

QR Codes | AIA2 | Acessibilidade | PWA | IA



ARTIGO TÉCNICO PARA REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL

QR Codes como Portais de Acessibilidade Conectada: uma sistematização técnica e metodológica baseada na AIA2

Proposta de organização conceitual, técnica e metodológica para aplicações inclusivas em ambientes públicos, educacionais e culturais

QR Code

PWA

IA + RAG

Audiodescrição

Ergonomia funcional

Capa visual em formato A4, com linguagem institucional e elementos gráficos inspirados em códigos QR, redes de mediação digital e acessibilidade conectada.

AIA2

Autores

Luiz Francisco Garavello
Jorge Ribeiro Cunha da Silva



Afiliação: Escola Nacional de Administração Pública (Enap) — CGTI

Autor

Javan Oliveira de Almeida

Afiliação: Embasa - Empresa Baiana de Águas e Saneamento

Brasília, 2026

Formato A4 | Capa institucional para artigo técnico

Resumo

Palavras-chave: AIA2; QR Code; acessibilidade; tecnologia assistiva; inteligência artificial; design universal; inclusão digital; PWA; RAG; audiodescrição; ergonomia funcional; smartphones; BLE; RFID.

Abstract

Keywords: AIA2; QR Code; accessibility; assistive technology; artificial intelligence; universal design; digital inclusion; PWA; RAG; audio description; functional ergonomics; smartphones; BLE; RFID.

Lista de Siglas e Abreviaturas

AIA2 — Automação Inclusiva Assistiva com Inteligência Artificial

BLE — Bluetooth Low Energy

GNSS — Global Navigation Satellite System

ISP — Image Signal Processor (processador de sinal de imagem)

LGPD — Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (Lei n.º 13.709/2018)

LiDAR — Light Detection and Ranging

NFC — Near Field Communication

NPU — Neural Processing Unit

OCR — Optical Character Recognition (reconhecimento óptico de caracteres)

PWA — Progressive Web App (aplicação web progressiva)

QR Code — Quick Response Code

RAG — Retrieval-Augmented Generation (geração aumentada por recuperação)

RFID — Radio Frequency Identification

SLA — Service Level Agreement (acordo de nível de serviço)

SUS — System Usability Scale (escala de usabilidade de sistemas)

ToF — Time of Flight (sensor de tempo de voo)

TTS — Text-to-Speech (síntese de fala)

WCAG — Web Content Accessibility Guidelines (diretrizes de acessibilidade para conteúdo web)

Sumário

1. Introdução
2. Problema, justificativa e contribuição do artigo
3. Referencial técnico: QR Code e convergência digital
 - 3.0 Método de pesquisa e posicionamento na literatura
4. Metodologia AIA2 como arcabouço de desenvolvimento
5. Smartphone como hub de acessibilidade

6. QR Codes em suporte 3D e mediação tátil-digital
7. Inteligência artificial aplicada a QR Codes acessíveis
8. PWA acessível com RAG e agentes de IA
 - 8.4 Trilha de implementação gradual
9. Tecnologias complementares: BLE, NFC/RFID e geolocalização indoor
10. Arquitetura técnica de referência
11. Diretrizes de implementação, validação e governança
12. Limitações, riscos e cuidados éticos
13. Considerações finais

Referências

Apêndice A — Checklist de qualidade para pilotos AIA2 com QR Codes

1. Introdução

A disseminação de smartphones, redes móveis e recursos de acessibilidade nativos ampliou a capacidade de transformar objetos, placas, maquetes e espaços físicos em interfaces digitais de informação. Nesse cenário, o QR Code deixou de ser apenas um marcador para acesso rápido a uma página web e passou a operar como ponto de ativação de experiências multimodais: áudio, texto, Libras, mapas, rotas, realidade aumentada, agentes conversacionais e conteúdos adaptados ao perfil funcional do usuário.

O presente artigo organiza e revisa o uso de QR Codes em soluções de acessibilidade a partir da metodologia AIA2 — Automação Inclusiva Assistiva com Inteligência Artificial. A proposta é tratar o QR Code como uma tecnologia de mediação: um elo simples, barato e escalável entre o ambiente físico e uma camada digital inteligente capaz de fornecer orientação, contextualização e autonomia.

A publicação é especialmente relevante para contextos institucionais, educacionais e culturais, nos quais a sinalização física nem sempre consegue oferecer, sozinha, informações suficientes para pessoas com deficiência visual, auditiva, motora, cognitiva ou múltipla. A combinação entre QR Codes, marcas táteis, audiodescrição, linguagem simples, PWA, IA, RAG e tecnologias como BLE e NFC/RFID permite criar experiências acessíveis sem necessariamente exigir reformas estruturais de alto custo.

