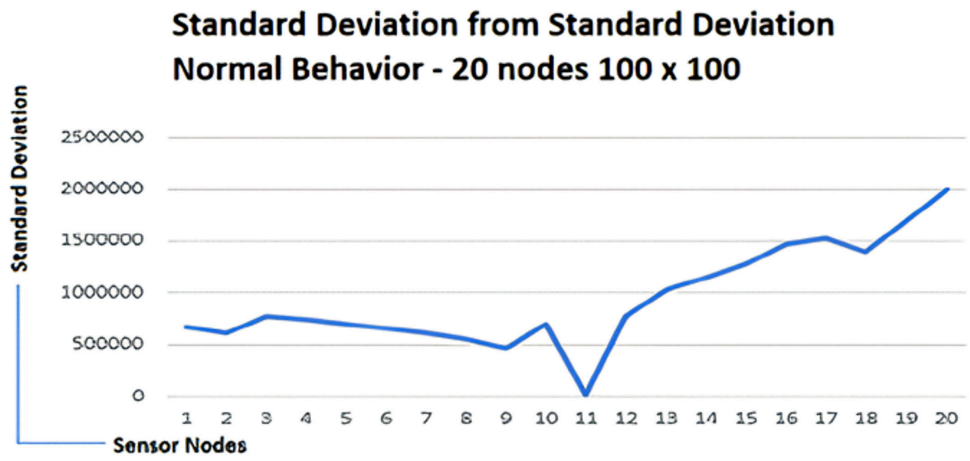
Figure 28 - Mean standard deviation scenario B



Source: Elaborated by the author

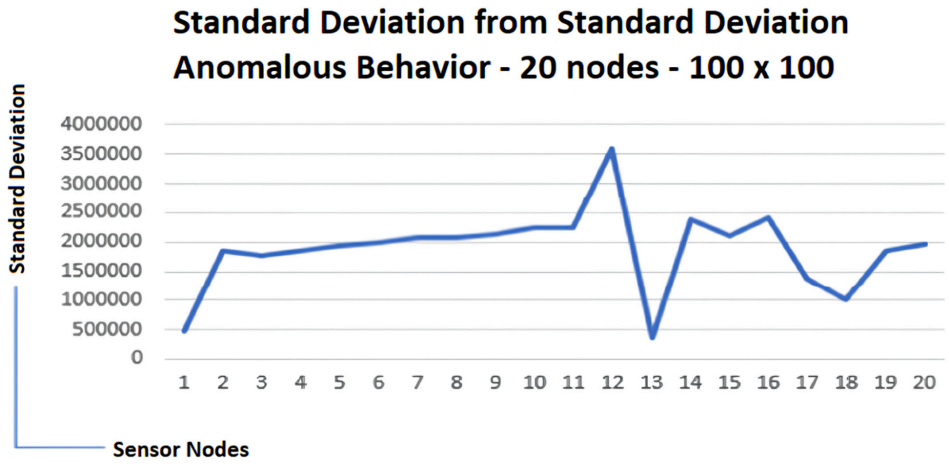
Seeking to generate graphs that can quantify and qualify all these analyses, **Figures 29** and **30** deal with the calculation of the total standard deviation for the set of standard deviations calculated per group of n rounds (n=number of nodes) for all sensor nodes in the network.

Figure 29 – Standard deviation of standard deviation scenario A



Source: Elaborated by the author

Figure 30 - Standard deviation of standard deviation scenario B

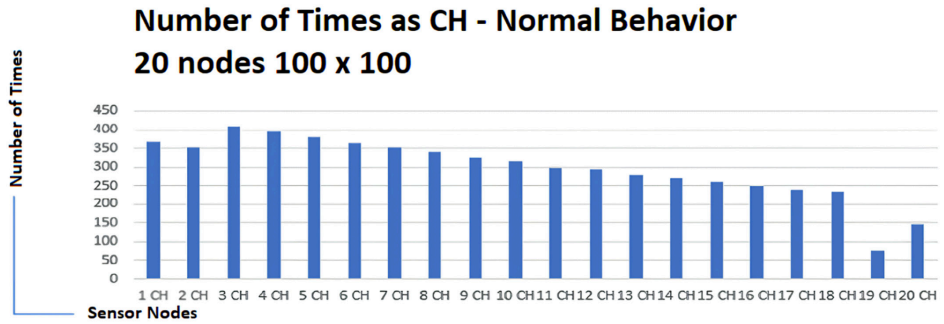


Source: Elaborated by the author

In the graph of **Figure 29**, sensor nodes 19 and 20, which were little chosen as cluster head, have a high standard deviation, while the others have a low total standard deviation. In the graph of **Figure 30**, the anomalous sensor nodes (11 and 12) have a higher total standard deviation, while the others have a lower value, but with an increasing trend.

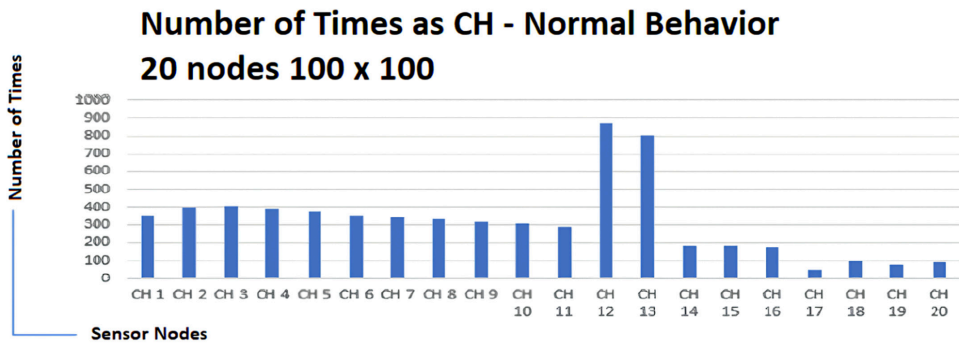
The next analysis presented is the quantification of times that each sensor node is elected cluster head during the lifetime of the network. It is advisable to perform this check to see if the protocol is working to ensure uniform consumption across the entire network. Visually, it is possible to verify that the behavior of the graphs presented in **Figures 31** and **32** is similar to the graphs already presented in **Figures 27** and **28**.

