



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
AUTOMAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA



Sistema web com estimativa de pose e análise de movimento para aplicações de auxílio à prática de exercício físico

Leandro de Souza Rodrigues

Orientador: Prof. Dr. Pablo Javier Alsina

Natal-RN
Fevereiro de 2022

**Sistema web com estimativa de pose e análise de movimento para
aplicações de auxílio à prática de exercício físico**

Leandro de Souza Rodrigues

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Banca Examinadora do curso de Engenharia Mecatrônica, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título Engenheiro Mecatrônico.

Natal-RN
Fevereiro de 2022

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Francisca Francinete de Souza Rodrigues e Josivan Fernandes Rodrigues, a minha irmã, Larisse de Souza Rodrigues e demais da família por todo apoio, carinho e torcida.

Agradeço imensamente a Deus, que através da fé, me dá forças e sabedoria.

Agradeço ao meu orientador Pablo Javier por todo auxílio e monitoramento nesse processo de escrita do artigo. Também agradeço ao profissional de educação física José Carlos pela contribuição no processo de orientação e análise deste software.

Agradeço a muitos professores do qual fui aluno, como Fabiana Tristão, Josinaldo Menezes, Orivaldo Vieira. Esses fizeram mais do que seu trabalho e tentaram extrair o melhor de mim.

Tenho gratidão também a todos os amigos e colegas que estiveram comigo nessa caminhada acadêmica.

“A esperança tem duas filhas lindas: a indignação e a coragem; a indignação nos ensina a não aceitar as coisas como estão. A coragem, a mudá-las.”
Santo Agostinho

Resumo

A prática regular de exercícios físicos proporciona benefícios à saúde física e mental, como também pode controlar ou atenuar doenças. É recomendado que exercícios sejam feitos com monitoramento de um profissional da educação física, pois caso não seja, há grandes riscos de lesões ou não ativação muscular efetiva. A tecnologia de rastreamento de partes do corpo humano, como a BlazePose da Google, possibilita identificar atividades físicas, porém não há disponível, até então, um software que independente do exercício forneça dados de amplitude do movimento, tempo de execução e frequência do treino. A presente monografia tem o objetivo de construir um sistema de software que possa fornecer esses dados, retornando uma avaliação do exercício feito mais completa para o instrutor e aluno. Tal sistema aproveita recursos do rastreamento de pose humano, o BlazePose, e também de bibliotecas de software como Flask e React. O projeto do sistema aplicou ferramentas de engenharia de software como diagrama de caso de uso, diagrama de classes; é feito também modelagem matemática dos dados obtidos para encontrar ângulo de articulações e detecção de completo movimento. Os resultados demonstraram que o sistema possui as funcionalidades mais importantes e que é possível o instrutor avaliar os dados de alunos para encontrar os que precisam de ajuda. Assim, o monitoramento do instrutor pode ser feito de uma maneira mais indireta, sem estar presencialmente na execução do exercício, e com mais exatidão.

Palavras-chave: Exercícios Físicos; Rastreamento de Partes do Corpo Humano; BlazePose; Sistema de Software; Avaliação do Exercício Feito; Engenharia de Software; Modelagem Matemática

Abstract

The regular practice of physical exercises provides benefits to physical and mental health, as well as controlling or mitigating diseases. It is recommended that exercises are performed under the supervision of a physical education professional, because if they are not, there is a great risk of injury or lack of effective muscle activation. The technology for tracking parts of the human body, such as Google's BlazePose, makes it possible to identify physical activities, but there is currently no software available that is independent of the exercise to provide data on range of motion, execution time and training frequency. The present monograph aims to build a software system that can provide this data, returning a more complete evaluation of the exercise done to the instructor and student. Such a system takes advantage of features from human pose tracking, BlazePose, and also from software libraries such as Flask and React. The system design applied software engineering tools like use case diagram, class diagram; Mathematical modeling of the data obtained is also carried out to find joint angles and full motion detection. The results showed that the system has the most important features and that it is possible for the instructor to evaluate student data to find those who need help. Thus, the instructor's monitoring can be done in a more indirect way, without being presently in the execution of the exercise, and with more accuracy.

Keywords: Physical Exercises; Human Body Parts Tracking; BlazePose; Software System; Evaluation of the Exercise Done; Software Engineering; Mathematical Modeling

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	iv
Lista de Abreviaturas	v
1. Introdução	16
2. Fundamentação Teórica	17
2.1 Desempenho físicos em exercícios	17
2.1.1 Métricas de Avaliação	17
2.2.2 Caso de estudo 1: Rosca Direta	19
2.2.3 Caso de estudo 2: Agachamento Livre	19
2.2 Visão Computacional: rastreamento de postura corporal	21
2.2.1 Topologia do BlazePose	22
2.2.2 Visão geral do sistema de aprendizado de máquina do BlazePose	23
3. Metodologia Proposta	24
3.1 Modelagem de softwares	25
3.1.1 Diagrama de Caso de Uso	26
3.1.2 Diagrama de Classes	27
3.1.3 Diagrama Modelo Entidade Relacionamento e Relacional	28
3.2 Modelagem matemática	30
3.2.1 Cálculo geométrico do ângulo das articulações	31
3.2.2 Detecção da frequência do movimento	32
4. Resultados	35
4.1 Testes	35
4.1 Desempenho do aplicativo web	37
4.2 Aplicação prática do software	39
5. Conclusão	41
Referências bibliográficas	42

Lista de Figuras

2.1	Músculos que são mais ativados durante o exercício de rosca direta	19
2.2	Músculos que são mais ativados durante o exercício de Agachamento Livre	20
2.3	Rastreamento de exercício físico pela abordagem BlazePose	22
2.4	Pontos-chave do corpo humano reconhecidos pelo BlazePose	22
2.5	Homem vitruviano alinhado por meio de dois pontos-chave virtuais previstos pelo detector BlazePose, além da caixa delimitadora de face..	23
3.1	Ilustração de situação prática realizada pelo usuário que tenha acesso ao sistema.....	25
3.2	Diagrama Caso de Uso	26
3.3	Diagrama de Classes do aplicativo web	28
3.4	Diagrama do modelo Entidade Relacionamento	29
3.5	Diagrama modelo Relacional	30
3.6	Ilustração gráfica do caso bíceps rosca direta braço esquerdo	31
3.7	Ilustração gráfica da exceção do caso da Figura 3.7(b)	32
3.8	Ilustração gráfica de um caso ideal do comportamento angular no tempo	33
3.9	Ilustração gráfica de um caso real do comportamento angular no tempo	34
4.1	Captura de imagem do vídeo classificado como modelo	36
4.2	Captura de imagem do vídeo de um dos voluntários executando o movimento modelo	36
4.6	Captura de imagem do vídeo da voluntária executando o agachamento antes da instrução	37
4.4	Página inicial do aluno	38
4.5	Página de execução do exercício feita pelo aluno	38
4.6	Dados do exercício modelo capturados pelo sistema	39
4.7	Resultado do exercício executado pelos 5 participantes	40

Lista de Tabelas

2.1	Variáveis do treinamento que influenciam na resposta aguda	18
4.1	Comparação dos resultados do exercício executado antes e depois da instrução do instrutor	40

Lista de Abreviaturas

A: Ângulo
AP: Aprendizado Profundo
API: Application Programming Interface
DP: Desvio Padrão
EPH: Estimativa de Pose Humana
ER: Entidade-Relacionamento
M : Médio(a)
ROI: Region Of Interest
T: Tempo
TR: Treino Resistivo
UML: Unified Modeling Language

Capítulo 1

Introdução

Com a conscientização dos benefícios causados pela prática regular de exercícios físicos, o aumento pela procura de academias foi e ainda é crescente em todo o mundo. As academias são procuradas com diversos fins, tais como estética, condicionamento físico, promoção de saúde, reabilitação etc. (ROLLA et al., 2004 apud NOGUEIRA, 2011).

Mesmo assim, a musculação pode apresentar alguns riscos ao seu praticante. Estudos preocupados com os perigos causados pela prática da musculação relatam que a má orientação, o treinamento excessivo e/ou errôneo pode causar graves lesões a diversos sistemas do indivíduo, entre eles o sistema musculoesquelético (ROLLA et al., 2004; SOUZA; JUNIOR, 2010 apud NOGUEIRA, 2011). Outro aspecto fundamental, segundo Barakat et al. (2019), é que para atingir um objetivo, como por exemplo a hipertrofia, é preciso que o praticante do exercício atenda as características do treinamento, como a frequência, intensidade, modelo, tempo do treino passado por um instrutor.

Estimativa de pose do corpo humano a partir de imagens ou reproduções de vídeo tem um papel central em várias aplicações, como rastreamento de saúde, reconhecimento de linguagem de sinais e controle gestual (BAZAREVSKY et al., 2020). Os novos modelos de aprendizado profundo (AP) superaram os métodos clássicos em vários campos de pesquisa, como classificação de imagens, segmentação semântica, detecção de objetos e faces. Posteriormente, a estimativa de pose humana (EPH) também alcançou realizações notáveis utilizando os métodos DL (TOSHPULATOV et al., 2022). Os adventos tecnológicos possibilitam o reconhecimento de atividades físicas com modelos AP de estimativa de pose.