O artigo está organizado em treze seções. A Seção 2 apresenta o problema, a justificativa e a contribuição. A Seção 3 contextualiza o QR Code como tecnologia e descreve o método de pesquisa adotado. A Seção 4 introduz a metodologia AIA2. As Seções 5 e 6 tratam do smartphone como plataforma central e do uso de QR Codes em suportes tridimensionais. As Seções 7 e 8 aprofundam o papel da inteligência artificial, do RAG e das PWAs acessíveis. A Seção 9 discute tecnologias complementares (BLE, NFC/RFID). As Seções 10 e 11 propõem a arquitetura técnica de referência e as diretrizes de implementação. A Seção 12 trata de limitações e cuidados éticos. As Considerações finais sintetizam as contribuições e indicam agenda de pesquisa futura.

2. Problema, justificativa e contribuição do artigo

O problema central abordado é a distância entre a informação disponível no ambiente físico e a forma como diferentes usuários conseguem percebê-la, interpretá-la e utilizá-la com autonomia. Mapas, placas, maquetes, etiquetas e materiais educativos frequentemente apresentam informação visual, textual ou espacial sem alternativas equivalentes em áudio, tato, Libras, linguagem simples ou interação assistida.

A justificativa técnica está na convergência entre três fatores: a ampla disponibilidade de smartphones; a maturidade do QR Code como padrão de identificação bidimensional; e a evolução de recursos de inteligência artificial capazes de gerar, adaptar, recuperar e contextualizar informação. Essa convergência cria uma oportunidade para a Administração Pública testar soluções inclusivas de baixo custo, com manutenção simplificada e possibilidade de atualização contínua de conteúdo.

A contribuição do artigo é propor uma organização conceitual e operacional para projetos baseados em QR Codes acessíveis, articulando metodologia AIA2, ergonomia funcional, validação com usuários, segurança da informação e governança de dados. O objetivo não é substituir braille, piso tátil, sinalização física ou atendimento humano, mas complementar esses recursos com uma camada digital flexível e atualizável.

3. Referencial técnico: QR Code e convergência digital

3.0 Método de pesquisa e posicionamento na literatura

Este artigo adota a modalidade de revisão narrativa integrativa combinada com sistematização metodológica aplicada. O corpus documental foi composto por: (a) normas técnicas internacionais (ISO/IEC 18004:2024; WCAG 2.2); (b) diretrizes nacionais de acessibilidade digital (eMAG; LGPD); (c) documentação técnica de plataformas de desenvolvimento (W3C, MDN, Apple, Google); e (d) literatura acadêmica sobre tecnologia assistiva, acessibilidade em ambientes públicos e interfaces físico-digitais. A seleção priorizou publicações dos últimos dez anos, com ênfase em estudos empíricos e propostas metodológicas para contextos institucionais e educacionais.

No campo da acessibilidade, estudos sobre interfaces táteis em dispositivos móveis (KUBER; YU, 2010) e sobre o uso de smartphones por pessoas com deficiência motora (KANE et al., 2011) estabeleceram bases para pensar o celular como plataforma assistiva. No contexto de museus e ambientes culturais, experiências com QR Codes como mediadores de informação multimodal demonstraram tanto o potencial quanto os limites de leitura em ambientes com iluminação variável (NOH et al., 2009; LIU et al., 2011). No Brasil, contribuições recentes no campo da tecnologia assistiva em contexto universitário têm consolidado abordagens de cocriação, ergonomia funcional e validação inclusiva, perspectiva que informa a estrutura metodológica da AIA2. No âmbito da presente pesquisa, destaca-se o desenvolvimento em andamento de um quiosque universal acessível na ULEG-FT — Unidade de Laboratórios de Ensino de Graduação da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília —, em parceria com a Flexmodula, integrando sensores touchscreen, intérprete de Libras, mapa tátil e audiodescrição em um único ponto de interação física (GARAVELLO; FLEXMODULA, 2026). Esse piloto constitui um caso de referência concreto para a aplicação prática da metodologia AIA2 em ambiente institucional real. Este artigo posiciona-se como contribuição de sistematização: organiza em um modelo coerente práticas e tecnologias já documentadas em separado, propondo sua integração sob uma arquitetura metodológica replicável por gestores públicos e equipes de baixa especialização técnica.

