

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
MINAS GERAIS - *CAMPUS* OURO BRANCO  
SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

Thiago Salles Fernandes

**NEXAR: SISTEMA DE DETECÇÃO DE QUEDA DE BAIXO CUSTO  
PARA IDOSOS**

Ouro Branco - MG

2026

THIAGO SALLES FERNANDES

**NEXAR: SISTEMA DE DETECÇÃO DE QUEDA DE BAIXO CUSTO  
PARA IDOSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Sistemas de Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* Ouro Branco para a obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

**Orientador:** Prof. Dr. Charles Tim Batista Garrocho

Ouro Branco - MG  
2026

F363n Fernandes, Thiago Salles.

Nexar: sistema de detecção de queda de baixo custo para idosos. / Thiago Salles Fernandes. – 2026.

14f.il.col.

Orientador: Charles Tim Batista Garrocho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Sistemas de Informação) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco, 2026.

1. Detecção de quedas. 2. Dispositivos vestíveis. 3. Aprendizagem profunda. 4. Monitoramento de idosos. 5. ESP32. I. Garrocho, Charles Tim Batista. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco. III. Título.

CDU: 004.8

Catálogo: Márcia Margarida Vilaça - CRB-6/2235  
Biblioteca do Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus* Ouro Branco



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS OURO BRANCO**

Av. Afonso Sardinha, nº 90, Bairro Pioneiros, CEP: 36.420-000, Ouro Branco - Minas Gerais

(31) 3742-2149 – [gabinete.ourobranco@ifmg.edu.br](mailto:gabinete.ourobranco@ifmg.edu.br)

**ANEXO II – ATA DE CONCLUSÃO DE TCC**

Aos 19 dias do mês de janeiro de 2026, às 21:35 horas, Thiago Salles Fernandes, aluno(a) regularmente matriculado no Curso de Sistemas de Informação do Instituto Federal de Minas Gerais, campus Ouro Branco, matrícula 0100807, concluiu o seu Trabalho de Conclusão de Curso por meio de:

( ) Publicação do artigo intitulado \_\_\_\_\_ na revista/conferência \_\_\_\_\_, cujo comprovante de aceitação será anexado a esta ata, recebendo a nota \_\_\_\_\_ pelo trabalho. Eu, na qualidade de orientador do aluno, lavrei a presente ata atestando a conclusão do trabalho, a qual será assinada por mim e pelo aluno.

\_\_\_\_\_  
Professor Orientador

\_\_\_\_\_  
Aluno

(X) Defesa em sessão pública realizada às 21:35 horas, na sala auditório do Instituto Federal de Minas Gerais, campus Ouro Branco, na presença da banca examinadora composta pelos docentes:

- 1 - Daniela Costa Terra
- 2 - Ederson Naves Fernandes Gonçalves Júnior
- 3 - Lucas Portela Costa da Silva
- 4 - Marcio Assis Miranda

do artigo intitulado Nexar: Sistema de detecção de queda de baixo custo para idosos



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS OURO BRANCO

Av. Afonso Sardinha, nº 90, Bairro Pioneiros, CEP: 36.420-000, Ouro Branco - Minas Gerais

(31) 3742-2149 – [gabinete.ourobranco@ifmg.edu.br](mailto:gabinete.ourobranco@ifmg.edu.br)

A banca examinadora, após reunião em sessão reservada, deliberou pela aprovação do referido trabalho, atribuindo a nota 97,4. Eu, na qualidade de presidente da banca examinadora, lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos demais examinadores e pelo aluno.

Observações pertinentes à defesa:

**NOME E ASSINATURA DOS COMPONENTES DA BANCA E DO ORIENTADO**



Documento assinado digitalmente

**CHARLES TIM BATISTA GARROCHO**

Data: 23/01/2026 19:58:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Orientador: *Charles Tim Batista Garrocho*



Documento assinado digitalmente

**DANIELA COSTA TERRA**

Data: 25/01/2026 18:43:21-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador 1: Daniela Costa Terra



Documento assinado digitalmente

**EDERSON NAVES FERNANDES GONCALVES JUN**

Data: 26/01/2026 11:11:29-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador 2: *Ederson Naves Fernandes Gonçalves Júnior*



Documento assinado digitalmente

**LUCAS PORTELA COSTA DA SILVA**

Data: 26/01/2026 13:38:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador 3: *Lucas Portela Costa da Silva*



Documento assinado digitalmente

**MARCIO ASSIS MIRANDA**

Data: 26/01/2026 21:03:25-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador 4: *Marcio Assis Miranda*



Documento assinado digitalmente

**THIAGO SALLES FERNANDES**

Data: 26/01/2026 21:27:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aluno(a): *Thiago Salles Fernandes*



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS  
CAMPUS OURO BRANCO

Av. Afonso Sardinha, nº 90, Bairro Pioneiros, CEP: 36.420-000, Ouro Branco - Minas Gerais

(31) 3742-2149 – [gabinete.ourobranco@ifmg.edu.br](mailto:gabinete.ourobranco@ifmg.edu.br)

### DECLARAÇÃO ANTI-PLÁGIO

Eu, Thiago Salles Fernandes, estudante do curso Bacharelado em Sistemas de Informação do IFMG – Campus Ouro Branco, declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto ao IFMG – Campus Ouro Branco, que, **sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro**, que é de minha criação o Trabalho de Conclusão de Curso que ora apresento.

**Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de *Falsidade Ideológica*:**

“Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante:

Pena – reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalecendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte”.

Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos. Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Ouro Branco, 23 de janeiro de 2026



Documento assinado digitalmente  
THIAGO SALLES FERNANDES  
Data: 26/01/2026 21:26:04-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do aluno: \_\_\_\_\_

# Nexar: Sistema de detecção de queda de baixo custo para idosos

Thiago Salles Fernandes<sup>1</sup>, Charles Tim Batista Garrocho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais  
Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil

thsalles99@gmail.com, charles.garrocho@ifmg.edu.br

**Resumo.** *A alta incidência de quedas físicas entre idosos e as limitações de dispositivos comerciais frequentemente caros motivam o desenvolvimento de soluções vestíveis mais acessíveis e robustas. Este trabalho propõe um sistema de detecção automática de quedas físicas baseado em um dispositivo de baixo custo utilizando ESP32 e sensores inerciais de seis eixos, capaz de coletar dados brutos de aceleração e velocidade angular. A solução adota uma arquitetura em três camadas: um pré-processamento embarcado no dispositivo, responsável por filtragem, normalização e identificação preliminar de eventos suspeitos; uma API REST desenvolvida em Spring Boot, que centraliza os registros e encaminha os dados processados; e um módulo de classificação em Python, no qual modelos de aprendizagem profunda baseados em CNN e LSTM realizam a distinção entre quedas físicas reais e atividades cotidianas. O sistema integra-se ainda a um aplicativo móvel, que permite alertas em tempo real e utiliza o GPS do celular para registro de localização durante o evento detectado. A abordagem segue prototipação incremental e testes experimentais com dados reais. Os resultados esperados incluem maior precisão na detecção, redução de alarmes indevidos e maior eficiência no monitoramento contínuo, tornando o sistema uma alternativa viável e acessível às soluções existentes.*

## 1. Introdução

As quedas representam um dos principais problemas de saúde pública na população idosa, figurando entre os acidentes mais frequentes nessa faixa etária. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), elas constituem a segunda maior causa de mortes por lesões não intencionais no mundo, afetando predominantemente pessoas com 60 anos ou mais (World Health Organization, 2021). No Brasil, esse cenário torna-se ainda mais preocupante diante do acelerado envelhecimento populacional: o Censo Demográfico de 2022 registrou 32,1 milhões de indivíduos nessa faixa etária, correspondendo a 15,6% da população total, um aumento de 56% em relação a 2010 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022). Com o avanço da idade, fatores como fraqueza muscular, instabilidade postural e o uso frequente de múltiplos medicamentos contribuem significativamente para o aumento do risco de quedas (APPEADU et al., 2023).

Além da elevada incidência, as quedas em idosos estão frequentemente associadas a consequências graves, incluindo fraturas, hospitalizações prolongadas, perda de autonomia funcional e aumento da mortalidade. Estima-se que aproximadamente 30% dos indivíduos com 65 anos ou mais sofram ao menos uma queda por ano, sendo que cerca de 5% desses episódios demandam hospitalização devido a lesões severas, como

fraturas de quadril ou traumatismos cranianos (ALMEIDA; MEUCCI; DUMITH, 2019). Um estudo retrospectivo envolvendo mais de 57.000 pacientes identificou mortalidade intrahospitalar de 4,4% em quedas ao nível do solo entre idosos, além de elevada incidência de fraturas de fêmur, pelve e lesões intracranianas (SPANIOLAS et al., 2010). Ademais, após uma fratura de quadril, o risco de óbito nos 12 meses subsequentes pode atingir 20%, frequentemente associado a complicações secundárias, como infecções, tromboembolismos, delirium e imobilidade prolongada (CHOI et al., 2018). Ressalta-se que muitas dessas mortes não ocorrem de forma imediata, mas resultam de complicações posteriores, agravadas por comorbidades e pela demora ou inadequação da resposta assistencial.

Diante da gravidade e da frequência desses eventos, torna-se evidente a necessidade de dispositivos capazes de monitorar quedas automaticamente e emitir notificações imediatas, reduzindo o tempo de resposta e, conseqüentemente, mitigando seus impactos. Entre 2000 e 2019, mais de 135.000 mortes por quedas em pessoas com 60 anos ou mais foram registradas no Brasil, com crescimento médio anual de 5,45% (GONÇALVES et al., 2022). Apesar dessa relevância, o acesso a tecnologias assistivas ainda permanece limitado, especialmente entre idosos de baixa renda (MONDEN et al., 2024). Além disso, fatores culturais, como o receio de incomodar familiares ou admitir fragilidade, levam muitos idosos a ocultar episódios de queda, retardando o socorro e potencializando agravamentos clínicos evitáveis (OLIVEIRA; MORAIS; SOUSA, 2023).

Nesse contexto, embora as soluções comerciais de monitoramento vestível equipadas com sensores inerciais e sistemas de geolocalização representem um avanço na detecção de eventos críticos, sua implementação em larga escala enfrenta obstáculos significativos. Além do elevado custo de aquisição, que restringe o acesso em cenários de saúde pública, esses sistemas operam frequentemente sob protocolos fechados e algoritmos proprietários, o que dificulta a personalização para diferentes perfis de mobilidade e limita a transparência nos critérios de detecção. Revisões sistemáticas indicam que, apesar da conveniência, tais dispositivos apresentam uma especificidade reduzida em comparação a modelos especializados, gerando uma taxa considerável de falsos positivos que pode comprometer a confiança do usuário final (SINGH et al., 2024).

Considerando tais limitações e a realidade socioeconômica do país, este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo vestível de baixo custo, alinhado a iniciativas que evidenciam a viabilidade de soluções acessíveis e eficazes baseadas em sensores inerciais (SALEH; JEANNÈS, 2019). Ao integrar sensores de movimento de baixo custo, algoritmos robustos de detecção de quedas e um sistema simplificado de notificação, a proposta busca reduzir o intervalo entre o evento e a resposta assistencial, prevenindo complicações secundárias e contribuindo para a mitigação do impacto das quedas como um relevante problema de saúde pública no Brasil.

## **2. Background**

Esta seção descreve os fundamentos teóricos e tecnológicos que sustentam o desenvolvimento do sistema Nexar, enfatizando a importância de soluções capazes de detectar eventos de risco e notificar, de maneira automática e oportuna, indivíduos responsáveis ou serviços de apoio. Além disso, apresenta-se uma revisão crítica da literatura, analisando os principais trabalhos correlatos e posicionando o Nexar no contexto de dispositivos vestíveis destinados à detecção de quedas em pessoas idosas.

