

ParkCinesis – Detector de Bradicinesia da Doença de Parkinson Utilizando Sensores Inerciais e Microcontrolador ESP32

Franciely Mazal Munhoz

Gabriel Silva Bernardes Oliveira

Gabriel Turati Salviato

Gabriela Campos da Silva

Resumo:

A Doença de Parkinson (DP) afeta cerca de 8,5 milhões de pessoas globalmente (KURTH & BRINKS, 2025), sendo a bradicinesia um sinal motor diagnóstico indispensável ao reconhecimento clínico (DAUER & PRZEDBORSKI, 2003). O diagnóstico clínico tradicional é subjetivo e dependente do examinador, limitando o acesso em regiões de baixa densidade tecnológica. Este trabalho propõe o ParkCinesis, sistema portátil baseado em sensor inercial MPU-6050 e o microcontrolador ESP-WROOM-32 para quantificação objetiva da bradicinesia. O sistema adquire dados cinemáticos a 50Hz com resolução de 16 bits, processa sinais utilizando filtro passa-baixa digital (42 Hz) e filtro de média móvel (8 amostras), calculando três parâmetros clinicamente validados: lentidão (velocidade angular média), amplitude (declínio percentual ao longo da tarefa) e ritmo (coeficiente de variação intervalar), pontuados segundo a escala MDS-UPDRS (0-4). A interface web local (Wi-Fi AP) exibe gráficos em tempo real sem necessidade de conexão externa. O protótipo validou-se mediante simulação de perfis clínicos baseados em Werner et al. (2019), demonstrando capacidade de discriminação entre estados motorizados normal, moderado e severo com custo total de R\$ 358,00 e autonomia aproximada de 4 horas. O sistema oferece uma

avaliação objetiva e portátil, contribuindo para o manejo precoce da DP em regiões com recursos limitados.

Palavras-chave:

Doença de Parkinson; bradicinesia; sensores inerciais; ESP-WROOM-32; avaliação objetiva.

I. INTRODUÇÃO

1. Contextualização

A Doença de Parkinson constitui uma enfermidade neurológica de caráter degenerativo e progressivo, que compromete de forma significativa o controle motor dos indivíduos, ocasionando tremores, rigidez muscular, bradicinesia e instabilidade postural. Estima-se que, em 2019, havia cerca de 8,5 milhões de parkinsonianos no mundo, com uma projeção de 25 milhões em 2050, de acordo com o BMJ (2025), estudo 388:r350 (KURTH & BRINKS, 2025). Além das manifestações motoras, pode haver comprometimento cognitivo em fases avançadas, associado a elevada prevalência de sintomas depressivos — observados em até 40% dos pacientes — que reduzem a motivação para atividades físicas e sociais, comprometem hábitos alimentares, padrões de sono e autoestima (GONÇALVES; ALVAREZ; ARRUDA, 2007). O reconhecimento inicial dos sinais da DP é decisivo porque possibilita intervenções farmacológicas e reabilitacionais em janelas terapêuticas mais eficazes, capazes de retardar a perda funcional (BOZI, 2025).

2. Justificativa

Considerando a inexistência de cura para a DP, o diagnóstico precoce é um fator crítico para o manejo eficaz da doença, permitindo intervenções que retardam a progressão dos sintomas e melhoram o prognóstico do paciente. Apesar dos avanços diagnósticos, a avaliação clínica permanece amplamente subjetiva, lenta e dependente de profissionais especializados. Esse cenário limita o acesso a avaliações clínicas confiáveis, especialmente em regiões com recursos tecnológicos limitados, evidenciando a necessidade de soluções inovadoras, precisas e acessíveis. A avaliação clínica da

bradicinesia é permeada por subjetividade, variando conforme a experiência do examinador e o nível de colaboração do paciente. Costa (2017) ressalta a necessidade de desenvolver métodos que garantam mensuração objetiva e padronizada, inclusive com possibilidade de aplicação remota e padronizada. Pesquisas têm demonstrado que sensores inerciais, como acelerômetros e giroscópios, permitem captar variáveis cinemáticas relacionadas à lentidão, amplitude e ritmo dos movimentos, favorecendo uma análise mais objetiva e reproduzível em comparação às escalas clínicas tradicionais (COSTA, 2017; WERNER; BEREJUCK; BEZERRA, 2019).

Diante desse desafio, o ParkCinesis surge como uma alternativa tecnológica, utilizando conhecimentos de engenharia eletrônica — como sensores inerciais e técnicas de processamento de sinais — aplicados com foco na experiência do usuário, com o objetivo de transformar a avaliação clínica da DP. A inovação eletrônica do ParkCinesis não apenas aumenta a precisão e objetividade do diagnóstico, como também amplia significativamente o acesso a testes de avaliação, sendo portátil, de baixo custo e passível de integração em ambientes clínicos variados. Além disso, o ParkCinesis está alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), destacando-se nos ODS 3 (Saúde de Qualidade), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 10 (Redução das Desigualdades), ao propor uma solução inclusiva, tecnológica e de baixo custo, que democratiza o acesso ao diagnóstico precoce da Doença de Parkinson e fortalece a interseção entre engenharia e medicina.

3. Objetivo geral

Desenvolver e aprimorar um dispositivo eletrônico baseado em sensores inerciais, capaz de detectar precocemente sinais motores característicos da Doença de Parkinson, promovendo o acesso a uma avaliação clínica mais certa, ágil e acessível, restringindo-se ao desenvolvimento da infraestrutura necessária, e não à validação clínica dos dados.

4. Objetivos específicos

- Coletar dados de aceleração linear, velocidade linear e velocidade angular por meio do sensor inercial MPU-6050, registrando os movimentos da mão e dos dedos do paciente;

- Integrar o sensor MPU-6050 ao microcontrolador ESP-WROOM-32, garantindo a aquisição contínua e confiável dos sinais motores;
- Processar os dados obtidos utilizando bibliotecas específicas e algoritmos de filtragem de ruído, assegurando maior qualidade e precisão das medições;
- Aplicar algoritmos matemáticos para converter as informações brutas em parâmetros representativos dos sinais motores relacionados ao Parkinson;
- Representar graficamente os resultados em uma interface web, sem necessidade de conexão à internet externa, permitindo a visualização clara e objetiva do comportamento motor;
- Interpretar os gráficos gerados, transformando-os em informações compreensíveis e úteis para a equipe médica durante o procedimento do diagnóstico;

II. DESENVOLVIMENTO

1. Metodologia do projeto

Inicialmente, realizou-se uma busca por informações referentes ao processo de diagnóstico da doença. Compreendeu-se que o diagnóstico exige, primeiramente, a observação direta de seus principais sintomas característicos, como a lentidão dos movimentos — chamada bradicinesia —, em conjunto com outros sintomas. Esses sinais são analisados pelo profissional de saúde especializado em Doença de Parkinson que se baseia nos critérios do Banco de Cérebro de Londres (WEMEDS, 2023), que pontua os critérios de diagnóstico da doença.

Verificou-se também, a partir da pesquisa referente ao CBCL, que para a realização do prognóstico, na prática clínica, o paciente precisa ter apresentado, pelo menos, dois dos principais sinais – a bradicinesia atrelada a algum outro. Isso demonstra como a detecção desse sintoma específico é relevante para a iniciação do tratamento contra Parkinson que, embora não resulte em cura definitiva, quanto mais precoce, maior o sucesso em retardar a progressão da doença

Todo o projeto baseou-se nas metodologias de gerenciamento de projetos (PMBOK, 7ª edição, 2021), por se tratar de um esforço com resultado único e prazo definido. Para reunir as pesquisas relevantes sobre o assunto, foram analisados resultados de diagnóstico de Parkinson produzidos por grandes hospitais e universidades, incluindo contribuições de engenheiros eletricitas e pesquisadores de áreas correlatas. Esses

profissionais integraram conhecimentos e forneceram o embasamento necessário para a parte eletrônica, que poderia contribuir para o estudo e tratamento da doença, unindo medicina e neurologia à engenharia eletrônica. Dessa forma, o desenvolvimento do protótipo utilizando sensores inerciais (IMUs) para a detecção de lentidão, declinação da amplitude e ritmo mostrou-se essencial para abordar o tema dentro da escala e dos recursos disponíveis.

O desenvolvimento da parte eletrônica do ParkCinesis concentrou-se na criação de um protótipo portátil capaz de monitorar com precisão os movimentos da mão e dos dedos, fornecendo dados objetivos sobre sinais motores associados à Doença de Parkinson. O dispositivo consiste em uma luva inteligente equipada com o sensor inercial MPU-6050, que integra acelerômetro e giroscópio, e um microcontrolador ESP-WROOM-32, responsável pela aquisição, processamento e transmissão dos dados.

