



TRABALHO DE ACESSIBILIDADE E INCLUSÃO DIGITAL

PROJETO JOYSTICK

Acessibilidade e Inclusão Digital

Wesley Willian Bezerra Franco

Vinculado ao projeto de extensão
Acessibilidade e Inclusão Digital:
formação, extensão e pesquisa
[2025-2027], registrado na UTFPR
sob o número 12184, sob a
coordenação de prof. Leonelo Dell
Anhol Almeida

CURITIBA

2026



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus - Pai, Filho e Espírito Santo. Pela Sua infinita graça, que me sustentou e guiou em todos os momentos desta jornada, tornando a realização deste trabalho possível.

À minha esposa, Jenifer, por todo apoio, carinho e incentivo ao longo deste processo. Agradeço pelas ideias, pela presença em todas as etapas de instalação e testes, pelo auxílio nas montagens e por estar ao meu lado em cada momento deste trabalho.

Ao colega Renê, por ter atuado diretamente na coleta de dimensões, na melhoria da prototipagem 3D, na realização das impressões 3D e no desenvolvimento da parte eletrônica. Agradeço também pela disponibilidade ao longo de todo o trabalho, auxiliando nos reparos necessários, nas adaptações e nas ideias que contribuíram para a evolução do projeto.

Aos professores Leonelo e Emílio, pelo auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho e por se mostrarem sempre disponíveis para orientar, esclarecer dúvidas e contribuir com o andamento do projeto.

Ao Charles e sua família, pela disponibilidade, paciência e colaboração durante os testes, conversas e ajustes realizados. Agradeço pela confiança, pelas sugestões e pela abertura para que este projeto pudesse ser desenvolvido a partir de necessidades reais de uso.

"A graça do Senhor Jesus Cristo, o amor de Deus e a comunhão do Espírito Santo sejam com todos vocês." 2Cor 13:13



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Relação entre os objetivos específicos e os passos metodológicos do projeto.....	8
Figura 1 - Joystick original da cadeira de rodas utilizado no projeto.....	11
Figura 2 - Vista do modelo 3D com regiões de fixação e passagem de cabos..	12
Figura 3 - Detalhe do modelo 3D para ímãs e sensores de fim de curso.....	13
Figura 4 - Modelos 3D da haste adaptada do joystick e das peças complementares de fixação.....	14
Figura 5 - Modelo 3D da case para acondicionamento dos componentes eletrônicos.....	15
Figura 6 - Dispositivo acoplável após impressão 3D e montagem inicial.....	16
Figura 7 - Case eletrônica impressa em 3D.....	17
Figura 8 - Encaixe entre o dispositivo acoplável, o suporte de fixação e a haste adaptada.....	17
Figura 9 - Bateria e placa eletrônica modular montada e instalada na case.....	19
Figura 10 - Variações de posição e tamanho do modo digital no aplicativo Move On.....	23
Figura 11 - Variações de posição e tamanho do modo analógico no aplicativo Move On.....	24
Figura 12 - Sistema montado na cadeira de rodas após impressão 3D e montagem dos componentes.....	26



SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	4
2.	OBJETIVOS.....	6
2.1.	Objetivo Geral.....	6
2.2.	Objetivos Específicos.....	6
3.	METODOLOGIA E ABORDAGEM DO PROJETO.....	7
4.	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA.....	10
4.1.	Projeto Mecânico.....	10
4.1.1.	Levantamento de Medidas e Análise Dimensional.....	11
4.1.2.	Modelagem 3D do Dispositivo.....	12
4.1.3.	Sistema de Fixação, Desencaixe Rápido e Haste Adaptada.....	13
4.1.4.	Compartimento para Acondicionamento da Eletrônica.....	14
4.1.5.	Processo de Impressão 3D e Materiais Utilizados.....	16
4.2.	Projeto Eletrônico.....	18
4.2.1.	Unidade de Controle - ESP32.....	19
4.2.2.	Sistema de Acionamento - Motores de Passo e Drivers.....	19
4.2.3.	Sistema de Alimentação e Proteção Elétrica.....	20
4.2.4.	Sensores de Fim de Curso e Segurança.....	21
4.3.	Projeto de Software.....	21
4.3.3.	Rotinas e Calibração de Segurança.....	25
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26



1. INTRODUÇÃO

Este trabalho consiste na continuidade e no aprimoramento de um projeto previamente desenvolvido no âmbito da disciplina ICSHX0 Acessibilidade e Inclusão Digital (vinculada ao projeto de extensão Acessibilidade e Inclusão Digital: formação, extensão e pesquisa [2025-2027], registrado na UTFPR sob o número 12184), ministrada pelo prof. Leonelo Dell Anhol Almeida, cujo objetivo inicial foi propor uma solução assistiva capaz de ampliar a autonomia de um usuário com limitações motoras no controle de sua cadeira de rodas elétrica. Na etapa anterior, foi concebido e implementado um protótipo de joystick acessório¹, controlado via aplicativo móvel e comunicação Bluetooth, responsável por movimentar mecanicamente o joystick original da cadeira de rodas.

Apesar de o protótipo inicial ter validado o conceito funcional da solução — integrando hardware, software e interação remota — os testes práticos evidenciaram limitações significativas relacionadas principalmente ao torque insuficiente dos atuadores utilizados e às restrições físicas de encaixe do dispositivo no joystick original. Essas limitações impediram o uso efetivo do sistema em um cenário real, reforçando a necessidade de uma revisão técnica mais aprofundada.

Diante disso, este novo trabalho tem como finalidade o aprimoramento completo do sistema, com foco em torná-lo plenamente funcional, robusto e adequado ao uso cotidiano. As melhorias propostas envolvem alterações estruturais no dispositivo físico, um novo dimensionamento mecânico para impressão 3D mais precisa e compatível com as dimensões reais do joystick, além da reavaliação dos componentes responsáveis pela força e pela movimentação do sistema.

¹ O Recurso Educacional Aberto do projeto anterior está disponível em: <https://repositorios.dainf.ct.utfpr.edu.br/s/aid/item/174>.



Paralelamente, o aplicativo móvel também passa por refinamentos, buscando oferecer uma interface mais usável, acessível e funcional, alinhada às necessidades específicas do usuário final. O objetivo é garantir maior precisão no controle, melhor resposta aos comandos e uma experiência de uso mais segura e confiável.

