

Sistema de monitorização de exercícios de fisioterapia para o pulso

Daniel Silva, Carmen Morgado, and Fernanda Barbosa

NOVA School of Science and Technology (FCT NOVA), Portugal

dp.silva@campus.fct.unl.pt
{cpm,fb}@fct.unl.pt

Resumo Movimentos repetitivos podem ser suficientes para provocar lesões nas articulações das mãos e pulsos. Atualmente, a utilização intensiva dos telemóveis e computadores, faz com que este tipo de lesões sejam mais frequentes. De forma a colmatar estes problemas, é importante dispor de ferramentas e aplicações que possam de alguma forma auxiliar, primeiro na prevenção, e depois em possíveis exercícios de recuperação. É interessante existir a possibilidade de realizar alguns tipos de exercícios de prevenção/tratamento de forma continuada e não apenas em consultório, com a presença de um técnico de saúde. Neste artigo apresenta-se um sistema de monitorização de exercícios de fisioterapia para o pulso, que pode ser utilizado de forma autónoma pelos pacientes. O sistema é composto por uma aplicação móvel interativa, e por um conjunto de dispositivos que serão colocados no pulso e mão. Os dispositivos detetam os movimentos efetuados pela articulação do pulso e enviam informação para a aplicação móvel. Através da aplicação, o paciente pode aceder a um conjunto de exercícios, previamente definidos por um fisioterapeuta, e ter acesso à informação recolhida em tempo real sobre os exercícios, assim como a forma como estes estão a ser executados. O sistema também dispõe de uma aplicação para os fisioterapeutas acompanharem e gerirem os exercícios realizados pelos pacientes. No entanto, neste artigo iremos focar-nos essencialmente na apresentação do dispositivo e aplicação móvel que é usada pelo paciente.

Keywords: Movimentos de Pulso · Sensores de Movimento · Sensores Wearable · Computação Móvel · Aplicação Móvel Interativa · Fisioterapia · Telemedicina.

1 Introdução

A inovação tecnológica permitiu o aparecimento de novas tecnologias de comunicação e de informação que tendem a substituir ou a alargar os serviços presenciais por serviços à distância, uma vez que são ferramentas poderosas capazes de quebrar as barreiras do tempo e do espaço [1]. Os serviços de saúde à distância tiram partido das tecnologias de comunicação permitindo que o diagnóstico do paciente seja feito em qualquer lugar do mundo e que a informação seja acedida, avaliada e devolvida através de serviços de comunicação sem fios.

Assim, surge a oportunidade de explorar novas ferramentas que visam contribuir para esta área, de forma a promover uma maior comodidade e qualidade dos serviços de saúde. Ao integrar nestes serviços, dispositivos que utilizam sensores simples e de fácil utilização, é possível reduzir o número de profissionais necessários para a realização de medições manuais, bem como contribuir para que estas medições sejam efetuadas de forma automática e fora do ambiente clínico.

O sistema que é apresentado neste artigo tem como objetivo o desenvolvimento de uma aplicação móvel interativa que se liga a um protótipo de sensores de movimento wearable para monitorizar exercícios de fisioterapia, especificamente de reabilitação músculo-esquelética do pulso. Os movimentos avaliados são quatro exercícios de fisioterapia: flexão e extensão, bem como desvio radial e ulnar, que podem ser realizados com ou sem carga, e com a mão esquerda ou direita. Nestes movimentos, o antebraço fica fixo numa superfície, e apenas a articulação do pulso é rodada, como ilustrado na figura 1. É de interesse avaliar se os exercícios propostos estão a ser realizados corretamente, isto é, se o ângulo a alcançar no exercício é validado com sucesso.

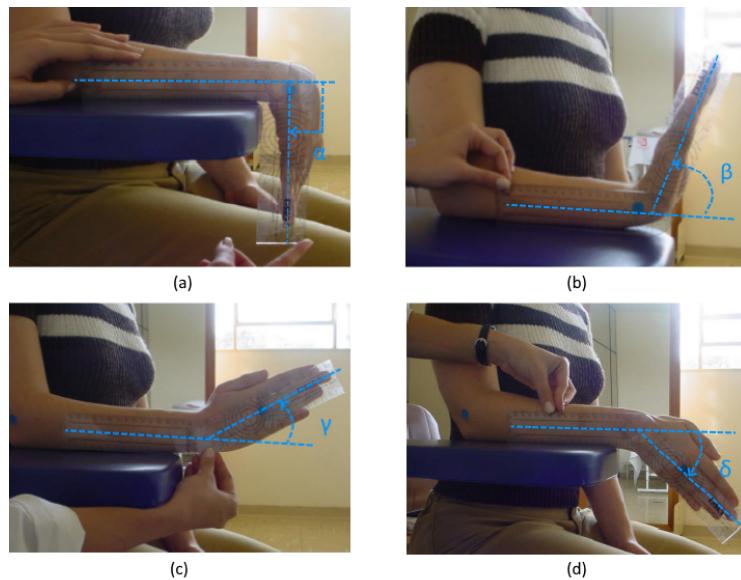


Figura 1. Medição dos movimentos de fisioterapia do pulso [3]. (a) Flexão. (b) Extensão. (c) Desvio radial. (d) Desvio ulnar