## **2.1. Invisibilidade das quedas e limitações na solicitação de ajuda**

Embora as quedas sejam amplamente reconhecidas como eventos frequentes na população idosa, os dados disponíveis tendem a representar apenas uma parcela do fenômeno real, uma vez que os sistemas de saúde e de vigilância epidemiológica dependem majoritariamente de registros provenientes de atendimentos formais ou do relato do próprio indivíduo (World Health Organization, 2021). Como consequência, episódios que não resultam em fraturas ou em lesões aparentes, especialmente aqueles classificados como “leves”, frequentemente não são comunicados e permanecem fora das estatísticas oficiais, configurando um cenário de subnotificação e invisibilidade das quedas na terceira idade (APPEADU et al., 2023).

Para além da subnotificação observada nos registros formais, destaca-se a questão crítica da incapacidade do idoso de solicitar auxílio de forma imediata após um evento de queda, mesmo quando o socorro é desejado. A experiência da queda insere o indivíduo em um estado de intensa vulnerabilidade física e psicológica, frequentemente desencadeando reações como fragilidade, estresse e insegurança, que afetam diretamente sua capacidade de resposta motora e cognitiva (LUZARDO et al., 2017). Essa limitação é agravada pelo fato de que muitos idosos vivem sozinhos, o que reduz significativamente a possibilidade de assistência imediata. Na sequência do trauma, diversos fatores incluindo dor aguda, confusão mental, estado de choque, restrições de mobilidade ou inconsciência podem impedir o pedido de ajuda.

Nesse contexto, sistemas tradicionais de resposta a emergências pessoais, como os Personal Emergency Response Systems (PERS), apresentam limitações importantes, uma vez que dependem da capacidade do usuário de acionar manualmente um botão de alerta. Embora sejam eficazes em determinadas circunstâncias, esses dispositivos tornam-se inoperantes quando o idoso está inconsciente ou fisicamente impossibilitado de alcançar o equipamento, comprometendo a eficácia da resposta assistencial (MUSCI et al., 2021).

Uma consequência grave dessa limitação é a ocorrência do fenômeno conhecido como long lie, caracterizado pela permanência prolongada do idoso no chão após a queda. Evidências indicam que indivíduos que permanecem por longos períodos sem assistência apresentam maior risco de complicações severas, como hipotermia, desidratação, lesões por pressão, perda de mobilidade e agravamento de condições clínicas preexistentes, podendo evoluir para desfechos fatais em casos de complicações pós-traumáticas (WILD; NAYAK; ISAACS, 1981; LORD et al., 1994).

## **2.2. Trabalhos relacionados**

O desenvolvimento de sistemas de detecção automática de quedas para pessoas idosas tem recebido ampla atenção da comunidade científica, impulsionado pelo impacto significativo desses eventos na saúde, na autonomia e na qualidade de vida dessa população. Estimativas indicam que as quedas figuram entre as principais causas de lesões graves e mortalidade em idosos, o que reforça a necessidade de soluções tecnológicas capazes de identificar tais eventos de forma automática e acionar mecanismos de resposta em tempo hábil (World Health Organization, 2021).

Diversas abordagens têm sido propostas na literatura, sendo os sistemas baseados em sensores inerciais amplamente adotados em razão de seu baixo custo, portabilidade e reduzido consumo energético. A revisão sistemática conduzida por Nooruddin et al.

(NOORUDDIN et al., 2022) apresenta uma taxonomia abrangente dos sistemas de detecção de quedas baseados em sensores, classificando-os de acordo com a quantidade e o tipo de sensores empregados, bem como as técnicas de detecção utilizadas. Os autores destacam que soluções fundamentadas em acelerômetros são particularmente adequadas para dispositivos vestíveis, embora ainda enfrentem desafios relacionados à precisão e à ocorrência de falsos positivos.

Com o avanço das técnicas de aprendizado de máquina, métodos baseados exclusivamente em limiares passaram a ser complementados ou substituídos por algoritmos de classificação mais robustos. Trabalhos recentes indicam que modelos de aprendizado profundo, especialmente redes neurais recorrentes do tipo *Long Short-Term Memory* (LSTM), apresentam desempenho superior na análise de séries temporais provenientes de sensores inerciais, contribuindo para a redução da taxa de falsos alarmes e para a melhoria na distinção entre quedas reais e atividades da vida diária (DANILENKA et al., 2023). Além disso, tais modelos têm sido progressivamente adaptados para execução em ambientes de Internet das Coisas (IoT) e computação de borda, considerando restrições de processamento, largura de banda e consumo energético.

Paralelamente, abordagens alternativas, como sistemas baseados em visão computacional, também têm sido amplamente investigadas. Gutiérrez et al. (GUTIÉRREZ; RODRÍGUEZ; MARTIN, 2021) analisaram de forma extensiva sistemas de detecção de quedas baseados em visão artificial, destacando avanços proporcionados pelo uso de redes neurais convolucionais. Entretanto, os autores ressaltam limitações relevantes relacionadas à privacidade, à dependência de condições ambientais controladas e à escassez de dados reais de quedas, fatores que restringem a aplicação dessas soluções em cenários reais e de monitoramento contínuo.

Mais recentemente, soluções integradas baseadas em IoT têm sido propostas com foco específico na população idosa. Sanyod et al. (SANYOD et al., 2025) desenvolveram um assistente de locomoção inteligente baseado em ESP32, incorporando sensores inerciais e comunicação sem fio para o envio de alertas em tempo real a cuidadores. Os resultados apresentados indicam elevada precisão na detecção de quedas e evidenciam a viabilidade de sistemas embarcados de baixo custo para o monitoramento contínuo da segurança do usuário, alinhados às demandas atuais da área.

A partir da análise dos trabalhos relacionados, observa-se que os principais desafios dos sistemas de detecção de quedas incluem a redução de falsos positivos, as limitações de recursos computacionais em dispositivos vestíveis, o consumo energético e a confiabilidade da comunicação. Diante desse cenário, o presente trabalho insere-se na linha de soluções baseadas em sensores inerciais e aprendizado profundo, explorando uma arquitetura de baixo custo voltada ao monitoramento contínuo de quedas em pessoas idosas. Os aspectos técnicos e metodológicos da solução proposta são detalhados nas seções subsequentes.