Assim, este relatório documenta todo o processo de evolução do projeto, abordando as decisões técnicas adotadas, os ajustes realizados no hardware e no software, bem como os critérios adotados para transformar um protótipo conceitual em uma solução assistiva efetivamente aplicável, reafirmando o compromisso com a acessibilidade, a inclusão digital e o desenvolvimento de tecnologias centradas no usuário.



2. OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho, voltados ao desenvolvimento e aprimoramento de uma solução assistiva para o controle remoto de uma cadeira de rodas elétrica por meio de um dispositivo acoplável ao joystick original.

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um sistema assistivo funcional e robusto para o controle remoto de uma cadeira de rodas elétrica por meio de um joystick acoplável, integrando soluções mecânicas, eletrônicas e de software, visando ampliar a autonomia do usuário.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste projeto são:

- Remodelar e otimizar o projeto mecânico do dispositivo acoplável, garantindo maior robustez estrutural, precisão dimensional e compatibilidade física.
- Selecionar atuadores e componentes mecânicos capazes de fornecer torque e precisão adequados para a movimentação efetiva.
- Projetar e implementar um sistema eletrônico modular, seguro e de fácil manutenção.
- Projetar e aprimorar o software de controle com foco em acessibilidade, usabilidade e conforto de uso, assegurando uma interface intuitiva, funcional e adequada às necessidades específicas do usuário final.
- Analisar o funcionamento do sistema por meio de testes práticos, registrando comportamentos observados, limitações e ajustes necessários para futuras melhorias.



3. METODOLOGIA E ABORDAGEM DO PROJETO

Em termos metodológicos, para subsidiar o processo de desenvolvimento do projeto, foi adotada uma adaptação do modelo de processo Estrela. O Modelo Estrela é um modelo de projeto de interação proposto por Hix e Hartson (1993), que representa o projeto de um produto interativo considerando os processos de avaliação como elemento central. O processo de avaliação é definido por Rocha e Baranauskas (2003, p.163) como atividades para a resolução de dúvidas que projetistas podem ter durante o processo de desenvolvimento de um produto, de modo a verificar o que realmente as pessoas que participam da avaliação necessitam ou desejam. O modelo é flexível em qual das etapas é a primeira a ser realizada. No caso deste projeto, o ponto de entrada no ciclo é a especificação de requisitos, realizada por meio do envolvimento direto entre estudantes e o público-alvo. O funcionamento do modelo é que, finalizada uma atividade, esta deve ser seguida de uma atividade de avaliação, que inclusive informa qual atividade será a próxima a ser realizada. Esta avaliação pode ser realizada com ou sem a participação da comunidade externa a depender do que foi desenvolvido. As atividades do ciclo de desenvolvimento são: (1) Especificação de Requisitos: delimita o que e como o produto deve ser ou fazer com a comunidade externa; (2) Análise de Tarefa/Análise Funcional: especifica e modela as situações relevantes à interação com o produto; (3) Design Conceitual/Design Formal: projeto da interação com o produto; (4) Prototipação: construção de versões iniciais do produto com o propósito de explorar conceitos e resultados de outras etapas; (5) Implementação: o produto é implantado ou hospedado seguindo um plano de implementação específico ao produto, formulado nesta etapa; (6) Avaliação: atividades para a resolução de dúvidas que projetistas podem ter durante o processo de desenvolvimento de um produto, de modo a verificar o que realmente as pessoas que participam da avaliação necessitam ou desejam.



Sobre aspectos particulares aos papéis das pessoas participantes:

- A. Estudantes da UTFPR são protagonistas na mediação com a comunidade externa, na identificação das barreiras de acessibilidade e em sua implementação;
- B. Responsáveis pela comunidade externa e o coordenador deste projeto: responsáveis pela mediação entre estudantes, acompanhamento do processo e facilitação por meio de materiais e técnicas;
- C. Pessoas da comunidade externa: participam ativamente dos processos decisórios sobre a ação extensionista que será realizada, desde a decisão do tema da ação.

Com relação aos objetivos específicos deste projeto, o quadro 1 relaciona-os com os passos metodológicos realizados neste projeto.

Quadro 1 - Relação entre os objetivos específicos e os passos metodológicos do projeto.

Objetivo específico	Passo metodológico
Remodelar e otimizar o projeto mecânico do dispositivo acoplável, garantindo maior robustez estrutural, precisão dimensional e compatibilidade física.	Levantamento de necessidades, análise do protótipo anterior e definição de ajustes no modelo físico.
Selecionar atuadores e componentes mecânicos capazes de fornecer torque e precisão adequados para a movimentação efetiva.	Análise das limitações técnicas observadas e seleção de componentes para nova etapa de prototipagem.
Projetar e implementar um sistema eletrônico modular, seguro e de fácil manutenção.	Planejamento da arquitetura eletrônica, montagem do protótipo e organização dos componentes.
Projetar e aprimorar o software de controle com foco em acessibilidade, usabilidade e conforto de uso.	Desenvolvimento iterativo da interface, com ajustes orientados pelas necessidades de uso observadas.



Analisar o funcionamento do sistema por meio de testes práticos, registrando comportamentos observados, limitações e ajustes necessários para futuras melhorias.	Realização de testes práticos, observação do uso e registro das limitações identificadas.
--	---

Fonte: autoria própria (2026).

A comunidade diretamente envolvida no projeto:

- Emílio Rudolfo Fey Neto: atuou na mediação inicial do contato com Charles e seus pais, auxiliando na comunicação entre a equipe do projeto e a família durante as primeiras conversas.
- Charleston Roberto de Oliveira Mayer Junior: participou como usuário diretamente envolvido no projeto, contribuindo para a identificação das necessidades de uso, para a realização dos testes práticos e para a avaliação das adaptações propostas ao sistema.
- Charleston Roberto de Oliveira Mayer: pai de Charles, acompanhou diferentes etapas do projeto, contribuindo com sugestões de melhoria, apoio na montagem do dispositivo e auxílio com ferramentas durante ajustes mecânicos.
- Alessandra Mara Rodrigues: mãe de Charles, acompanhou o desenvolvimento do projeto junto à família, contribuindo com observações sobre o uso cotidiano da cadeira, sugestões de melhorias e apoio na organização dos testes e deslocamentos necessários.