Os movimentos de flexão e extensão do pulso ocorrem no plano sagital nas articulações radiocárpicas e intercarpalas [2]. Nestes exercícios, o braço deve estar em pronação e o cotovelo fletido a cerca de 90° com o eixo na face medial do pulso. A flexão do pulso consiste em mover a mão para baixo numa amplitude articular entre 0°-90°, ângulo α ilustrado na figura 1(a). Em alternativa,

a extensão do pulso será o movimento oposto, numa amplitude articular entre 0° - 70° [3], ângulo β representado na figura 1(b).

Os movimentos de desvio radial (abdução) e desvio ulnar (adução) do pulso ocorrem no plano frontal [2]. O cotovelo deve estar fletido e o antebraço em posição neutra, ou seja, entre a supinação e a pronação com eixo na articulação radiocárpica, sendo que a supinação do antebraço consiste em rodá-lo para cima, enquanto a pronação é o movimento contrário, rodando o antebraço para baixo. O desvio radial ocorre quando a mão é movida para cima, numa amplitude de movimento entre 0° - 20° , ângulo γ mostrado na figura 1(c) enquanto o desvio ulnar é o movimento oposto, com uma amplitude de movimento entre 0° e 45° [3], ângulo δ ilustrado na figura 1(d).

2 Estado da arte

O número de aplicações destinadas à reabilitação das articulações tem aumentado, com o objetivo de incentivar a prática de movimentos de fisioterapia de modo a facilitar e tornar o processo de reabilitação mais eficaz e atrativo. Por vezes estas aplicações são apenas informativas e de comunicação entre o fisioterapeuta e o paciente, e apenas uma pequena percentagem destas aplicações incorpora uma componente de sensor que teoricamente permite um tratamento mais eficaz [4]. Através de exercícios monitorizados, ou mesmo de jogos interativos para captar a atenção e o interesse do utilizador durante longos períodos de tempo, é possível melhorar o processo de prevenção e reabilitação do paciente.

O sistema apresentado em [5] integra um sensor de unidade de medição inercial (IMU) para avaliar a amplitude de vários movimento do pulso, tais como flexão, extensão, desvio ulnar e radial, e ainda pronação e supinação. O sistema incorpora um microcontrolador e uma aplicação Android para processar e visualizar, respetivamente, os dados obtidos pelos sensores via comunicação Bluetooth. Neste trabalho analisou-se diferentes formas de realizar medições dos vários movimentos do pulso, variando o posicionamento do dispositivo nas costas da mão, e os melhores resultados foram obtidos quando o dispositivo foi colocado no ponto central e final das costas da mão. Os resultados obtidos em [5] indicam que este dispositivo recolheu dados bastante razoáveis e aceitáveis sobre a amplitude dos movimentos do pulso.

No trabalho [6], o foco está na reabilitação dos dedos da mão. Neste trabalho são usados os sensores baseados em resistência e comparados com sensores de unidade de medição iniciais. O dispositivo apresentado neste trabalho era uma luva composta por três sensores IMU de 6 eixos e dois sensores de flexão de 2.2 polegadas para detetar a movimentação das articulações dos dedos. Este sistema inclui uma interface gráfica com uma visualização 3D de um retângulo que se move de acordo com o movimento feito pelo dedo, o que é muito útil para o paciente compreender melhor como o movimento está a ser realizado. Neste estudo concluíram que o sensor IMU é o mais adequado devido à sua maior precisão e eficiência nas leituras, além de ter uma menor percentagem de erro em comparação aos sensores baseados em resistência.

Outro estudo interessante é a utilização de uma combinação de tecnologias de tele-reabilitação com tecnologias robóticas avançadas, permitindo o desenvolvimento de treinos de fisioterapia semi-autónomos com maior controlo e cumplicidade entre o profissional e o paciente [7]. O sistema apresentado motiva o paciente a realizar determinados movimentos do pulso através de um robô de reabilitação controlado por uma aplicação web via protocolo Internet. O terapeuta pode modificar os parâmetros, tais como o limite dos ângulos de cada movimento, a velocidade e o número de repetições, e pode supervisionar o exercício em tempo real enquanto o robô de reabilitação executa o movimento desejado.