A solução integra mecanismos de pré-filtragem e processamento em nuvem, comunicação por meio de uma Interface de Programação de Aplicações (API) no estilo REST e classificação baseada em modelos de aprendizado profundo. Além disso, o sistema conta com um aplicativo móvel para acompanhamento contínuo e validação dos eventos detectados. Possibilitando sua evolução progressiva a partir de novos dados cole-

tados, contribuindo para uma solução robusta e atual para o monitoramento de quedas de pessoas idosas.

### 2.3. Bases de dados para detecção de quedas

Entre as bases de dados públicas mais frequentemente empregadas em estudos de detecção de quedas, destaca-se o *SisFall: A Fall and Movement Dataset*, amplamente referenciado na literatura como conjunto de apoio à avaliação de algoritmos baseados em sensores inerciais (SUCERQUIA; LÓPEZ; VARGAS-BONILLA, 2017). Essa base reúne registros de movimentos associados tanto a atividades da vida diária quanto a eventos de queda, sendo utilizada por diversos trabalhos como referência comparativa no desenvolvimento e na validação de modelos de classificação temporal.

## 3. Arquitetura do Sistema Nexar

O sistema Nexar foi concebido como uma solução distribuída e modular voltada à detecção automática de quedas em pessoas idosas, integrando tecnologias de sistemas embarcados, computação móvel, serviços em nuvem e Inteligência Artificial. A proposta arquitetural busca garantir eficiência energética, escalabilidade, confiabilidade e baixo acoplamento entre os componentes, características essenciais em sistemas de monitoramento contínuo na área da saúde.

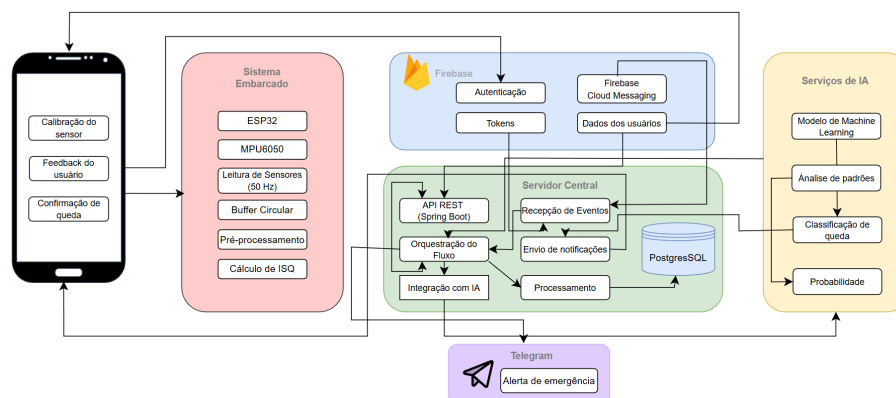


Figura 1. Visão geral da arquitetura do sistema Nexar

### 3.1. Visão Geral da Arquitetura

A arquitetura do Nexar é organizada em quatro camadas principais: (i) dispositivo embarcado, (ii) aplicação mobile, (iii) servidor central e (iv) serviço de Inteligência Artificial. Essa separação funcional permite que cada componente desempenhe responsabilidades bem definidas, promovendo alta coesão e facilitando a manutenção e evolução do sistema.

O dispositivo embarcado, equipado com sensores inerciais de seis eixos (acelerômetro e giroscópio), é responsável pela aquisição contínua dos sinais de movimento do usuário. A aplicação mobile atua como interface de interação com o usuário final, enquanto o servidor central orquestra a comunicação, persistência e integração com o serviço de Inteligência Artificial, responsável pela classificação dos eventos de queda.

### 3.2. Processamento Embarcado e Pré-Filtragem

O sistema embarcado realiza a leitura contínua dos seis eixos do sensor MPU6050, considerando aceleração e velocidade angular nos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ . A taxa de amostragem adotada é de 50 Hz, correspondente a um período de 20 ms entre amostras, enquanto o filtro digital passa-baixa (*Digital Low Pass Filter* – DLPF) é configurado em 42 Hz, reduzindo ruídos de alta frequência e contribuindo para a estabilidade do sinal.

As amostras são armazenadas em um *buffer circular* com capacidade para 600 amostras, equivalente a aproximadamente 12 segundos de dados. Esse mecanismo é implementado por meio de indexação modular, conforme a Equação 1, permitindo a retenção contínua de dados anteriores e posteriores a um evento, sem interrupção da coleta ou realocação dinâmica de memória.

$$idx_{atual} = (idx_{atual} + 1) \bmod N \quad (1)$$

Após o preenchimento inicial do buffer, o sistema passa a operar em modo de monitoramento contínuo. Quando é identificado um pico de aceleração superior ao limiar pré-definido de  $2,2g$ , o evento é classificado como potencialmente relevante. Nesse caso, inicia-se a coleta de um conjunto adicional de 100 amostras em um *buffer de pós-impacto*, preservando o comportamento do usuário imediatamente após o evento.

Com base nas amostras anteriores e posteriores ao impacto, o ESP32 calcula localmente um *Índice de Suspeita de Queda* (ISQ), utilizado como mecanismo de pré-filtragem embarcada. O objetivo desse índice é reduzir falsos positivos e evitar transmissões desnecessárias, contribuindo para o aumento da autonomia da bateria e para a redução da carga computacional nos serviços remotos.

O ISQ é obtido por meio da combinação ponderada de três indicadores, conforme a Equação 2:

$$ISQ = 0,65 \cdot I_{impacto} + 0,25 \cdot I_{angulo} + 0,10 \cdot I_{inatividade} \quad (2)$$

onde  $I_{impacto}$  representa a intensidade do pico de aceleração em unidades de gravidade ( $g$ ),  $I_{angulo}$  corresponde à variação angular média antes e após o impacto, normalizada no intervalo  $[0, 1]$ , e  $I_{inatividade}$  indica a proporção de amostras estáticas no período pós-impacto, também normalizada em  $[0, 1]$ .