Figure 31 - Number of times as cluster head scenario A



Source: Elaborated by the author

Figure 32 - Number of times as cluster head scenario B



Source: Elaborated by the author

It can be clearly seen in the graph of **Figure 31** how nodes 19 and 20 were the least elected as cluster head, a fact that justifies the individual result of these nodes in **Figures 27** and **29**. In **Figure 32**, it can be seen how the anomalous nodes (11 and 12) were elected as cluster head more often than the other nodes. Thus, differences can be seen between the standard deviation patterns of consumption between normal and anomalous networks, as shown in **Table 6.**

Table 6 - Standard deviation of sensor nodes

Round	SD of Normal Node A	SD of Normal Node B	SD of Anomalous Node A	SD of Anomalous Node B
0	8.273	8.265	8.273	0.000
500	11.338	8.265	0.000	0.000
100	8.273	8.273	0.000	0.000
1000	8.273	8.265	0.000	0.000
1500	8.273	8.265	0.000	0.000
2000	8.273	8.265	0.000	0.000
3000	11.338	8.265	0.000	0.000
3500	8.273	8.265	0.000	0.000
4000	8.273	8.265	0.000	0.000
4500	8.273	8.265	0.000	0.000
5000	8.273	8.265	0.000	0.000

Source: Elaborated by the author

It can be seen in **Table 6** that the standard deviation of the sensor nodes in scenarios without the presence of anomalous nodes, presents a value above zero, with little change during the useful life of the network. In scenarios with anomalous sensor nodes, the default behavior also undergoes few alterations, however, in most rounds it is set to zero, with exceptions between cluster head changes. **Table 7** presents other details about the scenario presented with 20 sensor nodes.

Table 7 – Information about Cluster head x Rounds.

Scenario with 20 nodes 100x100 - Battery Equal					
Anomalous nodes			Normal nodes		
Node ID	12	13	Node ID	8	9
Number of times as CH	873	807	Number of times as CH	340	326
Start of round as CH	2	876	Start of round as CH	8	9
Last round as CH	875	1683	Last round as CH	5936	5940
Number of rounds in the network		6418	Number of rounds in the network		5952

Source: Elaborated by the author

Table 7 shows the number of times a sensor node is elected cluster head, the round in which it is elected the first and last time as cluster head, in addition to the total number of rounds in the network. In the anomalous scenario, the sensor node that is most often elected cluster head, remains as cluster head during almost 13% of the network rounds, while in the normal scenario, this is no more than 9%.

7 Conclusion

The objective of this work was to propose an anomaly identification model, generated by anomalous nodes that send false information about their residual energy to the base station, in addition to considering general characteristics of the network to verify the consumption and performance between experiments of a normal network and a network with anomalous nodes. Comparing the general characteristics between the scenarios proposed in the experiment, it was found that in all cases with anomalous nodes, the network lifetime became 10% longer, on average, when compared to experiments with a normal network. At the beginning of the experiments, a network with anomalous sensor nodes was expected to have a shortened lifespan, but the experiments proved otherwise. The reason is that the consumption concentrated in anomalous nodes contributes to the increase in the network useful life. However, this behavior generates holes in the network coverage, which, in some cases, can make the network more susceptible to packet loss.

As the poisoned nodes die prematurely, the network coverage becomes precarious. Note that analyzing holes in a WSN is an ineffective approach for identifying anomalies, as these holes are typically the result of the actions of anomalous nodes. For example, in industrial sensor networks that need a balance of consumption generated by the rotation of node functions. Furthermore, the concentration generated by the poisoning of nodes goes against the very definition of networks based on the LEACH protocol, which is the alternation of responsibilities between nodes.

In the identification of anomalies, the study of the variability (standard deviation) of the experiments carried out showed that it is possible to identify the standard behavior of the sensor nodes and detect possible anomalous behaviors. Basically, the analyses were based on:

1) The number of packets sent;

2) Energy consumption;

3) The RSSI signal of the nodes;

4) The number of times the nodes were elected as cluster head.

As a metric, we used:

1) The standard deviation of a set of n rounds (n=number of nodes);

2) The mean of the standard deviation calculated every n rounds;

3) The total standard deviation of the set of standard deviations calculated every n runs.

From these elements, it was possible to identify anomalies implemented in the experiments.

The current work contains limitations that can provide opportunities for further research. An example is that the calculations were performed after the experiments. There is a need to perform real-time verification of poisoning. In fact, improvements to the proposed method may allow this quick verification in the base station. It is also necessary to use other statistical models that allow comparisons and rapid diagnosis of node poisoning. The analyses could also be extended to other variants of the LEACH protocol, as well as to **parameters other than energy consumption.** Likewise, it is necessary to test other types of attacks against WSN. Finally, if the scenarios and parameters chosen in the experiments are altered, new analyses may indicate interesting paths for the use and security of the LEACH protocol and its variants.

8 References

ABIDI, W.; EZZEDINE, T. Fuzzy Cluster Head Election algorithm based on LEACH protocol for wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING CONFERENCE (IWCMC), 13th., 2017. Proceedings... IEEE, 2017. p. 993–997.

ABO-ZAHHAD, M. *et al.* Mobile Sink-Based Adaptive Immune Energy-Efficient Clustering Protocol for Improving the Lifetime and Stability Period of Wireless Sensor Networks. IEEE Sensors Journal, v. 15, n. 8, p. 4576–4586, 2015.

AHMED, A. *et al.* Energy Efficient Sensor Network Routing (EESNR) Protocol For Large Distributed Environmental Monitoring Applications. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT DATA ACQUISITION AND ADVANCED COMPUTING SYSTEMS: TECHNOLOGY AND APPLICATIONS (IDAACS), 9th., 2017, Bucharest. Electronic Proceedings... IEEE, 2017. p. 6.

AKYILDIZ, I. F. *et al.* Wireless sensor networks: A survey. Computer Networks, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002.

ALI, M. S.; DEY, T.; BISWAS, R. ALEACH: Advanced LEACH routing protocol for wireless microsensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (ICECE), 5th., 2008, Dhaka. Proceedings... IEEE, 2008. p. 909–914.

ALMEIDA, F. C. de. Análise Baseada em Limites Estatísticos para Identificação de Comportamento e Anomalia em Sensores IoT. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, 2018.

ALMOMANI, I.; Al-KASASBEH, B.; Al-AKHRAS, M. WSN-DS: A Dataset for Intrusion Detection Systems in Wireless Sensor Networks. Journal of Sensors, v. 2016, p. 1–16, 2016.

BHARANY, S. *et al.* Energy-efficient clustering scheme for flying ad-hoc networks using an optimized LEACH protocol. Energies, v. 14, n. 19, p. 6016, 2021.

BHOLA, J.; SONI, S.; CHEEMA, G. K. Genetic algorithm based optimized leach protocol for energy efficient wireless sensor networks. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, v. 11, n. 3, p. 1281–1288, 2020.

BUYANJARGAL, O.; KWON, Y. An energy efficient clustering algorithm for Event-Driven Wireless Sensor Networks (EECED). In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON INC, IMS, AND IDC (NCM), 5th., 2009. Proceedings... IEEE, 2009. p. 1758–1763.

EL-SAADAWY, M.; SHAABAN, E. Enhancing S-LEACH security for wireless sensor networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRO INFORMATION TECHNOLOGY (EIT), 2012, Indianapolis. Proceedings... IEEE, 2012. p. 1–6.

FERRAZ JUNIOR, N. *et al.* IoT6Sec: reliability model for Internet of Things security focused on anomalous measurements identification with energy analysis. Wireless Networks, v. 25, n. 4, p. 1533–1556, 2019.

HANDY, M. J.; HAASE, M.; TIMMERMANN, D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON MOBILE AND WIRELESS COMMUNICATIONS NETWORK (MWCN), 4th., 2002. Proceedings... IEEE, 2002. p. 368–372.