A combinação de tecnologias de tele-reabilitação com tecnologias robóticas avançadas é também explorada no trabalho [8], onde os autores desenvolveram um dispositivo mecânico para apoiar o movimento de reabilitação das articulações do pulso. Este sistema é constituído por um manipulador paralelo pneumático em que os atuadores pneumáticos permitem um controlo mínimo da força através da compressibilidade do ar e a característica de múltiplos graus de liberdade do manipulador paralelo é bastante adequada para os movimentos complexos realizados na articulação do pulso. O paciente executa os movimentos segurando um manípulo ligado mecanicamente a um sensor de força de 6 eixos montado numa plataforma superior. Por outro lado, o fisioterapeuta tem um sensor táctil que lhe permite aplicar uma pressão nos ossos do pulso do paciente para confirmar que estão na posição correta, bem como sentir o antebraço e detetar se existe tensão muscular durante o movimento de reabilitação.

De uma forma geral, existem muitos trabalhos interessantes e bem conseguidos para os fins a que se destinam, utilizando diferentes sensores como unidades de medição inercial, sensores flexíveis e sensores tácteis. As comparações observadas nestes trabalhos relativamente à eficiência dos diferentes tipos de sensores foram úteis para compreender e estudar as melhores opções para implementar o nosso sistema. Algumas das soluções apresentadas têm algumas limitações como: não usam sensores suficientes ou adequados; o sistema não é fácil e confortável para ser utilizado autonomamente pelo paciente; e não possui interfaces gráficas e interativas em tempo real sobre o exercício que está a ser realizado. Assim, o sistema apresentado neste trabalho tem como objetivo combinar estas características e apresentar interfaces simples e intuitivas tanto para os pacientes como para os fisioterapeutas de forma a promover uma melhor reabilitação da articulação do pulso. O sistema utiliza dois sensores IMU de 9 eixos que trabalham em conjunto para validar e corrigir o movimento que está a ser realizado.

3 Descrição do sistema

O sistema de monitorização de exercícios do pulso consiste numa aplicação móvel interativa que, através da utilização de um dispositivo simples com sensores, é capaz de medir e monitorizar os exercícios de fisioterapia do pulso. Os exercícios considerados são: os movimentos de flexão, extensão, desvio ulnar e desvio radial. O sistema pode ser utilizado com a assistência de um fisioterapeuta, bem como de forma autónoma e independente. Ou seja, este sistema pode ser utilizado

na vida quotidiana e fora de um ambiente clínico. O sistema suporta que estes movimentos possam ser realizados tanto pelo pulso direito como pelo esquerdo, e com ou sem carga.

3.1 Arquitetura do sistema

O sistema é constituído por três componentes principais, que são: o componente do protótipo de sensores de movimento wearable, o componente da aplicação e o componente do servidor e da base de dados (ver figura 2).