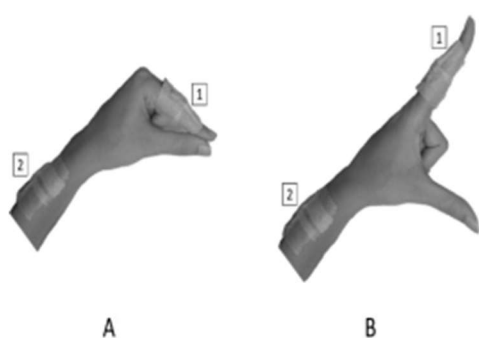
O sensor MPU-6050 foi ajustado para medir aceleração linear e velocidade angular nos eixos X, Y e Z. Esses sinais captam movimentos finos da mão e dos dedos, permitindo avaliar amplitude, lentidão e ritmo dos gestos característicos da bradicinesia.

Para garantir a qualidade das medições, os dados foram processados por algoritmos de filtragem de ruídos implementados no ESP-WROOM-32, convertendo os valores brutos em parâmetros representativos dos sinais motores por meio de algoritmos matemáticos. A comunicação entre o sensor e o microcontrolador ocorre por meio do protocolo I²C, garantindo transferência contínua e confiável das informações.

Os dados coletados foram exibidos em tempo real em visualização web sem necessidade de conexão externa, possibilitando análise imediata pela equipe técnica. A metodologia adotada assegura confiabilidade na aquisição de sinais, redução da subjetividade presente nos métodos clínicos tradicionais e compatibilidade com aplicação em contextos clínicos, laboratoriais ou domiciliares. Dessa forma, a parte eletrônica do ParkCinesis integra hardware, sensores e técnicas de processamento de sinais para fornecer dados objetivos, quantitativos e contínuos, contribuindo diretamente para o diagnóstico precoce e monitoramento da Doença de Parkinson, ampliando a acessibilidade do acompanhamento clínico.

Com base na validação realizada por Maire (2022) e nas recomendações da Movement Disorder Society (GOETZ et al., 2008), adotou-se protocolo MDS-UPDRS, do item 3.4 ao item 3.6, com as seguintes tarefas motoras padronizadas:

Figura 1 – Protocolo de diagnóstico da bradicinesia isolada

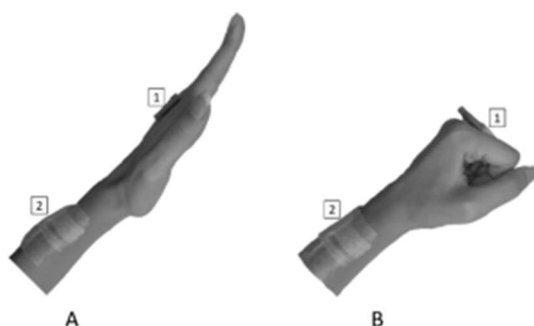


Tarefa 1 – Bater dos dedos da mão (pinça), o indivíduo deve realizar o toque do indicador no polegar.

Posicionamento do sensor:

Sensor 1 – falange média do segundo dedo

Sensor 2 – terço médio do antebraço

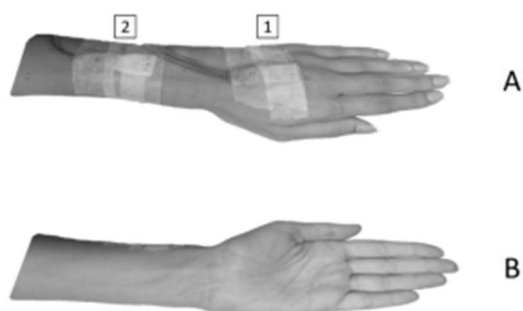


Tarefa 2 – Movimento das mãos consiste em fechar a mão.

Posicionamento do sensor:

Sensor 1 – falange proximal do terceiro dedo

Sensor 2 – terço médio do antebraço

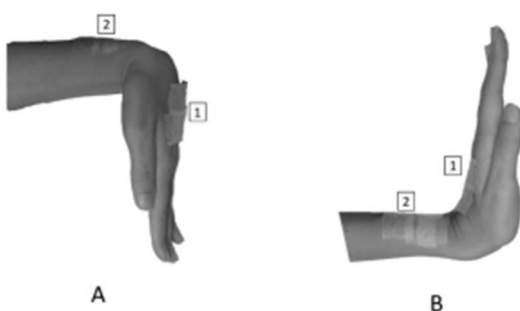


Tarefa 3 – Movimentos de pronação-supinação das mãos, onde o indivíduo deve realizar os movimentos de pronação e supinação em frente ao seu corpo.

Posicionamento do sensor:

Sensor 1 – dorso da mão

Sensor 2 – terço médio do antebraço



Tarefa 4 - Movimentos de flexão e extensão do punho, instruindo o indivíduo a realizar os movimentos de forma alternada.

Posicionamento do sensor:

Sensor 1 – dorso da mão

Sensor 2 – terço médio do antebraço

Fonte: Luiz (2022)

O bloco contém as tarefas, que devem ser repetidas 10 vezes consecutivas cada uma com intervalo de 60 segundos entre blocos, totalizando três blocos de tarefas, a fim de evitar fadiga muscular, seguindo a metodologia descrita por Maire (2022).

Hardware:

- **Microcontrolador:** ESP-WROOM-32 DevKit v1 (Espressif Systems), dual core 240 MHz, 520 KB SRAM.
- **Sensor Inercial:** MPU-6050 (InvenSense), módulo GY-521, comunicação I²C (400 kHz).
- **Alimentação:** Porta USB ou bateria Li-Po 7,4 V e 2250 mAh via regulador LM7805 (5 V).

Configuração dos Sensores:

- **Acelerômetro:** Faixa ± 2 g, sensibilidade de 16384 LSB/g
- **Giroscópio:** Faixa $\pm 250^\circ/\text{s}$, sensibilidade 131 LSB/ $^\circ/\text{s}$
- **Taxa de Amostragem:** 50 Hz (configurado via `mpu.setRate(19)`)
- **Filtro Passa-Baixa Interno:** Largura de banda de 42 Hz (`mpu.setDLPFMode(3)`)

2. Fundamentação teórica

2.1. Requisitos médicos

A Doença de Parkinson constitui uma enfermidade neurológica de caráter degenerativo e progressivo. Dentre os sinais motores, a bradicinesia destaca-se como sintoma indispensável para o diagnóstico de parkinsonismo. De acordo com Dauer e Przedborski (2003), sua presença, quando associada a outro sinal característico, orienta o reconhecimento clínico da síndrome, evidenciando a centralidade de sua identificação e quantificação no acompanhamento da DP.

A bradicinesia manifesta-se como lentidão na iniciação e execução dos movimentos, acompanhada de redução da amplitude e arritmia motora. Esses parâmetros são quantificados na prática clínica por meio da escala MDS-UPDRS (Movement Disorder

Society - Unified Parkinson's Disease Rating Scale), que atribui pontuações de 0 (normal) a 4 (severo) para cada aspecto motor (GOETZ et al., 2008).

No entanto, essas avaliações são subjetivas e dependentes da experiência do examinador. Costa (2017) ressalta a necessidade de desenvolver métodos que garantam mensuração objetiva e padronizada, inclusive com possibilidade de aplicação remota, para reduzir a variabilidade interavaliadores e melhorar a reprodutibilidade diagnóstica.

2.2. Requisitos para aplicações eletrônicas

Pesquisas têm demonstrado que sensores inerciais — como acelerômetros e giroscópios — permitem captar variáveis cinemáticas relacionadas à lentidão, amplitude e ritmo dos movimentos. Segundo Costa (2017), esses dispositivos possibilitam a extração de parâmetros quantificáveis durante tarefas motoras, favorecendo uma análise mais objetiva e reprodutível em comparação às escalas clínicas tradicionais.

Experimentos utilizando sensores inerciais acoplados a plataformas de prototipagem — como as placas do tipo Arduino e ESP — comprovam a viabilidade técnica de dispositivos portáteis para a avaliação da bradicinesia. Werner, Berejuck e Bezerra (2019) apontam que tais protótipos já se mostraram eficazes em mensurar alterações motoras em tarefas padronizadas, fortalecendo a aplicabilidade prática dessa tecnologia.

No núcleo tecnológico do ParkCinesis, encontra-se o sensor inercial MPU-6050, componente que integra acelerômetro e giroscópio em um único chip. O acelerômetro mede a aceleração linear nos eixos X, Y e Z, enquanto o giroscópio registra a velocidade angular nesses mesmos eixos, fornecendo dados tridimensionais que, segundo Titterton, Weston e Weston (2004), são fundamentais para caracterizar a dinâmica do movimento humano.