HEAWOOD, P. J. Map-colour theorem. Proceedings of the London Mathematical Society, v. 51, n. 1, p. 161–175, 1949.

HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks, v. 30, n. 3-4, p. 301–322, 2000.

IBRL. Intel Berkeley ResearchLab Dataset, 2004. Disponível em: http://db.csail.mit.edu/labdata/labdata.html. Acesso em: 15 jan. 2012.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). Internet of Things: Wireless Sensor Networks Market Strategy Board, whitepaper, p. 78, 2014. Disponível em: http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-internetofthings-LR-en.pdf.

JUNIOR, N. F. *et al.* Lightweight and Secure Publish-Subscribe System for Cloud-Connected Ultra Low Power IoT Devices. Journal of Communication and Information Systems, v. 36, n. 1, p. 100–113, 2021.

MINGOTI, S. A. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. 3. reimpr. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

MITTAL, M. *et al.* Machine learning techniques for energy efficiency and anomaly detection in hybrid wireless sensor networks. Energies, v. 14, n. 11, p. 3125, 2021.

MITTAL, M. *et al.* An efficient quality of services based wireless sensor network for anomaly detection using soft computing approaches. Journal of Cloud Computing, v. 11, n. 1, p. 1–21, 2022.

MOHAPATRA, H.; RATH, A. K. Fault tolerance in WSN through PE-LEACH protocol. IET Wireless Sensor Systems, v. 9, n. 6, p. 358–365, 2019.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. D. O. Estatística básica. São Paulo: Editora Saraiva, 2017.

NAGARAJAN, M. K.; JANAKIRAMAN, N.; BALASUBRAMANIAN, C. A new routing protocol for WSN using limit-based Jaya sail fish optimization-based multi-objective LEACH protocol: an energy-efficient clustering strategy. Wireless Networks, v. 28, n. 5, p. 2131–2153, 2022.

NARAYANAN, R. P.; SARATH, T. V.; VINEETH, V. V. Survey on nodes used in wireless sensor networks. International Journal of Pharmacy and Technology, v. 8, n. 4, p. 21272–21278, 2016.

OLIVEIRA, F. D. M. de. FTE-LEACH: um protocolo energeticamente eficiente e tolerante a falhas aplicado às redes industriais de sensores sem fio. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2015.

RADHIKA, M.; SIVAKUMAR, P. Energy optimized micro genetic algorithm based LEACH protocol for WSN. Wireless Networks, v. 27, n. 1, p. 27–40, 2021.

RAFIQ, A. *et al.* A consistent approach towards clustering in low energy adaptive clustering hierarchy protocol. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH-CAPACITY OPTICAL NETWORKS AND ENABLING/EMERGING TECHNOLOGIES (HONET-ICT), 12th., 2015, Islamabad. Proceedings... IEEE, 2015. p. 1–5.

RAJASEGARAR, S. *et al.* Analysis of anomalies in IBRL data from a wireless sensor network deployment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SENSOR TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS (SENSORCOMM), 2007, Valencia. Proceedings... IEEE, 2007. p. 158–163.

RAMESH, S. *et al.* Optimization of Leach Protocol in Wireless Sensor Network Using Machine Learning. Computational Intelligence and Neuroscience, v. 2022, p. 1–11, 2022.

RAMYA, R. *et al.* Energy efficient enhanced LEACH protocol for IoT based applications in wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INVENTIVE COMPUTATION TECHNOLOGIES (ICICT), 2022, Lalitpur. Proceedings... IEEE, 2022. p. 953–961.

RASSAM, M. A.; ZAINAL, A.; MAAROF, M. A. Advancements of data anomaly detection research in Wireless Sensor Networks: A survey and open issues. Sensors, v. 13, n. 8, p. 10087–10122, 2013.

RAZAQUE, A. *et al.* H-LEACH: Hybrid-low energy adaptive clustering hierarchy for wireless sensor networks. In: IEEE LONG ISLAND SYSTEMS, APPLICATIONS AND TECHNOLOGY CONFERENCE (LISAT), 2016, Farmingdale. Proceedings... IEEE, 2016. p. 1–4.

SANTOS, C. I. L. dos. Dependabilidade Aplicada A Protocolo Hierárquico Baseado No Leach. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - UERN/UFERSA, Mossoró, 2017.

SARKAR, T. K.; PALMA, M. S.; ABDALLAH, M. N. The Physics and Mathematics of Electromagnetic Wave Propagation in Cellular Wireless Communication. Wiley-IEEE Press, 2018.

SHARMA, M.; SHARMA, K. An energy efficient extended LEACH (EEE LEACH). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORK TECHNOLOGIES (CSNT), 2012, Rajkot. Proceedings... IEEE, 2012. p. 377–382.

SILVA, A. A. A. *et al.* Grouping detection and forecasting security controls using unrestricted cooperative bargains. Computer Communications, v. 146, p. 155–173, 2019.

SINGH, T. S.; SORAM, R.; KHAN, A. K. Distance Based Multi Single Hop Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (MS LEACH) Routing Protocol in Wireless Sensor Network. In: IEEE INTERNATIONAL ADVANCED COMPUTING CONFERENCE (IACC), 6th., 2016, Bhimavaram. Proceedings... IEEE, 2016. p. 613–617.

SONGMA, S. *et al.* Classification via k-means clustering and distance-based outlier detection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ICT AND KNOWLEDGE ENGINEERING, 2012, Bangkok. Proceedings... IEEE, 2012. p. 125–128.

SOUZA, J. E. D. C. de. Técnicas de Eficiência Energética aplicadas ao Protocolo FTE-LEACH em NS-3. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - UERN/UFERSA, Mossoró, 2017.

SUTHAHARAN, S. *et al.* Labelled data collection for anomaly detection in wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SENSORS, SENSOR NETWORKS AND INFORMATION PROCESSING (ISSNIP), 6th., 2010, Brisbane. Proceedings... IEEE, 2010. p. 269–274.

TRIPATHI, M. *et al.* Energy efficient LEACH-C protocol for wireless sensor network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY (CIIT), 3rd., 2013, Mumbai. Electronic Proceedings... v. 12, n. 13, p. 234–241, 2013.

WARNEKE, B. *et al.* Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer. Computer, v. 34, n. 1, p. 44–51, 2001.

XIE, M.; HU, J.; GUO, S. Segment-based anomaly detection with approximated sample covariance matrix in wireless sensor networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, v. 26, n. 2, p. 574–583, 2015.

YICK, J.; MUKHERJEE, B.; GHOSAL, D. Wireless sensor network survey. Computer Networks, v. 52, n. 12, p. 2292–2330, 2008.