Diante deste contexto, o objetivo desse trabalho é usar um modelo EPH, no caso o BlazePose, para criar um aplicativo web que retorne uma avaliação para o aluno sobre seu exercício executado. Para isso, é preciso manipular a biblioteca MediaPipe (baseado no modelo BlazePose) para que possam ser entregues os pontos do corpo humano em tempo real, e assim, modelar matematicamente para encontrar parâmetros fundamentais de uma avaliação. O desenvolvimento do software seguiu alguns passos: levantamento de requisitos; planejamento de classes e bancos de dados; definição de estruturação de código, e por fim, a construção desses algoritmos.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Desempenho físicos em exercícios

Grande parte da população aderiu à prática regular de atividades físicas, tanto nas ruas como em academias de ginástica. Dentre as várias atividades proporcionadas, os exercícios resistidos (musculação) ganham espaço, sendo recomendados por médicos, fisioterapeutas e educadores físicos (HIRATA, 2006; SILVA., 2008 apud NOGUEIRA, 2011). Um dos fortes motivos é porque, segundo Hannan et al. (2021), o recente modo de vida inativo resultou em obesidade, corpulência, diabetes mellitus tipo 2 e doenças cardiovasculares entre a grande maioria dos habitantes do planeta, então o exercício físico pode ser considerado uma necessidade e não uma opção.

Muitas doenças são curadas (ou controladas) através do exercício, incluindo pressão alta, diabetes, asma e artrite. No entanto, ir à academia e começar a se exercitar não é a solução definitiva para o problema. A execução de exercícios pode levar a casos ainda mais graves se não for feito corretamente ou sob supervisão profissional (HANNAN et al., 2021). Como também afirmam os autores Chen e Yang (2020), os exercícios podem ser ineficazes e potencialmente perigosos quando executados de maneira incorreta pelo usuário. Tais erros são cometidos quando o usuário executa de forma inadequada o movimento, postura incorreta, etc .

Os benefícios adquiridos com a prática regular não atingem o indivíduo somente em nível físico, mas também em nível psicológico e social, auxiliando no controle de estresse, melhora da autoestima e melhora da autoimagem (TAHARA; SCHWARTZ; SILVA, 2003; NOMOMURA; TEIXEIRA; CARUSO, 2004 apud NOGUEIRA, 2011).

2.1.1 Métricas de Avaliação

O monitoramento do treinamento físico inclui cargas externas (por exemplo, distância, potência e velocidade) e internas (por exemplo, classificações de esforço

percebido, frequência cardíaca, concentrações de lactato no sangue), (HECKSTEDEN et al., 2018).

Atletas físicos, como fisiculturistas, estão focados principalmente em maximizar a hipertrofia muscular para seu esporte (HELMS, E.R et Al, 2019 apud BARAKAT et al., 2019). A literatura indica que o treinamento resistido (TR), também conhecido como musculação, é o método mais eficaz para aumentar a hipertrofia muscular (SCHOENFELD, 2010; WACKERHAGE, 2018; SOUZA, 2018; FIGUEIREDO, SALLES, TRAJANO, 2017 apud BARAKAT et al., 2019). Além disso, de acordo com Freitas (2017), Nosaka (2001) apud Barakat et al. (2019), as variáveis do TR como a intensidade, volume, seleção do exercício, ângulo articular, tempo, frequência (Tabela 2.1) influenciam as respostas agudas. Assim, treinadores e atletas manipulam intencionalmente as variáveis do TR dentro de uma sessão para otimizar o estímulo da sessão, bem como as adaptações do treinamento (HECKSTEDEN et al., 2018)

Tabela 2.1: Variáveis do treinamento que influenciam na resposta aguda

Aspecto do treinamento	Explicação
Frequência	Quantidade de sessões de treinamento por dia ou semana
Intensidade	Carga absoluta (velocidade, peso e potência) e relativa (referente ao consumo de oxigênio e frequência cardíaca)
Modelo	Execução e posição do movimento, bem como domínios funcionais (por exemplo neuromuscular)
Tempo	Duração e repetições de um ou vários estímulos e exercícios de treinamento (Volume = Frequência x Tempo)

Fonte: adaptado Barakat et al., 2019.

Os autores do Hecksteden et al. (2018) e Nosaka (2001) concluíram através dos seus resultados que alteração dos ângulos articulares influencia a relação comprimento-tensão do músculo, e isso afeta também a capacidade de produzir força durante o exercício. A quantidade de tensão e dano produzidos durante a sobrecarga do músculo é responsável pela ativação muscular, que, junto com estímulos internos, fortalece e aumenta a massa muscular.

Todos os fatores externos, como também os internos, determinam como um instrutor de educação física deve montar um treino de exercícios para determinado aluno. A quantidade de séries, repetições, tempo de execução na subida, descida, amplitude do movimento, postura etc são, por exemplo, fatores externos levados em

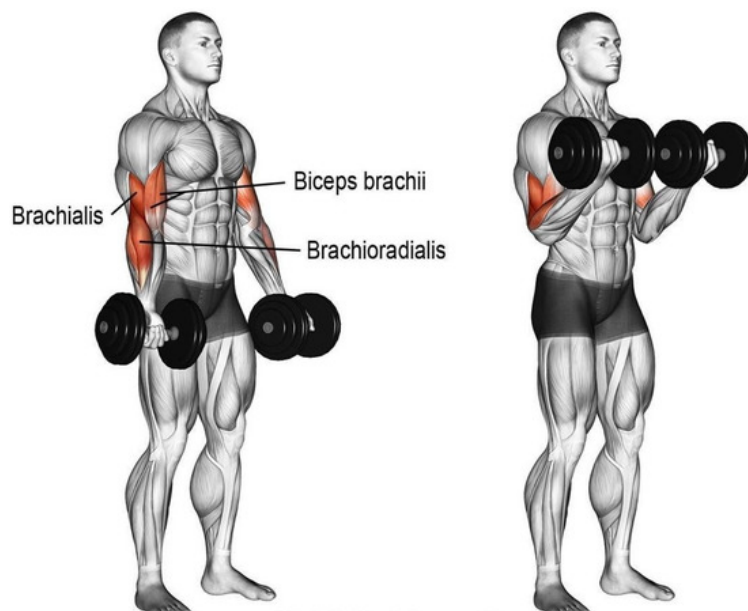
consideração. Assim, para não haver danos musculares, erro de execução, e para que a ativação muscular seja eficiente, o exercício deve ser acompanhado por um profissional da educação física

2.1.2 Caso de estudo 1: Rosca Direta

A rosca bíceps pode ser descrita como o movimento do antebraço ao redor do cotovelo, que atua como o ponto de pivô, de uma posição normal pendurada para uma posição perpendicular (BASEHORE, 2013). Para Campos (2000), a rosca direta de bíceps pode ser resumida em uma flexão de cotovelos com contração (estágio 1) e extensão (último estágio). Neumann (2011), afirma que a articulação do cotovelo pode atingir ângulos de 0° a 145 para uma correto movimento.

Este movimento envolve o músculo bíceps braquial para completar este movimento (BASEHORE, 2013). Como se pode ver pela Figura 2.1, outros músculos são principalmente afetados por este exercício, além do bíceps braquial, como: tríceps braquial e o braquiorradial.

Figura 2.1: Músculos que são mais ativados durante o exercício de rosca direta.



Fonte: Hannan, 2021.

2.1.3 Caso de estudo 2: Agachamento Livre

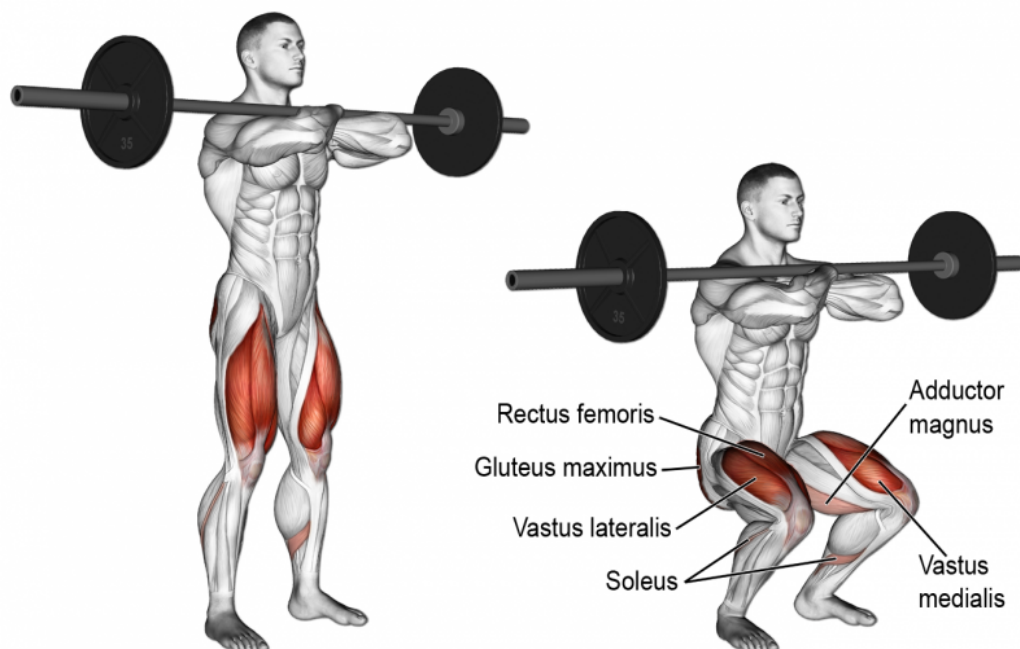
A forma indicada para realizar o exercício de agachamento é colocar uma barra com pesos sobre os ombros, atrás do pescoço e a agarrá-la com pronação de

antebraço, em seguida agachar-se flexionando os quadris e os joelhos até as coxas ficarem paralelas ao chão e retornar à posição inicial (THOMPSON; FLOYD, 2002 apud NOGUEIRA, 2011). Para aprimorar o exercício e minimizar os riscos de lesão, o agachamento não pode gerar dores nas articulações, os pés devem estar paralelos um ao outro, a distância entre eles equivalente à distância dos quadris e a angulação máxima de flexão de joelhos não deve ultrapassar 90° (CARNAVAL, 2001; JORGE et al., 2007 apud NOGUEIRA, 2011).