3.1 Origem e características do QR Code

O QR Code, sigla de Quick Response Code, foi desenvolvido em 1994 pela Denso Wave, no Japão, para ampliar a velocidade e a capacidade de identificação em processos industriais. Diferentemente do código de barras unidimensional, o QR Code armazena informação em duas dimensões, o que aumenta sua capacidade de dados e permite leitura mais flexível em diferentes orientações.

Do ponto de vista técnico, sua robustez deriva de elementos estruturais como padrões de localização, área silenciosa, módulos claros e escuros, capacidade de correção de erros e regras de codificação padronizadas. A norma ISO/IEC 18004:2024 especifica características da simbologia, formatos, codificação de dados, correção de erros, requisitos de qualidade de produção e parâmetros selecionáveis pelo usuário.

Para aplicações acessíveis, a principal vantagem do QR Code não está apenas na capacidade de armazenar dados, mas na possibilidade de acionar uma experiência digital a partir de um ponto físico reconhecível. Um código aplicado em uma placa, maquete, embalagem ou mapa pode abrir uma página leve, um áudio, um vídeo em Libras, um texto em linguagem simples, uma rota acessível ou um agente de IA treinado para responder sobre aquele contexto.

3.2 QR Code estático, dinâmico e contextual

Do ponto de vista das aplicações em acessibilidade, a distinção entre os tipos de QR Code é determinante para decisões de projeto. O Quadro 1 sistematiza as três categorias principais — estático, dinâmico e contextual — com foco nas implicações práticas para soluções inclusivas.

Quadro 1 — Tipos de QR Code e implicações para acessibilidade

Tipo	Descrição	Potencial	Cuidados
Estático	O dado final fica gravado no próprio código, geralmente uma URL ou texto fixo.	Simplicidade e operação sem backend complexo.	Baixa flexibilidade; alteração do destino exige novo código físico.
Dinâmico	O código aponta para um redirecionador ou backend que pode atualizar o conteúdo.	Permite corrigir, ampliar e versionar conteúdo sem trocar o QR físico.	Exige governança de links, disponibilidade do servidor e segurança.
Contextual	O backend usa contexto autorizado, como idioma, localização, horário ou preferência declarada.	Personalização de conteúdo e experiência multimodal.	Demanda consentimento, minimização de dados e conformidade com LGPD.

Como observado no Quadro 1, o QR Code contextual oferece o maior potencial para experiências adaptativas, mas exige governança cuidadosa de dados e conformidade com a LGPD. Para a maioria dos pilotos institucionais, o QR dinâmico representa o equilíbrio mais adequado entre flexibilidade e simplicidade operacional.

4. Metodologia AIA2 como arcabouço de desenvolvimento

AIA2 significa Automação Inclusiva Assistiva com Inteligência Artificial. O número 2 não indica versão do projeto, mas a dupla dimensão estrutural da metodologia: a dimensão física, composta por objetos, sensores, maquetes, sinalização e interações no espaço; e a dimensão digital/inteligente, composta por software, dados, IA, acessibilidade digital e adaptação multimodal. Nota terminológica: este artigo adota exclusivamente a grafia AIA2. A variação AI@2, registrada em versões anteriores de trabalho, não será utilizada em publicações formais para evitar ambiguidade tipográfica.

O diferencial metodológico da AIA2 é compreender a acessibilidade como requisito nativo de projeto, e não como adaptação posterior. Em vez de corrigir barreiras depois que uma solução já está pronta, a metodologia orienta diagnóstico funcional, cocriação, prototipagem, validação com usuários e operação assistida desde o início.

A estrutura da AIA2 pode ser compreendida por meio de cinco camadas funcionais, descritas no Quadro 2. Cada camada representa um nível de transformação entre o estímulo físico do ambiente e a experiência de autonomia percebida pelo usuário.

Quadro 2 — Arquitetura AIA2 em cinco camadas

Camada	Função técnica	Resultado esperado
1. Percepção	Captação de estímulos do mundo real por câmera, QR Code, NFC, RFID, sensores, botões, BLE ou entradas manuais.	Objeto, espaço ou sinalização torna-se detectável.
2. Interação	Conversão da ação do usuário em evento digital: scan, toque, aproximação, comando de voz ou acionamento tátil.	Ação física é transformada em solicitação acessível.
3. Processamento	Interpretação do evento por regras, banco de dados, IA, RAG, serviços de rota ou lógica de automação.	Sistema entende contexto e seleciona resposta adequada.
4. Adaptação multimodal	Conversão da informação em áudio, texto, Libras,	Conteúdo é entregue em múltiplos

Camada	Função técnica	Resultado esperado
	alto contraste, vibração, braille eletrônico ou linguagem simples.	formatos.
5. Experiência e autonomia	Resultado percebido pelo usuário: orientação, compreensão, tomada de decisão e participação.	Redução de barreiras e aumento de autonomia funcional.