ZHANG, Y.; MERATNIA, N.; HAVINGA, P. Outlier detection techniques for wireless sensor networks: A survey. IEEE Communications Surveys and Tutorials, v. 12, n. 2, p. 159–170, 2010.

xxxxxxxxxxx

Artigo Técnico

Uma análise da evolução da norma ABNT NBR 7117 para projeto de aterramentos elétricos do ponto de vista da geofísica

An analysis of the evolution of the ABNT NBR 7117 standard for electrical grounding design from a geophysics perspective

Vinícius Cardoso Monteiro de Souza[a],
Otávio Coaracy Brasil Gandolfo[b*]

[a] Empresa Brazilian RockHounds

[b] Laboratório de Riscos, Investigações e Gestão Ambiental, Unidade Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*e-mail: vrizcardoso@gmail.com
*e-mail: gandolfo@ipt.br

Palavras-chave: ABNT NBR 7117; geofísica; método da eletrorresistividade; projetos de aterramento; resistividade elétrica do solo.

Keywords: norethisterone acetate; estradiol; immediate release; wet granulation; fluidized bed.

Resumo

Este artigo apresenta uma análise das três diferentes versões da norma ABNT NBR 7117, publicadas em 1981, 2012 e 2020, avaliando suas principais diferenças no que diz respeito à aplicação de métodos geofísicos elétricos. Para tanto, foram delineados os principais tópicos abordados, abrangendo os conceitos teóricos do método da eletrorresistividade, as técnicas de investigação (planejamento e execução) e os parâmetros de interesse. Realizou-se uma avaliação crítica das alterações ocorridas na norma ao longo de suas três versões. Tais modificações foram benéficas, pois introduziram melhorias e aperfeiçoaram as técnicas de processamento e análise dos dados geofísicos, impulsionadas pelos avanços instrumentais e computacionais verificados ao longo dos anos.

Abstract

This article presents an analysis of the three different versions of the ABNT NBR 7117 standard published in 1981, 2012, and 2020, evaluating their key differences regarding the application of electrical geophysical methods. To this end, the main topics addressed were outlined, covering the theoretical concepts of the electrical resistivity method, investigation techniques (planning and execution), and parameters of interest. A critical assessment of the changes that occurred in the standard in its three different versions was carried out. These modifications were beneficial, as they introduced improvements and refined geophysical data processing and analysis techniques, driven by the instrumental and computational advancements that have occurred over the years.

1 Introdução

A geofísica é o conjunto de técnicas físicas e matemáticas utilizadas na investigação da subsuperfície com as quais é possível obter diversos parâmetros do subsolo, sendo utilizado métodos com ensaios efetuados na superfície do terreno, no interior de furos e em levantamentos aéreos (ORELLANA, 1972). A aplicação destes métodos está fundamentada nos contrastes existentes entre as propriedades físicas dos tipos de materiais geológicos, presença de possíveis contaminantes, corpos estranhos, dentre outros.

Um projeto de aterramento elétrico conecta equipamentos à terra por meio de eletrodos e condutores de aterramento para fornecer um caminho de baixa impedância para correntes de falha, de descargas atmosféricas, correntes espúrias, protegendo pessoas e máquinas contra riscos elétricos, sendo que um dos parâmetros a ser analisado é a resistividade elétrica do solo ( ), parâmetro que pode ser determinado pelo método geofísico da eletrorresistividade. Este parâmetro é fundamental para o correto dimensionamento desses sistemas, permitindo verificar sua compatibilidade com as características do subsolo local.

Na engenharia elétrica, o método da eletrorresistividade é amplamente utilizado no desenvolvimento e na inspeção de projetos de aterramento e de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA). O aterramento consiste na ligação elétrica de elementos condutivos à terra, por meio de condutores apropriados. No SPDA, ele assegura que a eletricidade captada pelos subsistemas de captação e transmitidas pelo subsistema de descidas seja guiada de forma regulada, diminuindo a possibilidade de surgimento de faíscas, picos de tensão e prejuízos às estruturas. Em sistemas de energia, o aterramento é fundamental para manter os circuitos seguros e operacionais, garantindo que os mecanismos de segurança, como interruptores, fusíveis e protetores contra surtos, atuem de forma eficaz. Dessa forma, constitui um elemento indispensável à segurança de pessoas e sistemas, sendo o conhecimento da resistividade elétrica do solo e o adequado dimensionamento do aterramento, fatores determinantes para a eficiência e confiabilidade das instalações elétricas, segundo a NBR-15749 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

2 Projetos de aterramentos elétricos

A ligação proposital de componentes condutores ao solo, conhecida como aterramento elétrico, possibilita o desvio seguro de correntes anormais e raios, protegendo tanto pessoas quanto os equipamentos e certificando a operação adequada dos dispositivos de proteção. Para a proteção contra descargas atmosféricas tem-se quatro tipos de eletrodos

de aterramento: aterramento natural pelas fundações; condutores em anel; hastes verticais ou inclinadas e condutores horizontais radiais, conforme as NBR 5410 e NBR 5419 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004; 2026).

O aterramento natural diz respeito à utilização das próprias armaduras estruturais das construções como sistema de aterramento. Contudo, deve ser realizado um estudo específico para tal de forma a verificar se as condições de resistividade elétrica e disponibilidade de pontos de aterramento (local onde dissipará a corrente no solo) do sistema natural de aterramento serão suficientes para se adequar ao tipo de estrutura.

Os demais eletrodos de aterramento poderão ser utilizados individualmente ou em conjunto. Em geral, adota-se um sistema de malha de aterramento, constituído por condutores horizontais interligados às hastes de aterramento.

As hastes de aterramento são elementos destinados a conduzir a corrente elétrica para as camadas mais profundas do solo. Sua instalação, assim como a do anel de aterramento, deve observar os critérios estabelecidos em projeto, considerando a profundidade e o afastamento em relação às paredes da edificação. O anel e as hastes de aterramento são soluções complementares regulamentadas pela norma NBR 5419 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2026).

A elaboração de um projeto eficiente de aterramento não deve se limitar à definição da geometria dos dispositivos ou à escolha dos materiais utilizados. É importante o conhecimento das propriedades elétricas do solo, pois solos aparentemente semelhantes podem apresentar comportamentos elétricos distintos, afetando o desempenho do aterramento.

3 O método da eletrorresistividade

3.1 Resistividade elétrica

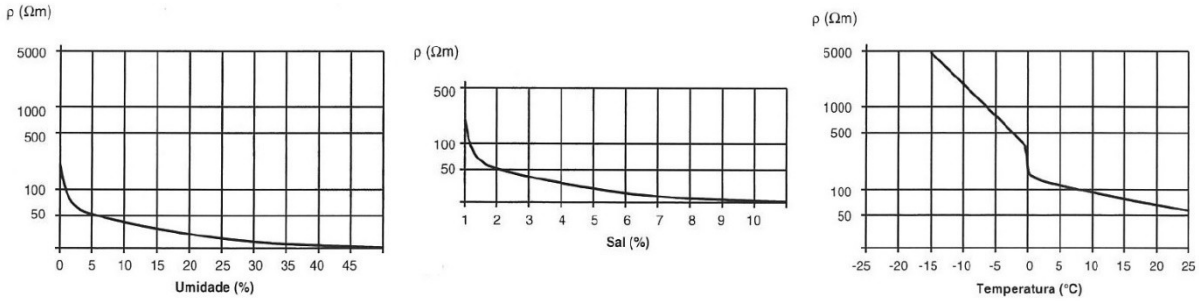
O parâmetro físico medido pelo método da eletrorresistividade é a resistividade elétrica (ρ), que consiste na dificuldade de uma corrente elétrica de se propagar em um determinado meio, expressa em unidades de ohm.m (Ωm).