O agachamento pode ser classificado conforme a profundidade do ângulo articular do joelho. Caterisano et al.(2002) apud Nogueira (2011) classificaram os agachamentos analisando o ângulo de flexão de joelho e os rotularam em: agachamento parcial (aprox.135°), agachamento paralelo (aprox. 90°) e agachamento completo (aprox. 45°).

Outra característica importante desse exercício é o número de articulações utilizadas para realizar o movimento, são três as principais: articulação do quadril, articulação do joelho e articulação do tornozelo. Pelo fato de recrutar três articulações dos membros inferiores, o agachamento é considerado um exercício multiarticular (NOGUEIRA, 2011). A Figura 2.2 mostra os músculos reto femoral, glúteo máximo, vasto lateral, glúteo máximo, sóleo, vasto medial, adutor magno como os mais ativados no Agachamento.

Figura 2.2: Músculos que são mais ativados durante o exercício de Agachamento Livre.



Fonte: Gymguider.

2.2 Visão Computacional: rastreamento de postura corporal

A estimativa da pose humana é geralmente considerada como a tarefa de prever as localizações das articulações articuladas de um corpo humano a partir de uma imagem ou de uma sequência de imagens dessa pessoa. Devido à sua ampla gama de aplicações potenciais, a estimativa da postura humana é uma direção de pesquisa ativa na área de visão computacional, impulsionado por poderosas técnicas de aprendizado profundo e recentemente coletadas em conjuntos de dados em larga escala, a estimativa de pose humana continuou fazendo grandes progressos (WANG et Al, 2021).

Os autores Wang et Al (2021) citam algumas das principais aplicações da identificação e rastreamento de corpos humanos. Por exemplo: carros autônomos, os quais são obrigados a tomar decisões para evitar colisões com pedestres e, assim, compreender a postura desses, o movimento e a intenção de movimento é muito importante; vigilância de segurança, a tecnologia de rastreamento pode ser usado para identificação de alvos de interesse; moda, os usuários podem ver como eles ficam ao usar uma determinada peça de roupa na Internet em um sistema de prova virtual baseado em estimativa de postura; e desempenho esportivo, estimativa de pose humana pode ser usado para avaliar e corrigir as pessoas em várias formas de esportes.

A abordagem usada nesta monografia é a criada pela Google, chamada BlazePose. BlazePose é uma arquitetura de rede neural convolucional leve para estimativa de pose humana. No decorrer da inferência, a rede produz 33 pontos-chave do corpo para uma única pessoa e é executada a mais de 30 quadros por segundo em um *smartphone* Pixel 2. Isso o torna particularmente adequado para uso em tempo real em casos como rastreamento de condicionamento físico e reconhecimento de linguagem de sinais (BAZAREVSKY et al., 2020). Na Figura 2.3 pode ser visto o sistema BlazePose sendo aplicado no exercício físico agachamento com pulo.

Figura 2.3: Rastreamento de exercício físico pela abordagem BlazePose.

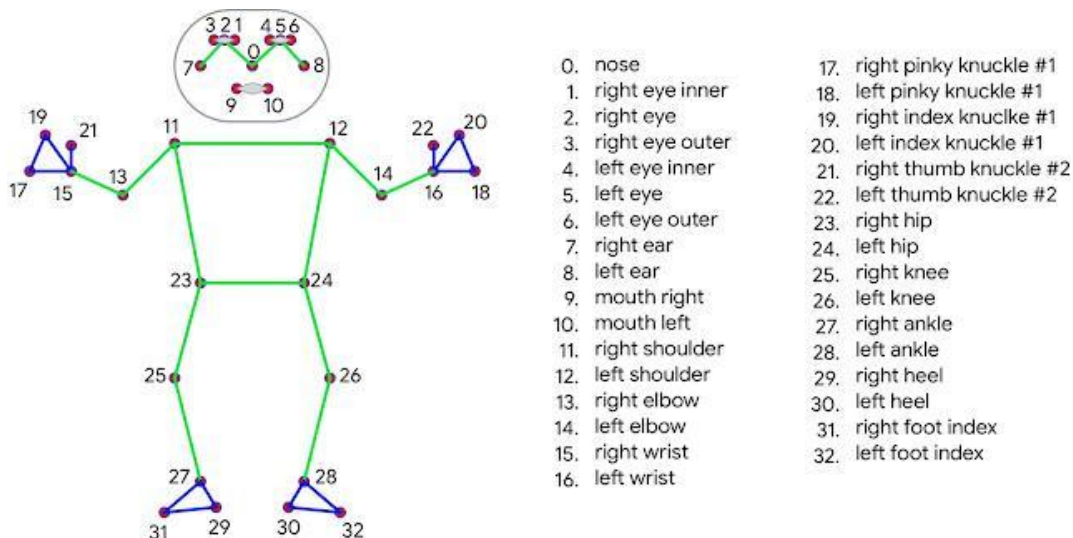


Fonte: Bazarevsky et al., 2020.

2.2.1 Topologia do BlazePose

Segundo Bazarevsky et al. (2020), o padrão atual usado na maioria dos detectores de pose do corpo humano é a topologia Coco, a qual consiste em 17 pontos de referência, isso inclui partes do corpo: tronco, braços, pernas e rosto. Porém o modelo Coco não contém referência para as mãos e pés, o que é fundamental para aplicações musculares. A topologia deste modelo tem 33 pontos de referência do corpo humano, tomando o superconjunto daqueles usados por BlazeFace, BlazePalm e Coco (BAZAREVSKY, 2019; BAZAREVSKY, 2020; LIN et Al, 2014 apud BAZAREVSKY et al., 2020). Esses 33 pontos são mostrados na Figura 2.4

Figura 2.4: Pontos-chave do corpo humano reconhecidos pelo BlazePose.



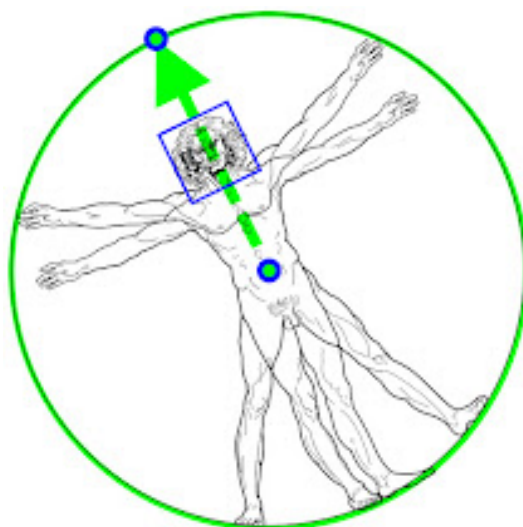
Fonte: Bazarevsky et al., 2020.

2.2.2 Visão geral do sistema de aprendizado de máquina do BlazePose

A detecção de pose em tempo real requer que um sistema de aprendizado de máquina possa gerar um modelo que indica onde está cada parte do corpo humano dentro de cada frame. Segundo Bazarevsky et al. (2020), O BlazePose primeiro localiza a região considerada de interesse (ROI - Region OF Interest), após isso são previstos os 33 pontos de referência deste ROI.

A primeira fase é basicamente encontrar um corpo humano dentro do frame, não podendo confundir com qualquer outro objeto ao redor. Essa etapa é Inspirada no homem Vitruviano de Leonardo da Vinci, onde é previsto o ponto médio dos quadris de uma pessoa, o raio de um círculo circunscrevendo toda a pessoa e o ângulo de inclinação da linha que conecta os pontos médios do ombro e do quadril (BAZAREVSKY et al., 2020). Assim se tem a região de interesse, o ROI, como se pode ver na ilustração da Figura 2.5.

Figura 2.5: Homem vitruviano alinhado por meio de dois pontos-chave virtuais previstos pelo detector BlazePose, além da caixa delimitadora de face.



Fonte: Bazarevsky et al., 2020.

Após a localização do ROI é possível achar partes do corpo humano nesta região, mais precisamente os 33 pontos de interesse. Conforme Bazarevsky et al. (2020) menciona, cada ponto encontrado tem 3 graus de liberdade (localização x, y e visibilidade). Ainda segundo Bazarevsky et al., esse modelo de rastreamento usa os tipos de aprendizado de máquina supervisionada com regressão combinados com mapas de calor.

Capítulo 3

Metodologia Proposta

Esta aplicação web se propõe a ser um auxílio à prática de musculação, ajudando os instrutores a passarem com agilidade e precisão os treinos e a poderem monitorar o desenvolvimento dos seus alunos, assim como, que os alunos possam ter respostas de como está seu desempenho nos exercícios físicos.

