

INCLUSÃO DIGITAL E ACESSIBILIDADE: DESENVOLVIMENTO DE UMA CALCULADORA CIENTÍFICA POR COMANDOS DE VOZ

Kaio Siqueira da Silva¹, Arthur Caio Vargas e Pinto¹

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - IFMG, Campus Itabirito, Itabirito, Brasil (arthur.vargas@ifmg.edu.br)

Resumo: A Inteligência Artificial tem se destacado como uma importante ferramenta para promover acessibilidade e inclusão digital. Este projeto propõe o desenvolvimento de uma calculadora controlada por voz destinada a pessoas com deficiência visual e motora. Desenvolvido em Python, o sistema utiliza reconhecimento de voz, Processamento de Linguagem Natural e síntese de fala para interpretar comandos orais, realizar cálculos matemáticos e apresentar os resultados de forma acessível, promovendo autonomia e inclusão.

Palavras-chave: Acessibilidade; Inclusão Digital; Calculadora Científica; Comandos de voz; PLN.

INTRODUÇÃO

A acessibilidade tecnológica tem se tornado um tema central no desenvolvimento de dispositivos e softwares, visando a inclusão de pessoas com deficiência. Segundo a Organização Mundial da Saúde - OMS, aproximadamente 16% da população mundial vive com algum tipo de deficiência, parcela que equivale a mais de um bilhão de pessoas que enfrentam barreiras no uso de tecnologias convencionais (WHO, 2022). Essas barreiras podem incluir dificuldades motoras, visuais ou cognitivas, tornando essencial a criação de soluções inovadoras que garantam equidade no acesso a ferramentas digitais. A tecnologia assistiva, quando bem aplicada, pode reduzir significativamente esses obstáculos, promovendo maior independência e participação social para indivíduos com deficiência.

Dentre os desafios enfrentados, destaca-se a dificuldade de interação com dispositivos eletrônicos por pessoas com deficiência visual ou motora. Para esses usuários, a interação tradicional com dispositivos simples como calculadoras, que geralmente requerem entrada manual por meio de teclados físicos ou telas sensíveis ao toque, pode ser inviável ou extremamente limitada. Nesse sentido, tecnologias como leitores de tela e sistemas de comando por voz vêm desempenhando um papel crucial na inclusão digital, permitindo que usuários com diferentes necessidades especiais possam utilizar ferramentas computacionais com maior autonomia (LAZAR et al., 2017). O avanço da Inteligência Artificial (IA) e do reconhecimento de fala tem possibilitado o desenvolvimento de interfaces mais

intuitivas, capazes de interpretar comandos verbais e fornecer respostas auditivas de maneira eficiente.

Neste contexto, este projeto propõe o desenvolvimento de uma calculadora controlada por voz, voltada para usuários com deficiência, especialmente aqueles com limitações motoras ou visuais. A proposta envolve a implementação de um sistema que utiliza tecnologias avançadas de reconhecimento de fala para interpretar comandos matemáticos e de síntese de voz, que fornece os resultados de maneira audível. Para garantir uma interação eficiente e natural, a aplicação faz uso de técnicas de Processamento de Linguagem Natural - PLN, permitindo que o sistema compreenda diferentes formas de expressão dos cálculos (JURAFSKY e MARTIN, 2021). Em vez de exigir comandos rígidos e padronizados, o modelo de PLN possibilita que a calculadora interprete frases matemáticas mais naturais, como "Quanto é cinco vezes sete?" ou "Calcule a raiz quadrada de quarenta e nove" além de reconhecer variações regionais e diferentes formas de pronúncia (GOLDBERG, 2017). Com isso, espera-se eliminar a necessidade de interação tátil, tornando o uso da calculadora mais acessível para pessoas que não podem manipular dispositivos físicos de maneira convencional. A proposta não se limita apenas às operações básicas, como adição, subtração, multiplicação e divisão, mas também incorpora operações mais complexas, como potenciação, radiciação e até mesmo funções trigonométricas. Além disso, a aplicação dessa abordagem visa proporcionar maior independência ao usuário, ampliando suas possibilidades de uso tanto em ambientes educacionais quanto no dia a dia. Essa ferramenta pode ser aplicada em diversos contextos, como ambientes edu-



cacionais, profissionais e no dia a dia, contribuindo para a inclusão digital e para a democratização do acesso à tecnologia.