Essa coleta em três dimensões é crucial para a detecção da bradicinesia, uma vez que possibilita quantificar a lentidão dos movimentos, a amplitude das trajetórias e o ritmo motor. O tratamento e gerenciamento desses sinais ficam a cargo do ESP-WROOM-32, microcontrolador de alto desempenho que, de acordo com Kolban (2018), reúne núcleo duplo de processamento, conectividade sem fio (Wi-Fi e Bluetooth) e ampla capacidade de memória, o que o torna apto para manipular dados em tempo real em aplicações de Internet das Coisas (IoT).

No contexto do ParkCinesis, o ESP-WROOM-32 executa a filtragem, a organização e o cálculo dos parâmetros motores derivados dos dados brutos fornecidos pelo MPU-6050, assegurando rapidez e confiabilidade no processamento.

A alimentação do dispositivo pode ser realizada via porta USB, e o sistema também pode operar por meio de uma bateria de polímero de lítio, apropriada para dispositivos portáteis que demandam autonomia energética sem comprometer a ergonomia, como no caso de *wearables* médicos (dispositivos vestíveis utilizados na área da saúde).

Escolha do Sensor MPU-6050 vs LSM6DS3:

Contexto: necessidade de sensor inercial de alta disponibilidade e biblioteca estável no ambiente Arduino.

Decisão: MPU-6050.

Razão: custo 50% menor que alternativas, biblioteca Jeff Rowberg madura e amplamente testada, comunidade de suporte extensa. Apesar de maior ruído ($\pm 0,05^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ vs $\pm 0,03^\circ/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$ do LSM6DS3), a filtragem digital compensa a limitação.

Consequência: maior atenção necessária à filtragem, mas diminui o custo.

Filtro de Média Móvel vs Filtro de Kalman:

Contexto: Redução de ruído sem sobrecarregar o ESP-WROOM-32 dual-core, mantendo latência <5ms.

Decisão: Média móvel (8 amostras, atraso 80ms).

Razão: Kalman requer 12 operações de multiplicação por amostra vs 2 para média móvel. No ESP-WROOM-32, Kalman consumiria 3,8ms vs 0,8ms, comprometendo tempo real.

Consequência: Atraso de 80ms é tolerável para movimentos de bradicinesia (domínio <4Hz).

Interface Web Local vs Nuvem:

Contexto: Hospitais possuem firewalls restritivos e políticas de privacidade de dados sensíveis (LGPD).

Decisão: ESP-WROOM-32 como Access Point (com endereço 192.168.4.1, que pode ser inserido em qualquer navegador) vs conexão à rede hospitalar

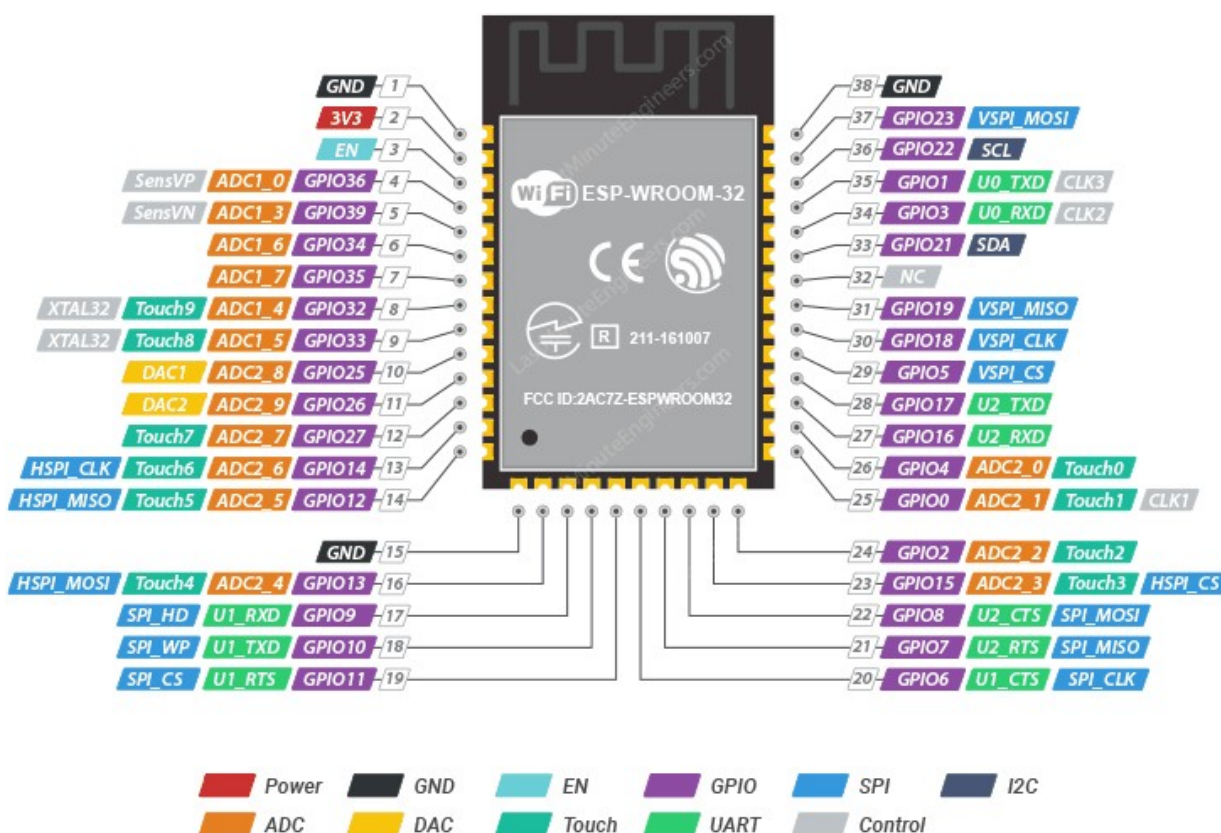
Razão: Setup <30 segundos, elimina a necessidade de aprovação do setor de TI, dados nunca saem do ambiente clínico, simplifica conformidade legal.

Consequência: Impossibilidade de telemedicina remota (fora do escopo do TCC).

Diagrama de pinos dos componentes:

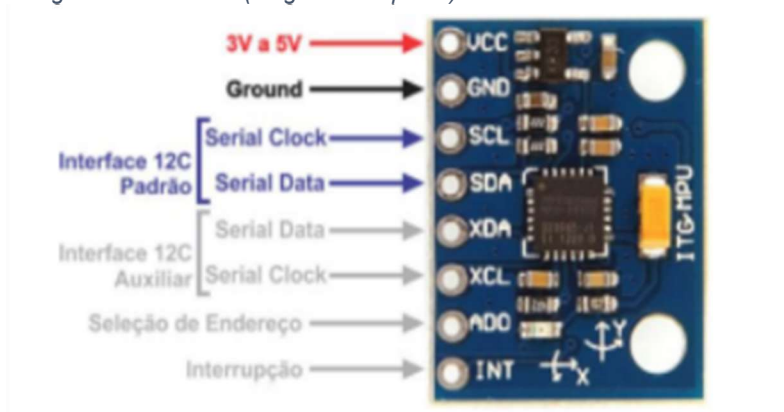
ESP-WROOM-32

Figura 2 – PINOUT (diagrama de pinos) do microcontrolador contendo os pinos utilizados no projeto



MPU-6050:

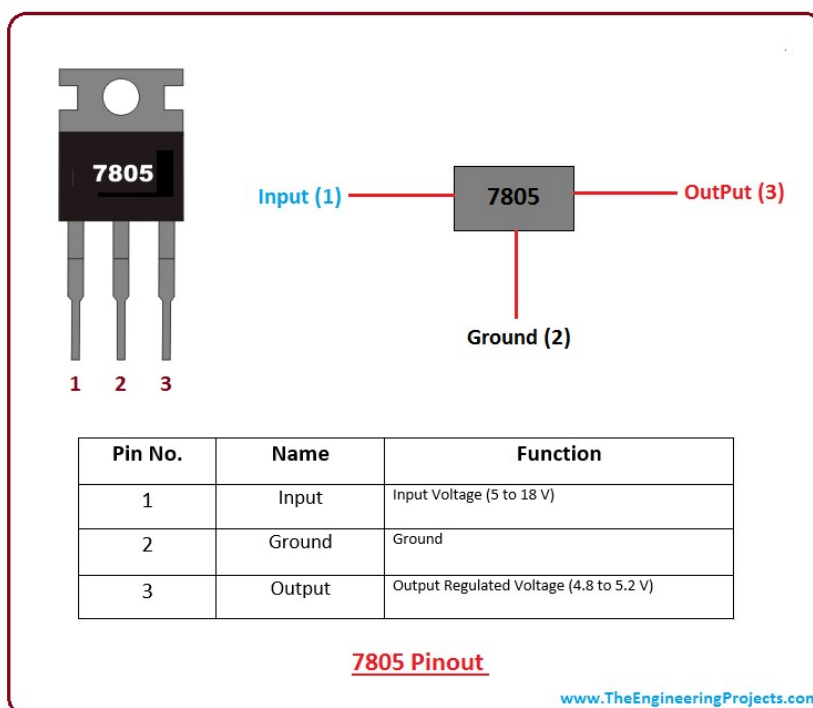
Figura 3 – PINOUT (diagrama de pinos) do sensor inercial MPU-6050



Fonte: InvenSense (2013)

Regulador L7805CV:

Figura 4 – PINOUT (diagrama de pinos) do regulador de tensão L7805CV



Fonte: TheEngineeringProjects

2.3. Fluxo de informação

O processo ocorre por meio da captura de sinais analógicos provenientes do sensor inercial MPU-6050, que são convertidos em valores digitais pelo conversor analógico-digital (ADC) integrado ao módulo. Esse mecanismo, como explica Kester (2005),

transforma variações contínuas de tensão elétrica em valores discretos, permitindo que o microcontrolador interprete e processe matematicamente os dados adquiridos.