A Figura 3.1 ilustra como é a proposta de aplicação desse software. Uma câmera faria a captura tanto do exercício do aluno como do instrutor. Essa câmera estaria ligada ao site do aplicativo pela rede internet. Além da câmera como instrumento de entrada e saída do sistema web, haveria também a possibilidade de receber dados de entrada do usuário, como também exibir em telas informações necessárias.

Mais precisamente, esse aplicativo web servirá para que os instrutores cadastrem exercícios, definindo fatores externos necessários para execução correta do exercício de musculação, confirmem informações de alunos e exercícios. O aluno pode então executar no site tais exercícios cadastrados para receber a avaliação em tempo real, ter acesso ao seu treino, etc.

Como referenciado na análise teórica, parâmetros como tempo de execução de subida/descida, correto movimento e frequência são configurações necessárias na definição de um treino pelo instrutor. Por isso, esse aplicativo web tem o objetivo de capturar essas informações durante a definição do treino pelo instrutor e avaliar se as especificações dos exercícios foram seguidas pelo aluno durante a execução.

Definiu-se que as informações do movimento do instrutor serão captadas pela câmera e processadas pelo sistema de aprendizado de máquina do MediaPipe, porém o tempo de subida/descida, quantidade de série e repetições são informações digitadas pelo instrutor. No caso de captura de informações relativas ao aluno, serão todas capturadas pela câmera e mostradas na tela.

Figura 3.1: Ilustração de situação prática realizada pelo usuário que tenha acesso ao sistema.



Fonte: Hannan, 2022.

Para que esse sistema web esteja totalmente funcional, é preciso inicialmente uma definição da arquitetura do software, modelagem geométrica do problema e a construção do aplicativo com diversas tecnologias disponíveis no mercado. Assim, inicialmente foram levantados os requisitos, depois construída a programação do detector de posição, e por último, construído o sistema web. Cada fase dessas é ilustrada em um ou mais diagramas descritos nos tópicos posteriores.

3.1 Modelagem de softwares

Esta monografia apresenta a construção um sistema web que contém diversas bibliotecas externas, constrói diversos métodos e tabelas no banco de dados. Por isso, é preciso estruturar o sistema desde de seus requisitos até a especificação de como acontece a comunicação de todos os métodos que realizam um especifica funcionalidade. Assim, são usados alguns modelos de softwares para ilustrar e projetar situações/sistemas.

Modelos são largamente usados também em outras engenharias. Por exemplo, uma engenheira civil pode decidir criar uma maquete para mostrar como será a ponte que ela foi contratada para construir. Em seguida, ela pode criar um modelo matemático e físico da ponte e usá-lo para simular e provar propriedades da mesma (VALENTE, 2020). A modelagem geralmente representa o sistema com algum tipo de notação gráfica, que, atualmente, quase sempre é baseada em

notações de UML (linguagem de modelagem unificada, do inglês Unified Modeling Language), (SOMMERVILLE, 2011).

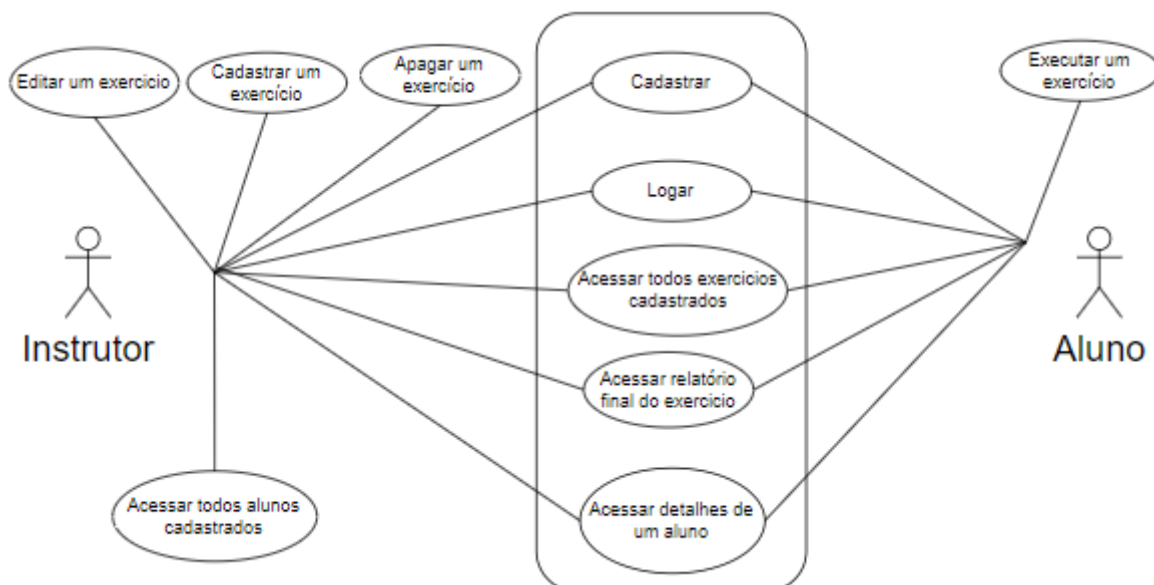
3.1.1 Diagrama de Caso de Uso

Um caso de uso pode ser tomado como um cenário simples que descreve o que o usuário espera de um sistema. Cada caso de uso representa uma tarefa discreta que envolve a interação externa com um sistema (SOMMERVILLE, 2011). Conforme afirma Valente (2020), o diagrama de casos de uso representa os casos de uso, através de elipses e suas relações com os atores (bonecos)

Nesta monografia, é usado o diagrama de caso de uso para descrever os requisitos dos sistemas. O diagrama de casos de uso é importante porque essas funcionalidades servem de base para projeto e construção das outras fases. Este diagrama servirá de base diretamente para construção do diagrama de classes.

Neste diagrama de caso de uso (Figura 3.2) há dois atores, o instrutor e aluno. O diagrama contém funcionalidades compartilhadas por esses atores e funcionalidades individualizadas. Basicamente, o diagrama está expressando que um instrutor poderá se cadastrar, logar, cadastrar exercícios, ter acesso a esses exercícios e monitorar os seus alunos. Os alunos podem ter acesso a funcionalidades de se cadastrar, logar e ter acesso aos seus dados, mas também executar o exercício no sistema.

Figura 3.2: Diagrama Caso de Uso



Fonte: Autoria Própria (2022).

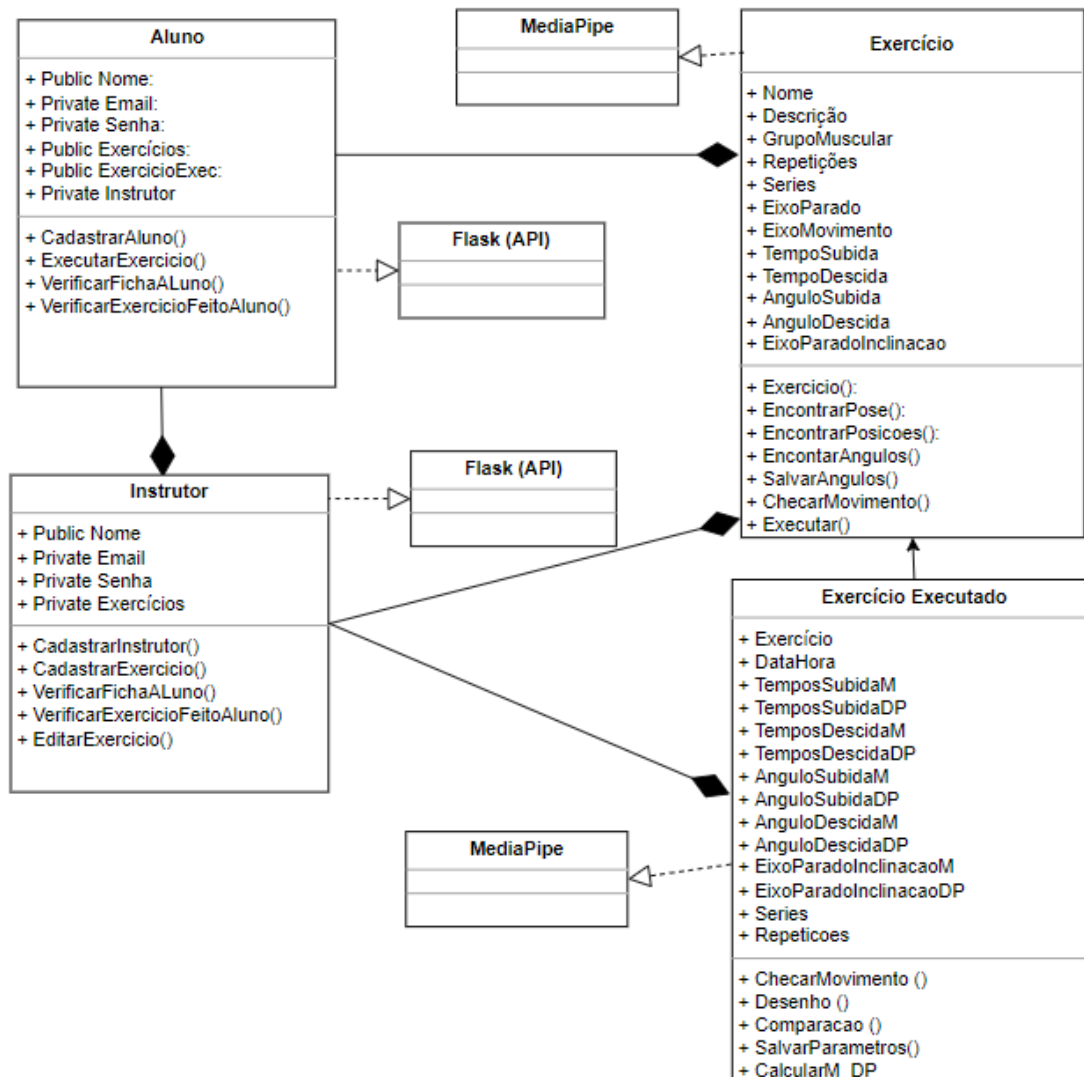
3.1.2 Diagrama de Classes

Os diagramas de classe são usados no desenvolvimento de um modelo de sistema orientado a objetos para mostrar as classes de um sistema e as associações entre essas classes (SOMMERVILLE, 2011). Um diagrama de classes é desenhado usando-se retângulos e setas (VALENTE, 2020). Segundo Valente (2020), o retângulo simboliza a classe com 3 compartimentos (nome da classe, atributos e métodos), e as setas representam as relações das classes, podendo ser do tipo: associação, herança e dependência.