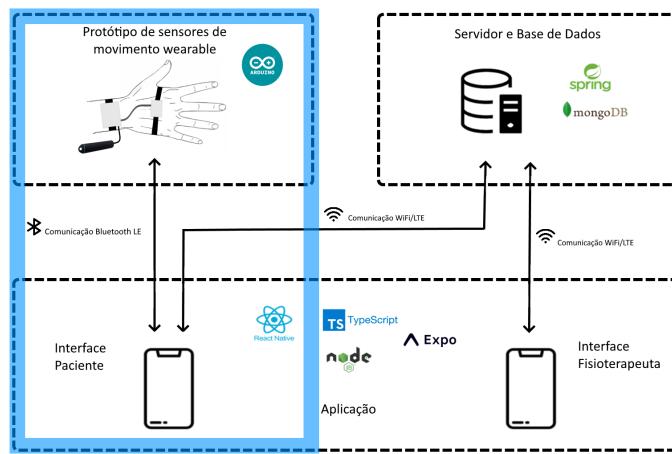


Figura 2. Visão geral da arquitetura do sistema

O código executado no protótipo wearable foi desenvolvido no Arduino IDE, o servidor em Spring Boot e a base de dados é uma instância MongoDB. A aplicação móvel foi desenvolvida em React Native, uma framework que permite o desenvolvimento de aplicações híbridas. Uma vez que é necessário um suporte de comunicação BLE para o dispositivo móvel comunicar com o microcontrolador, e é também necessário um suporte de animação 3D do movimento de fisioterapia, a aplicação foi desenvolvida seguindo um bare workflow. Desta forma, foi possível instalar as bibliotecas de animação da Expo, bem como outras bibliotecas nativas, como a biblioteca React Native Ble Manager¹, que suportará a comunicação BLE, fundamental para esta aplicação. De um modo geral, a aplicação comunica com o componente do protótipo de sensores de movimento wearable e com o componente do servidor e da base de dados utilizando os protocolos de comunicação Bluetooth Low Energy (BLE) e Wi-Fi, respetivamente, para estabelecer ligações bidirecionais. Como dito anteriormente, neste artigo só será dado ênfase à componente dos sensores e à aplicação móvel do paciente, tal como delimitado a azul na figura 2.

¹ Está disponível no website: <https://github.com/innoveit/react-native-ble-manager>

3.2 Protótipo de sensores de movimento wearable

Este componente de sensores é essencial para a medição dos ângulos realizados nos exercícios de fisioterapia, que foram ilustrados na figura 1. Este componente deve garantir as seguintes funcionalidades e requisitos: (1) baixo custo e acessível: deve ser acessível a todos os pacientes e à clínica; (2) fácil de utilizar e confortável: de forma a permitir que os pacientes consigam realizar os exercícios de fisioterapia de forma independente, e sem qualquer dificuldade ou restrição de movimentos; e (3) Recolher, processar e enviar dados para a aplicação: os sensores devem medir os ângulos dos movimentos, processar esses valores e apresentá-los na interface da aplicação móvel do paciente.

Composição do protótipo O dispositivo da componente com sensores é constituído por duas caixas e uma powerbank, a qual fornece energia ao sistema. Na figura 3 apresenta-se o esquema da componente com sensores, onde na caixa com o número 1 está um microcontrolador ESP32 e um sensor IMU MPU9250 que tem como principal função avaliar se existe movimento do antebraço durante os exercícios de fisioterapia, e na caixa com o número 2 está um sensor IMU MPU9250 que vai medir os ângulos do pulso durante todos os exercícios.

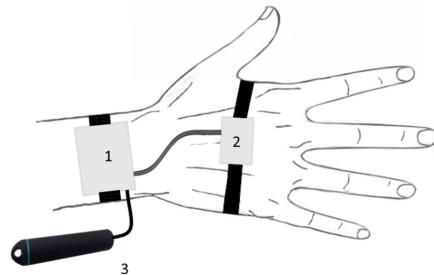


Figura 3. Esquema do protótipo de sensores de movimento wearable

A colocação do dispositivo tem que ser: a caixa com número 1 deve estar na zona entre o pulso e o antebraço e a caixa com o número 2 nas costas da mão, utilizando elásticos com velcro. Desta forma, o eixo x do sensor da caixa com o número 2 está no seguimento do braço, o eixo y é perpendicular ao antebraço e o eixo z está a apontar para cima. Os ângulos que são medidos relativamente aos movimentos do pulso correspondem à rotação em torno do eixo y. No caso do sensor colocado na caixa com o número 1, todos os eixos são considerados dado que é necessário detetar quando existe algum movimento do antebraço.

Comunicação entre o microcontrolador e os IMUs A comunicação entre o ESP32 e os dois sensores MPU9250 é feita através de um protocolo simples

de comunicação em série chamado I2C, que é composto por sinais de dados e de relógio em série [9]. Para permitir comunicações separadas com os sensores, cada MPU9250 tem o seu próprio endereço I2C.

É importante fazer uma fusão dos dados para obter informações mais fiáveis após a recolha dos valores dos sensores. Este pré-processamento dos dados é efectuado no microcontrolador, e deste modo não é necessário existir uma conexão entre o protótipo e a componente da aplicação ou servidor para a fazer a leitura e tratamento dos dados recolhidos pelos sensores. A biblioteca escolhida para suportar a comunicação entre os sensores IMU MPU9250 e o microcontrolador ESP32, como também processar os dados obtidos da recolha e filtragem dos sinais dos sensores para melhorar a qualidade dos dados, foi criada por hideakitai². Esta biblioteca ainda permite aplicar o filtro Madgwick [10] que utiliza uma representação em quaternion da orientação para descrever a estimativa da orientação [11].

Comunicação entre o microcontrolador e a aplicação A comunicação entre o microcontrolador do protótipo de sensores de movimento wearable e a aplicação móvel é feita através do protocolo de comunicação BLE. Este protocolo de comunicação é muito utilizado no mundo da IoT e em sistemas que integram sensores, uma vez que transmite e recebe pequenas quantidades de dados, com baixo consumo de energia, pelo que pode facilmente funcionar durante longos períodos de tempo [12]. Nesta comunicação, o microcontrolador ESP32 atua como servidor e o cliente é implementado na aplicação do dispositivo móvel [13].