4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O desenvolvimento do sistema concentrou-se no aprimoramento de uma solução assistiva em estágio de protótipo funcional, integrando aspectos mecânicos, eletrônicos e de software. A partir dos requisitos definidos e das necessidades identificadas para a aplicação do dispositivo, o sistema foi organizado de maneira modular, buscando facilitar ajustes, manutenção e novas etapas de teste.

Foram adotadas soluções técnicas voltadas à melhoria da estrutura mecânica, ao acionamento dos atuadores, à organização eletrônica e à adequação da interface de software às limitações motoras do usuário. O desenvolvimento foi organizado em três frentes principais: o projeto mecânico do dispositivo acoplável, o projeto eletrônico responsável pelo acionamento e controle dos componentes, e o projeto de software, responsável pela interação entre o usuário e o sistema embarcado.

4.1. Projeto Mecânico

A cadeira em seu estado inicial com o joystick analisado pode ser visto na figura 1.

O projeto mecânico teve como foco principal o desenvolvimento de uma estrutura fisicamente resistente e compatível com o joystick da cadeira de rodas. Para isso, foram realizadas medições detalhadas do joystick original, considerando seu formato irregular, dimensões críticas e limitações de espaço para o acoplamento do dispositivo.

Figura 1 - Joystick original da cadeira de rodas utilizado no projeto.



Fonte: Autoria própria (2026).

4.1.1. Levantamento de Medidas e Análise Dimensional

Inicialmente, foi realizada a análise física do joystick original da cadeira de rodas, apresentado na figura 1, com o objetivo de identificar suas características geométricas, limitações de espaço e regiões adequadas para o acoplamento do dispositivo desenvolvido.

A partir dessa análise, foi realizado o levantamento das dimensões do joystick utilizando instrumentos de medição manual. As medidas coletadas incluíram diâmetro da base, altura da haste, comprimento total e demais características geométricas relevantes para o encaixe e funcionamento do sistema.

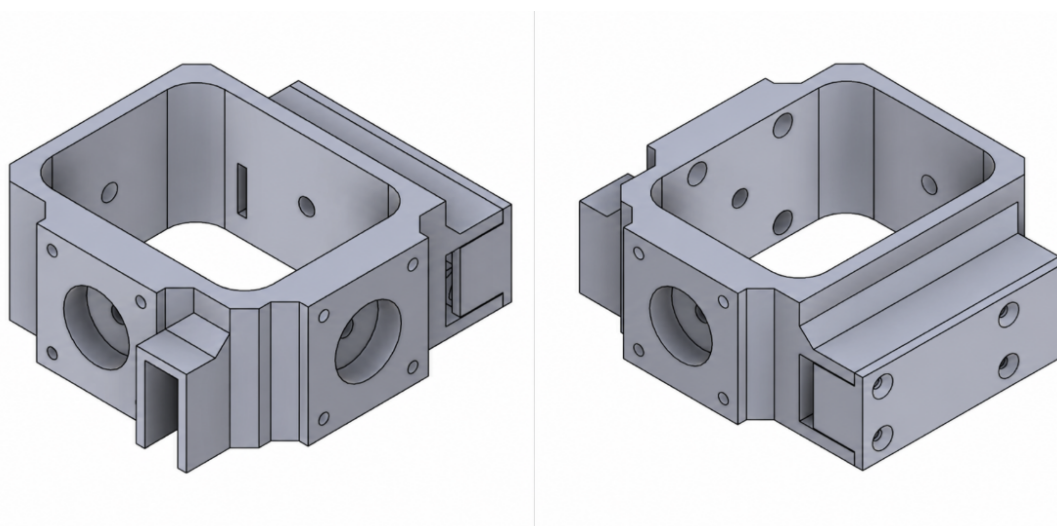
Essas medições serviram como base para o desenvolvimento do modelo tridimensional, auxiliando no ajuste do encaixe e na redução de possíveis interferências físicas durante o funcionamento do sistema.

4.1.2. Modelagem 3D do Dispositivo

A modelagem tridimensional do dispositivo acoplável ao joystick foi realizada utilizando o software Autodesk Fusion 360, amplamente empregado em projetos de engenharia mecânica e de prototipagem rápida. O modelo foi desenvolvido com foco em robustez estrutural e compatibilidade dimensional, considerando as limitações físicas do joystick da cadeira de rodas e a necessidade de acomodar atuadores, sensores e cabeamentos.

O design adotado apresenta uma estrutura reforçada, com geometrias mais rígidas e dimensionamento ajustado em relação ao protótipo inicial, buscando melhor distribuição dos esforços mecânicos gerados pela atuação dos motores. Foram previstas regiões específicas para fixação dos motores de passo, apoio dos eixos de movimentação e passagem dos cabos, conforme representado na figura 2.

Figura 2 - Vista do modelo 3D com regiões de fixação e passagem de cabos.

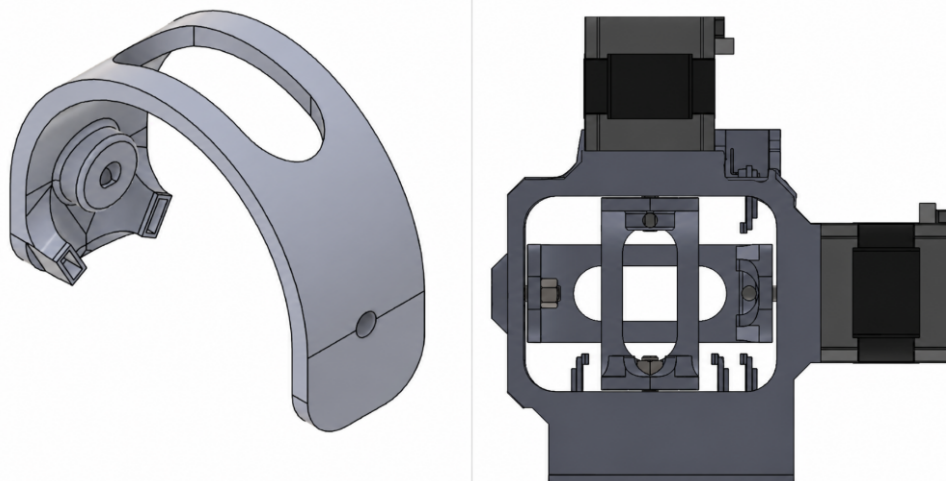


Fonte: Autoria própria (2026).