O solo é um meio heterogêneo constituído por argila, silte, areia e pedregulho (em ordem crescente de granulometria). O valor de sua resistividade varia no tempo e no espaço, tanto

vertical como horizontalmente. Essa variação ocorre devido a alguns fatores como: tipo de solo, teor de umidade, composição mineralógica, profundidade das camadas, idade de formação geológica, grau de compactação, temperatura, salinidade e outros como, por exemplo, a eventual presença de um contaminante. Em função de todos estes condicionantes, o parâmetro resistividade elétrica varia dentro de uma extensa faixa de valores, desde 150 Ωm para solos alagadiços até 8.000 Ωm para areias não saturadas ou, superiores à 10.000 Ωm, para rochas sãs (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020).

A **Figura 1** apresenta os gráficos da variação da resistividade elétrica (ρ) em função da umidade, salinidade e temperatura.

Figura 1 - Variações da resistividade elétrica (ρ) em função da umidade, salinidade e temperatura.



Fonte: NBR - 7117 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

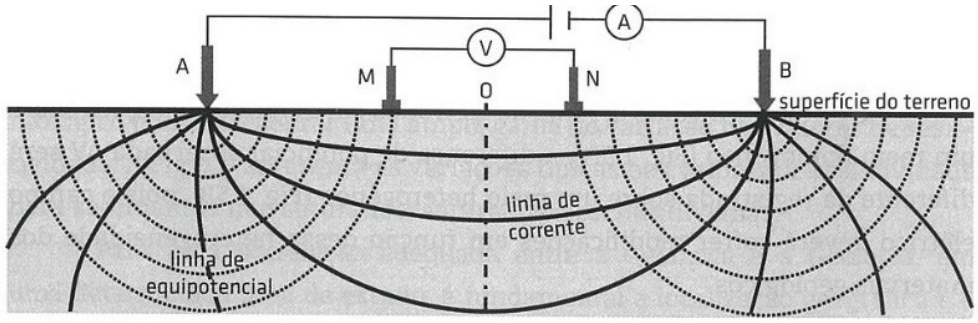
Os valores da resistividade elétrica do solo podem ser assim classificados em três categorias: baixa (ρ < 250 Ωm); média (250 Ωm < ρ < 1.000 Ωm) e alta (ρ > 1.000 Ωm). Do ponto de vista da engenharia elétrica, o solo pode ser subdividido em uma estrutura básica de três camadas: 1) solo superficial, não saturado, com matéria orgânica e resistividade média; 2) solo saturado (abaixo do nível d´água), resistividades mais baixas; 3) embasamento rochoso, com resistividade média (no caso de rochas porosas ou fraturadas, saturadas com água) ou elevada (no caso de rochas sãs) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020).

Os equipamentos utilizados para as medições em campo são denominados de terrômetros e resistivímetros.

3.2 Medições de resistividade elétrica

O método da eletrorresistividade utiliza eletrodos cravados no solo a pequenas profundidades. O procedimento para realizar a medição consiste na injeção de uma corrente elétrica (I) no solo por meio de um par de eletrodos, denominados de A e B, e a leitura da diferença de potencial (ΔV) gerado pela circulação da corrente injetada, por meio de outro par de eletrodos, denominados de M e N (**Figura 2**).

Figura 2 - Princípio do método da Eletrorresistividade.



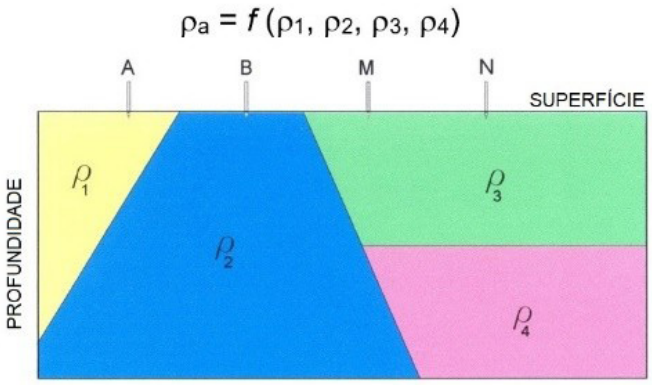
Fonte: Braga (2016).

A resistividade elétrica aparente (ρ_a) é obtida pela equação (1), onde K representa um fator geométrico conhecido e que depende apenas das distâncias entre os quatro eletrodos de medição na superfície do terreno.

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \qquad (1)$$

As medições realizadas são volumétricas, ou seja, o valor da resistividade medido na superfície sofre a influência de todos os materiais em subsuperfície existentes no volume abrangido pelos eletrodos situados na superfície do terreno. A **Figura 3** ilustra o conceito de resistividade aparente do solo (ρ_a), que é uma medida resultante da contribuição de todas as resistividades (ρ_1, ρ_2, ρ_3 e ρ_4) presentes no volume da subsuperfície compreendida entre os quatro eletrodos de medição.

Figura 3 - O conceito de resistividade elétrica aparente (ρ_a).



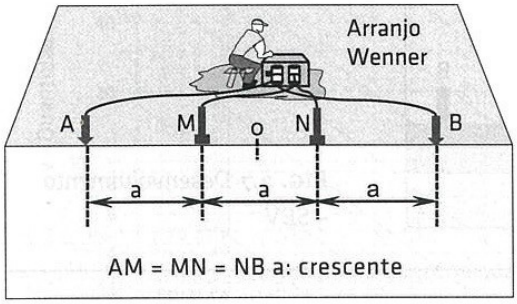
Fonte: modificado de Gallas (2000).

Para as medições de ρ_a podem ser utilizadas diferentes configurações no modo de disposição dos eletrodos no terreno. Tais configurações são denominadas de arranjos, como por exemplo os arranjos de Wenner e o de Schlumberger. Cada arranjo de eletrodos, apresenta certas características, vantagens e desvantagens, no que se refere à resolução, sensibilidade e razão sinal/ruído. Os arranjos Wenner e Schlumberger são os que fornecem a melhor resolução vertical, o que os tornam eficientes para identificar camadas dispostas horizontalmente no subsolo (WARD, 1990) e, assim sendo, são os arranjos comumente utilizado para a execução de uma técnica de medição em campo denominada de sondagem elétrica vertical (SEV).

3.3 Arranjo Wenner

No arranjo Wenner, os quatro eletrodos são dispostos em linha e as medidas são efetuadas mantendo-se uma distância constante entre eles (“a”) no decorrer de todo o ensaio, quando são simultaneamente movidos simetricamente em relação à um ponto fixo (“O”) correspondente ao centro do arranjo, que é o ponto de medição (**Figura 4**).