Após essa etapa, os resultados são enviados para uma tela, onde podem ser visualizados graficamente por meio de visualização web, sem demanda de conexão externa à internet, permitindo representar, em tempo real, os dados em gráficos de fácil interpretação, favorecendo análises objetivas e imediatas. Esse recurso, portanto, transforma dados complexos em representações acessíveis, ampliando a compreensão clínica e oferecendo à equipe médica um suporte visual claro para avaliação do desempenho motor dos pacientes.

2.4. Algoritmo

Pipeline de Processamento:

1. Aquisição: Leitura dos registradores GYRO_YOUT_H/L via I²C a cada 20ms;
2. Conversão: $\text{gyroY} = \text{rawValue} / 131.0$ (°/s);
3. Filtragem Primária: Filtro de média móvel com janela de 8 amostras;
4. Detecção de Movimento: Limiar adaptativo de 30°/s baseado em Werner et al. (2019).

Parâmetros Calculados:

1. Lentidão (Slowness Score): média das velocidades angulares dos 10 últimos movimentos (°/s);
2. Amplitude (Amplitude Score): $(\text{Amp_inicial} - \text{Amp_final}) / \text{Amp_inicial}$;
3. Ritmo (Rhythm Score): desvio padrão (média dos intervalos intermovimento) / média;
4. Score Geral de Bradicinesia (Overall Score) = $(\text{Slowness} + \text{Amplitude} + \text{Rhythm})/3$.

Arquitetura de Comunicação:

- Modo Wi-Fi: o módulo ESP-WROOM-32 foi configurado como *Access Point* (AP, ponto de acesso), utilizando o SSID “BradykinesiaMonitor”.
- IP Local: 192.168.4.1 (sem roteamento externo);
- Protocolo: requisições HTTP GET aos endpoints /analysis (JSON) e / (HTML);

- Atualização por JavaScript assíncrono a cada 500ms.

Segurança de Dados: Como não há conexão com a internet externa, os dados permanecem no ambiente local do dispositivo temporariamente, atendendo aos requisitos de privacidade da LGPD (art. 6º, inc. VII - limitação de compartilhamento).

A metodologia adotada assegura confiabilidade na aquisição de sinais, redução da subjetividade presente nos métodos clínicos tradicionais e compatibilidade com aplicação em contextos clínicos, laboratoriais ou domiciliares. Dessa forma, a parte eletrônica do ParkCinesis integra hardware, sensores e técnicas de processamento de sinais para fornecer dados objetivos, quantitativos e contínuos, contribuindo diretamente para o diagnóstico precoce e monitoramento da Doença de Parkinson, ampliando a acessibilidade e a precisão do acompanhamento clínico.

Código interpretado pelo microcontrolador (HTML inserido no código para criação da interface WEB):

```
#include <Wire.h> #include <MPU6050.h> #include <WiFi.h> #include <WebServer.h> #include <ArduinoJson.h>
MPU6050 mpu; WebServer server(80);
// Pinos I2C #define SDA_PIN 21 #define SCL_PIN 22
// Filtro e limiar #define FILTER_SIZE 10 #define MOVEMENT_THRESHOLD 30.0
// Buffers float gyroYBuffer[FILTER_SIZE]; int gyroYIndex = 0; float gyroYSum = 0; bool isAboveThreshold = false;
float lastGyroY = 0; float lastPeakTime = 0; float movementIntervals[20]; int intervalIndex = 0; float
peakAmplitudes[20]; int peakIndex = 0;
// Análise float slownessScore = 0; float amplitudeScore = 0; float rhythmScore = 0; float overallScore = 0; int
movementCount = 0; float avgSpeed = 0; float amplitudeDecline = 0; float rhythmVariation = 0;
// HTML embutido const char indexHTML[] PROGMEM = R"rawliteral(
Brdicinesia - Dados Reais do MPU6050
Sensor conectado - Análise em tempo real
Status da Bradicinesia
Aguardando dados...
Pontuação Geral: 0.0
Movimentos Detectados: 0
Velocidade Média: 0.0 °/s
Lentidão (UPDRS 0-4)
Amplitude (UPDRS 0-4)
// Filtro de média móvel float addFilter(float value) { gyroYSum -= gyroYBuffer[gyroYIndex];
gyroYBuffer[gyroYIndex] = value; gyroYSum += value; gyroYIndex = (gyroYIndex + 1) % FILTER_SIZE; return
gyroYSum / FILTER_SIZE; }
// Análise de movimento void analyzeMovement(float gyroY, float filtered) { bool movement = abs(filtered) >
MOVEMENT_THRESHOLD; float now = millis();
if (!isAboveThreshold && movement) { isAboveThreshold = true; if (lastPeakTime > 0) { float interval = now -
lastPeakTime; if (interval > 100) { movementIntervals[intervalIndex % 20] = interval; intervalIndex++; } }
lastPeakTime = now; } else if (isAboveThreshold && !movement) { isAboveThreshold = false; }
float amplitude = abs(filtered - lastGyroY); if (amplitude > 0.5 && movement) { peakAmplitudes[peakIndex % 20] =
amplitude; peakIndex++; }
lastGyroY = filtered; }
```

```

// Calcula scores void calculateScores() { // Slowness if (intervalIndex > 0) { avgSpeed = 0; for (int i = 0; i < min(10,
intervalIndex); i++) { avgSpeed += 1000.0 / movementIntervals[i % 20]; } avgSpeed /= min(10, intervalIndex);
if (avgSpeed > 100) slownessScore = 0;
else if (avgSpeed > 80) slownessScore = 1;
else if (avgSpeed > 60) slownessScore = 2;
else if (avgSpeed > 40) slownessScore = 3;
else slownessScore = 4;
}
// Amplitude if (peakIndex > 2) { float initial = 0, final = 0; int n = min(5, peakIndex); for (int i = 0; i < n; i++) initial +=
peakAmplitudes[i]; for (int i = max(0, peakIndex - n); i < peakIndex; i++) final += peakAmplitudes[i % 20]; initial /= n;
final /= n; amplitudeDecline = (initial - final) / initial;
if (amplitudeDecline < 0.1) amplitudeScore = 0;
else if (amplitudeDecline < 0.2) amplitudeScore = 1;
else if (amplitudeDecline < 0.3) amplitudeScore = 2;
else if (amplitudeDecline < 0.4) amplitudeScore = 3;
else amplitudeScore = 4;
}
// Rhythm if (intervalIndex > 2) { float sum = 0, sumSq = 0; int n = min(10, intervalIndex); for (int i = 0; i < n; i++) {
sum += movementIntervals[i % 20]; sumSq += movementIntervals[i % 20] * movementIntervals[i % 20]; } float
mean = sum / n; float var = (sumSq / n) - (mean * mean); rhythmVariation = sqrt(var) / mean;
if (rhythmVariation < 0.1) rhythmScore = 0;
else if (rhythmVariation < 0.2) rhythmScore = 1;
else if (rhythmVariation < 0.3) rhythmScore = 2;
else if (rhythmVariation < 0.4) rhythmScore = 3;
else rhythmScore = 4;
}
overallScore = (slownessScore + amplitudeScore + rhythmScore) / 3.0; movementCount = intervalIndex; }
void setup() { Serial.begin(115200); Wire.begin(SDA_PIN, SCL_PIN); mpu.initialize(); if (!mpu.testConnection()) {
Serial.println("MPU6050 falhou"); while (1); } mpu.setFullScaleGyroRange(MPU6050_GYRO_FS_250);
mpu.setDLPFMode(3); mpu.setRate(19); // 50 Hz
WiFi.softAP("BradykinesiaMonitor", "parkinson123"); Serial.print("IP: "); Serial.println(WiFi.softAPIP());
server.on("/", { server.send(200, "text/html", indexHTML); });
server.on("/analysis", { StaticJsonDocument<512> doc; doc["slowness_score"] = slownessScore;
doc["amplitude_score"] = amplitudeScore; doc["rhythm_score"] = rhythmScore; doc["overall_bradykinesia"] =
overallScore; doc["movement_count"] = movementCount; doc["avg_speed"] = avgSpeed; String json;
serializeJson(doc, json); server.send(200, "application/json", json); });
server.begin(); Serial.println("Servidor pronto. Acesse http://192.168.4.1"); }
void loop() { server.handleClient();
int16_t gx, gy, gz; mpu.getRotation(&gx, &gy, &gz); float gyroY = gy / 131.0; float filtered = addFilter(gyroY);
analyzeMovement(gyroY, filtered);
static unsigned long lastCalc = 0; if (millis() - lastCalc > 1000) { calculateScores(); lastCalc = millis(); } }