Apenas eventos cujo valor de ISQ ultrapasse o limiar configurado são enviados ao servidor central para análise posterior. Após o envio, o sistema entra em um período refratário de 4 segundos, durante o qual novas detecções são temporariamente ignoradas, evitando múltiplos disparos referentes ao mesmo evento.

### 3.3. Comunicação e Orquestração no Servidor Central

A comunicação entre os componentes do sistema é intermediada pelo servidor central, que atua como um *middleware* responsável por integrar o sistema embarcado, o serviço de Inteligência Artificial, o banco de dados PostgreSQL e os serviços do Firebase. A troca de informações ocorre por meio de requisições HTTP REST, enquanto o envio de notificações ao usuário é realizado de forma assíncrona utilizando o Firebase Cloud Messaging (FCM).

O servidor central desempenha funções essenciais relacionadas à validação, persistência, encaminhamento e notificação dos eventos de queda. A Tabela 1 apresenta os principais papéis atribuídos a esse componente no contexto do sistema Nexar.

ID	Descrição do papel
P1	Receber e validar os dados sensoriais enviados pelo dispositivo embarcado.
P2	Encaminhar os dados para análise pelo serviço de Inteligência Artificial.
P3	Persistir os eventos detectados e seus respectivos metadados no banco de dados.
P4	Acionar o envio de notificações à aplicação mobile em caso de detecção de queda.
P5	Gerenciar e armazenar os tokens de notificação FCM fornecidos pela aplicação mobile.
P6	Receber o feedback do usuário sobre a ocorrência do evento.
P7	Atualizar o estado do evento no banco de dados, apoiando o aprimoramento contínuo do modelo.

**Tabela 1. Principais papéis do servidor no sistema Nexar**

### 3.4. Serviço de Inteligência Artificial para Detecção de Quedas

O Nexar diferencia-se de soluções convencionais ao empregar uma arquitetura de rede neural profunda customizada para o contexto de monitoramento de saúde. O modelo foi desenvolvido utilizando o conjunto de dados *SisFall*, submetido a um pré-processamento baseado em janelas deslizantes com 600 amostras temporais e 50% de sobreposição (*overlap*). A entrada do modelo consiste em um tensor de dimensões  $(600 \times 6)$ , representando os eixos triaxiais do acelerômetro e do giroscópio, devidamente normalizados para acelerar a convergência do treinamento.

A arquitetura proposta utiliza uma estrutura híbrida CNN-BiLSTM. Camadas de Convolução Unidimensional (*Conv1D*) atuam como extratoras automáticas de características morfológicas dos sinais brutos, enquanto uma camada *Bidirectional Long Short-Term Memory* (BiLSTM) é empregada para modelar dependências temporais de longo prazo. A natureza bidirecional da BiLSTM é particularmente relevante no contexto de detecção de quedas, pois permite ao modelo analisar tanto o comportamento cinemático que antecede o impacto quanto a estabilização ou ausência de movimento subsequente.

O processo de otimização do modelo utilizou o algoritmo Adam, com taxa de aprendizado inicial de  $10^{-3}$ , em conjunto com a função de custo *binary cross-entropy*. Para mitigar o desbalanceamento intrínseco do conjunto *SisFall* — no qual as Atividades de Vida Diária (ADL) superam numericamente os eventos de queda — aplicou-se a técnica de pesos de classe (*class weights*), atribuindo maior penalidade aos erros de classificação da classe minoritária.

Com o objetivo de garantir a generalização do modelo e evitar o fenômeno de *overfitting*, foram incorporados mecanismos de regularização, como *Dropout* e *Early Stopping*, com paciência de 10 épocas. Por fim, o limiar de decisão ( $\tau$ ) foi calibrado experimentalmente no conjunto de validação, buscando otimizar o  $F_1$ -score e estabelecer um equilíbrio entre sensibilidade — essencial para a detecção de eventos críticos — e precisão, fundamental para a redução de falsos alarmes em sistemas de assistência à saúde.

#### 4. Prova de Conceito

A prova de conceito do sistema Nexar foi desenvolvida com o objetivo de validar a integração entre os componentes de hardware e software, assegurando a funcionalidade do sistema de detecção de quedas em tempo real. O projeto foi concebido de forma a garantir uma solução de baixo custo, eficiente e acessível, sem comprometer o desempenho necessário para a identificação confiável de eventos críticos.

Nesse contexto, a seleção dos componentes foi realizada considerando critérios como desempenho, custo reduzido e eficiência energética. O microcontrolador adotado foi o ESP32 DOIT DevKit (30 pinos), equipado com o módulo ESP-WROOM-32, que integra conectividade Wi-Fi e Bluetooth Low Energy (BLE). Essa escolha se justifica pelo equilíbrio entre baixo custo e capacidade computacional suficiente para o pré-processamento dos dados sensoriais e a comunicação com os demais módulos do sistema.

Para a aquisição dos dados inerciais, utilizou-se o sensor MPU6050, um módulo de seis eixos que combina acelerômetro e giroscópio, selecionado por sua precisão, ampla disponibilidade no mercado e custo acessível. A alimentação do dispositivo é realizada por meio de uma bateria Li-Po de 3,7 V e 1500 mAh, cuja recarga é gerenciada pelo módulo TP4056, responsável por garantir segurança e estabilidade durante o processo de carregamento.

A Figura 2 ilustra o dispositivo acoplado ao cinto e a forma como ele é utilizado pelo usuário. A comunicação entre o dispositivo embarcado e o servidor central ocorre por meio de Wi-Fi, sendo acionada apenas quando eventos relevantes são detectados, o que contribui para a eficiência energética do sistema. O uso de conectores modulares facilita a manutenção e possibilita futuras modificações no hardware, aumentando a flexibilidade e a extensibilidade da solução proposta.



(a) Visão frontal do dispositivo vestível



(b) Dispositivo acoplado ao cinto

**Figura 2. Protótipo do dispositivo Nexar em diferentes formas de uso**

Por fim, o projeto adota conectores modulares para facilitar a manutenção e possíveis modificações no hardware, possibilitando a desconexão rápida da bateria e dos demais componentes, o que contribui para a flexibilidade e a extensibilidade da solução proposta.