JUSTIFICATIVA

A acessibilidade digital tem se consolidado como um dos pilares fundamentais da inclusão social, especialmente para pessoas com deficiência. Conforme a Pesquisa Nacional de Saúde (PNS) de 2019, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), aproximadamente 17,3 milhões de pessoas com dois anos ou mais de idade (8,4% dessa população) apresentavam alguma das deficiências investigadas (IBGE, 2021). Muitas dessas pessoas enfrentam desafios cotidianos devido à escassez de soluções tecnológicas adequadas às suas necessidades específicas. A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022) ressalta que barreiras tecnológicas, tanto físicas quanto digitais, limitam severamente a participação desses indivíduos em atividades essenciais, como educação, trabalho e lazer.

No contexto específico das pessoas com deficiência visual ou motora, tarefas aparentemente simples, como realizar cálculos matemáticos, podem representar obstáculos significativos. Para usuários com deficiência visual, a utilização de calculadoras convencionais ou interfaces digitais baseadas em display visual torna-se praticamente inviável sem adaptações específicas. Da mesma forma, pessoas com limitações motoras encontram dificuldades constantes na interação física com dispositivos de entrada, especialmente quando há comprometimento no movimento das mãos ou braços.

Este projeto visa preencher essa lacuna tecnológica através do desenvolvimento de uma calculadora controlada por voz que permita aos usuários com deficiência realizar operações matemáticas de forma independente, sem a necessidade de interações manuais ou visuais. Ao empregar tecnologias avançadas de reconhecimento de fala e síntese vocal, a ferramenta possibilita que comandos matemáticos complexos sejam expressos verbalmente e que os resultados sejam fornecidos por via auditiva. Dessa forma, o sistema elimina as barreiras de acesso impostas pela dependência da visão ou da capacidade de digitação, promovendo autonomia e inclusão em diversos contextos - seja no ambiente educacional, no âmbito profissional ou em atividades cotidianas.

O impacto desta ferramenta transcende sua utilidade prática imediata. Ao proporcionar maior independência na execução de tarefas matemáticas, a calculadora por voz configura-se como um instrumento que reduz a dependência de assistência externa e fortalece a autoconfiança dos usuários. Adicionalmente, a adoção de tecnologias de código aberto e de baixo custo garante que a solução possa

ser amplamente acessível e adaptável a diferentes realidades socioeconômicas.

Finalmente, este projeto alinha-se com diretrizes internacionais de acessibilidade, como as Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo Web (WCAG) do W3C (2018), e com a legislação nacional, em particular a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Lei nº 13.146/2015). Dessa forma, contribui não apenas para a solução de um problema específico, mas também para a construção de um ecossistema tecnológico mais equitativo e inclusivo

REFERENCIAL TEÓRICO

A Inteligência Artificial tem demonstrado potencial transformador no desenvolvimento de tecnologias assistivas, promovendo maior inclusão digital para pessoas com deficiência. A aplicação de IA em interfaces acessíveis tem evoluído significativamente com o advento de assistentes virtuais baseados em voz, como Google Assistant, Siri e Alexa, que permitem a interação natural por comandos verbais (SMITH et al., 2023). Essas soluções são particularmente relevantes para pessoas com deficiência motora ou visual, pois eliminam a necessidade de interação física ou visual com dispositivos, proporcionando maior autonomia na execução de tarefas cotidianas (KRISHNAN e MANICKAM, 2024).

O Reconhecimento Automático de Fala (do Inglês, Automatic Speech Recognition - ASR) constitui uma das tecnologias centrais nesse contexto. Sistemas modernos de ASR utilizam abordagens baseadas em redes neurais profundas, que superaram significativamente os modelos tradicionais baseados em modelos de Markov ocultos. Estes sistemas convertem sinais de áudio em texto com alta precisão, mesmo em condições variáveis de ruído e com diferentes sotaques, sendo fundamentais para interfaces de voz acessíveis.