Figura 4 - Arranjo Wenner.



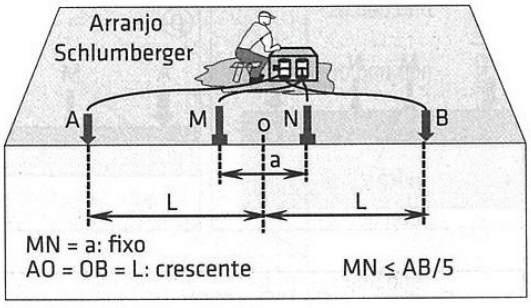
Fonte: Braga (2016).

O arranjo Wenner fornece uma melhor razão sinal/ruído em comparação ao arranjo Schlumberger, porém é mais suscetível a erros interpretativos devido às heterogeneidades laterais.

3.4 Arranjo Schlumberger

No arranjo Schlumberger os quatro eletrodos são dispostos em linha de modo que o espaçamento ("a") entre os dois eletrodos de potencial, M e N, permanece fixo e pouco distante entre si (geralmente em torno de 1 m). No decorrer das medições, os eletrodos de corrente, A e B, são distanciados simetricamente em relação ao ponto central por uma distância "L" (**Figura 5**). Pelo fato de "L" ir se tornando muito maior que "a", é necessário que o equipamento tenha uma alta sensibilidade de medição dos potenciais, principalmente se a fonte de alimentação do equipamento for de baixa potência. Se ocorrer a leitura de valores de potenciais a níveis abaixo da sensibilidade do equipamento, o espaçamento entre eletrodos de potencial deve ser aumentado, com repetição da medição sem o deslocamento dos eletrodos de corrente, operação conhecida no meio técnico como "embreagem".

Figura 5 - Arranjo Schlumberger.

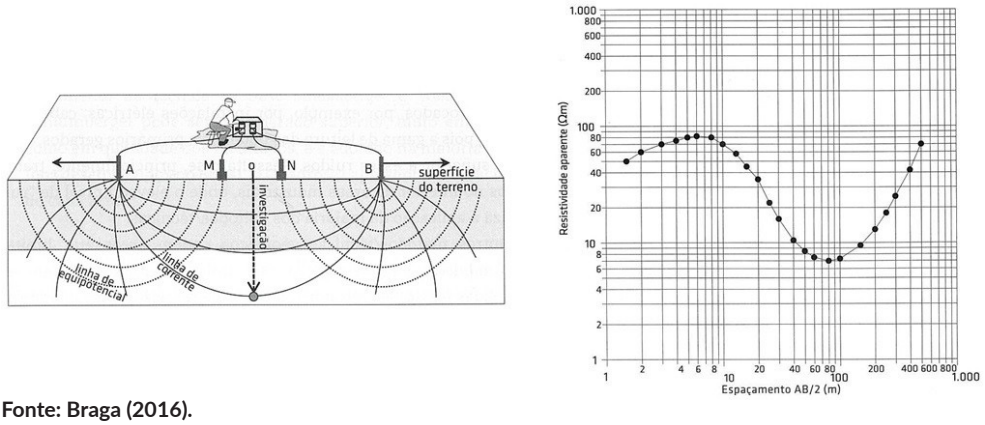


Fonte: Braga (2016).

3.5 Sondagem elétrica vertical (SEV)

A sondagem elétrica vertical (SEV) é uma técnica de medição do método da eletrorresistividade que é realizada utilizando um alinhamento simétrico de eletrodos e variando o espaçamento entre eles, conforme o arranjo de medição adotado (Wenner ou Schlumberger, em geral). A SEV investiga a distribuição vertical da resistividade elétrica no subsolo, abaixo de um ponto situado no centro do arranjo. As medidas realizadas em campo são apresentadas na forma de curvas de resistividades aparentes plotadas em um gráfico log-log (ρ_a versus metade do espaçamento entre eletrodos de corrente, A e B) que, passando por processos matemáticos de inversão e devidamente interpretadas, fornecem um modelo geoelétrico de subsuperfície (1D) atribuído ao ponto central do arranjo de eletrodos (**Figura 6**).

Figura 6 - Sondagem elétrica vertical (SEV).



Fonte: Braga (2016).

Este modelo, como será visto posteriormente, é constituído de camadas horizontais, plano e paralelas, onde cada camada apresenta um valor de resistividade elétrica e de espessura (modelo geoelétrico 1D de subsuperfície). Apesar de constituir uma solução que atende matematicamente ao problema da inversão, o modelo geoelétrico determinado pode não corresponder à estrutura geoelétrica que efetivamente ocorre no subsolo da área investigada, pois o processo de inversão tem a característica de admitir múltiplas soluções em termos de modelos geoelétricos para uma mesma curva de ρ_a, problema conhecido na geofísica como "não unicidade da solução".

A SEV é a técnica recomendada para as medidas de resistividade elétrica para projetos de aterramento elétrico na NBR-7117 em todas as suas versões (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1981; 2012; 2020).

4 ABNT NBR 7117 (1981) - Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)

Em sua primeira publicação, a norma NBR 7117 orienta a aplicação do arranjo Wenner, até então conhecido como método dos quatro pontos, na determinação de parâmetros essenciais de projetos elétricos e de aterramento: resistência de terra; gradientes de potencial; tensão de passo e tensão toque (potenciais perigosos); e parâmetros de linha de transmissão.

A norma apresenta condutas relacionadas às precauções de segurança durante as medições, tais como evitar a realização de medições sob condições atmosféricas adversas, o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs) e evitar que pessoas e animais se aproximem do equipamento de medição e dos eletrodos. Estas recomendações foram corretamente mantidas nas versões de 2012 e de 2020 da ABNT NBR-7117.

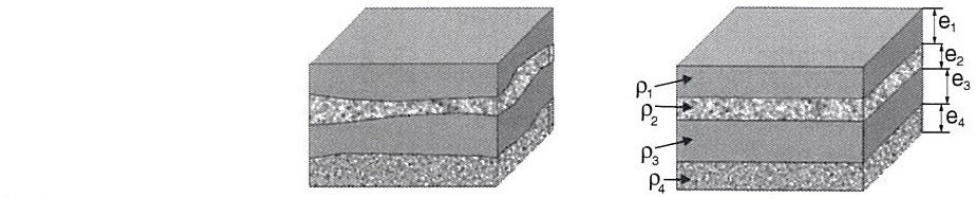
A NBR 7117 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1981) apresenta recomendações quanto ao número de pontos onde devem ser realizadas as medições em função da dimensão do terreno e uma descrição da aparelhagem utilizada para a realização do ensaio. Pode ser constatado uma notável evolução nos equipamentos utilizados, desde a publicação desta primeira versão até as duas versões mais recentes (2012 e 2020), em decorrência de todo avanço tecnológico eletrônico/digital da instrumentação ocorrido neste período.