O Quadro 2 evidencia que cada camada da AIA2 possui uma função técnica distinta e um resultado esperado mensurável. Essa estrutura em camadas facilita a identificação de onde ocorrem falhas no fluxo de acessibilidade e orienta a priorização de melhorias em projetos reais.

4.1 Gates de desenvolvimento e indicadores

Para transformar a proposta em projeto institucional, recomenda-se adotar gates de desenvolvimento com evidências mínimas. Os indicadores devem ser ajustados ao escopo, ao risco e ao público-alvo, evitando métricas meramente formais. Em pilotos com pessoas com deficiência, a validação deve respeitar consentimento, segurança, acessibilidade dos instrumentos e devolutiva aos participantes.

O Quadro 3 detalha os sete gates recomendados, com os respectivos objetivos e evidências esperadas em cada etapa. A progressão não é rígida: projetos de menor escopo podem comprimir gates intermediários, mas os Gates 1 (diagnóstico), 4 (cocriação) e 6 (validação multimétrica) são considerados inegociáveis para garantir a qualidade inclusiva do produto final.

Quadro 3 — Gates recomendados para projetos AIA2 com QR Codes

Gate	Objetivo	Evidência esperada
Gate 1 — Diagnóstico funcional	Mapear usuários, barreiras, ambiente, jornadas e tecnologias existentes.	Mapa de barreiras, personas funcionais e requisitos de acessibilidade.
Gate 2 — Requisitos inclusivos	Definir conteúdo, canais de saída, dispositivos e critérios mínimos de acessibilidade.	Matriz de requisitos e critérios de aceite.
Gate 3 — Arquitetura e riscos	Escolher QR estático/dinâmico, PWA, backend, IA, dados, fallback e segurança.	Diagrama técnico, matriz de riscos e plano de privacidade.
Gate 4 — Cocriação e protótipo	Testar fluxo com usuários e equipe técnica em ambiente controlado.	Protótipo funcional, achados de usabilidade e plano de ajustes.
Gate 5 — MVP	Implementar versão mínima em cenário real com suporte operacional.	MVP publicado, conteúdo validado e monitoramento básico.
Gate 6 — Validação multimétrica	Medir: (a) taxa de leitura bem-sucedida do QR Code (meta: $\geq 85\%$); (b) tempo médio de tarefa; (c) taxa de compreensão do conteúdo (meta: $\geq 70\%$ de acertos em questionário pós-uso); (d) satisfação geral (escala SUS ou similar, meta: ≥ 68 pontos); (e) conformidade com WCAG 2.2 nível AA nos itens críticos.	Relatório de validação com métricas e evidências qualitativas.
Gate 7 — Operação e escala	Definir manutenção, atualização de conteúdo, suporte e governança.	Plano de operação, responsáveis, SLA e roteiro de expansão.

O Quadro 3 revela que a validação com usuários (Gate 4) e a medição multimétrica (Gate 6) ocupam posição central no processo. Isso reflete o princípio AIA2 de que a acessibilidade não pode ser presumida: ela precisa ser verificada com as pessoas que mais dependem dela.

5. Smartphone como hub de acessibilidade

O smartphone é o principal viabilizador das aplicações propostas porque combina câmera, microfone, alto-falantes, tela sensível ao toque, vibração, GPS/GNSS, Wi-Fi, Bluetooth, NFC, sensores de movimento, processamento local e recursos de acessibilidade do sistema operacional. Essa convergência permite que um mesmo aparelho leia um QR Code, reproduza audiodescrição, apresente texto ampliado, ative leitor de tela, envie dados a um backend, conecte-se a dispositivos BLE e ofereça retorno háptico.

Para pessoas com deficiência visual, leitores de tela, TTS, OCR e audiodescrição podem tornar objetos e ambientes mais compreensíveis. Para pessoas surdas ou com deficiência auditiva, vídeos em Libras, legendas e transcrição podem ampliar o acesso. Para pessoas com deficiência motora, comando de voz, interfaces simplificadas e compatibilidade com acionadores externos reduzem barreiras de manipulação. Para pessoas com deficiência cognitiva, linguagem simples, navegação guiada e fragmentação do conteúdo em etapas reduzem carga cognitiva.