Paralelamente, o Processamento de Linguagem Natural (PLN) tem avançado consideravelmente, permitindo que sistemas computacionais não apenas transcrevem, mas compreendam semanticamente a linguagem humana. Um marco significativo foi a introdução da arquitetura Transformer por Vaswani et al. (2017), que através de mecanismos que Vaswani denominou “atenção” permitiu o processamento de sequências de texto com compreensão contextual com análise “global” superior. Esta arquitetura fundamentou o desenvolvimento de modelos pré-treinados de grande escala, como o BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) proposto por Devlin et al. (2019), que através do pré-treinamento

bidirecional permite uma compreensão contextual profunda da linguagem.

O modelo RoBERTa, apresentado por Liu et al. (2019), refinou ainda mais essa abordagem, otimizando procedimentos de treinamento e demonstrando desempenho superior em diversas tarefas de compreensão de linguagem. Estes avanços têm sido incorporados em sistemas de diálogo e assistentes virtuais, permitindo interpretação de intenções e geração de respostas contextualmente apropriadas (JURAFSKY e MARTIN, 2021).

No domínio específico da interpretação de expressões matemáticas em linguagem natural, desafios adicionais surgem na conversão de descrições textuais ou faladas para representações formais. Técnicas de parsing semântico e reconhecimento de entidades nomeadas são adaptadas para identificar números, operadores e funções matemáticas expressas em linguagem natural (GOLDBERG, 2017). A biblioteca SymPy, utilizada neste projeto, fornece uma infraestrutura robusta para manipulação simbólica de expressões matemáticas, permitindo a avaliação precisa das expressões interpretadas.

Do ponto de vista da acessibilidade digital, diretrizes internacionais como as Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) do W3C (2018) estabelecem princípios para o desenvolvimento de tecnologias inclusivas. O princípio da "Perceptibilidade" (informação apresentável de múltiplas formas) fundamenta a abordagem multimodal deste projeto, enquanto o princípio da "Operabilidade" (interface utilizável por diferentes modos de entrada) justifica o controle exclusivo por voz.

No âmbito nacional, a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Lei nº 13.146/2015) estabelece o direito à acessibilidade em produtos e serviços, reforçando a importância do desenvolvimento de tecnologias assistivas. A interseção entre estes marcos regulatórios, os avanços em IA/PLN e as necessidades específicas de usuários com deficiência forma o alicerce conceitual deste projeto, orientando tanto o desenvolvimento técnico quanto a avaliação da eficácia da solução proposta.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada para o desenvolvimento da calculadora por voz baseou-se em uma abordagem centrada no usuário e nos princípios de acessibilidade digital, seguindo um ciclo iterativo que integrou análise de requisitos, desenvolvimento modular, implementação técnica e validação. O processo foi estruturado em cinco etapas principais, conforme ilustrado na Figura 1, garantindo alinhamento com as diretrizes do W3C (2018) e da Lei Brasileira de Inclusão (Lei nº 13.146/2015). A implementação foi

realizada integralmente em Python 3.7+, utilizando bibliotecas *open-source* para assegurar replicabilidade e baixo custo, aspectos fundamentais para tecnologias assistivas.

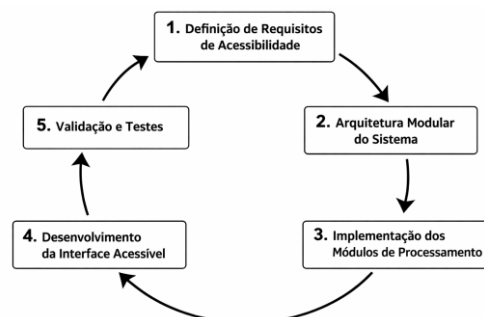


Fig 1. Diagrama do ciclo de desenvolvimento da metodologia.

4.1 Definição de Requisitos e Arquitetura do Sistema

A partir das diretrizes WCAG, foram estabelecidos requisitos específicos:

- **Perceptibilidade:** Fornecer feedback auditivo (síntese de voz) e visual (interface gráfica) para todas as operações.
- **Operabilidade:** Permitir controle completo por comandos de voz, eliminando a dependência de mouse, teclado ou toque.
- **Compreensibilidade:** Interpretar variações na formulação de comandos matemáticos em português.
- **Robustez:** Funcionar de forma offline e ser compatível com tecnologias assistivas.