Além disso, o modelo contempla aberturas posicionadas nas extremidades de cada eixo de movimentação, destinadas à fixação de ímãs permanentes, os quais atuam em conjunto com os sensores magnéticos de fim de curso para a limitação

dos movimentos máximos do sistema. Esses detalhes de acoplamento são apresentados na figura 3.

Figura 3 - Detalhe do modelo 3D para ímãs e sensores de fim de curso.



Fonte: Autoria própria (2026).

4.1.3. Sistema de Fixação, Desencaixe Rápido e Haste Adaptada

Além da estrutura principal do dispositivo acoplável ao joystick, foram desenvolvidas peças complementares para auxiliar a fixação, o posicionamento e a remoção do conjunto durante o uso. Essas peças foram projetadas de forma integrada ao acessório principal, considerando a necessidade de manter o dispositivo posicionado sobre o joystick original e, ao mesmo tempo, permitir sua retirada quando fosse necessário utilizar a cadeira de rodas de modo convencional.

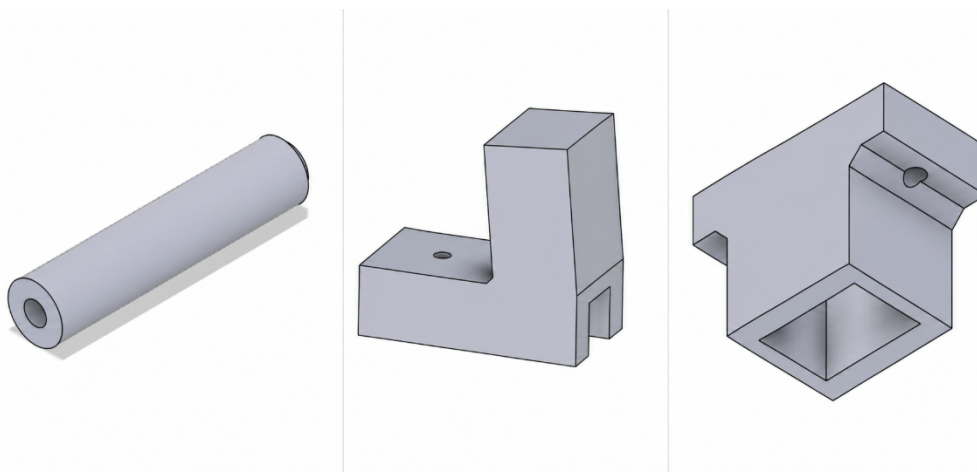
O sistema de fixação foi composto por duas partes: uma peça destinada à fixação no braço da cadeira de rodas, próxima ao joystick original, e outra associada ao acessório acoplável. Essa configuração permite que o conjunto seja encaixado e removido de maneira mais simples, reduzindo a dependência de reposicionamentos manuais a cada instalação. O velcro foi mantido como elemento auxiliar de fixação,

contribuindo para a união entre as partes e para a estabilidade do acessório durante os testes.

Também foi desenvolvida uma haste adaptada para a região central do joystick. A peça emborrachada original apresentava formato mais espesso e irregular, o que dificultava a acomodação adequada entre os arcos do mecanismo. Por isso, foi criada uma haste impressa em 3D com dimensões compatíveis com o espaço disponível no dispositivo, favorecendo o acoplamento mecânico entre o joystick original e o acessório desenvolvido.

A figura 4 apresenta os modelos 3D das peças complementares desenvolvidas para o sistema de fixação, desencaixe rápido e adaptação da haste do joystick.

Figura 4 - Modelos 3D da haste adaptada do joystick e das peças complementares de fixação.



Fonte: Autoria própria (2026).

4.1.4. Compartimento para Acondicionamento da Eletrônica

A parte eletrônica do sistema foi organizada em um compartimento próprio (“case”), projetado para acondicionar os componentes responsáveis pelo controle e alimentação do dispositivo. Essa case foi desenvolvida para receber a placa

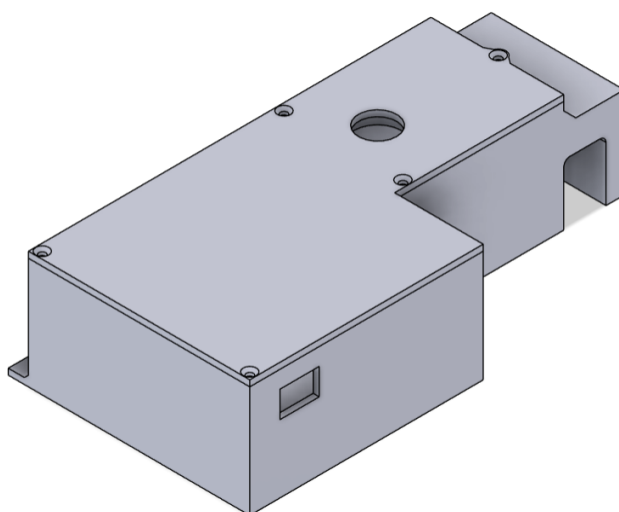


eletrônica, a bateria, o conversor de tensão, os drivers dos motores e os demais elementos necessários ao funcionamento do sistema.

A utilização de uma case separada do dispositivo acoplável ao joystick permite concentrar os componentes eletrônicos em um único compartimento, facilitando o acesso às conexões e reduzindo a exposição direta dos circuitos durante o manuseio da cadeira de rodas. Seu dimensionamento considerou o espaço necessário para acomodação dos módulos eletrônicos, a passagem dos cabos e o acesso aos botões de acionamento e verificação de bateria.

A case foi planejada para ser fixada na parte lateral externa da cadeira de rodas, em uma posição que não interfira na movimentação do usuário nem aumente significativamente as dimensões externas da cadeira. Esse posicionamento também considera a necessidade de manter os componentes eletrônicos próximos ao dispositivo acoplável ao joystick, sem comprometer a organização dos cabos. O modelo 3D da case desenvolvida é apresentado na figura 5.

Figura 5 - Modelo 3D da case para acondicionamento dos componentes eletrônicos.