A decisão técnica deve considerar que nem todos os usuários possuem aparelhos recentes, conexão estável ou familiaridade com aplicativos. Por isso, soluções institucionais devem funcionar em navegadores móveis, ter páginas leves, compatibilidade com leitores de tela, opção de áudio pré-gravado, texto equivalente e fallback offline quando a experiência for crítica.

6. QR Codes em suporte 3D e mediação tátil-digital

A expressão “QR Code 3D” deve ser utilizada com precisão. Tecnicamente, o QR Code visual precisa manter contraste, proporção, área silenciosa e legibilidade. Em superfícies tridimensionais ou táteis, o mais seguro é empregar um QR Code plano e legível, associado a uma marca tátil de localização, como ponto em relevo, moldura, textura, braille de identificação ou encaixe físico. Assim, o usuário localiza o ponto pelo tato e utiliza a câmera para o escaneamento.

Em maquetes táteis, placas, embalagens ou objetos educativos, essa estratégia transforma o toque em porta de entrada para conteúdos digitais. A experiência recomendada começa com um resumo curto, seguido por opções de aprofundamento: descrição geral, orientação espacial, detalhes técnicos, contexto histórico, perguntas frequentes, Libras, texto simples e interação por agente de IA. Essa organização evita sobrecarga informacional e respeita diferentes ritmos de exploração.

Em ambientes públicos, a implantação deve considerar altura acessível, iluminação, contraste, distância de leitura, redundância de localização, durabilidade do material e consistência de posicionamento. Para pessoas com deficiência visual, não basta disponibilizar o QR; é necessário tornar o QR encontrável.

7. Inteligência artificial aplicada a QR Codes acessíveis

A inteligência artificial amplia o papel do QR Code em três dimensões. A primeira é a geração e validação de conteúdo: modelos de linguagem podem apoiar a produção de audiodescrições, resumos em linguagem simples, perguntas frequentes e versões adaptadas por nível de detalhamento, sempre com curadoria humana em contextos institucionais. A segunda é a contextualização: um mesmo QR pode direcionar o usuário para conteúdo diferente conforme idioma, etapa do percurso, tipo de dispositivo ou preferência declarada. A terceira é a interação: agentes conversacionais podem responder perguntas sobre uma maquete, uma sala, um serviço ou um percurso.

A integração com RAG (Retrieval-Augmented Generation, ou geração aumentada por recuperação) é especialmente útil para reduzir respostas inventadas, pois o agente consulta bases documentais autorizadas antes de gerar a resposta. Em ambientes públicos, recomenda-se que a base de

conhecimento seja versionada, revisada e aprovada pela instituição responsável, com logs mínimos e política de privacidade clara.

A IA também pode apoiar análise de uso, identificação de falhas de leitura, priorização de melhorias e tradução de conteúdos. No entanto, o sistema deve evitar decisões opacas, coleta excessiva de dados e personalização sem consentimento. A acessibilidade não deve depender de IA como único caminho: sempre deve existir alternativa estável, simples e verificável.

Esta seção descreve como o QR Code pode atuar como gatilho de uma aplicação web progressiva (PWA) acessível, capaz de entregar conteúdo multimodal, consultar bases documentais institucionais via RAG e acionar agentes especializados conforme o contexto. A abordagem fortalece a ponte entre o ponto físico de ativação e a camada digital inteligente, ampliando as possibilidades da mediação proposta pela AIA2.

Uma Progressive Web App (PWA) é adequada a pilotos institucionais porque pode funcionar em navegadores móveis, compartilhar uma única base de código entre plataformas, ser instalada quando o dispositivo permitir e oferecer recursos como cache, operação parcial offline e atualização centralizada. Para o contexto AIA2, a PWA deve ser leve, compatível com leitores de tela, responsiva, navegável por teclado, com botões grandes, foco visível, linguagem simples e fluxo de uso direto: escanear, identificar, ouvir, ler, aprofundar e pedir ajuda.

8.1 Arquitetura funcional: PWA, RAG e agentes especializados

A arquitetura recomendada deve separar três camadas: interface acessível, base de conhecimento institucional e orquestração de IA. O RAG conecta a pergunta do usuário ou o ID do QR Code a uma base de documentos autorizados, reduzindo a dependência do conhecimento genérico do modelo. Os agentes, quando utilizados, devem ser entendidos como funções especializadas e auditáveis, e não como substitutos de validação humana.