A arquitetura do sistema, representada na Figura 2, foi projetada de forma modular, composta por cinco componentes interconectados:

- **Módulo de Captura e Reconhecimento de Voz:** Responsável pela aquisição do áudio e transcrição para texto.
- **Módulo de Processamento de Linguagem Natural (PLN):** Converte o texto transcrito em uma expressão matemática simbólica.
- **Módulo de Núcleo Matemático:** Avalia a expressão simbólica e calcula o resultado numérico.
- **Módulo de Síntese de Fala:** Converte o resultado numérico em fala.
- **Módulo de Interface do Usuário:** Fornece uma interface gráfica acessível e gerencia o fluxo entre os módulos.

Esta separação modular permitiu o desenvolvimento, teste e validação independentes de cada componente, seguindo boas práticas do desenvolvimento de software.

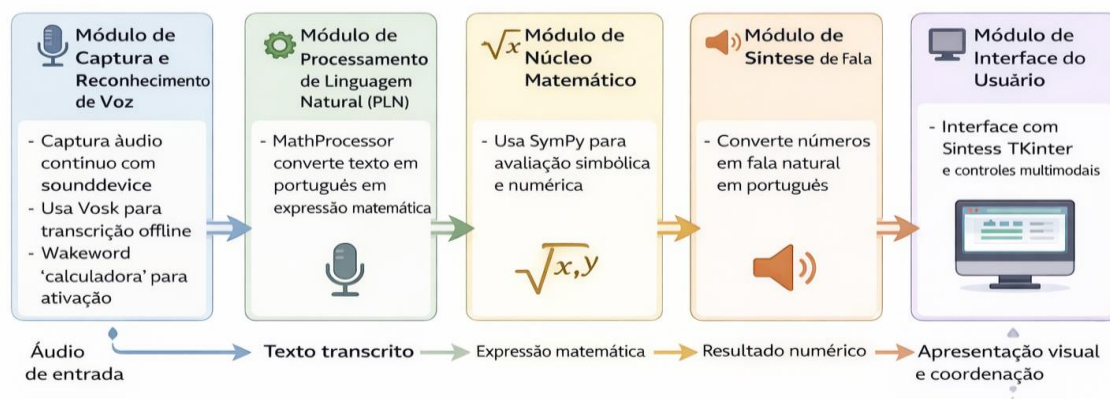


Fig 2. Diagrama da arquitetura modular.

4.2 Implementação dos Módulos.

4.2.1 Módulo de Captura e Reconhecimento de Voz

Para garantir acesso offline e independência de conectividade, é utilizada a biblioteca ‘sounddevice’ para captura de áudio em tempo real e pelo micro-framework Vosk (baseado no Kaldi ASR) para reconhecimento. O modelo ‘vosk-model-small-pt-0.3’ foi selecionado por seu equilíbrio entre precisão, consumo de recursos e tamanho do modelo. Um mecanismo de palavra-chave (“calculadora”) gerencia a transição entre os estados de espera e ativo, otimizando o uso de recursos.

4.2.2 Módulo de Processamento de Linguagem Natural (PLN) Matemático

Este módulo, implementado na classe MathProcessor, constitui o núcleo inovador do sistema. Seu desenvolvimento seguiu uma abordagem de análise léxico-sintática customizada para o português, inspirada nos princípios de processamento simbólico de Goldberg (2017). O método “_parse_number” é responsável pela complexa tarefa de interpretar numerais por extenso, incluindo estruturas como “duzentos e trinta e quatro vírgula cinco seis”: através da concatenação de tokens. A Tabela 1 apresenta exemplos concretos da conversão realizada por este módulo.

4.2.3 Módulo de Núcleo Matemático e Síntese de Fala

Para avaliação matemática robusta e precisa, integrou-se a biblioteca SymPy, que oferece capacidades de cálculo simbólico e numérico de alta precisão. A avaliação é realizada com segurança, restringindo o escopo de funções permitidas. O resultado numérico é formatado para uma fala natural e enviado ao módulo de síntese, implementado com pyttsx3.