A composição dos dados transmitidos entre o microcontrolador e o dispositivo móvel consiste num valor em quaternion que é uma média de cerca de 63 leituras feitas pelos sensores durante um intervalo de tempo de aproximadamente 508ms, seguida da sua respetiva conversão para os ângulos de Euler. Assim, o tamanho dos dados enviados para a aplicação é em torno de 40 bytes. Estes dados são utilizados para apresentar na aplicação os diferentes ângulos realizados em tempo real, mas apenas os valores recolhidos durante o tempo de validação do ângulo a alcançar durante a realização do exercício são enviados para o servidor e guardados de forma persistente na base de dados para que o fisioterapeuta possa consultar, uma vez que o objetivo do sistema consiste em avaliar e confirmar se o exercício foi bem feito.

Nesta comunicação foi necessário definir um aumento da unidade máxima de transmissão (MTU). O método utilizado para aumentar o limite do MTU foi através da extensão do comprimento do pacote (DLE) [14], introduzida no Bluetooth 4.2.

A calibração dos sensores acelerómetro e giroscópio que compõem ambos os IMUs é efetuada após o estabelecimento da comunicação.

² Biblioteca Arduino para dispositivo MPU9250 de nove eixos (giroscópio + acelerômetro + bússola) MEMS MotionTracking. Está disponível no website: <https://github.com/hideakitai/MPU9250>

3.3 Aplicação móvel do paciente

A aplicação do paciente disponibiliza um conjunto de funcionalidade básicas para o paciente: (1) consultar e iniciar um plano de treino; e (2) realizar o exercício de fisioterapia

Planos de treino e exercícios de fisioterapia O paciente tem acesso aos planos de treino e respetivos exercícios propostos pelo fisioterapeuta, bem como a interfaces para a realização de cada exercício. Um plano é um conjunto de exercícios, onde em cada exercício está definido o tipo, ângulo a atingir, número de repetições e séries, intervalos de tempo para realizar cada repetição e validar o ângulo objetivo, e ainda em qual dos pulsos o paciente deve equipar a componente dos sensores para realizar o exercício. Na interface da lista de planos, é possível consultar os planos que estão disponíveis, indisponíveis, concluídos e ainda em curso, o que significa que um plano de treino foi iniciado e pode ser retomado. Um plano está indisponível quando a data estabelecida pelo fisioterapeuta para a sua realização ainda está por chegar. Por outro lado, os planos estão disponíveis e podem ser realizados quando ainda não foram concluídos e a data definida para a sua realização é o dia atual ou anteriores. Um plano concluído não pode ser repetido, o que significa que o paciente completou os exercícios de fisioterapia propostos e terminou o plano. O fisioteraputa pode definir vários planos de treino conforme a condição física do paciente, e baseado nas avaliações de planos anteriores, isto é, se os exercícios realizados anteriormente pelo paciente foram concluídos com sucesso, ou se ocorreu algum problema ou incapacitação durante a sua realização.

Quando um paciente decide realizar um exercício de fisioterapia, é apresentada uma interface para estabelecer a ligação entre o dispositivo móvel e o microcontrolador, bem como para efetuar a calibração dos sensores. Após uma calibração bem sucedida, a aplicação móvel do paciente disponibiliza uma interface onde é possível observar o modelo 3D do pulso e um gráfico interativo que mostra o ângulo que está a ser realizado, bem como todas as informações necessárias para realizar o exercício (ver figura 4). Na interface do gráfico circular interativo, este gráfico é preenchido de acordo com o ângulo feito pelo pulso e muda de cor entre vermelho, laranja, amarelo e verde, dependendo da proximidade do valor do ângulo feito com o pulso em relação ao valor do ângulo objetivo. Existem ainda outras informações, tais como barras de progresso das repetições e das séries, o tempo necessário para a realização de cada repetição, bem como bordas coloridas para indicar movimentos corretos e incorretos. Além disso, são apresentadas mensagens temporárias que indicam as fases do progresso do exercício, como, por exemplo, se uma repetição foi iniciada ou concluída, ou se um movimento está a ser validado ou se é incorreto, sendo estas mensagens acompanhadas por diferentes efeitos sonoros que ajudam a alertar o paciente sobre estas situações. Existe também um botão para ativar ou desativar os efeitos sonoros.