#### **4.1. Funcionamento do sistema**

O fluxo completo de funcionamento do sistema Nexar inicia-se a partir da interação do usuário com o aplicativo móvel e estende-se até o processamento centralizado e a confirmação de eventos de queda. A Figura 3 ilustra a sequência de interações entre os principais componentes da arquitetura.

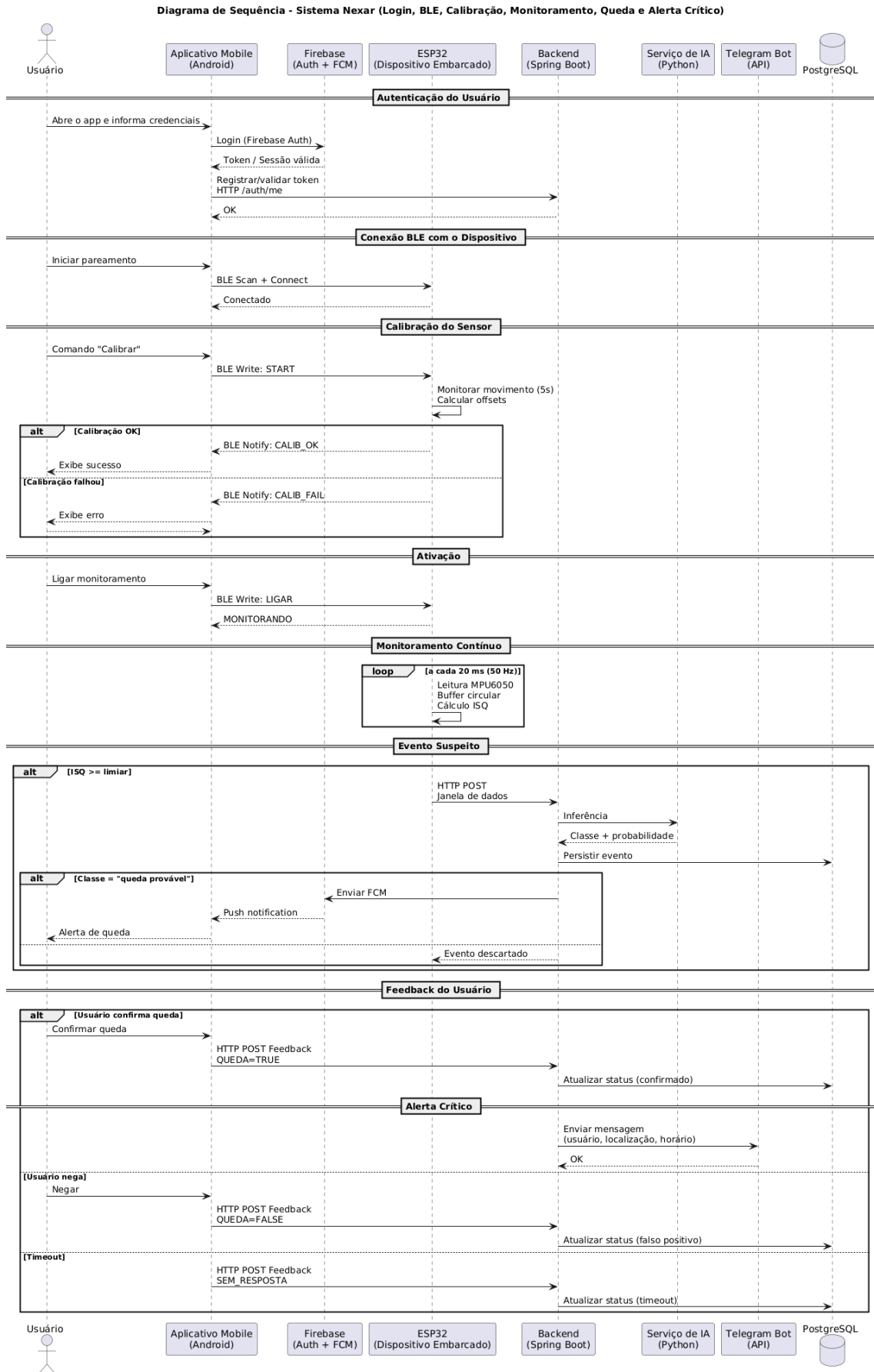
Após a autenticação no aplicativo móvel, é estabelecida uma conexão Bluetooth Low Energy (BLE) com o dispositivo embarcado baseado no ESP32. Em seguida, o usuário inicia a calibração do sensor inercial, na qual o sistema calcula os offsets do MPU6050 apenas em repouso, assegurando a precisão das medições; falhas no processo resultam na notificação do usuário.

Com a calibração validada, o monitoramento contínuo é ativado via BLE. O ESP32 passa a adquirir dados inerciais a uma taxa de 50 Hz, armazenando as amostras em um buffer circular e realizando o pré-processamento local, incluindo o cálculo do Índice de Suspeita de Queda (ISQ).

Quando o ISQ ultrapassa um limiar predefinido, indicando um evento potencialmente relevante, uma janela temporal de dados é consolidada e enviada ao servidor central por meio de uma requisição HTTP. O servidor valida o evento e encaminha os dados ao serviço de inteligência artificial, responsável pela inferência e classificação da ocorrência.

Caso a classificação indique uma queda provável, o servidor registra o evento no banco de dados PostgreSQL e aciona o Firebase Cloud Messaging (FCM) para o envio de uma notificação push ao aplicativo móvel.

Após a confirmação do usuário, o sistema pode ainda encaminhar um alerta crítico via Telegram, ampliando o alcance da notificação para cuidadores ou responsáveis. O feedback do usuário é utilizado para atualizar o estado final do evento, contribuindo para a redução de falsos positivos e para o aumento da confiabilidade do sistema.