Por fim, a norma NBR 7117 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1981) não estabelece nenhuma metodologia para a determinação de um modelo de subsuperfície com as camadas identificadas, constando os seus respectivos valores de resistividade elétrica e espessuras (estratificação real do solo). Apenas é apresentado, por meio de cálculos simplificados, o procedimento para a apresentação dos resultados, na forma de uma tabela, sem a elaboração da curva de resistividade elétrica aparente. Além disso, a norma nesta versão limita-se a apresentar o Wenner como a única opção de arranjo de eletrodos a ser utilizado para se realizar as medições.

5 ABNT NBR 7117 (2012) - Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo

Uma primeira mudança inovadora desta versão da norma foi a inclusão do conceito de estratificação do solo, para a melhoraria da precisão dos projetos. O volume do solo formado por camadas distribuídas heterogeneamente é aproximado por um modelo de camadas horizontais, plano e paralelas, onde cada camada possui um valor de resistividade (ρ) e de espessura (e) (Figura 7).

Figura 7 - Solo na sua configuração real (a) e o modelo unidimensional (1D) correspondente (b), estratificado em camadas horizontais, planas e paralelas.



Legenda	
ρ_1, e_1	Resistividade e espessura da camada de número 1;
ρ_2, e_2	Resistividade e espessura da camada de número 2;
ρ_3, e_3	Resistividade e espessura da camada de número 3;
ρ_4, e_4	Resistividade e espessura da camada de número 4.

Fonte: NBR 7117 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

O conceito de modelo de solo estratificado muito se aproxima do resultado do processamento de dados de uma SEV, há muito tempo já praticado pelos profissionais geofísicos para diversas aplicações nas áreas da geologia, hidrogeologia e geotecnia.

A norma NBR 7117 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) possui 64 páginas e apresenta uma descrição detalhada de diversos arranjos utilizando-se quatro eletrodos (além dos dois arranjos comumente mais utilizados - Wenner e Schlumberger): do eletrodo central; de Lee (ou das cinco hastes, pois utiliza um eletrodo adicional) e o de Schlumberger-Palmer.

A NBR 7117 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) também apresenta um grande volume de informações na forma de anexos (A, B e C) sobre alguns métodos gráficos de estratificação do solo (Anexo A), exemplos de estratificação do solo (Anexo B) e especificações dos equipamentos para a medição de resistividade do solo (Anexo C). Outros dois anexos informativos (D e E) abordam o método dos dois eletrodos (Anexo D) e a amostragem física do solo (Anexo E).

Nos procedimentos de medição são apresentadas recomendações quanto ao número de medidas e o posicionamento (direção) da linha de eletrodos em função das dimensões do terreno.

Na norma encontram-se dois itens que tratam sobre uma modelagem matemática do solo para duas camadas e sobre a estratificação do solo, seja por métodos gráficos (atualmente não praticada pelo meio técnico) ou por métodos computacionais (realizada por softwares, muitos deles disponíveis na Internet, de utilização livre para os usuários). Há um terceiro item que mostra exemplos de curvas de resistividade elétrica aparente e as respectivas quantidades de camadas no solo. Há uma relação entre o número de camadas da estratificação do solo com o número de inflexões da curva de resistividade: um solo homogêneo tem como curva uma reta; um solo de duas camadas tem uma curva com um ponto de inflexão e assim por diante.

Embora a utilização de softwares para o processamento e a interpretação dos dados seja recomendada, a norma NBR 7117 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) reforça que a análise física dos resultados é indispensável por parte do projetista, não sendo regulamentados tratamentos estatísticos ou ajustes posteriores, como pode ser constatado no seguinte trecho da norma: "a utilização de programas computacionais não exime o projetista da interpretação física dos resultados, para verificar a aplicabilidade da modelagem obtida do solo".

Para uma boa conduta técnica, deve-se ter em mente que geralmente um software não interpreta os dados e sim, os processa. Quem interpreta os dados é o ser humano, o usuário, o especialista, que domina o assunto e conta com toda a sua vivência prática e experiência.

6 ABNT NBR 7117-1 (2020) - Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos. Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoelétrica

A ABNT NBR 7117-1 de 2020, norma atual e vigente, cancelou e substitui a norma ABNT NBR 7117 de 2012. Sob o título geral "Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos", a norma passou a ser estruturada em partes e tem a previsão de conter posteriormente os seguintes adendos: a) Parte 2: Medição dos parâmetros térmicos e b) Parte 3: Medição da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética.

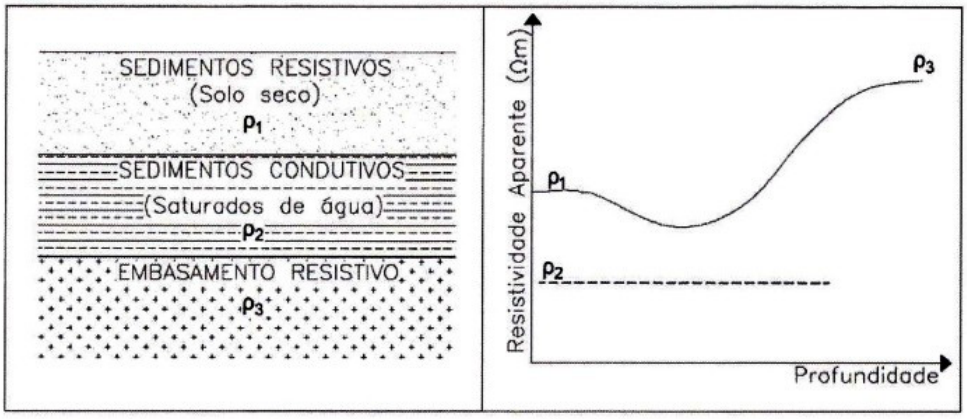
Esta parte da ABNT NBR 7117-1 apresenta os métodos de sondagem geoelétrica e as técnicas de determinação do modelo geoelétrico 1D correspondentes, não se aplicando às estruturas geoelétricas complexas, associadas aos modelos 2D ou 3D.

Em virtude da necessidade de técnicas de inversão para a elaboração dos modelos geoelétricos, a norma recomenda a atuação de um profissional qualificado na área de geofísica para que seja fornecido o devido suporte técnico, principalmente para sistema de aterramento de instalações de grande porte ocupando extensas áreas (parques eólicos, sistemas fotovoltaicos, complexos hidrelétricos, plantas industriais e subestações com área superior a 20.000 m2).

Conceituando-se, a inversão pode ser definida como o processo matemático que, a partir de uma curva de resistividades elétricas aparentes (ρ_a), infere a estrutura de subsuperfície, resultando em um modelo geoelétrico estratificado em camadas horizontais, planas e paralelas, denominado "modelo 1D" no jargão técnico geofísico.

Segundo Raggi (2009), um modelo estratificado com mais de três camadas possui pouco interesse prático. A **Figura 8** mostra um modelo geoelétrico típico de três camadas (duas inflexões da curva), composto por solo não saturado (superior), solo saturado com água (intermediária) e rocha (inferior).