O diagrama de classe criado nesta monografia visa organizar as classes que usam a biblioteca disponibilizada pela Google, a MediaPipe, o qual usa a abordagem BlazePose. A biblioteca fornece funções para detecção de pose, essas classes podem utilizar esses métodos para a aplicação de musculação específica desta monografia, e isso envolve captura de imagem, configurações de parâmetros, cálculo de ângulo das articulações, cálculos de informações de exibição, etc.

Percebe-se, através da Figura 3.3, que instrutor e alunos são classes que não possuem relação de herança, mas tem dependências externas da API(significa interface de programação de aplicações, do inglês *application programming interface*) Flask. Porém, a classe Exercício é pai da classe Exercício Executado, ou seja, há herança e tem dependência da biblioteca MediaPipe. Pode-se ver também que um Instrutor contém Exercício e Aluno. Aluno possui relação de ser composto por Exercício e Exercício Executado.

Figura 3.3: Diagrama de Classes do aplicativo web.



Fonte: Autoria Própria (2022).

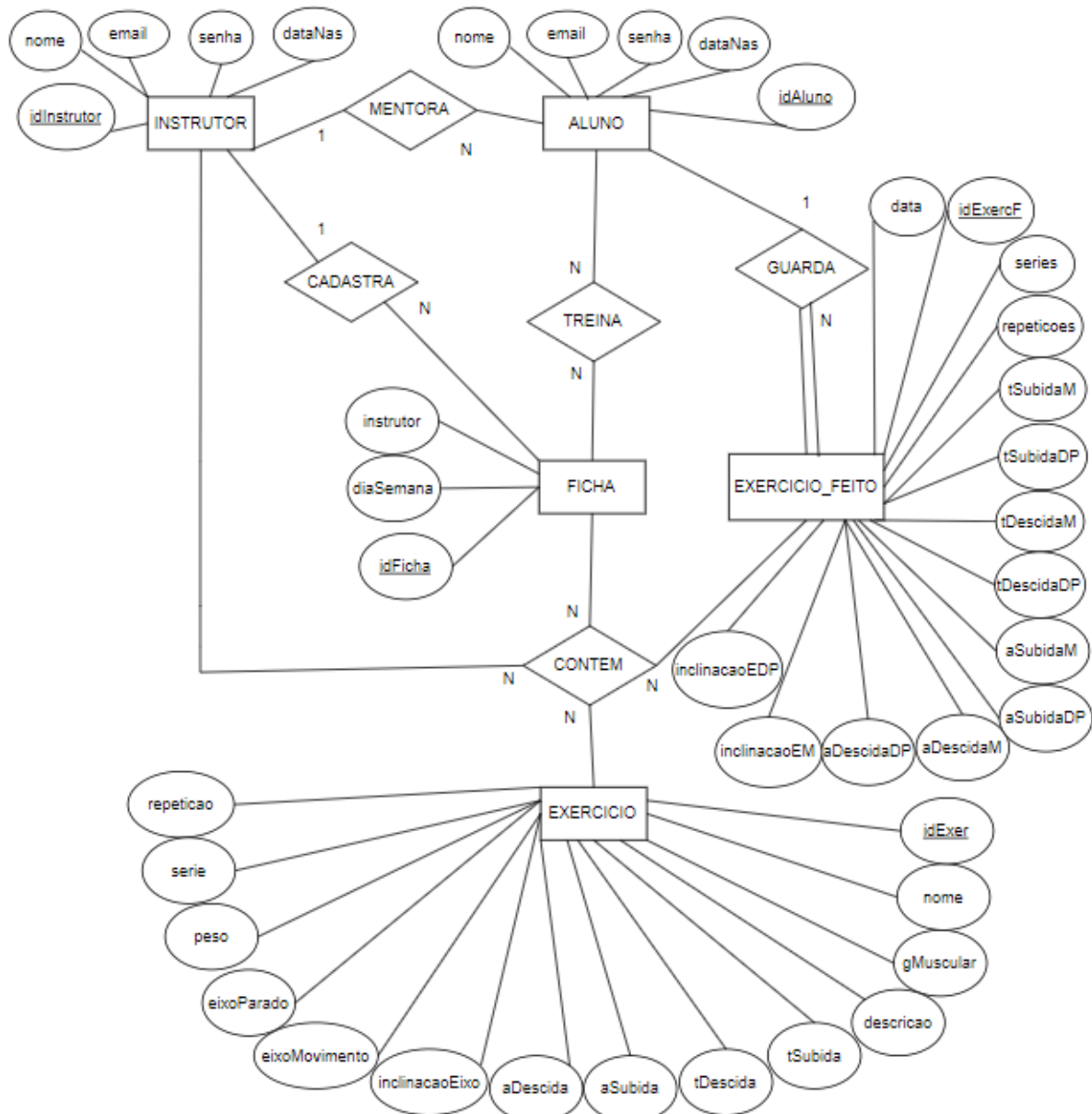
3.1.3 Diagrama Modelo Entidade Relacionamento e Relacional

O modelo Entidade-Relacionamento (ER), é um modelo de dados conceitual popular de alto nível. Esse modelo e suas variações costumam ser utilizados para o projeto conceitual de aplicações de banco de dados e muitas ferramentas de projeto de banco de dados (ELMASRI,2011). Na construção de banco de dados, a elaboração do diagrama é o primeiro passo, por ser de mais alto nível, isso porque permite que o qualquer pessoa faça a leitura e não está próximo do modelo a ser implementado.

O modelo ER deste artigo pode ser visto na Figura 3.4. Algumas características podem ser extraídas. Há cinco entidades: Instrutor, Aluno, Ficha,

Exercício e Exercício Feito. O instrutor é responsável pela mentoria (relacionamento Mentora) do aluno. O aluno treina exercícios que constam em uma ficha (envolve o relacionamento Contém e Treina). O aluno pode realizar um exercício (relacionamento Guarda).

Figura 3.4: Diagrama do modelo Entidade Relacionamento.

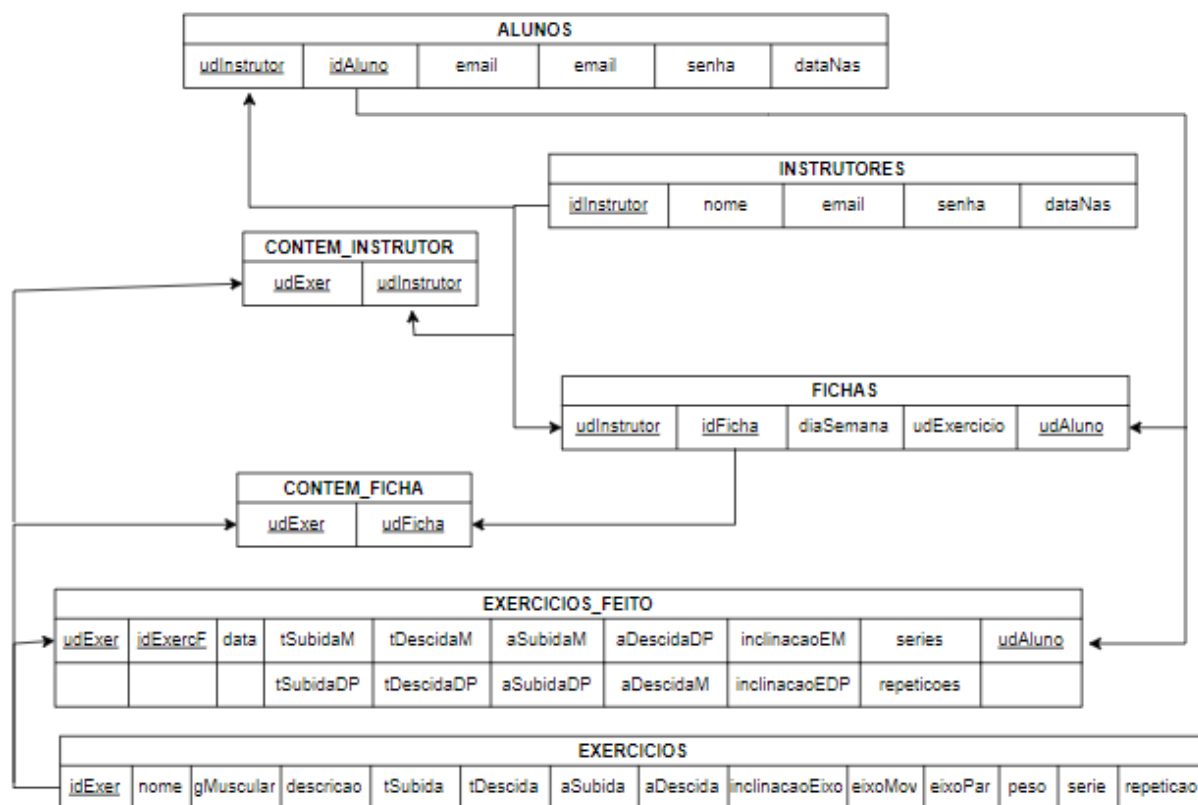


Fonte: Autoria Própria (2022).