O Quadro 4 descreve as cinco funções especializadas que compõem a arquitetura de uma PWA AIA2 com RAG. Para cada função, são indicados o papel no sistema e os cuidados técnicos necessários para garantir rastreabilidade, acessibilidade e operação segura.

Quadro 4 — Funções especializadas em uma PWA AIA2 com RAG

Função	Papel no sistema	Cuidados técnicos
Leitor/identificador	Captura o QR Code, valida o ID e direciona a aplicação para o conteúdo correto.	Manter compatibilidade com diferentes câmeras; oferecer alternativa por digitação de código ou NFC quando possível.
Agente de conteúdo	Recupera informações em base aprovada e organiza a resposta em resumo, detalhe técnico, orientação ou pergunta frequente.	Usar base versionada, curadoria humana e limites claros para evitar respostas não verificadas.
Agente de acessibilidade	Adapta a saída para audiodescrição, linguagem simples, texto ampliado, Libras, alto contraste ou orientação por etapas.	Não presumir deficiência; permitir escolha do usuário e manter equivalentes textuais.
Agente de contexto	Considera permissões autorizadas, etapa da visita, ponto escaneado e capacidades do dispositivo.	Minimizar dados; solicitar consentimento para localização, câmera, áudio ou preferências persistentes.
Camada de fallback	Fornecer resposta estável quando IA, internet ou sensores avançados não estiverem disponíveis.	Garantir conteúdo fixo, áudio local, texto local, atendimento humano ou kiosk.

O Quadro 4 reforça que nenhuma das funções opera de forma isolada: o leitor/identificador alimenta o agente de conteúdo, que por sua vez depende da camada de contexto para personalizar a resposta. A

camada de fallback, embora aparente coadjuvante, é a que garante que a experiência funcione mesmo quando a infraestrutura mais avançada não está disponível.

8.2 Compatibilidade com hardware e limites práticos

A eficiência da PWA depende das capacidades do smartphone, mas o projeto não deve exigir aparelhos premium. Câmera e navegador moderno devem ser suficientes para o fluxo principal. Recursos como NPU, LiDAR, sensores ToF ou processamento de visão local podem melhorar desempenho em alguns dispositivos, mas não devem ser tratados como pré-requisitos universais. Em uma política pública ou ambiente educacional, a arquitetura precisa degradar com segurança: funcionar bem no aparelho comum e melhorar quando o hardware for superior.

O Quadro 5 mapeia os principais recursos de hardware presentes em smartphones e seu impacto possível na experiência da PWA com IA. Para cada recurso, são indicados os cuidados necessários para garantir coerência técnica e não criar dependências que excluam usuários com aparelhos de menor capacidade.

Quadro 5 — Recursos de smartphone e impacto na experiência PWA + IA

Recurso	Impacto possível	Recomendação de coerência técnica
Câmera e ISP	Leitura do QR Code, OCR e captura contextual quando autorizada.	Tratar como requisito principal; testar em aparelhos de entrada, intermediários e premium.
TTS, vibração e alto-falante	Audiodescrição, leitura em voz alta, alertas e retorno háptico.	Priorizar recursos nativos do sistema; oferecer pausa, repetição e controle de velocidade quando possível.
NPU/Edge AI	Pode acelerar modelos locais leves em alguns dispositivos e reduzir latência.	Não prometer inferência local de LLM em todos os aparelhos; usar como melhoria opcional.
LiDAR/ToF	Pode auxiliar foco, profundidade e leitura em superfícies complexas em aparelhos específicos.	Não tornar obrigatório; prever QR plano e guia tátil como solução de base.
Cache e service worker	Permite operação parcial offline e carregamento mais rápido.	Definir conteúdo mínimo offline: resumo, áudio essencial, texto, contatos e instruções.

O Quadro 5 evidencia que a câmera e o TTS são os recursos de maior impacto e maior cobertura nos dispositivos em circulação. Recursos como NPU e LiDAR, embora promissores, devem ser tratados como melhorias opcionais, sem comprometer a experiência básica de acessibilidade em aparelhos de entrada.

8.3 Recomendações de implementação para a PWA

- Usar QR Code dinâmico quando houver necessidade de atualização de conteúdo, mas manter governança de links e histórico de versões.
- Oferecer fluxo inicial curto: identificação do ponto, resumo em áudio/texto e opções de aprofundamento.
- Manter base RAG curada pela instituição, com documentos autorizados, data de revisão e responsável editorial.
- Evitar coleta automática de dados sensíveis; solicitar permissões apenas quando necessárias e explicar finalidade em linguagem simples.
- Prever alternativa sem IA, sem login e com baixo consumo de dados para situações de conectividade instável.