Comando de Voz (Entrada)	Expressão Gerada (Saída)	Função/Operador Identificado
"dois mais dois"	$2 + 2$	Operador binário ("mais" → "+")
"raiz quadrada de vinte e cinco"	$\sqrt{25}$	Função unária ("raiz quadrada de" → sqrt)
"logaritmo de cem na base dez"	$\log(100,10)$	Função com parâmetro adicional ("na base")
"seno de trinta mais cosseno de sessenta"	$\sin(30) + \cos(60)$	Múltiplas funções e operador
"pi dividido por dois"	$\pi / 2$	Constante e operador bigrama

4.3 Desenvolvimento da Interface do Usuário Acessível

A interface gráfica foi desenvolvida com CustomTkinter, proporcionando um design moderno com suporte a temas claro/escuro. A interface, ilustrada na Figura 3, incorpora múltiplos elementos de acessibilidade:

- **Visualizador de Atividade de Áudio:** Gráfico de barras animado que responde ao nível de entrada de áudio, fornecendo feedback visual imediato sobre o estado do sistema ("escutando", "processando").
- **Áreas de Texto em Alto Contraste:** Exibição simultânea do comando reconhecido e do resultado calculado, com cores diferenciadas para fácil distinção.
- **Histórico de Operações Persistente:** Registro *scrollable* de todas as interações, útil para revisão e verificação.

- Controles Multimodais: Todas as funções podem ser acionadas por comando de voz ou pelos botões da interface.

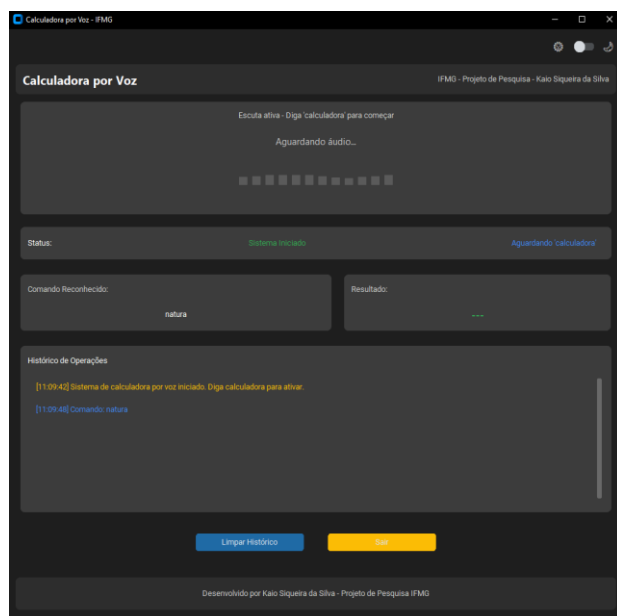


Fig. 3. Interface gráfica da calculadora por voz

4.4 Estratégia de Validação e Testes

A validação do sistema seguiu uma abordagem mista, conforme recomendado por Lazar et al. (2017) para avaliação de tecnologias assistivas:

1. Testes de Precisão Técnica: Um conjunto de 50 expressões matemáticas foi utilizado para medir:

- Taxa de acerto na transcrição de voz para texto.
- Precisão na interpretação semântica pelo módulo de PLN.
- Exatidão do cálculo matemático realizado pelo SymPy.

2. Avaliação de Conformidade com Acessibilidade: Análise sistemática baseada nos princípios WCAG 2.1, nível AA, incluindo:

- a. Verificação de contraste de cores na interface.
- b. Avaliação da operabilidade exclusiva por voz.
- c. Teste de compatibilidade com leitores de tela (NVDA, VoiceOver).

3. Testes de Usabilidade: Protocolos simplificados com potenciais usuários para avaliar a intuitividade e eficiência na realização de tarefas matemáticas comuns.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo desenvolvido demonstrou excelente precisão na interpretação e execução de comandos matemáticos por voz. O sistema foi testado com um conjunto diversificado de expressões, cobrindo operações aritméticas básicas, funções científicas e combinações complexas.