**Figura 3. Fluxo de funcionamento do sistema Nexar**

## 5. Resultados e Discussão

A avaliação do protótipo do sistema Nexar teve como objetivo validar sua eficácia na detecção automática de quedas, no processamento dos dados sensoriais e na comunicação entre os diferentes componentes da arquitetura em tempo real. Para isso, foram realizados testes em cenários controlados, contemplando movimentos associados a atividades da vida diária (ADLs) e eventos simulados de queda, considerando variações de orientação do dispositivo, intensidade dos movimentos e condições de conectividade.

Os testes foram conduzidos utilizando um dispositivo vestível baseado no microcontrolador ESP32 acoplado a um sensor inercial de seis eixos (MPU6050), responsável pela aquisição contínua dos dados de aceleração e rotação. Durante os experimentos, o dispositivo realizou o pré-processamento local dos sinais e o cálculo de um índice de severidade de queda, permitindo o envio seletivo apenas de eventos considerados suspeitos ao servidor central.

Os resultados demonstraram que o modelo de inteligência artificial empregado no Nexar, baseado em uma arquitetura híbrida CNN-BiLSTM e treinado com dados normalizados do conjunto SisFall, alcançou uma acurácia aproximada de 87% na distinção entre atividades da vida diária (ADLs) e eventos de queda. Além da acurácia global, observou-se uma elevada taxa de sensibilidade (*recall*) para a classe de quedas, característica considerada prioritária em sistemas assistivos, uma vez que a não detecção de uma queda real representa um risco significativo à segurança de pessoas idosas.

A análise dos erros de classificação indicou que os falsos positivos estiveram concentrados principalmente em rotinas de atividades da vida diária caracterizadas por mudanças abruptas de aceleração e orientação do corpo, tais como sentar-se de forma brusca, deitar-se rapidamente ou realizar movimentos de agachamento. Contudo, a maior parte desses eventos foi mitigada pelo mecanismo de pré-processamento embarcado, que restringe o envio de janelas de dados ao backend apenas quando o Índice de Severidade de Queda ultrapassa um limiar pré-estabelecido. Adicionalmente, o sistema incorpora um mecanismo de confirmação via aplicativo móvel, no qual o usuário pode informar se o evento identificado corresponde, de fato, a uma queda real. Esse feedback possibilita a coleta de dados rotulados em ambiente real de uso, criando subsídios para ciclos futuros de re-treinamento do modelo e para o aprimoramento progressivo de sua precisão e robustez.

O desempenho temporal do sistema mostrou-se adequado para aplicações em tempo real. O tempo médio de resposta, considerando o intervalo entre a detecção do evento no dispositivo embarcado, o envio dos dados ao servidor, a inferência do modelo e o disparo da notificação ao aplicativo móvel, manteve-se inferior a 10 segundos após a ocorrência do evento de queda. Esse tempo é compatível com os requisitos de sistemas de monitoramento assistivo, nos quais a rapidez na notificação é essencial para a tomada de ações corretivas ou de emergência.

A comunicação entre o dispositivo vestível, o servidor central e o aplicativo móvel apresentou comportamento estável ao longo dos testes. O uso de Bluetooth Low Energy (BLE) para o pareamento inicial e a configuração do dispositivo mostrou-se adequado, enquanto a transmissão dos dados sensoriais ao backend via rede sem fio manteve a integridade das informações, mesmo em situações com maior volume de dados transmitidos.

A autonomia energética do protótipo também foi avaliada por meio de testes contínuos de operação. O sistema apresentou duração de bateria aproximada de 7 horas e 45 minutos, utilizando uma bateria de íons de lítio, valor considerado satisfatório para um protótipo funcional. Esse resultado evidencia a viabilidade do uso do Nexar ao longo de períodos prolongados, embora melhorias futuras possam ser exploradas para ampliar ainda mais o tempo de operação.

De forma geral, os resultados obtidos indicam que o Nexar é capaz de realizar a detecção automática de quedas de maneira eficiente, combinando processamento embarcado, inferência baseada em inteligência artificial e validação assistida pelo usuário. A integração entre esses elementos contribui para a confiabilidade do sistema, ao mesmo tempo em que possibilita sua evolução contínua por meio do reaproveitamento dos dados coletados em cenários reais de uso.

## **6. Limitações e Trabalhos Futuros**

Embora os resultados obtidos indiquem a viabilidade técnica do sistema Nexar, algumas limitações foram identificadas durante a fase experimental, abrindo espaço para aprimoramentos em trabalhos futuros.

Uma das principais oportunidades de evolução está relacionada à redução de falsos positivos. Apesar da arquitetura em duas camadas com filtragem por Índice de Severidade de Queda (ISQ) no dispositivo embarcado e validação assistida pelo usuário — ainda podem ocorrer ativações indevidas. Como trabalho futuro, pretende-se explorar técnicas de aprendizado incremental, incorporando os feedbacks fornecidos pelos usuários para o re-treinamento contínuo do modelo, tornando-o mais adaptado a padrões individuais de movimento.

Outra possibilidade de melhoria envolve a ampliação do conjunto de sensores. A incorporação de sensores adicionais, como sensores fisiológicos (frequência cardíaca) pode fornecer informações complementares ao modelo de classificação, contribuindo para uma detecção mais robusta e reduzindo ambiguidades entre quedas reais e atividades da vida diária.

No que se refere à autonomia energética, embora o protótipo tenha apresentado uma duração satisfatória para uma prova de conceito, trabalhos futuros podem focar na otimização do consumo de energia. Estratégias como o uso de modos avançados de *deep sleep*, ajuste dinâmico da frequência de amostragem do sensor MPU6050 podem estender significativamente o tempo de operação do dispositivo.

Adicionalmente, a avaliação em cenários reais de uso constitui um passo essencial para a maturação do sistema. Testes prolongados com usuários finais, em ambientes domésticos e externos, permitirão analisar o comportamento do Nexar em condições reais, considerando variáveis como conectividade instável, diferentes perfis de usuários e padrões naturais de movimento.

## **7. Considerações Finais**

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação do sistema Nexar, um protótipo vestível para detecção automática de quedas, baseado em sensores inerciais, processamento embarcado e inteligência artificial.