8.4 Trilha de implementação gradual

A arquitetura proposta nas seções anteriores pode ser adotada de forma incremental, respeitando a capacidade técnica, orçamentária e operacional de cada instituição. A seguir, são descritos três níveis de implementação. Não há obrigatoriedade de percorrer todos os níveis: cada um já entrega valor inclusivo real e pode ser mantido indefinidamente se atender aos objetivos do projeto.

Nível 1 — QR estático com página simples: o QR Code aponta para uma URL fixa com conteúdo em HTML estático. A página contém resumo em texto, áudio pré-gravado e, se possível, vídeo em Libras. Não exige backend, banco de dados ou infraestrutura de IA. É o ponto de entrada recomendado para equipes sem experiência prévia em desenvolvimento web. Requisito mínimo: hospedagem HTTPS e um editor de conteúdo.

Nível 2 — QR dinâmico com PWA e conteúdo multimodal: o QR aponta para um redirecionador gerenciável, que entrega uma PWA leve com cache, suporte a leitores de tela, navegação por teclado e múltiplos formatos de conteúdo (texto, áudio, Libras, contraste). O conteúdo é atualizável sem trocar o código físico. Requer gerenciamento de links, servidor simples e sistema de gestão de conteúdo acessível à equipe editorial.

Nível 3 — PWA com RAG e agentes especializados: o QR aciona uma PWA conectada a uma base de conhecimento institucional via RAG, com agentes capazes de responder perguntas, adaptar conteúdo ao contexto e ao perfil funcional do usuário. Requer backend estruturado, base documental curada, política de privacidade, monitoramento de uso e equipe técnica para manutenção. Recomendado para instituições com ambientes complexos (museus, centros de formação, espaços multifuncionais) e capacidade de sustentar a operação a longo prazo.

9. Tecnologias complementares: BLE, NFC/RFID e geolocalização indoor

Embora o QR Code seja uma solução simples e de baixo custo, há cenários em que tecnologias complementares aumentam robustez e autonomia. O Bluetooth Low Energy pode ser utilizado em beacons para sinalização por proximidade e apoio à localização indoor. NFC e RFID podem identificar objetos por aproximação, sem necessidade de câmera ou iluminação adequada. Em projetos mais complexos, a combinação entre QR, BLE, NFC/RFID e mapas digitais permite criar experiências redundantes e mais resilientes.

O Quadro 6 compara as quatro principais tecnologias de identificação e localização utilizadas em projetos acessíveis, destacando a forma de interação, o uso indicado e as observações técnicas relevantes para a escolha em cada contexto.

Quadro 6 — Tecnologias complementares em projetos acessíveis

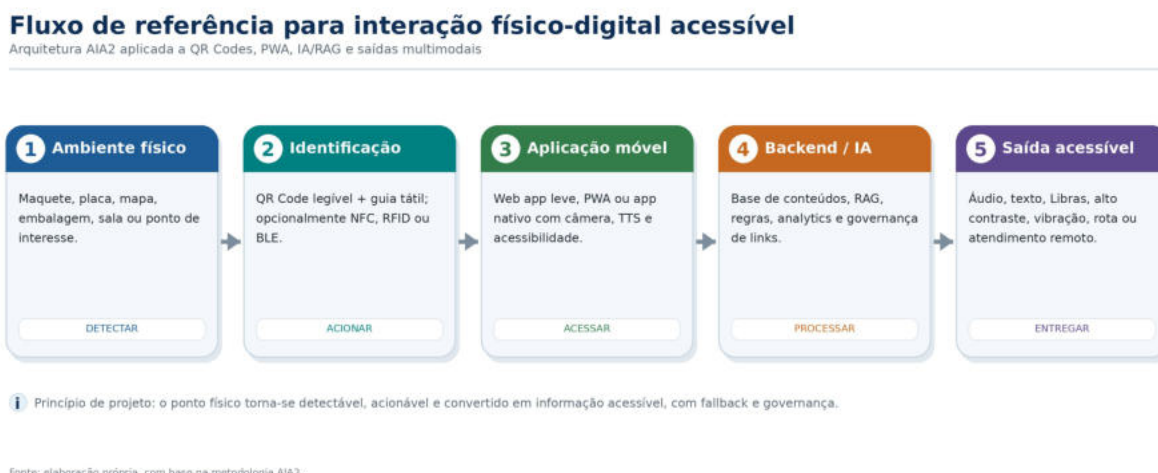
Tecnologia	Forma de interação	Uso indicado	Observações
QR Code	Câmera do smartphone	Acesso rápido a conteúdo multimodal em placas, maquetes, objetos e materiais impressos.	Baixo custo; fácil geração; precisa ser visualmente legível e encontrável.
NFC/RFID HF	Aproximação do aparelho ou leitor	Identificação de ponto, objeto ou crachá quando a câmera não é ideal.	Bom para proximidade; exige tag e compatibilidade do dispositivo.
RFID UHF	Leitor dedicado	Inventário e rastreamento de ativos em maior distância.	Requer infraestrutura própria; sensível a materiais e ambiente.
BLE Beacons	Sinal de proximidade captado por app	Orientação indoor, zonas de informação e automação contextual.	Exige calibração, bateria, manutenção e app compatível.