Figura 8 - Modelo estratificado de um solo com três camadas geoelétricas e a curva de resistividade elétrica aparente correspondente.



Fonte: NBR 7117-1 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020).

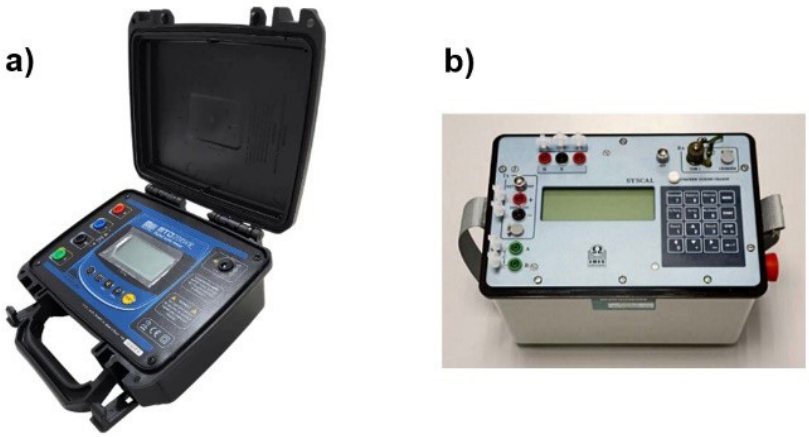
A norma NBR 7117-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020) é bem detalhada no que se refere ao tratamento dos dados (análise e inversão da curva de ρ_a), sendo enfatizada a importância de que, no processo de inversão sejam incorporadas informações complementares sobre o estudo do subsolo, tais como sondagens e o conhecimento das formações geológicas presentes na área, para a obtenção de um modelo geoelétrico mais compatível com a estrutura do solo existente no local.

Dentre os diversos arranjos apresentados na versão da norma de 2012, os dois únicos tratados na ABNT NBR de 2020 são os arranjos de Wenner e de Schlumberger de utilização já consolidada no meio técnico geofísico.

No anexo A da norma ABNT NBR 7117-1 são apresentadas as técnicas geofísicas de sondagens eletromagnéticas que podem complementar a investigação por eletrorresistividade, no caso de projetos de aterramento que necessitam de modelos geoelétricos mais profundos, devido à alta resistividade do solo ou a uma malha de aterramento com mais de 20.000 m. É ainda recomendado o uso de outro método geofísico, a perfilagem de poços, que utilizam sondas que descem dentro de um furo perfurado até a profundidade de interesse, medindo-se diretamente ρ na coluna de solo perfurada.

No anexo B são apresentados os equipamentos utilizados para as medições pelo método da eletrorresistividade citando, além do já conhecido terrômetro, o resistivímetro (**Figura 9**).

Figura 9 - Terrômetro (a) e resistivímetro (b).



Fonte: Megabras (2026) e Iris Instruments (2026).

As informações sobre o número de pontos, a localização e as direções das linhas de medição das SEVs, também constam nesta versão da norma.

7 Conclusão

A norma ABNT NBR 7117 passou por várias revisões desde sua primeira publicação em 1981, sendo atualizada para incorporar os avanços tecnológicos e científicos que aprimoraram os métodos de medição e o processamento dos dados.

A versão de 2012 introduz o conceito de estratificação do solo, enfatizando a importância para um processamento de dados mais adequado, sejam eles por métodos gráficos ou computacionais.

A versão mais recente da norma NBR 7117-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2020), juntamente com seus anexos, oferece orientações para o correto processamento dos dados, com procedimentos matemáticos de inversão e modelagem, contribuindo para uma melhor qualidade dos resultados. Os dois arranjos recomendados, Wenner e Schlumberger são, de fato, reconhecidamente eficazes para execução das medições nos ensaios de campo. A norma também recomenda a utilização de uma instrumentação adicional além do terrômetro, o resistivímetro. Em situações de maiores complexidades do subsolo, acertadamente a norma recomenda a utilização de técnicas de investigação 2D (que permitem uma boa avaliação horizontal e vertical do parâmetro ρ em subsuperfície), como por exemplo a tomografia de resistividade elétrica - ERT. A investigação pode ainda ser complementada pelas técnicas eletromagnéticas e de perfilagem de poços.

Ressalta-se que os resultados desses procedimentos de investigação por meio de ensaios indiretos, utilizando o método da eletrorresistividade, interessam não só aos projetistas elétricos, mas também a outros profissionais da área da engenharia civil, pois oferecem uma pré-avaliação do terreno a um custo/benefício atrativo, se comparado as investigações diretas e destrutivas (sondagens). Porém, nunca prescindindo deste tipo de informação, otimizando o tempo e economizando recursos, além de fornecerem os locais mais adequados para o posicionamento de furos de sondagens que eventualmente poderão ser realizados na investigação da área.

Enfim, sob o ponto de vista da geofísica, a ABNT NBR 7117 evoluiu ao longo destes anos, partindo de medições pontuais da resistividade elétrica para uma modelagem geoelétrica mais aprimorada e multidisciplinar.

8 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117: Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)**. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117-1: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos - Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geoelétrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BRAGA, Antonio Celso de Oliveira. **Geofísica aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GALLAS, José Domingos Faraco. **Principais métodos geoelétricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental**. 2000. Tese (Doutorado em Geociências e Ciências Exatas) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

IRIS INSTRUMENTS. **Consulta geral na homepage.** Disponível em: https://www.iris-instruments.com/. Acesso em: 25 mar. 2026.

MEGABRAS. **Consulta geral na homepage**. Disponível em: https://www.megabras.com/. Acesso em: 25 mar. 2026.

ORELLANA, Ernesto. **Propeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid: Paraninfo, 1972.

RAGGI, Luiz Márcio Rodrigues. **Projeto de malhas de aterramento: contribuição ao cômputo da estratificação do solo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

WARD, Stanley H. **Resistivity and induced polarization methods**. In: Geotechnical and Environmental Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1990. v. 1, p. 147-189.

XXXXXXXXXXXXXXXX

CC BY

Para obter mais informações
sobre os mestrados profissionais
Entre em contato com Adilson ou Mary pelo e-mail
mestrado@ipt.br
ou ligue para (11) 3767.4673

Sobre os cursos de especialização,
curta duração e educação corporativa
Entre em contato com Andrea pelo e-mail
cursos@ipt.br
ou ligue para (11) 3767-4226

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Av. Prof. Almeida Prado, 532
Cidade Universitária - São Paulo - SP
CEP 05508-901 - Brasil

Central de Relacionamento com o Cliente
(11) 3767-4102 / 4456 / 4091

Ensino Tecnológico
(11) 3767-4673 | mestrado@ipt.br

https://www.instagram.com/iptensino/

https://bit.ly/FacebookEnsinoTecnologicoIPT

https://bit.ly/LinkedinEnsinoTecnologicoIPT

https://www.youtube.com/@cursosipt

ipt INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS | ensino tecnológico

sapiens.ipt.br

revista IPT

TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Confira em nosso site todas as edições da revista

https://bit.ly/revistaIPT