Os resultados obtidos demonstraram que o Nexar é capaz de identificar eventos de queda de forma satisfatória em cenários controlados. O modelo de classificação CNN-BiLSTM alcançou acurácia aproximada de 87%, apresentando boa capacidade de diferenciação entre atividades da vida diária e quedas.

Observou-se que a priorização da sensibilidade (recall) foi adequada ao contexto do problema, uma vez que a não detecção de uma queda representa maior risco ao usuário do que a ocorrência de falsos positivos. O tempo médio de resposta inferior a 10 segundos e a autonomia energética de aproximadamente 7 horas e 45 minutos indicam que o sistema atende aos requisitos básicos de aplicações assistivas em tempo real.

### 7.1. Retorno

Como principal retorno deste trabalho, destaca-se a validação de uma arquitetura híbrida que combina processamento no dispositivo embarcado e inferência no servidor, permitindo reduzir a carga computacional do hardware vestível sem comprometer o desempenho da detecção.

Outro retorno relevante foi a implementação de um mecanismo de confirmação via aplicativo móvel, que possibilita ao usuário informar se o evento identificado corresponde a uma queda real. Essa abordagem mostrou-se útil para lidar com falsos positivos e abre a possibilidade de utilização desses dados em futuras etapas de aprimoramento do modelo.

### 7.2. Recomendações

Como trabalhos futuros, recomenda-se a realização de testes em ambientes reais e por períodos prolongados, bem como a adoção de estratégias de otimização energética no ESP32, incluindo modos de economia de energia e ajustes na frequência de amostragem do sensor MPU6050. Além disso, o uso dos feedbacks dos usuários para o re-treinamento do modelo pode contribuir para a redução de falsos positivos e para a adaptação do sistema a diferentes perfis de uso.

## Referências

- ALMEIDA, Letícia Maria da Silva; MEUCCI, Rodrigo Dalke; DUMITH, Samuel C. Prevalence of falls in elderly people: a population based study. **Revista da Associação Médica Brasileira**, SciELO Brasil, v. 65, n. 11, p. 1397–1403, 2019.
- APPEADU, M. K. et al. Falls in older adults: A review of risk factors and prevention strategies. **Journal of Gerontology & Geriatric Research**, v. 12, n. 1, p. 1–7, 2023.
- CHOI, HG et al. Mortality and cause of death postoperatively in patients with a hip fracture: a national cohort longitudinal follow-up study. **The bone & joint journal**, Bone & Joint, v. 100, n. 4, p. 436–442, 2018.
- DANILENKA, Anastasiya et al. Real-time ai-driven fall detection method for occupational health and safety. **Electronics**, MDPI, v. 12, n. 20, p. 4257, 2023.
- GONÇALVES, L. H. T. et al. Mortalidade por quedas em idosos no brasil: análise de 2000 a 2019. **Revista Brasileira de Geriatria e Gerontologia**, v. 25, n. 1, p. e220001, 2022.

GUTIÉRREZ, Jesús; RODRÍGUEZ, Víctor; MARTIN, Sergio. Comprehensive review of vision-based fall detection systems. **Sensors**, MDPI, v. 21, n. 3, p. 947, 2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22439-censo-demografico-2022.html>>. Acesso em: 11 jul. 2025.

LORD, Stephen R et al. Physiological factors associated with falls in older community-dwelling women. **Journal of the American Geriatrics Society**, Wiley Online Library, v. 42, n. 10, p. 1110–1117, 1994.

LUZARDO, Adriana Remião et al. Queda de idosos: desvelando situações de vulnerabilidade. **REME-Revista Mineira de Enfermagem**, v. 21, n. 1, 2017.

MONDEN, Kimberley R et al. Exploring perspectives on assistive technology use: barriers, facilitators, and access. **Disability and Rehabilitation: Assistive Technology**, Taylor & Francis, v. 19, n. 4, p. 1676–1686, 2024.

MUSCI, Mirto et al. Online fall detection using recurrent neural networks on smart wearable devices. **IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing**, v. 9, n. 3, p. 1276–1289, 2021.

NOORUDDIN, Sheikh et al. Sensor-based fall detection systems: a review. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, Springer, v. 13, n. 5, p. 2735–2751, 2022.

OLIVEIRA, Sheyla Macêdo Ribeiro de; MORAIS, Alanna Michely Batista de; SOUSA, Milena Nunes Alves de. Principais causas da queda em idosos: um despertar para a prevenção. **Revista Eletrônica Acervo Saúde**, v. 23, n. 2, p. e11458–e11458, 2023.

SALEH, Majd; JEANNÈS, Régine Le Bouquin. Elderly fall detection using wearable sensors: A low cost highly accurate algorithm. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 19, n. 8, p. 3156–3164, 2019.

SANYOD, Vatinee et al. Iot-based smart walking assistant for fall detection in the elderly. **International Journal of Online & Biomedical Engineering**, v. 21, n. 6, 2025.

SINGH, Ben et al. Real-world accuracy of wearable activity trackers for detecting medical conditions: Systematic review and meta-analysis. **JMIR mHealth and uHealth**, v. 12, p. e56972, 2024. Disponível em: <<https://mhealth.jmir.org/2024/1/e56972>>.

SPANIOLAS, Konstantinos et al. Ground level falls are associated with significant mortality in elderly patients. **Journal of Trauma and Acute Care Surgery**, LWW, v. 69, n. 4, p. 821–825, 2010.

SUCERQUIA, Angela; LÓPEZ, José David; VARGAS-BONILLA, Jesús Francisco. Sisfall: A fall and movement dataset. **Sensors**, MDPI, v. 17, n. 1, p. 198, 2017.

WILD, Deidre; NAYAK, US; ISAACS, Bernard. How dangerous are falls in old people at home? **Br Med J (Clin Res Ed)**, British Medical Journal Publishing Group, v. 282, n. 6260, p. 266–268, 1981.

World Health Organization. **Falls**. 2021. <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/falls>>. Acesso em: 11 jul. 2025.