Realizar um exercício de fisioterapia Num exercício, todas as repetições são iniciadas com o paciente a colocar a mão que está a usar o protótipo de

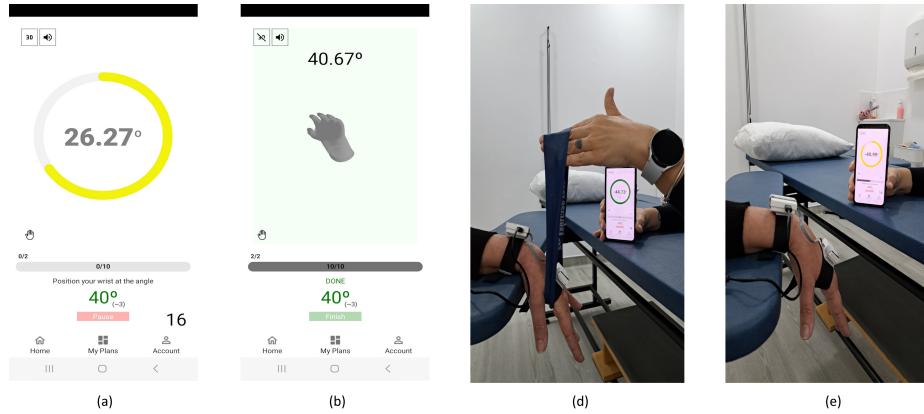


Figura 4. Interface da aplicação móvel do paciente, e realização de exercícios com e sem carga. (a) Vista gráfica interativa durante a primeira repetição. (b) Vista do modelo 3D quando todas as repetições e séries foram concluídas. (c) Exercício com carga. (d) Exercício sem carga

sensores de movimento wearable numa posição em que o ângulo de inclinação é de 0°, durante um intervalo de tempo de três segundos. Após esta validação, a repetição é iniciada e o paciente deve realizar o movimento de fisioterapia durante um intervalo de tempo determinado pelo fisioterapeuta, até alcançar o ângulo objetivo. Ao atingir o ângulo objetivo proposto no exercício, é iniciada uma contagem de tempo de validação, também determinada pelo fisioterapeuta, em que o paciente deve manter um ângulo durante este intervalo de tempo para que a repetição seja validada e concluída com sucesso. Durante o tempo de validação do ângulo, é calculada uma média dos ângulos feitos com o pulso, que acabam por diferir minimamente uns dos outros, uma vez que o paciente tem de manter o ângulo no mesmo ou muito próximo do ângulo objetivo, com um desvio de 3°.

A posição correta da posição do antebraço é definida no início de cada repetição, com a ajuda do sensor colocado no antebraço. Pelo que, caso se verifique uma rotação do antebraço até 10° em qualquer um dos eixos do sensor, o movimento é considerado incorreto e, por conseguinte, a repetição é interrompida até que a postura seja corrigida. Na realização do exercício é feita uma contagem do número de vezes que o paciente esteve em posição incorreta.

4 Avaliação

Foram realizados alguns testes para determinar a melhor forma de utilização e posicionamento do componente do protótipo de sensores de movimento wearable no pulso, de forma a obter leituras mais corretas, bem como proporcionar maior conforto e menor interferência durante os movimentos de fisioterapia. Na aplicação móvel do paciente fez-se uma avaliação para garantir o bom desempe-

nho de cada componente do sistema, tais como testes de integração e testes de usabilidade.

4.1 Colocação de sensores

A colocação do sensor colocado na caixa com o número 2 (ver figura 3), o qual foi utilizado para medir os valores dos ângulos do pulso foi testada em 3 localizações nas costas da mão: a zona central, uma zona mais próxima dos dedos e outra zona mais próxima do pulso. A região central da mão mostrou-se mais adequada para medir os ângulos dos quatro exercícios de fisioterapia dentro dos respetivos limites, isto é, os ângulos máximos que é possível alcançar em cada exercício, sem introduzir erros significativos. Quando o sensor foi colocado mais próximo dos dedos, ocorreram algumas complicações durante o movimento de flexão, uma vez que o sensor dificilmente fazia leituras de ângulos acima de 70º. Por outro lado, quando o sensor foi colocado mais próximo do pulso, foram verificados alguns problemas durante o movimento de desvio ulnar, estando o problema novamente relacionado com a incapacidade do sensor em efetuar leituras a partir de determinados ângulos, neste caso, atingindo ângulos superiores a 30º. O sensor da caixa número 1, foi colocado entre a zona do pulso e do antebraço, e revelou ser capaz de desempenhar a função de detetar qualquer movimento do antebraço.