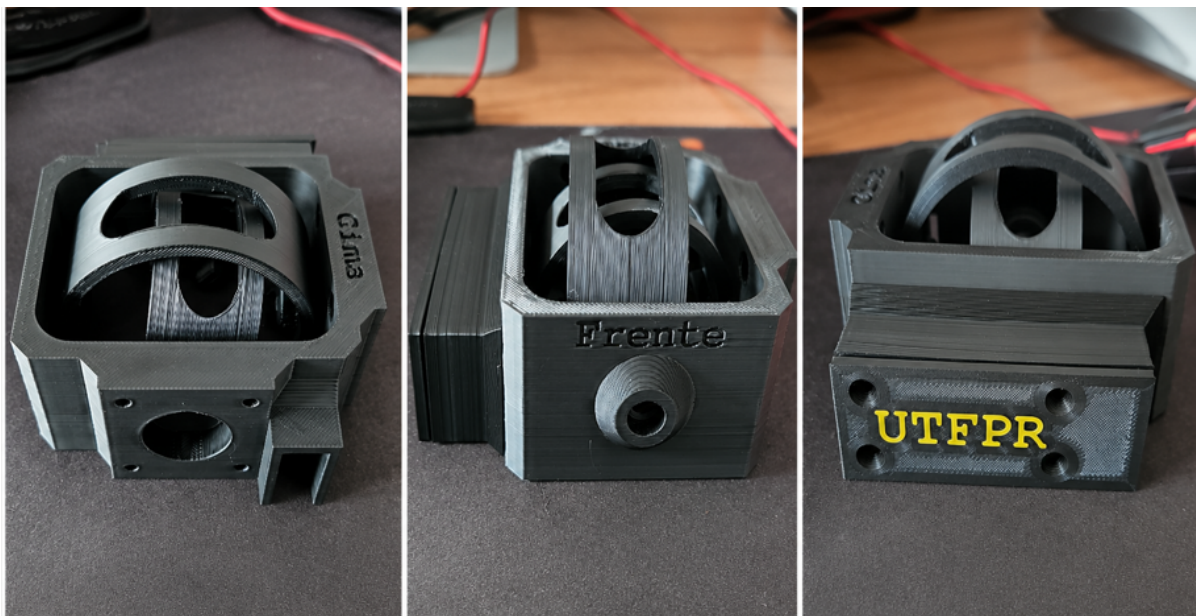
Fonte: Autoria própria (2026).

4.1.5. Processo de Impressão 3D e Materiais Utilizados

A fabricação das peças foi realizada por meio de impressão 3D, tecnologia que permitiu prototipagem rápida e ajustes no projeto. O material utilizado foi Ácido Polilático (PLA), escolhido por apresentar resistência mecânica compatível com a etapa de prototipagem, facilidade de impressão e baixo custo.

Os parâmetros de impressão foram definidos com foco na resistência estrutural e na orientação das peças para suportar os esforços previstos durante a operação do sistema. Na peça acoplável ao joystick, também foram impressas referências direcionais, como "Cima" e "Frente", para auxiliar a identificação da posição correta de montagem, conforme mostrado na figura 6. A case eletrônica também foi impressa em 3D e recebeu os componentes do circuito, como apresentado na figura 7.

Figura 6 - Dispositivo acoplável após impressão 3D e montagem inicial.



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 7 - Case eletrônica impressa em 3D.



Fonte: Autoria própria (2026).

Após a impressão das peças, foi verificado o encaixe entre o dispositivo acoplável, o suporte de fixação e a haste adaptada do joystick. A figura 8 apresenta o conjunto posicionado junto ao joystick da cadeira de rodas, destacando a disposição dos elementos mecânicos após a montagem inicial.

Figura 8 - Encaixe entre o dispositivo acoplável, o suporte de fixação e a haste adaptada.



Fonte: Autoria própria (2026).



4.2. Projeto Eletrônico

O projeto eletrônico do sistema foi desenvolvido com foco no controle preciso dos atuadores, na segurança elétrica e na facilidade de manutenção, adotando uma arquitetura modular e funcional. O sistema opera de forma autônoma, alimentado por bateria, sendo controlado por um microcontrolador com comunicação Bluetooth, responsável por receber os comandos do aplicativo móvel e convertê-los em ações mecânicas no dispositivo acoplado ao joystick da cadeira de rodas.

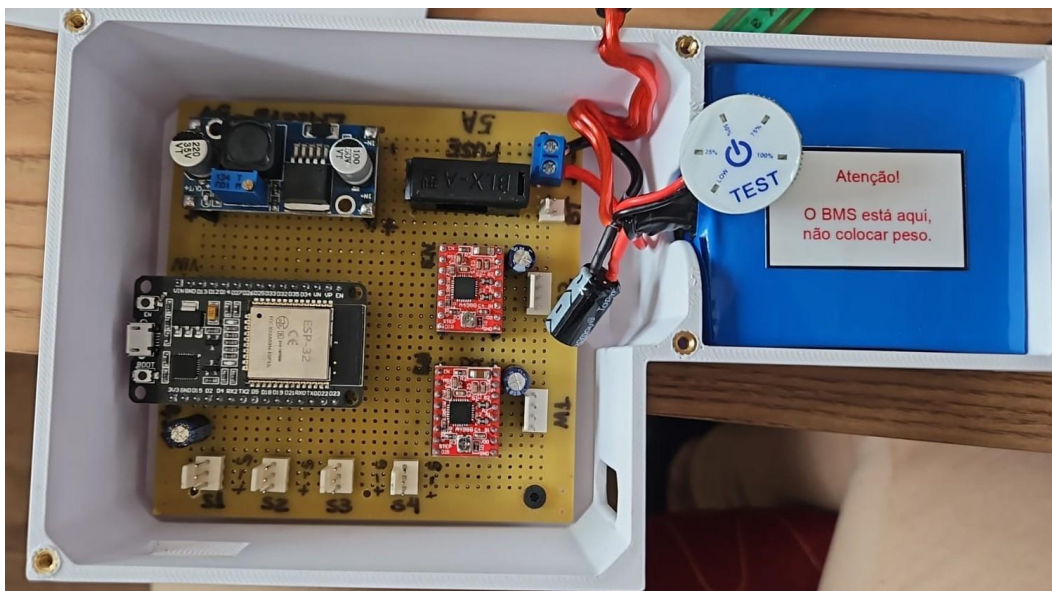
A organização eletrônica priorizou a separação clara entre os estágios de alimentação, controle, acionamento dos motores e sensores de segurança, garantindo integração eficiente entre os subsistemas e maior confiabilidade durante a operação.