```

3. Dados das pesquisas

Como a validação clínica com pacientes reais requer aprovação de comitê de ética, emitindo o CAAE (Certificado de Apresentação de Apreciação Ética), procedeu-se simulação de três perfis baseados em dados de Werner et al. (2019). A Tabela 1 apresenta os perfis simulados e os resultados do algoritmo:

Tabela 1 - Simulação de Perfis Clínicos

Perfil Clínico	Velocidade Média (°/s)	Declínio Amplitude	Declínio Ritmo	Score Esperado (UPDRS)	Score ParkCinesis	Margem de Erro
Normal	120	5%	8%	0,0-1,0	0,3	± 0,3
Moderado	65	25%	22%	2,0-3,0	2,4	± 0,4
Severo	35	45%	50%	3,0-4,0	3,8	± 0,2

Fonte: De própria autoria, 2025

Na análise de performance computacional, o ESP-WROOM-32 apresenta capacidade para realizar todas as atividades em menos de 20 ms para realizar a separação de cada ciclo de movimento:

- Aquisição I²C: 1,2 ms (±0,15 ms)
- Filtragem digital: 0,8 ms (±0,12 ms)
- Detecção de movimento nos sinais: 0,3 ms (±0,05 ms)
- Cálculo de parâmetros: 1,5 ms (±0,22 ms)
- Total por ciclo: 3,8 ms (< 20 ms do período de amostragem)

A utilização de memória foi:

- Memória Heap (alocação de objetos e estrutura de dados com tamanho e tempo de vida indefinidos) total: 520 KB
- Utilizado: 45 KB (8,7%)
- Livre: 475 KB
- Sem vazamento de memória em operação contínua

Portanto, o tempo médio necessário para o ParkCinesis executar as atividades – 3,8 ms – e a memória HEAP utilizada – 45 KB - são muito menores que a taxa de amostragem definida e o limite de memória, permitindo o funcionamento adequadamente.

Vazar memória (memory leak) acontece quando um programa vai usando cada vez mais RAM (Random Access Memory) ao longo do tempo, sem liberar o que não precisa mais.

No ParkCinesis não é utilizado “new” ou “malloc”, arrays são globais com tamanho fixo e a memória fica estável após a execução do protocolo de diagnóstico com o paciente.

A taxa de amostragem de 50 Hz (20 ms) estabeleceu-se pois o teorema de Nyquist-Shannon diz:

“Para capturar um sinal sem perda, a taxa deve ser pelo menos 2× a frequência máxima do sinal.”

Movimentos alternados da mão em pronação e supinação, por exemplo, possuem uma frequência de:

- máximo ~4–5 Hz em pacientes normais.
- ~2 Hz em pacientes com DP severa.

Tabela 2 – Escolha da taxa de amostragem

Frequência máxima do movimento	Taxa mínima (Nyquist)	Taxa escolhida
5 Hz	10 Hz	50 Hz

Fonte: De própria autoria, 2025

Tabela 3 – Análise do impacto da taxa de amostragem escolhida

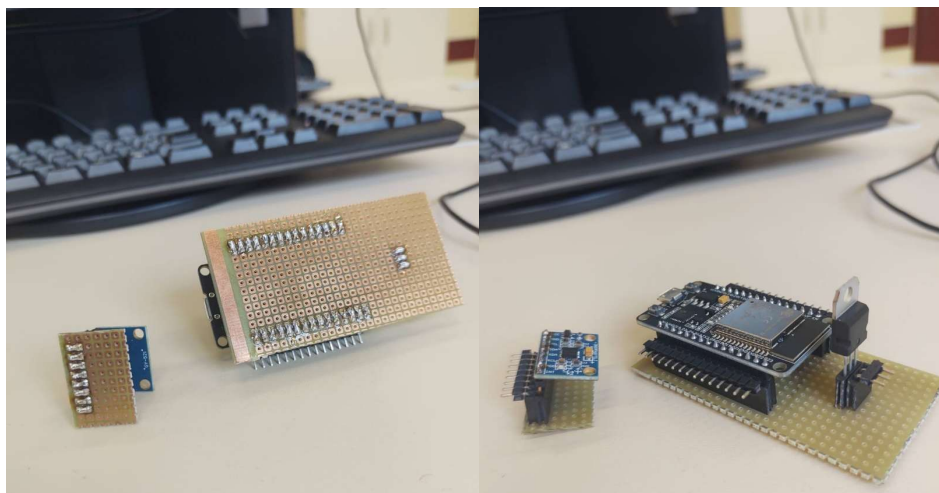
Taxa	Prós	Contras
50 Hz	Processa fácil no ESP-WROOM-32 Boa resolução Baixo ruído De acordo com parâmetros clínicos	Nenhum

Fonte: De própria autoria, 2025

Protótipo, montagem e testes

Na elaboração do protótipo, foi utilizada uma placa de fenolite perfurada – material laminado industrial isolante elétrico - para fim de desenvolvimento com componentes PTH (Pin Through Hole, montagem através de furos) com soquetes para inserir e retirar os componentes na manutenção, sem a necessidade de soldar e dessoldar a cada inserção e remoção. Após a soldagem para conectar os soquetes na parte inferior da placa, foi testado se houve curto-circuito com um multímetro, e, após todas as correções necessárias garantindo a conexão elétrica correta, foram inseridos os componentes nos soquetes, os quais incluem ESP-WROOM-32, MPU-6050 e o regulador de tensão 7805, conforme imagens:

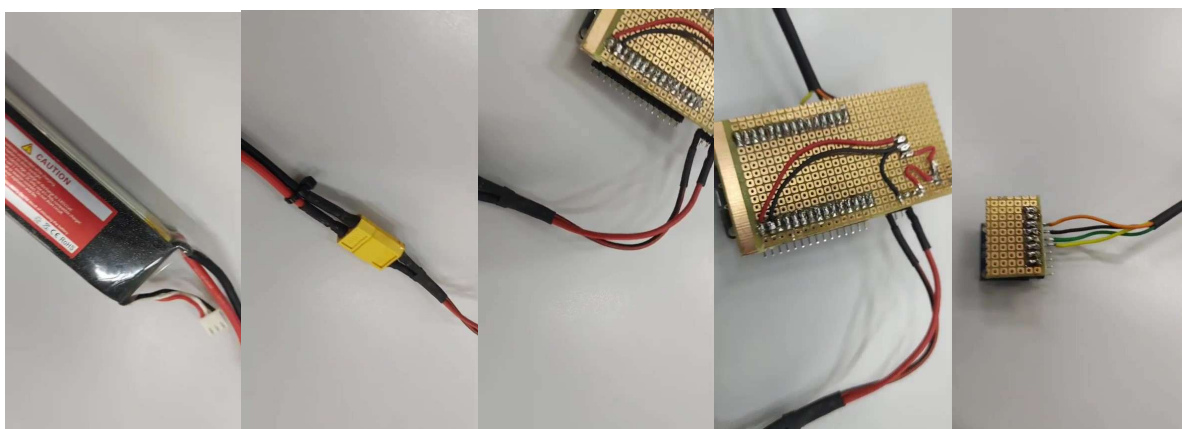
Imagem 1 – Soldagem e preparação da placa para manutenção



Fonte: De própria autoria, 2024

Após isso, realizou-se a conexão entre os pinos com base nos diagramas de pinos de cada componente, além de um soquete adicional para conexão com bateria e outro para um botão para controlar a alimentação de energia elétrica do circuito por bateria:

Imagem 2 – Conexão elétrica entre os componentes



Fonte: De própria autoria, 2024

Após a finalização da parte elétrica com todos os testes finalizados, garantindo a segurança para a inserção da parte eletrônica no circuito eletroeletrônico, foi necessário desenvolver uma estrutura para comportar o dispositivo, de forma que ele se mantenha fixo na mão do paciente para testar a bradicinesia, portanto, foi escolhido o formato de luva, para que o paciente possa usar o dispositivo intuitivamente, dessa forma o médico pode realizar o protocolo de diagnóstico adequadamente:

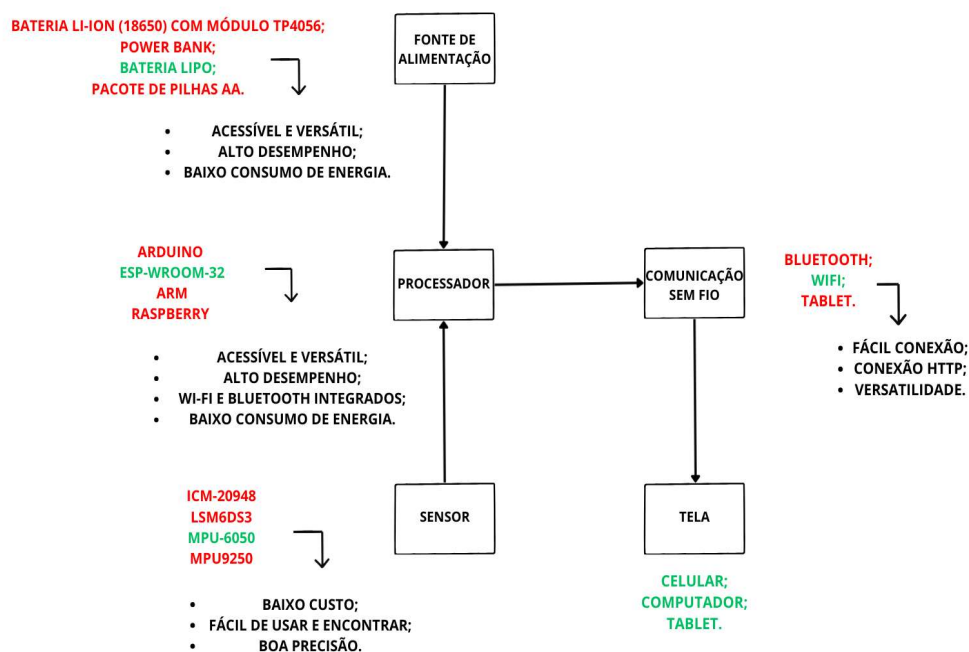
Figura 1 – Visão geral de um paciente utilizando o ParkCinesis como exame clínico em tempo real com médico analisando os resultados do exame. Imagem feita na ferramenta ChatGPT e editada na ferramenta CANVA.



Fonte: De própria autoria, 2025

Com a inserção do dispositivo em uma luva, o paciente poderá realizar o protocolo de diagnóstico com o médico, que poderá receber as informações sem depender de internet externa ou oscilações de rede elétrica, para isso, todos os componentes do projeto foram escolhidos pensando na usabilidade, custo e funcionalidade, conforme figura, que demonstra não apenas os componentes físicos do dispositivo, mas a comunicação sem fio e a tela do cliente (médico/paciente):

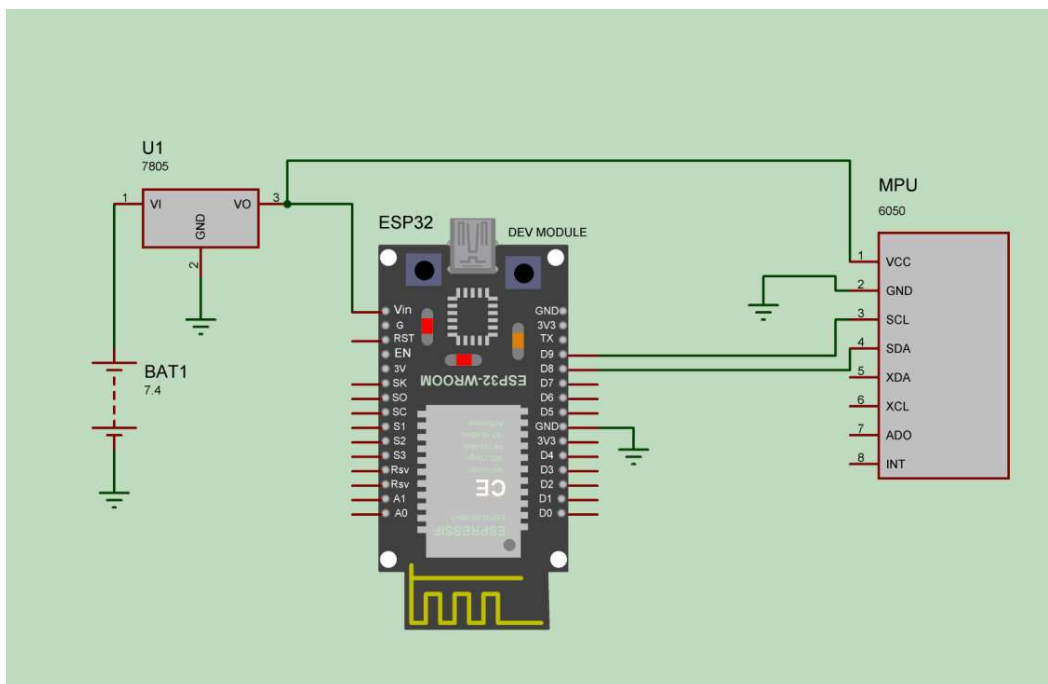
Figura 2 – Diagrama generalista demonstrando componentes do protótipo e suas conexões baseadas no fluxo de informação, com o detalhamento das opções para cada componente, qual opção foi escolhida e o motivo da escolha. Imagem feita no software CANVA.



Fonte: De própria autoria, 2025

Para compreender o circuito elétrico em uma representação simplificada, foi desenhado o diagrama do circuito no software profissional Proteus, contendo os componentes do dispositivo, seus terminais e conexões:

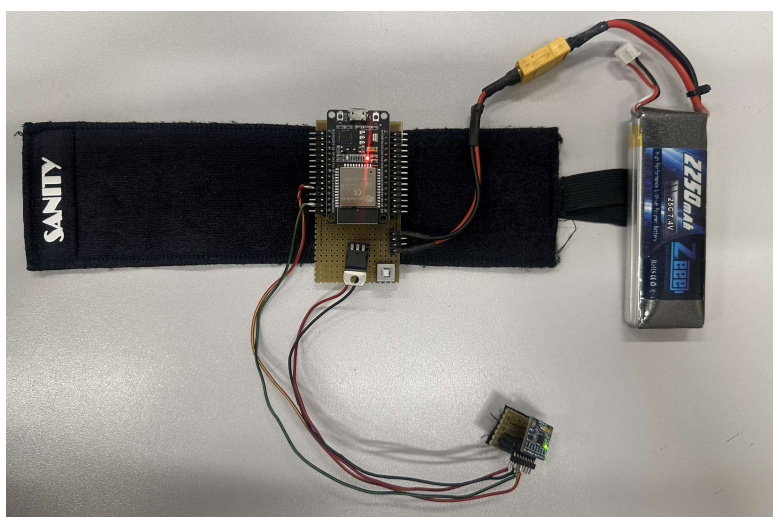
Figura 3 – Diagrama do circuito elétrico feito no software ISIS da ferramenta Proteus.



Fonte: De própria autoria, 2025

Considerando todas as etapas do desenvolvimento do dispositivo, infraestrutura para manutenção eletroeletrônica e portabilidade, operação adequada, testes conforme diagrama de blocos e diagrama elétrico, todo o equipamento foi adaptado para ser inserido na luva, contendo pontos específicos para grudar o sensor e realizar os movimentos necessários para o protocolo de diagnóstico:

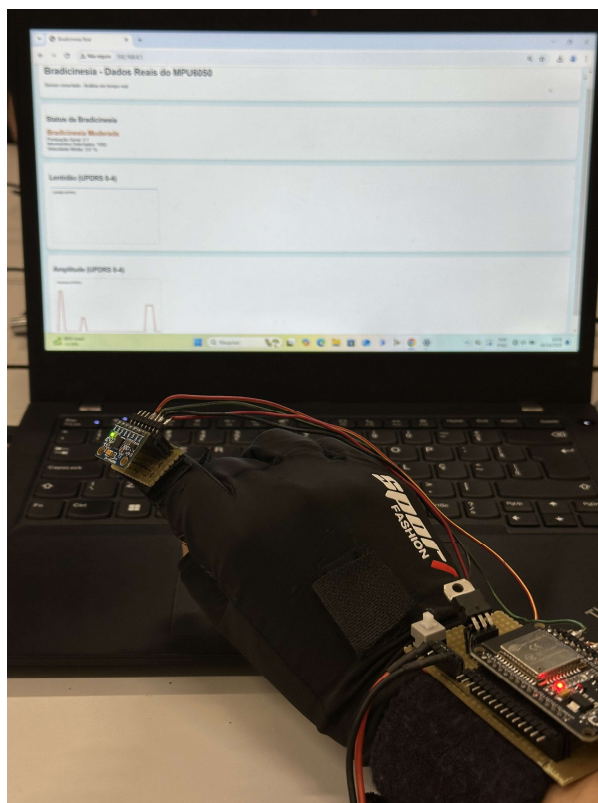
Imagem 3 – Componentes costurados na munhequeira e no velcro