4.2 Avaliação e correção das medições

Para determinar se o componente do protótipo de sensores de movimento wearable está a recolher e a processar corretamente os dados relativos à orientação do movimento, foram realizados alguns testes, onde foram escolhidos três ângulos diferentes para cada exercício de fisioterapia e foram efetuadas dez repetições para cada ângulo. O objetivo destas medições é avaliar se os ângulos propostos foram alcançados corretamente, ou seja, se os valores dos ângulos medidos pelos sensores correspondem ao ângulo real feito pelo pulso.

De um modo geral, o sistema mostrou-se adequado e correto na leitura dos diferentes valores dos ângulos definidos para cada exercício de fisioterapia, e os ângulos obtidos oscilaram muito perto do ângulo objetivo e dentro do limite definido de 3º.

4.3 Testes de usabilidade da aplicação móvel do paciente

A fim de avaliar a aplicação do paciente e obter feedback dos utilizadores, foi descrito um conjunto de histórias de utilizadores, que consiste em descrições de tarefas com as informações necessárias para as realizar. Durante a realização dos testes esteve presente um examinador para registar quaisquer dificuldades ou problemas que o utilizador possa encontrar. Foi também utilizado um questionário e o System Usability Scale(SUS)³, que é uma ferramenta fiável para medir a usabilidade e fornece uma visão geral das avaliações subjetivas da usabilidade.

³ O system usability scale (SUS) fornece uma ferramenta fiável para medir a usabilidade. Para mais informações, consultar <https://www.usability.gov/how-to-and-tools/methods/system-usability-scale.html>

Os testes foram efectuados em doze pacientes de ambos os sexos, com idades compreendidas entre os 21 e os 60 anos, e os resultados foram positivos.

A navegação e a interação com as diferentes interfaces do paciente na aplicação foram positivas e todos os pacientes conseguiram aceder facilmente aos seus planos e exercícios, bem como iniciar um plano de fisioterapia e um exercício sem qualquer dificuldade. De um modo geral, o protótipo de sensores de movimento wearable foi considerado confortável e fácil de utilizar. A componente gráfica interativa foi muito bem recebida e os efeitos sonoros foram considerados úteis, uma vez que o paciente não teve de estar totalmente atento à interface visual da aplicação para compreender o estado do exercício enquanto realizava o movimento.

Foram colocadas algumas questões sobre a experiência de utilização do sistema. As questões colocadas foram: (1) se foi intuitivo e fácil aceder à página do plano e iniciar um exercício de fisioterapia; (2) se o protótipo de sensores de movimento wearable era confortável e fácil de utilizar; (3) se o processo de conectar o protótipo de sensores de movimento wearable ao dispositivo móvel e calibrar os sensores foi fácil; e (4) se a interface de realizar o exercício é útil e intuitiva para concluir o exercício com êxito. De um modo geral, como se observa na figura 5, as respostas variaram entre 4 e 5, numa escala de 0 (Discordo totalmente) a 5 (Concordo totalmente). Apenas a opinião sobre a utilidade e a intuição da interface de realização de um do exercício, teve algumas respostas com uma classificação menos boa (3 em 5). No entanto, a maioria dos comentários e observações foram relacionados com a conceção da interface e a forma como a informação é apresentada na interface, e não com o desempenho das funcionalidades do sistema.

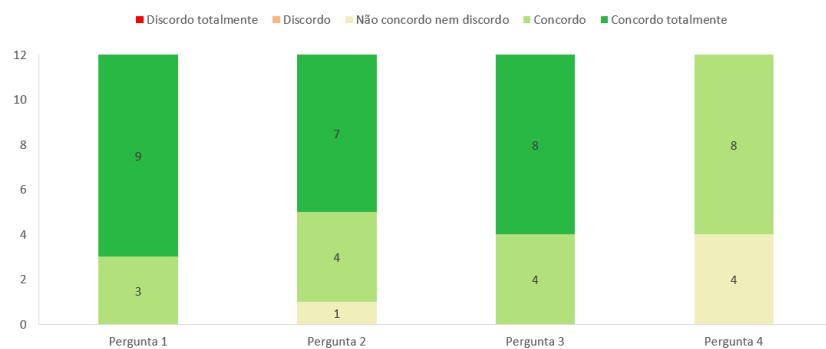


Figura 5. Gráfico da avaliação dos pacientes

Relativamente ao questionário SUS realizado aos pacientes, a nota foi de 83,3%, o que na escala equivale a uma classificação de BOM, ficando muito próximo de excelente, que seria acima de 85,5%.