Após o término do modelo ER, pode-se então construir o modelo de mais baixo nível, o qual ajuda desenvolvedores a implementarem as tabelas. O modelo relacional representa o banco de dados como uma coleção de relações. Informalmente, cada relação é semelhante a uma tabela de valores ou, até certo ponto, a um arquivo plano de registros (ELMASRI, 2011).

O modelo relacional deste trabalho foi derivado do modelo ER, seguindo as regras teóricas. Assim, o banco de dados tem as seguintes tabelas: Alunos, Instrutores, Fichas, “Exercicios_Feito1”, Exercicios, Contem_Ficha e Contem_Intrutor. Cada Tabela possui seus atributos necessários, no caso, suas colunas. A figura 3.5 ilustra todo o diagrama Relacional.

Figura 3.5: Diagrama modelo Relacional



Fonte: Autoria Própria (2022).

3.2 Modelagem matemática

Apenas a criação de classes dependentes da Mediapipe, o banco de dados e a parte visual do site não atendem todos os requisitos funcionais, onde dois deles correspondem ao cálculo da angulação da articulação e detecção de repetição. Essas modelagens necessitam de conhecimentos matemáticos, que envolvem, primeiro, conceitos de cálculo de ângulos entre duas retas que se cruzam, e, em segundo lugar, princípios na localização de máximos e mínimos de funções oscilatórias.

A partir dos dados retornados por essas modelagens é possível realizar outros cálculos que não demandam de modelagem: o tempo de subida, descida, estabilização de certos eixos (músculos), quantas séries foram realizadas etc.

3.2.1 Cálculo geométrico do ângulo das articulações

Os dois estudos de caso deste artigo são a rosca direta e o agachamento, onde, tanto esses como outros exercícios, envolvem articulações de interesse. Essas articulações contêm o eixo parado e o eixo que se movimenta. Com a extração dos 33 pontos pelo MediaPipe pode-se ter os dados da localização desses eixos e realizar o cálculo angular.

Um exemplo de cálculo angular no caso da rosca direta feita pelo braço esquerdo é visto na figura 3.7 (a). O símbolo M representa o eixo de movimento, P o eixo Parado, e, dentro de círculos, P o punho, C o cotovelo e O ombro. Nesse caso, o objetivo é descobrir o ângulo θ (teta). Sabe-se que:

$$\theta = \alpha - \beta \quad (1)$$

$$\phi = 180^\circ - \theta \quad (2)$$

Considerando que se tem o α^* (alfa*) da Figura 3.7 (b), ângulo complementar a α :

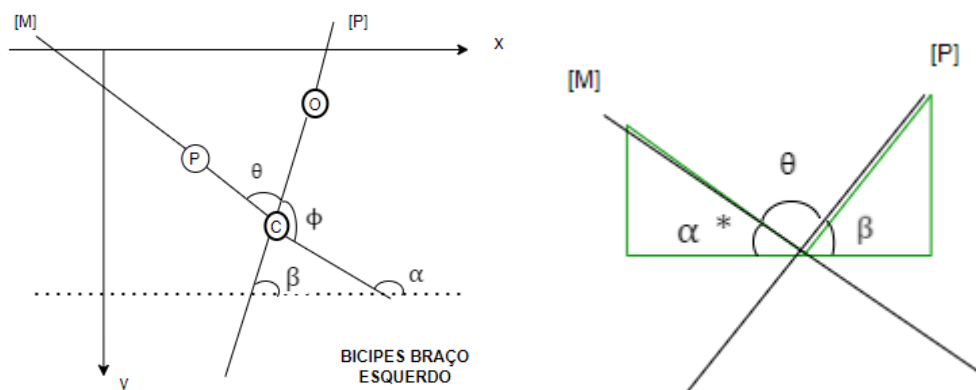
$$\alpha = 180^\circ - \alpha^* \quad (3)$$

Assim, relacionando a equação (1) com (3) e (2) com (3), encontra-se os ângulos θ e ϕ :

$$\theta = 180 - \alpha^* - \beta \quad (4)$$

$$\phi = \alpha^* + \beta \quad (5)$$

Figura 3.6: Ilustração gráfica do caso bíceps rosca direta no braço esquerdo.
(a) mais detalhado (b) com informações mais relevantes

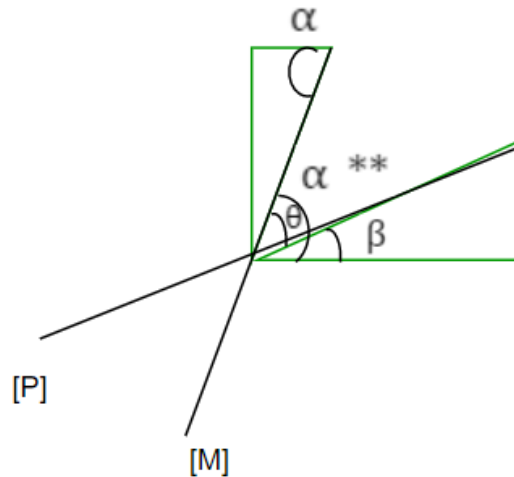


Fonte: Autoria Própria (2022).

Existe uma exceção do caso geral descrito acima, é quando o ângulo α captado não é o formado pela horizontal de baixo do lado esquerdo, pois esse ângulo é acima de 90° e triângulos retângulos não tem ângulos maiores que esse valor, então é capturado o ângulo feito pelo lado direito. Neste caso, o ângulo α da horizontal, é representado por α^{**} na Figura 3.8. Assim, o cálculo se torna:

$$\theta = \beta - \alpha^{**} \quad (6)$$

Figura 3.7: Ilustração gráfica da exceção do caso da Figura 3.7(b)



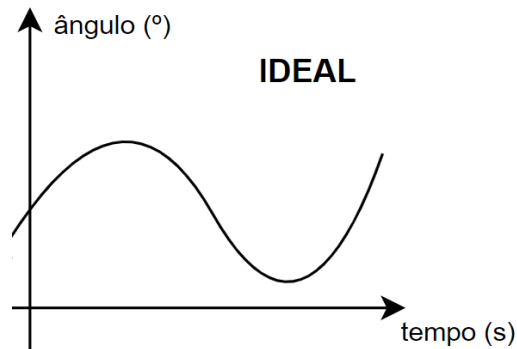
Fonte: Autoria Própria (2022).

Como na prática a imagem captada pelo computador tem eixo invertido, como mostra na Figura 3.7 (a), inverte-se na prática o sinal das equações (4), (5) e (6).

3.2.2 Detecção da frequência do movimento

Caso seja expresso o comportamento dos valores dos ângulos da articulação ao longo do tempo, deveria ficar parecido com a Figura 3.8. A figura ilustra um comportamento parecido com uma função senoidal, em que o movimento vai do máximo ao mínimo e há repetição.

Figura 3.8: Ilustração gráfica de um caso ideal do comportamento angular no tempo.



Fonte: Autoria Própria (2022).

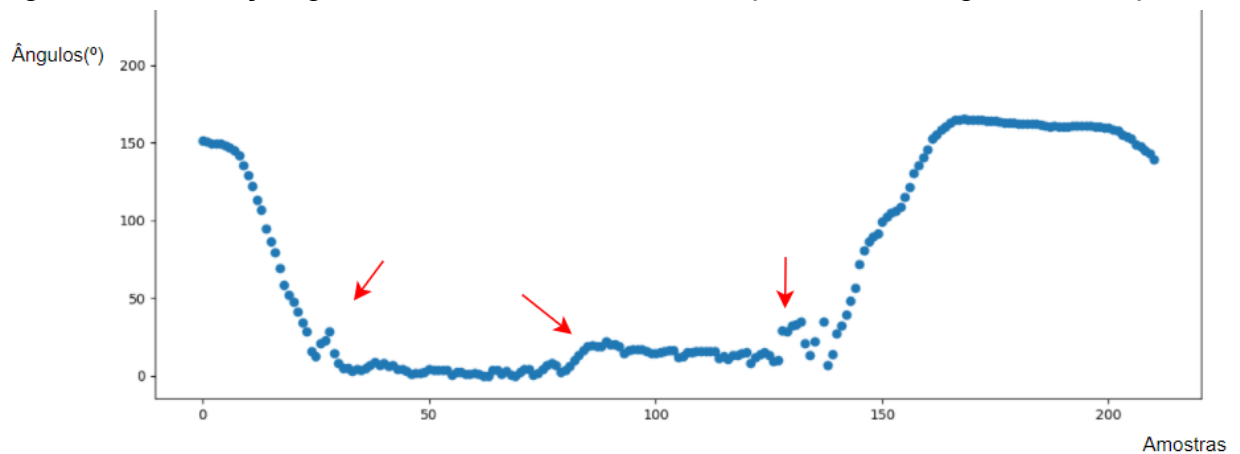
Entretanto o comportamento não é esse, na prática uma pessoa pode realizar o movimento e “parar” durante uma subida, por exemplo, e essa parada mínima não significa que atingiu o máximo. O algoritmo deve, então, ser capaz de detectar subidas/descidas “falsas”. Os critérios definidos por esse artigo são:

1º critério (1°C): mudança do vetor de direção indica a princípio encontro de máximo ou mínimo do movimento. Desse 1°C advém o primeiro problema (1°P), de existir “falsos” máximos e mínimos, ou conhecidos como máximos e mínimos locais.