O sistema eletrônico é composto pelos seguintes elementos principais:

- Microcontrolador ESP32;
- Dois motores de passo NEMA 17;
- Dois drivers de motor de passo A4988;
- Conversor de tensão LM2596;
- Bateria Li-ion 12V com placa BMS;
- Quatro sensores magnéticos de fim de curso;
- Fusível de proteção;
- Botão liga/desliga;
- Botão de verificação de nível de bateria.

Todos os componentes foram organizados em uma placa perfurada, alojada em uma case impressa em 3D, favorecendo a organização interna e o acesso para manutenção, conforme a figura 9.

Figura 9 - Bateria e placa eletrônica modular montada e instalada na case.



Fonte: Autoria própria (2026).

4.2.1. Unidade de Controle - ESP32

O controle do sistema é realizado por um microcontrolador ESP32, escolhido por sua capacidade de processamento, baixo consumo energético e conectividade Bluetooth integrada. O ESP32 é responsável por:

- Receber os comandos enviados pelo aplicativo móvel via Bluetooth;
- Processar a lógica de controle dos eixos horizontal e vertical;
- Gerar os sinais de controle para os drivers dos motores de passo;
- Monitorar os estados dos sensores de fim de curso.

A comunicação sem fio elimina a necessidade de cabos entre o usuário e o sistema, proporcionando maior conforto e flexibilidade de uso.

4.2.2. Sistema de Acionamento - Motores de Passo e Drivers

Para a movimentação do joystick, foram utilizados motores de passo NEMA 17, selecionados por oferecerem maior torque e controle de posicionamento em



comparação com servomotores convencionais. Cada eixo de movimentação (horizontal e vertical) é acionado por um motor dedicado.

O controle dos motores é realizado por meio de drivers A4988, responsáveis por:

- Regular a corrente fornecida aos motores;
- Permitir microstepping, aumentando a suavidade dos movimentos;
- Proteger o sistema contra sobrecorrente.

Essa configuração possibilita movimentos mais precisos e controlados, fundamentais para a aplicação em um sistema assistivo.

4.2.3. Sistema de Alimentação e Proteção Elétrica

O sistema é alimentado por uma bateria Li-ion de 12V e 6600 mAh, equipada com placa BMS (Battery Management System), responsável por proteger a bateria contra sobrecarga, descarga excessiva e curto-circuito. Um botão físico permite a verificação do nível de bateria em 100%, 75%, 50%, 25% e “LOW” (baixo).

Para adequar a tensão às necessidades dos componentes eletrônicos, foi utilizado um conversor de tensão LM2596, permitindo a redução e estabilização da tensão de entrada para níveis seguros de operação do microcontrolador e dos periféricos.

Adicionalmente, foi incorporado um fusível de proteção em série com a alimentação principal, aumentando a segurança do sistema e prevenindo danos em caso de falhas elétricas.



4.2.4. Sensores de Fim de Curso e Segurança

Para garantir a segurança mecânica do sistema e evitar esforços excessivos nos motores e na estrutura física, foram implementados sensores magnéticos de fim de curso, distribuídos de forma a limitar os movimentos máximos dos dois eixos de atuação.

No total, foram utilizados quatro sensores magnéticos, sendo dois para cada eixo de movimentação. Esses sensores informam ao microcontrolador quando o limite de curso é atingido, permitindo a interrupção imediata do movimento e prevenindo danos ao sistema.

Adicionalmente, foi incorporado um botão físico de liga/desliga, permitindo a interrupção manual e imediata do funcionamento do sistema em situações de emergência, como travamentos de software ou comportamentos inesperados durante a operação.

Essa abordagem contribui para:

- Proteção mecânica do dispositivo;
- Aumento da confiabilidade do sistema;
- Redução do risco de falhas durante a operação;
- Maior segurança para o usuário.

4.3. Projeto de Software

O projeto de software foi desenvolvido com o objetivo de oferecer uma interface de controle acessível, intuitiva e compatível com as limitações motoras do usuário, além de favorecer a comunicação entre o aplicativo e o sistema embarcado. O software é composto por duas partes principais: o programa embarcado no microcontrolador ESP32 e o aplicativo móvel desenvolvido para dispositivos Android.



O sistema de software interpreta as interações do usuário, transmite os comandos via Bluetooth e os converte em ações mecânicas coordenadas nos eixos de movimentação do joystick da cadeira de rodas, buscando oferecer controle e conforto durante a operação.

4.3.1. Software Embarcado - ESP32

O software embarcado foi desenvolvido na plataforma Arduino IDE, utilizando o microcontrolador ESP32 como unidade central de controle. Esse software é responsável por:

- Gerenciar a comunicação Bluetooth com o aplicativo móvel;
- Interpretar os comandos recebidos;
- Controlar o acionamento dos motores de passo por meio dos drivers;
- Monitorar os sensores magnéticos de fim de curso;
- Executar rotinas de calibração e segurança.

O controle dos motores de passo foi implementado de forma a permitir movimentos graduais, com retorno automático à posição central sempre que não há comando ativo. Além disso, ao atingir a posição de repouso, as bobinas dos motores são desativadas, reduzindo o consumo de energia e evitando esforços desnecessários nos atuadores.