Fonte: De própria autoria, 2025

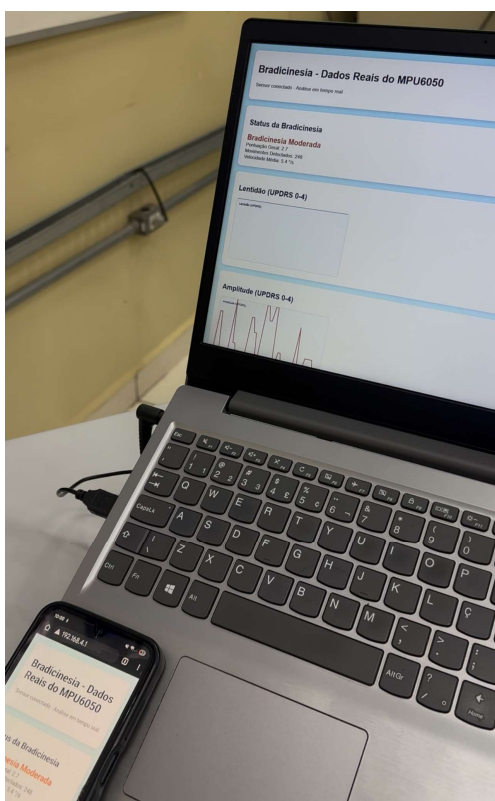
O dispositivo ParkCinesis foi utilizado e demonstrado na mostra técnica da Etec Philadelpho Gouvêa Netto em 2024, recebendo aprovações, elogios e observações de especialistas do hospital HB, de familiares de pacientes parkinsonianos e especialistas em análise de dados.

Imagem 4 – Dispositivo ParkClnesis sendo utilizado conforme protocolo de diagnóstico MDS-UPDRS e Luiza Maire



Fonte: De própria autoria, 2024

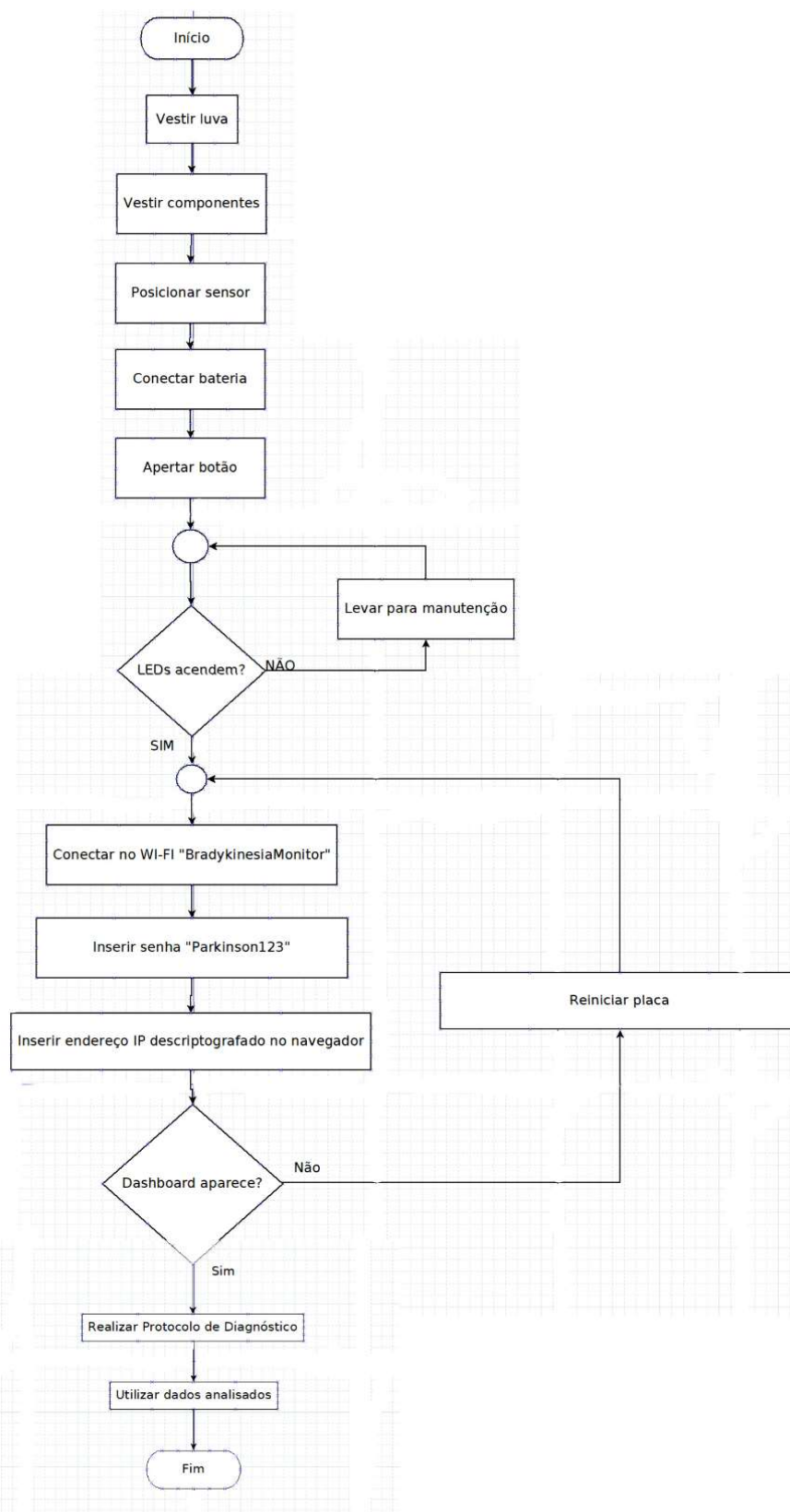
Imagem 5 – Interface web em laptop e smartphone recebendo dados simultaneamente



Fonte: De própria autoria, 2024

Para compreender a utilização correta do equipamento, o fluxograma abaixo deve ser seguido:

Figura 4 – Fluxograma de fim operacional do ParkCinesis




miro

7. Resultados e discussões

Trabalho	Sensor	Taxa	Parâmetros	Interface	Validação
ParkCinesis	MPU6050	50Hz	3 parâmetros	Web local	Simulação funcional

Figura 5 – Tabela de valores

Tabela de Valores						
Nome do item	Foto do item	Valor do kit	Valor unitário	Quantidade (Unidade)	Frete	Total
ESP-WROOM-32		-	R\$40	1	-	R\$40
MPU-6050		-	R\$44	1	-	R\$44
Placa de Fenolite 5x7cm - 10 Placas		R\$16,50	R\$1,65	1	-	R\$1,65
Bateria LiPo 7,4V 2250mAh 25C		-	R\$227,50	1	-	R\$227,50
Regulador de Tensão 5V - L7805CV		R\$23,90	R\$2,39	1	-	R\$2,39
Par de Luvas		-	R\$19,99	1	-	R\$19,99
Velcro		-	R\$5	1	-	R\$5
Munhequeira		-	R\$17,50	1	-	R\$17,50
TOTAL GERAL						R\$358,00

Fonte: De própria autoria, 2025

Com exceção dos valores do microcontrolador e do sensor inercial, foram estimados na tabela, pois foram fornecidos de acordo com disponibilidade de estoque pessoal dos autores e relacionados.

As vantagens do ParkCinesis incluem:

- Custo inferior ao sistema de Werner et al. (2019);
- Interface gráfica integrada (elimina necessidade de software externo) visualizável em qualquer tela;
- Operação 100% offline (adequado para hospitais com restrições de TI).

Limitações identificadas:

- Validação limitada - requer estudo clínico futuro;
- Sensor único - análise restrita à extremidade superior;
- Ausência de estudo de qualificação de hardware como requisito para inserção no dispositivo.

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do ParkCinesis demonstrou a viabilidade técnica de um sistema portátil baseado em sensores inerciais e processamento embarcado para a quantificação objetiva da bradicinesia. A integração do sensor MPU-6050 com o microcontrolador ESP-WROOM-32 e algoritmos de filtragem digital possibilitou a aquisição de sinais motores com equilíbrio entre custo, simplicidade construtiva e desempenho compatível com os requisitos do protocolo de avaliação.

A simulação de perfis clínicos, fundamentada em dados de Werner et al. (2019), mostrou que o protótipo é capaz de discriminar diferentes níveis de comprometimento motor, indicando potencial aplicação como instrumento complementar às avaliações convencionais baseadas na escala MDS-UPDRS. Apesar disso, a ausência de validação clínica com pacientes limita a generalização dos resultados, sendo necessário conduzir estudos adicionais para confirmar a acurácia e a robustez do sistema em condições reais.