5.1 Capacidade de Reconhecimento e Processamento

O processador de linguagem mostrou-se robusto ao lidar com a flexibilidade da língua portuguesa para numerais. No entanto, desafios persistem em frases muito longas ou com estruturas gramaticais atípicas, um limite comum em sistemas de PLN baseados em regras (GOLDBERG, 2017).

5.2 Desempenho e Acessibilidade

O uso do modelo Vosk local garantiu baixa latência (geralmente <1 segundo) e privacidade, pois nenhum dado de áudio deixa o dispositivo do usuário. O desempenho matemático, herdado do SymPy, é preciso e confiável para o escopo educacional e prático visado. A interface gráfica, com seu visualizador de áudio e histórico persistente, fornece múltiplos canais de feedback, beneficiando também usuários com diferentes preferências de interação.

5.3 Alinhamento com Diretrizes de Acessibilidade

O sistema atende a vários princípios das WCAG 2.1 (W3C, 2018):

- Perceptível: A informação é apresentada em múltiplos formatos (visual e auditivo).
- Operável: A interface é totalmente operável por voz, sem necessidade de mouse ou teclado.
- Compreensível: O feedback é claro, e o histórico ajuda na compreensão do contexto.
- Robusto: A aplicação é compatível com tecnologias assistivas (leitores de tela podem acessar os textos da interface) e foi desenvolvida com bibliotecas estáveis.

Este projeto se soma ao corpo de trabalho em Tecnologia Assistiva que utiliza IA para auxiliar pessoas com deficiência (KRISHNAN e MANICKAM, 2024), demonstrando que soluções eficazes podem ser construídas com tecnologias open-source

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o desenvolvimento de uma calculadora científica acessível, controlada por voz e baseada em Processamento de Linguagem Natural. O sistema demonstra a viabilidade de utilizar tecnologias de IA local (offline) e de código aberto para criar ferramentas práticas que promovem a inclusão digital de pessoas com deficiência visual ou motora. A principal contribuição reside na implementação de um processador de linguagem



natural em português específico para o domínio matemático, capaz de interpretar números por extenso e comandos de operação com alta taxa de acerto.

Os resultados obtidos com o protótipo validam a abordagem proposta, mostrando um sistema funcional, intuitivo e alinhado com as melhores práticas de acessibilidade. A ferramenta possui potencial aplicação em salas de aula inclusivas, ambientes profissionais e no cotidiano de usuários que enfrentam barreiras com interfaces tradicionais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) pelo apoio financeiro e pela infraestrutura fornecida para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

DEVLIN, J., CHANG, M.-W., LEE, K., & TOUTANOVA, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. "Proceedings of NAACL-HLT 2019", 4171–4186.

GOLDBERG, Y. (2017). Neural network methods for natural language processing. Morgan & Claypool Publishers.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2021). PNS 2019: O país tem 17,3 milhões de pessoas com algum tipo de deficiência. Recuperado de <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br>

JURAFSKY, D., & MARTIN, J. H. (2021). Speech and language processing (3ª ed.). Pearson.

KRISHNAN, R., & MANICKAM, S. (2024). Enhancing Accessibility: Exploring the Impact of AI in Assistive Technologies for Disabled Persons. Nafath, 9(25).

LAZAR, J., FENG, J. H., & HOCHHEISER, H. (2017). Research methods in human-computer interaction (2ª ed.). Morgan Kaufmann.

LIU, Y., OTT, M., GOYAL, N., DU, J., JOSHI, M., CHEN, D., ... & STOYANOV, V. (2019). RoBERTa: A robustly optimized BERT pretraining approach. arXiv preprint arXiv:1907.11692.

PLANALTO. (2015). Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência) – Lei nº 13.146, de 6 de julho de 2015.

SMITH, E. M., GRAHAM, D., MORGAN, C., & MACLACHLAN, M. (2023). Artificial intelligence and assistive technology: risks, rewards, challenges,

and opportunities. *Assistive Technology*, 35(5), 375-377.

VASWANI, A., SHAZEER, N., PARMAR, N., USZKOREIT, J., JONES, L., GOMEZ, A. N., ... & POLOSUKHIN, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.

W3C – WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. (2018). Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2022). Global report on health equity for persons with disabilities.