5 Conclusão

O sistema permite que um paciente realize os exercícios de fisioterapia de forma mais controlada e correta, utilizando a aplicação juntamente com o protótipo de sensores a qualquer momento, de forma autónoma e sem qualquer restrição. Por outro lado, o fisioterapeuta pode avaliar e acompanhar a evolução dos pacientes ao longo do processo de reabilitação.

A componente de sensores é de baixo custo para que possa ser acessível e utilizado por qualquer paciente fisioterapeuta, e de um modo geral é fácil de utilizar, com volume e peso reduzidos, para que não limite ou condicione nenhum dos movimentos de fisioterapia. O sistema apresentou bom desempenho durante a fase de testes, tendo sido possível alcançar e medir corretamente os valores dos ângulos durante os exercícios de fisioterapia, e os resultados obtidos nos testes realizados com pacientes e fisioterapeuta foram positivos.

Seria interessante, num futuro incluir novos exercícios de fisioterapia para o pulso e integrar novos sensores para detetar a má postura durante a realização dos movimentos.

6 Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente apoiado pela NOVA LINCS através da subvenção FC&T UIDB/04516/2020.

Referências

1. S. Tachakra et al. “Mobile e-Health: The Unwired Evolution of Telemedicine”. In: *Telemedicine Journal and e-Health* 9.3 (2004), pp. 247–257. doi: 10.1089/153056203322502632 (cit. on p. 1).
2. J. Eschweiler et al. “Anatomy, Biomechanics, and Loads of the Wrist Joint”. In: *Life* 12.2 (Jan. 2022), p. 188. issn: 2075-1729. doi: 10.3390/life12020188. url: <https://www.mdpi.com/2075-1729/12/2/188> (cit. on p. 2).
3. A. G. de Saúde LTDA. Manual de Goniometria Medição dos Ângulos Articulares. 2016. url: <https://acegs.com.br/wp-content/uploads/2016/06/MANUAL-DE-GONIOMETRIA-FINAL.pdf> (visited on 09/14/2022) (cit. on pp. 2, 3).
4. R. Nussbaum et al. “Systematic Review of Mobile Health Applications in Rehabilitation”. In: *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 100.1 (2019), pp. 115–127. issn: 0003-9993. doi: 10.1016/j.apmr.2018.07.439. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003999318311754> (cit. on p. 2).
5. F. J. Hiung and I. M. Sahat. “Development of wrist monitoring device to measure wrist range of motion”. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 788.1 (Apr. 2020), p. 012033. doi: 10.1088/1757-899X/788/1/012033. url: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012033> (cit. on pp. 3, 42).
6. M. Hazman et al. “IMU sensor-based data glove for finger joint measurement”. In: *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 20 (Oct. 2020), pp. 82–88. issn: 2502-4752. doi:10.11591/ijeecs.v20.i1.pp82-88 (cit. on p. 4).

7. I. Ben Abdallah, Y. Bouteraa, and C. Rekik. “Web-based robot control for wrist telerehabilitation”. In: 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT). Dec. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/CEIT.2016.7929100 (cit. on p. 4).
8. M. Takaiwa and T. Noritsugu. “Development of wrist rehabilitation equipment using pneumatic parallel manipulator - Acquisition of P.T.’s motion and its execution for patient-”. In: 2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. 2009, pp. 34–39. doi: 10.1109/ICORR.2009.5209563 (cit. on p. 4).
9. N. Semiconductors. “I2C-bus specification and user manual”. In: NXP Semiconductors 4 (2014) (cit. on p. 53).
10. S. Madgwick et al. “An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays”. In: Report x-io and University of Bristol (UK) 25 (2010), pp. 113–118 (cit. on p. 27).
11. C. Gordon. “Quaternion Representation of 3D Orientation and Rotation for Sensor Fusion Applications”. In: 2021 (cit. on p. 52).
12. S. Al-Sarawi et al. “Internet of Things (IoT) communication protocols: Review”. In: 2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT). July 2017, pp. 685–690. doi: 10.1109/ICITECH.2017.8079928 (cit. on p. 30).
13. F. J. Dian, A. Yousefi, and S. Lim. “A practical study on Bluetooth Low Energy (BLE) throughput”. In: 2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON). Nov. 2018, pp. 768–771. doi: 10.1109/IEMCON.2018.8614763 (cit. on pp. 32, 33).
14. K. T’Jonck et al. “Optimizing the Bluetooth Low Energy Service Discovery Process”. In: Sensors 21.11 (2021), p. 3812. issn: 1424-8220. doi: 10.3390/s21113812. url: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3812> (cit. on pp. 33, 34).