2º critério (2°C): Esse critério tem como objetivo estabelecer um mínimo de amostras que podem ser verificadas se houve máximo/mínimo, ou seja, depois de uma detecção dessa deve-se esperar certas amostras até que se possa verificar se houve mudança de direção. Esse critério em si não garante totalmente não haver máximos/mínimos locais.

3º critério (3° C): Em toda detecção de mudança de direção deve-se verificar se é em nível local ou em nível que seja interessante para a aplicação. Para isso, guarda-se o ângulo dessa detecção, e verifica se as próximas amostras condizem a amostras coerentes com a última mudança de direção. Por exemplo, ao se detectar por último uma subida na rosca direta(algo no intervalo de 0° a 90°), espera-se que o vetor tenha direção para baixo. Todas essas informações são ilustradas na Figura 3.9, as setas vermelhas indicam as consideradas, para a aplicação, falsas mudanças de direção.

Figura 3.9: Ilustração gráfica de um caso real do comportamento angular no tempo.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Outra maneira de encontrar as mudanças de direções usuais seria uma interpolação de amostras para encontrar um polinômio característico; para retirar os ruídos (“falsas” mudanças de direção), poderia-se usar um filtro passa-baixa.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Testes

Os testes tem como objetivo comprovar as funcionalidades projetadas e os benefícios esperados do software. A partir dos testes é possível avaliar os resultados. Foram feitas duas classes de testes, um que visa avaliar o próprio site e outro os benefícios da aplicação.

O primeiro teste deste trabalho analisa o desempenho do aplicativo web, se os requisitos descritos no diagrama de caso de uso foram cumpridos. Nele foi testada a inserção de dados, a tela de exibição de informações escritas e em forma de vídeo. Assim, nesse formato, é possível retornar a avaliação.

O segundo visa verificar quais benefícios foram atendidos com a aplicação do software, sendo subdividido em duas situações. Situação 1, em que pessoas têm acesso ao modelo correto do exercício e tentam executar do mesmo jeito do padronizado; a segunda situação visa analisar como o software avalia exercícios executados que passaram por correções de um profissional de educação física.

O exercício padrão do teste 2 situação 1 foi a rosca direta executada por um profissional de educação física, como se pode ver na Figura 4.1. Cinco voluntários tiveram acesso a esse vídeo modelo e tentaram reproduzir (Figura 4.2). Todos gravaram vídeos que foram anexados ao aplicativo, e assim, tido o resultado. No segundo teste da situação 2, o mesmo profissional de educação física gravou um aluno realizando um exercício sem correções específicas e após situações específicas, uma captura antes da instrução pode ser vista na Figura 4.3. Os vídeos também foram inseridos no site.

Figura 4.1: Captura de imagem do vídeo classificado como modelo.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Figura 4.2: Captura de imagem do vídeo de um dos voluntários executando o movimento modelo.



Fonte: Autoria Própria (2022).

Figura 4.3 : Captura de imagem do vídeo da voluntária executando o agachamento antes da instrução.



Fonte: Autoria Própria (2022).

4.2 Desempenho do aplicativo web

A maioria dos requisitos descritos no diagrama de caso de uso da Figura 3.2 foram totalmente atendidos ou parcialmente. Os requisitos atendidos completamente foram: acessar todos os exercícios cadastrados, acessar relatório do exercício, executar um exercício pelo aluno, cadastrar um exercício pelo professor, editá-lo. Os requisitos parcialmente atendidos, isso porque foi construído a funcionalidade no banco de dados e API, mas não na página web, foram: Logar, cadastrar, apagar exercício, acessar todos os alunos cadastrados, acessar detalhes de um aluno. Alguns detalhes de funcionalidade do sistema não foram feitos, o que impede a comercialização desse software, mas isso não interfere na obtenção da avaliação retornada pelo sistema, o qual é necessário para os testes.

A página inicial do aluno mostra os dias da semana e seus respectivos treinos, assim o aluno pode filtrar exercícios apenas no dia de interesse. Essa página requer dados da tabela Fichas, Contêm Ficha Alunos e Exercícios do diagrama relacional(Figura 3.5), como também da API flask(Figura 3.3). Essa página pode ser vista na Figura 4.4, pode-se ver na parte superior os botões com dias da semana que funcionam como filtro, e em baixo da página, os respectivos exercícios.

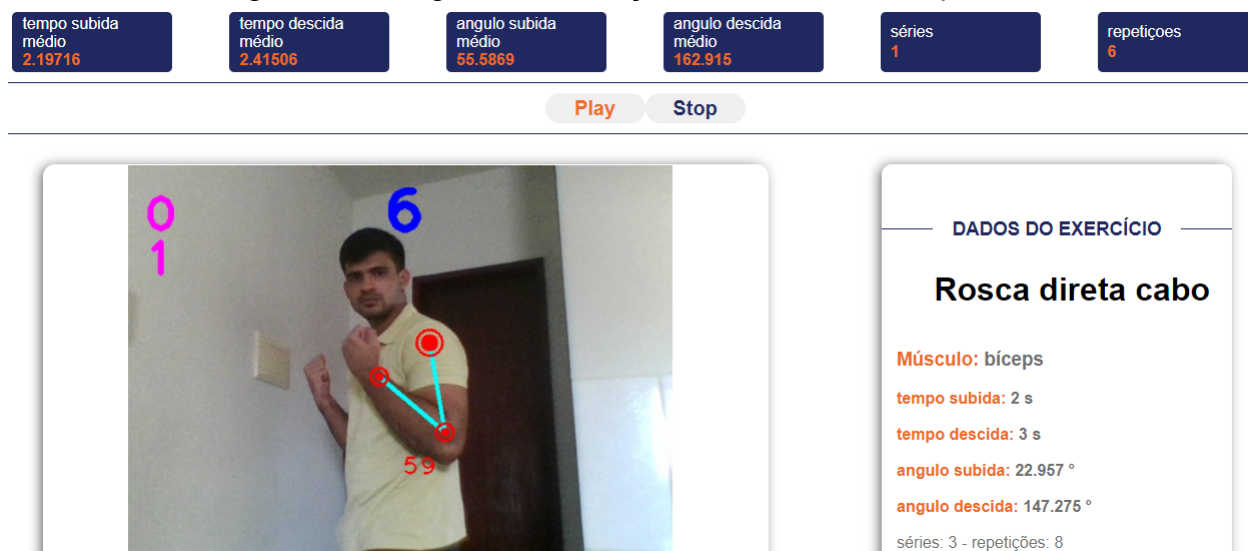
Figura 4.4: Página inicial do aluno.



Fonte: Autoria Própria (2022).

As páginas mais importantes para o sistema web são a de cadastrar um exercício pelo professor e de executar o exercício pelo aluno. Essas páginas requerem da tabela Exercícios e Exercícios Feitos do banco de dados, e também das classes ilustradas no diagrama de classe da Figura 3.3. Um exemplo de um de acesso a página de execução de exercício¹ pode ser visto na Figura 4.5, é visto informações do exercício modelo (canto inferior direito), do exercício executado (parte superior) e o vídeo referente ao exercício feito pelo aluno (canto inferior direito).¹

Figura 4.5 : Página de execução do exercício feita pelo aluno



Fonte: Autoria Própria (2022).

¹ As figuras que exibem pessoas não mostram expressamente seus rostos para manter sua privacidade, menos a Figura 4.5 pois é o próprio autor desta monografia que aparece nela.

O desempenho do aplicativo web é fundamental para que se possa avaliar as funcionalidades do sistema e possa ser aplicável. Como foi descrito, o sistema atende os principais requisitos e pode, então, ser avaliado se o sistema proporciona benefícios para o aluno e instrutor que praticam/instruem exercícios.

4.3 Aplicação prática do software

Com o segundo teste da situação 1 pode-se visualizar como os alunos executaram seus exercícios e comparar com o modelo. A Figura 4.5 mostra os dados do exercício cadastrado pelo professor, percebe-se que espera que os alunos atinjam o ângulo de subida $59,10^\circ$ e descida 124° ; o tempo de subida 1 segundo e descida de 2 segundos; além de realizar 5 repetições.

Figura 4.6 : Dados do exercício modelo capturados pelo sistema.



Fonte: Autoria Própria (2022).