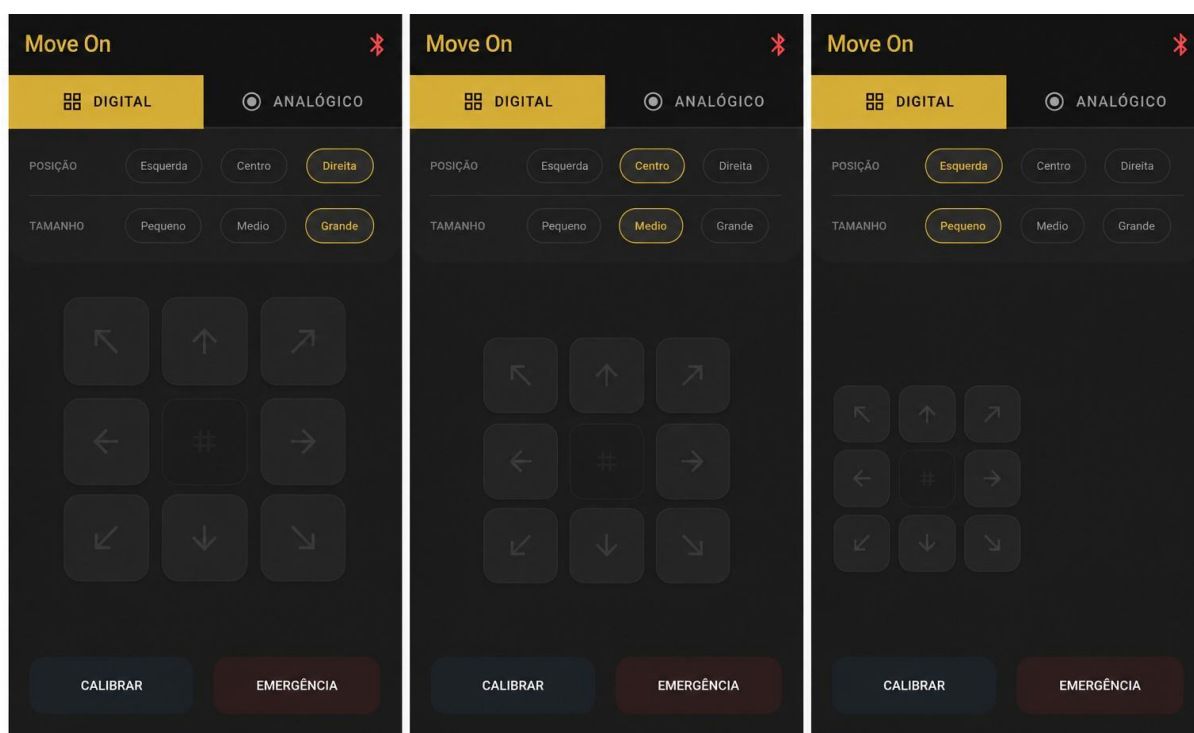
4.3.2. Aplicativo Móvel - Move On

O aplicativo móvel, denominado "Move On", foi desenvolvido em Flutter, utilizando o Visual Studio Code, e é destinado a dispositivos com sistema operacional Android. O aplicativo atua como interface principal de interação entre o usuário e o sistema embarcado, permitindo o envio de comandos por Bluetooth para o acionamento do dispositivo acoplado ao joystick da cadeira de rodas.



Na tela principal, o aplicativo disponibiliza botões para conexão e desconexão Bluetooth, além dos comandos de calibração e emergência. A interface foi reorganizada em dois modos de controle: digital e analógico. Em ambos, é possível ajustar a posição do campo de comando para a esquerda, centro ou direita da tela, bem como selecionar diferentes tamanhos de área de atuação, conforme apresentado nas figuras 10 e 11.

Figura 10 - Variações de posição e tamanho do modo digital no aplicativo Move On.

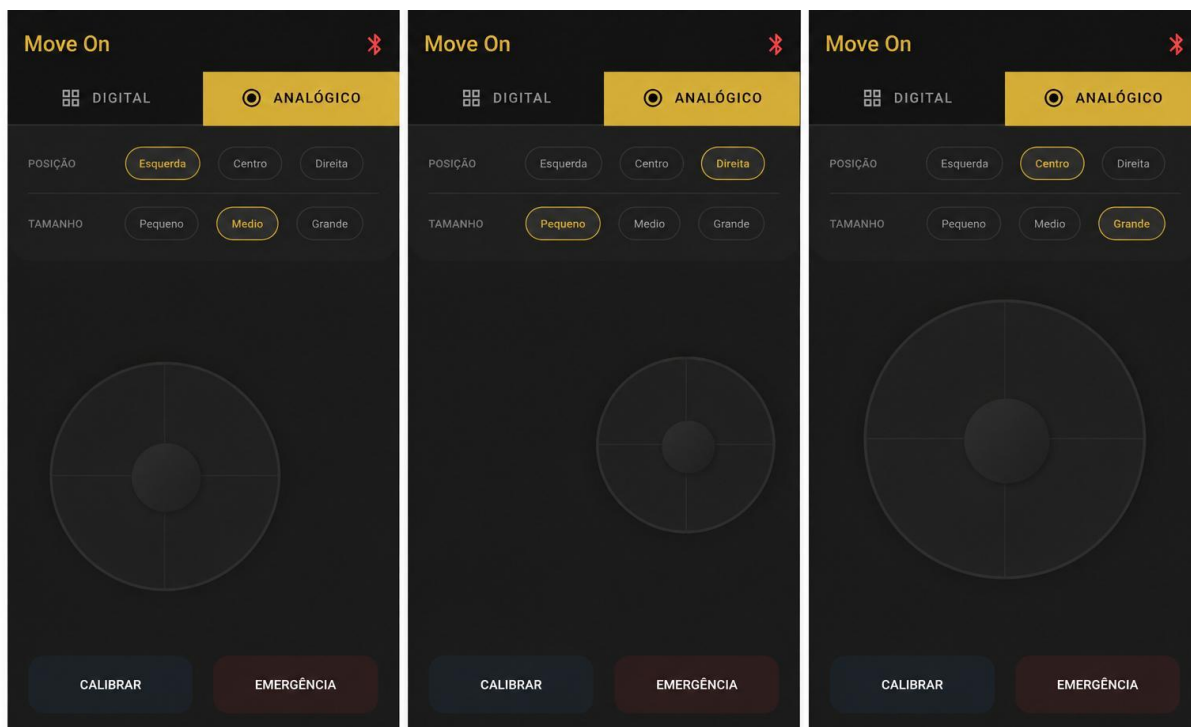


Fonte: Autoria própria (2026).

No modo digital, os comandos são apresentados em uma matriz de botões direcionais. Essa configuração permite acionar movimentos principais e diagonais por toque, com variações de tamanho e posicionamento que podem ser escolhidas de acordo com a condição de uso. No modo analógico, o controle é realizado por

uma área circular, semelhante a um joystick virtual, permitindo movimentos graduais em diferentes direções.

Figura 11 - Variações de posição e tamanho do modo analógico no aplicativo Move On.



Fonte: Autoria própria (2026).