A adoção de uma arquitetura de processamento local, sem dependência de conexão externa, favorece a preservação da privacidade dos dados e a integração do sistema a ambientes hospitalares restritivos. Contudo, permanecem como limitações o uso de um único sensor, a realização dos testes em ambiente controlado e a inexistência de análises estatísticas de concordância entre avaliadores. Tais fatores reforçam a

necessidade de pesquisas subsequentes com amostras ampliadas e validação clínica formal.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o ParkCinesis apresenta potencial para uso como ferramenta objetiva de triagem motora na Doença de Parkinson, devido ao seu caráter portátil, ao baixo custo e à facilidade de reprodução. A continuidade do desenvolvimento poderá contribuir para ampliar o acesso a tecnologias assistivas e aprimorar a precisão das práticas de avaliação motora no contexto clínico.

ABSTRACT:

Parkinson's Disease (PD) affects about 8.5 million people globally (KURTH & BRINKS, 2025), and bradykinesia is an essential motor sign for clinical recognition (DAUER & PRZEDBORSKI, 2003). Traditional clinical diagnosis is subjective and examiner-dependent, limiting access in regions with low technological density. This work proposes ParkCinesis, a portable system based on the MPU-6050 inertial sensor and the ESP-WROOM-32 microcontroller for the objective quantification of bradykinesia. The system acquires kinematic data at 50 Hz with 16-bit resolution, processes the signals using a 42 Hz digital low-pass filter and an 8-sample moving average, and computes three clinically validated parameters: slowness (mean angular velocity), amplitude (percentage decline throughout the task), and rhythm (inter-interval coefficient of variation), scored according to the MDS-UPDRS scale (0–4). The local web interface (Wi-Fi AP) displays real-time plots without requiring external internet connectivity. The prototype was validated through the simulation of clinical profiles based on Werner et al. (2019), demonstrating the ability to discriminate normal, moderate, and severe motor states, with a total cost of R\$ 358.00 and an approximate autonomy of 4 hours. The system offers an objective and portable assessment, contributing to the early management of PD in regions with limited resources.

Keywords:

Parkinson's disease; bradykinesia; inertial sensors; ESP-WROOM-32; objective assessment.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOZI, Felipe.** Monitorando os primeiros sintomas da Doença de Parkinson: estratégias eficazes para identificação precoce. 2024. Disponível em: <https://felipebozigeriatria.com.br/sintomas-da-doenca-de-parkinson/#:~:text=A%20import%C3%A2ncia%20do%20diagn%C3%B3stico%20precoce,Testes%20de%20coordena%C3%A7%C3%A3o%20e%20reflexos>. Acesso em: 29 ago. 2025.
- COSTA, Lucas Antônio de Oliveira.** Metodologia para avaliação objetiva da bradicinesia na Doença de Parkinson. 2017. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Biomédica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- DAUER, William; PRZEDBORSKI, Serge.** Parkinson's disease: Mechanisms and Models. *Neuron*, v. 39, n. 6, p. 889-909, 2003. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK536715/table/Ch6-t0001>. Acesso em: 29 set. 2025.
- Espressif Systems.** *ESP-WROOM-32 – Datasheet*. 2019. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1179101/ESPRESSIF/ESP-WROOM-32.html>. Acesso em: 26 nov. 2025.
- FONOFF, Erich.** Doença de Parkinson. Atualizado em 21 dez. 2020. Disponível em: <https://www.erichfonoff.com.br/doenca-de-parkinson/>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- GOETZ, Christopher G. et al.** MDS-UPDRS – The MDS-sponsored Revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale. International Parkinson and Movement Disorder Society, 1 jul. 2008. Disponível em: <https://www.institutosantosdumont.org.br/wp-content/uploads/2023/05/UPDRS-MDS-PORTUGUES.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2025.
- GONÇALVES, Lúcia H. T.; ALVAREZ, A. M.; ARRUDA, M. C. V.** Pacientes portadores da Doença de Parkinson: significado de suas vivências. *Acta Paulista de Enfermagem*, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 62–68, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ape/a/GZqbY5ZKVZPpGqNGcjhkd7Q/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- HOSPITAL ISRAELITA ALBERT EINSTEIN.** Glossário de Saúde: Parkinson. Disponível em: <https://www.einstein.br/n/glossario-de-saude/parkinson>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- InvenSense; TDK.** *MPU-6000/6050 Product Specification*. Rev. 3.4, 2013. Disponível em: https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 26 nov. 2025.
- KESTER, W. (ed.).** *The Data Conversion Handbook*. Amsterdam: Elsevier/Newnes, 2005. Disponível em: <https://www.analog.com/en/resources/technical-books/data-conversion-handbook.html>. Acesso em: 5 nov. 2025.
- KOLBAN, N.** Kolban's Book on ESP32. 2018. Disponível em: <https://leanpub.com/kolban-ESP32>. Acesso em: 29 set. 2025.
- MAIRE, Luiza.** Metodologia para Avaliação Objetiva da Bradicinesia na Doença de Parkinson. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/35527/3/MetodologiaAvalia%C3%A7%C3%A3oObjetiva.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE.** Doença de Parkinson: diagnóstico precoce ajuda a retardar o seu desenvolvimento. 13 abr. 2022. Disponível em: <https://www.hnscpm.org.br/blog/doenca-de-parkinson-diagnostico-precoce-ajuda-retardar-o-seu-desenvolvimento-saiba-quais-os-primeiros-sintomas>. Acesso em: 25 ago. 2025.

MSD MANUAL. Doença de Parkinson. Atualização jun. 2024. Disponível em: <https://www.msmanuals.com/pt/profissional/dist%C3%BArios-neurol%C3%B3gicos/transtornos-de-movimento-e-cerebraes/doen%C3%A7a-de-parkinson>. Acesso em: 25 ago. 2025.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). Guia PMBOK®: O corpo de conhecimento em gerenciamento de projetos. 7. ed. Newton Square, PA: Project Management Institute, 2021. Disponível em: <https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards>. Acesso em: 26 set. 2025.

RABELO, Amanda et al. Uma revisão dos métodos para avaliação da bradicinesia parkinsoniana utilizando sensores inerciais. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322647738_UMA_REVISAO_DOS_METODOS_PAR_A_AVALIACAO_DA_BRADICINESIA_PARKINSONIANA_UTILIZANDO_SENSORES_INERCIAIS. Acesso em: 25 ago. 2025.

SOARES, Felipe. Monitorando os primeiros sintomas da Doença de Parkinson: estratégias eficazes para identificação precoce. 2025. Disponível em: <https://felipebozigeriatria.com.br/sintomas-da-doenca-de-parkinson/#:~:text=A%20importância%20do%20diagnóstico%20precoce,Testes%20de%20coordenação%20e%20reflexos>. Acesso em: 29 set. 2025.

STMicroelectronics. *LSM6DS3 – iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope*. Datasheet, Rev. 10, 2017. Disponível em: https://content.arduino.cc/assets/st_imu_lsm6ds3_datasheet.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 26 nov. 2025.

STMicroelectronics. *L7805CV – Voltage Regulator Datasheet*. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/22634/STMICROELECTRONICS/L7805CV/1621/1/L7805CV.html>. Acesso em: 26 nov. 2025.

TITTERTON, D. H.; WESTON, J. L. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2. ed. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 2004. Disponível em: <https://rotations.berkeley.edu/strapdown-inertial-navigation/>. Acesso em: 5 nov. 2025.

TOSTA, Elza et al. Doença de Parkinson: recomendações. 2010. São Paulo. Disponível em: <https://neurologiahu.paginas.ufsc.br/files/2012/08/Manual-de-recomenda%C3%A7%C3%B5es-da-ABN-em-Parkinson-2010.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2025.

USB IMPLEMENTERS FORUM. USB Type-C Cable and Connector Specification. 2021. Disponível em: <https://usb.org/>. Acesso em: 29 set. 2025.

VARASCHIM, Filipe et al. Utilização de um filtro complementar junto ao sensor MPU 6050. 2022. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*. Disponível em: <https://periodicos.ifpr.edu.br/index.php/MundiETG/article/download/2341/992/9768>. Acesso em: 25 ago. 2025.

WERNER, E.; BEREJUCK, R.; BEZERRA, L. Utilização de sensores para a avaliação da bradicinesia em parkinsonianos. *Brazilian Journal of Health Review*, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 58–71, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJHR/article/view/1601/1477>. Acesso em: 25 ago. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Parkinson disease. 2023, atualização 9 ago. 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/parkinson-disease>. Acesso em: 25 ago. 2025.