A Figura 4.6 demonstra o resultados dos voluntários com informações retiradas do banco de dados do sistema. Pode-se afirmar, comparando com dados da Figura 4.5, que o participante 2 e 3 tiveram um ângulo de subida médio próximo ao do instrutor, mais ainda o participante 3 com menos de um grau de diferença; no ângulo de descida médio, o participante 1 e 3 se aproximou do esperado, porém 3 teve menor desvio padrão da média. Na questão do tempo de subida, a maioria ficou próximo do estabelecido, menos o participante 4, no tempo de descida, o primeiro e quarto se distanciaram do esperado. Pode-se inferir que o participante 4

não realizou tempo de execução próximo ao tempo esperado; o participante 1 teve alta variação da média na subida, comprovado pelo desvio padrão; o participante 2 não desceu muito o braço e o primeiro, quarto e quinto não subiram o bastante.

Figura 4.7 : Resultado do exercício executado pelos 5 participantes.

nome	tSubidaM	tSubidaDP	tDescidaM	tDescidaDP	aSubidaM	aSubidaDP	aDescidaM	aDescidaDP	repeticoes
participante1	2.698	1.083	3.843	0.623	99.001	110.317	122.204	30.579	3
participante2	2.442	0.636	2.909	0.711	42.718	23.707	89.304	12.95	4
participante3	2.367	0.705	2.061	0.517	58.224	11.955	122.974	24.631	5
participante4	7.587	1.746	3.763	0.898	99.527	17.603	138.002	16.337	2
participante5	2.586	1.655	1.682	0.327	97.917	17.024	137.885	88.613	2

Fonte: Autoria Própria (2022).

Nesse sentido, o professor poderia verificar dados como esse para analisar os alunos que estão se distanciando do esperado, e caso não seja um acontecimento de exceção, pode analisar tais pessoas pessoalmente com mais cuidado e intervir, se preciso, para alertá-los e ensiná-los corretamente.

O resultado da situação 2 analisa os resultados do sistema em comparação à mudança de execução do exercício, ou seja, antes e depois da instrução do profissional. Como se pode ver pela Tabela 4.2, a instrução influenciou que o aluno subisse mais na execução, pois assim está mais de acordo com o modelo esperado do exercício. Esperava-se que o aluno tivesse o ângulo de descida perto dos 90° devido a instrução, mas não houve porque, como se pode ver pela Figura 4.3, o joelho está à frente do esperado e isso muda o valor ângulo da articulação.

Tabela 4.1 : Comparação dos resultados do exercício executado antes e depois da instrução do instrutor.

Momento	Tempo subida médio	DP tempo subida	Tempo descida médio	DP tempo descida	Ângulo subida médio	DP ângulo subida	Ângulo descida médio	DP ângulo descida
antes	2.05	0.36	2.93	0.54	169.93	5.78	69.30	11.96
depois	1.89	0.47	2.71	0.61	167.25	4.31	81.91	9.34

Fonte: Autoria Própria (2022).

Os resultados da primeira situação do segundo teste podem oferecer para o aluno uma avaliação em tempo real e assim ele pode corrigir; para o professor possibilita um melhor e mais preciso monitoramento. Mostrou-se na segunda situação que houve uma melhoria do aluno, mas poderia ser melhor se fossem capturados e analisados outros aspectos, como posição das articulações.

Capítulo 5

Conclusão

Os exercícios físicos desempenham papel importante na vida das pessoas e a errônea execução apresenta-se como um perigo para os usuários. Os instrutores, que têm o papel de monitorar e corrigir erros de alunos, avaliam diversos fatores externos e internos para orientar seus alunos. Este sistema possibilita ao instrutor realizar monitoramento com mais facilidade, pois não precisa estar presencialmente em todas as execuções do aluno, e também acesso a informações mais precisas.

Os resultados demonstraram que muitos recursos desse protótipo de conceito mostraram-se usuais e alguns precisam ser aprimorados ou adicionados. Para se tornar um produto, deve-se fazer uma pesquisa de mercado para decidir: a melhor forma de se adquirir a imagem das pessoas, funcionalidades extras do sistema, melhor formato de software (site ou aplicativo de celular), melhor formato de comunicação com o usuário (voz, mensagem ou avisos em formato de cores), etc.

Os requisitos prontos permitiram testar quais os benefícios para o professor e para o aluno. Os testes com usuários resultaram em dados que permitiram inferir quais alunos fizeram corretamente o exercício e os que precisam ser monitorados com mais atenção. Porém, neste aplicativo, o instrutor só obtém dados relativos à amplitude do movimento, tempo de execução e frequência do treino; outras informações, como postura, não foram obtidas por esse sistema. A correção da postura poderia ser facilmente implementada, pois esse sistema já construiu o código de detector de pose adequado para situação de musculação e, também, a modelagem matemática, dos quais são obtidos os ângulos das articulações e distância dos eixos articulares. Para que este protótipo possa se tornar um produto, ainda é necessário realizar um maior número de testes, adequadamente planejados, com amostras estatisticamente relevantes, de maneira a validar o sistema.

Algoritmos de detecção de atividades físicas existem muitos e utilizando diversas tecnologias, como o trabalho dos autores Wang et Al (2021). O que esse trabalho possibilita adicionar é a análise de movimento, a partir de um desses algoritmos de detecção, assim como a construção de um aplicativo web que fornece informações e funcionalidades necessárias para instrutores e alunos.

Referências bibliográficas

BARAKAT, C. et Al. The Effects of Varying Glenohumeral Joint Angle on Acute Volume Load, Muscle Activation, Swelling, and Echo-Intensity on the Biceps Brachii in Resistance-Trained Individuals. *Sports* 2019, 7, 204, 2019.

BASEHORE, S.; GRAF, T; WALL, K. A Biomechanical Analysis of a Bicep Curl. Worcester Polytechnics Institute, 2013.

BAZAREVSKY, V et al. BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking. *CoRR*, v. abs/2006.10204, 2020.

BAZAREVSKY, V; GRISHCHENKO, I. On-device, Real-time Body Pose Tracking with MediaPipe BlazePose. Google AI Blog, 13 de agosto de 2020. Disponível em: <<https://ai.googleblog.com/2020/08/on-device-real-time-body-pose-tracking.html>>. Acesso em : 25/01/2022.

CAMPOS, Maurício de A. Biomecânica da musculação. 2ª ed. Rio de Janeiro: Sprint, 2000.

CHEN, S.;YANG, R. R.. Pose Trainer: Correcting Exercise Posture using Pose Estimation, 2020.

ELMASRI, Ramez; NAVATHE, S. B. Sistemas de banco de dados. 6. ed, São Paulo : Pearson Addison Wesley, 2011.

HANNAN, A. et Al. A Portable Smart Fitness Suite for Real-Time Exercise Monitoring and Posture Correction. *Sensors* 21, n. 19: 6692, 2021.

HECKSTEDEN, A. et Al. How to Construct, Conduct and Analyze an Exercise Training Study?. *Frontiers in physiology* vol. 9 1007, 2018.

NEUMANN, Donald. A cinesiologia do aparelho musculoesquelético. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

NOGUEIRA, R. P. Análise do Exercício agachamento utilizando o método de Kane. Tese (mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2011.

NOSAKA, KAZUNORI; SAKAMOTO. KEI Effect of elbow joint angle on the magnitude of muscle damage to the elbow flexors, Medicine and Science in Sports and Exercise: January 2001 - Volume 33 - Issue 1 - p 22-29, 2001.

SOMMERVILLE, I. Engenharia de software. 9, São Paulo pearson education, 2011.
TOSHPULATOV et al. Estimativa de pose humana, mão e malha usando aprendizado profundo: uma pesquisa. J Supercomputador, 2022.

VALENTE, M. T. Engenharia de Software Moderna: Princípios e Práticas para Desenvolvimento de Software com Produtividade, 2020.

WANG, J. et Al. Deep 3D human pose estimation: A review, Computer Vision and Image Understanding, Volume 210, 2021,103225, 2021.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

Trabalho de Conclusão de Curso – Avaliação

I. IDENTIFICAÇÃO

Nome: Leandro de Souza Rodrigues
Curso: Engenharia Mecatrônica. Matrícula: 20200001060
Orientador: Pablo Javier Alsina
Departamento: Engenharia de Computação e Automação SIAPE:1242315

II. TRABALHO

Título: **Sistema web com estimativa de pose e análise de movimento para aplicações de auxílio à prática de exercício físico.**

Agência Financiadora:

(X) Sem financiamento () Empresa: _____
() Bolsa: _____ () Outro: _____

Área de conhecimento:

() Engenharia Mecânica () Engenharia Elétrica () Outra: Engenharia Mecatrônica

III. AVALIAÇÃO

Data de início: 18 / 10 / 2021

Data da defesa: 16 / 02 / 2022 Local: videoconferência do Google Meet:

<https://meet.google.com/xaz-amuy-fej>

BANCA EXAMINADORA			
NOME	ASSINATURA	SIAPE(*)	NOTA
Adelardo Adelino Dantas de Medeiros	Assinado eletronicamente	1276494	9,0
Agostinho de Medeiros Brito Junior	Assinado eletronicamente	0350751	9,0
Pablo Javier Alsina	Assinado eletronicamente	1242315	9,0
Média final			9,0

A banca examinadora é de parecer que o trabalho atingiu a nota mínima de 7,0 (sete). Portanto, o aluno atendeu às exigências para cumprimento do Trabalho de Conclusão de Curso obrigatório do Curso de Engenharia Mecatrônica.

Natal (RN), 16 de fevereiro de 2022.

(*) Não sendo professor da UFRN, informar a condição/empresa