Essas variações foram incluídas para favorecer uma posição de uso mais confortável tanto para Charles quanto para uma terceira pessoa que eventualmente auxilie no comando da cadeira. No caso do Charles, observou-se a necessidade de manter o campo de utilização próximo à extremidade da tela, pois ele apresenta maior facilidade de movimento com o polegar e dificuldade para elevar ou reposicionar o punho durante o uso. O ajuste de tamanho também permite buscar uma área em que ele consiga alcançar todo o campo de comando com menor esforço, reduzindo a ocorrência de toques repetidos ou arrastes involuntários.



4.3.3. Rotinas e Calibração de Segurança

O sistema incorpora rotinas específicas de calibração e interrupção, acessíveis diretamente pelo aplicativo por meio de botões dedicados localizados na parte inferior da interface.

A rotina de calibração é executada automaticamente sempre que o aplicativo é conectado ao dispositivo móvel. Durante esse processo, cada eixo de movimentação é deslocado até seus limites físicos, detectados pelos sensores magnéticos de fim de curso, realizando esse percurso duas vezes para registrar referências de movimentação. Após a calibração, o sistema retorna os atuadores à posição central, liberando o uso normal da cadeira de rodas.

Durante a calibração, recomenda-se que a cadeira de rodas permaneça desligada, evitando movimentação indesejada durante o procedimento.

O botão de emergência permite a interrupção imediata dos comandos, bloqueando o acionamento dos motores. Essa funcionalidade é utilizada tanto como recurso de parada quanto para manter a cadeira em uma posição específica, evitando comandos acidentais durante o uso do aplicativo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da realização dos testes com o usuário, o sistema foi montado na cadeira de rodas para verificar a disposição física dos componentes e a integração entre o dispositivo acoplável ao joystick, a case eletrônica e os elementos de fixação. A montagem permitiu observar o posicionamento do conjunto na estrutura da cadeira, bem como a forma de instalação e remoção do dispositivo para alternar entre o uso assistido pelo sistema e o uso manual do joystick original. A figura 12 apresenta o sistema instalado após as etapas de impressão 3D, montagem dos componentes e fixação na cadeira de rodas.

Figura 12 - Sistema montado na cadeira de rodas após impressão 3D e montagem dos componentes.



Fonte: autoria própria (2026).



Os testes realizados com Charles indicaram que o desenvolvimento do sistema exigiu sucessivas revisões de software, ajustes mecânicos e novas tentativas de uso até chegar à configuração apresentada neste trabalho. A interface do aplicativo foi refeita em diferentes versões a partir da observação direta do uso, buscando uma forma de comando que pudesse ser alcançada com menor esforço e com menor ocorrência de acionamentos involuntários.

A partir desses testes, observou-se que a posição do controle na tela precisava variar conforme a condição de uso. Em alguns momentos, a área de comando posicionada mais à direita favorecia o alcance com o polegar; em outros, uma posição mais centralizada ou à esquerda poderia ser mais adequada, especialmente quando uma terceira pessoa auxiliava no comando da cadeira. A possibilidade de alterar o tamanho do campo de controle também se mostrou importante, pois permitiu experimentar áreas maiores ou menores até encontrar uma configuração mais compatível com o alcance e a mobilidade disponíveis no momento do teste.

Durante os ensaios com o modo analógico, Charles conseguiu movimentar a cadeira de rodas de forma autônoma em ambiente controlado. A velocidade de deslocamento não foi equivalente à obtida por uma pessoa sem limitação motora comandando o joystick diretamente, mas o controle pelo próprio usuário representou uma condição de uso mais adequada ao contexto do projeto, pois reduziu a dependência de outra pessoa para interpretar a direção desejada e acionar a cadeira.

Também foram observadas limitações relacionadas à visualização da interface. Em ambientes com maior incidência de luz, a leitura da tela ficou mais difícil. Além disso, a posição do celular exigia que o usuário dividisse a atenção entre o aplicativo e o deslocamento da cadeira, o que pode gerar desconforto postural e demandar familiarização com o sistema. Por esse motivo, a interface ainda deve ser



analisada em novos ciclos de uso, para verificar se os ajustes necessários estão relacionados ao posicionamento, ao tamanho dos elementos ou ao tempo de adaptação do usuário.

Na parte mecânica e eletrônica, os testes permitiram ajustar os limites físicos do dispositivo em relação ao joystick real da cadeira. Os sensores magnéticos de fim de curso precisaram ser verificados em diferentes momentos, pois pequenas alterações de posição influenciavam a detecção dos limites. Em uma das situações, após ciclos de retirada e recolocação do conjunto, um sensor se deslocou o suficiente para não ser identificado pelo eixo correspondente, exigindo novo ajuste manual.

Outro ponto observado foi a ocorrência de perda de passos em um dos motores durante a rotina de calibração. Esse comportamento foi identificado como uma limitação relevante, pois pode interferir no reconhecimento correto dos limites de movimento. Assim, a substituição ou reavaliação desse motor, juntamente com a adoção de sensores magnéticos com fixação mais estável, foi registrada como melhoria necessária para versões futuras do sistema.

Quanto à alimentação elétrica, a bateria utilizada atendeu ao período de testes realizado, sem necessidade de recarga durante as atividades executadas. Os componentes eletrônicos permaneceram operacionais ao longo dos ensaios conduzidos, o que indica compatibilidade inicial da montagem com a etapa de prototipagem. Ainda assim, por se tratar de um sistema assistivo em desenvolvimento, novos testes de duração, repetibilidade e uso contínuo são necessários antes de considerar o dispositivo adequado para uso cotidiano.

Como continuidade do projeto, recomenda-se aprimorar a fixação dos sensores magnéticos, reavaliar o motor que apresentou perda de passos, testar novas formas de posicionamento do celular e refinar a interface junto com o Charles ao longo de novos ciclos de uso. Também se sugere avaliar futuramente uma versão



do aplicativo para iOS, ampliando a possibilidade de uso do sistema por pessoas que utilizam esse sistema operacional.



REFERÊNCIAS

HIX, D.; HARTSON, H. R. Developing user interfaces: ensuring usability through product & process. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

ROCHA, H. da; BARANAUSKAS, M. Design e avaliação de interfaces humano-computador. Campinas: Unicamp, 2003. ISBN 9788588833043.