O Quadro 6 indica que QR Code e NFC são complementares, e não concorrentes: o QR oferece alcance visual e baixo custo de implantação, enquanto o NFC amplia o acesso em situações de baixa visibilidade ou dificuldade de enquadramento. A escolha entre eles deve ser guiada pelo perfil do usuário e pelas características físicas do ambiente.

10. Arquitetura técnica de referência

A arquitetura de referência para um piloto AIA2 com QR Codes pode ser organizada em fluxo simples e escalável:

Figura 1 — Fluxo de referência para interação físico-digital acessível



Para implantação institucional, recomenda-se separar conteúdo, interface e lógica de IA. O conteúdo deve ficar em base administrável, com versionamento e revisão editorial. A interface deve ser compatível com leitores de tela, navegação por teclado, contraste adequado, botões grandes e linguagem simples. A camada de IA deve consultar fontes autorizadas e apresentar limites de uso, com opção de acessar conteúdo fixo quando a resposta automática não for adequada.

11. Diretrizes de implementação, validação e governança

As diretrizes desta seção são organizadas em oito dimensões práticas, descritas no Quadro 7. Cada dimensão concentra as recomendações mais críticas para que o projeto transite do protótipo ao piloto com segurança técnica, qualidade inclusiva e governança adequada.

Quadro 7 — Diretrizes práticas para publicação e piloto

Dimensão	Recomendação
Acessibilidade digital	Aplicar WCAG 2.2 e eMAG; testar com leitor de tela, navegação por teclado, contraste, foco visível, tamanho de toque e texto alternativo.
Ergonomia física	Instalar QR em altura, distância e orientação acessíveis; usar marca tátil; garantir contraste, iluminação e redundância.
Conteúdo multimodal	Oferecer resumo inicial, opções de aprofundamento, audiodescrição, texto simples, Libras e equivalentes para elementos visuais.
PWA e experiência móvel	Garantir páginas leves, carregamento rápido, suporte a TTS, cache de conteúdo essencial, botões grandes e compatibilidade com leitores de tela.
Validação com usuários	Realizar cocriação, testes de leitura, compreensão, tempo de tarefa, satisfação e observação qualitativa com perfis diversos.

Dimensão	Recomendação
Privacidade e segurança	Minimizar coleta de dados, informar finalidade, obter consentimento quando necessário, proteger logs e evitar dados sensíveis desnecessários.
Operação e manutenção	Definir responsáveis por links, conteúdo, QR físico, bateria de beacons, servidor, suporte e atualização da base de conhecimento.
Fallback	Garantir alternativa sem IA, sem login e, quando necessário, sem internet: áudio embarcado, texto local, atendimento humano ou kiosk.

O Quadro 7 deve ser lido como um instrumento de planejamento, não como lista exaustiva. Instituições com menor capacidade técnica podem adotar as dimensões progressivamente, priorizando acessibilidade digital, conteúdo multimodal e validação com usuários nas etapas iniciais. As dimensões de privacidade, segurança e operação tornam-se mais críticas conforme o projeto amadurece e passa a coletar dados ou ampliar a base de usuários.

12. Limitações, riscos e cuidados éticos

As soluções com QR Codes acessíveis apresentam limitações que precisam ser reconhecidas. A leitura pode falhar por baixa iluminação, reflexo, distância, curvatura, sujeira, dano físico ou dificuldade de enquadramento. A dependência de smartphone e internet pode excluir usuários sem aparelho compatível, bateria ou pacote de dados. Conteúdos gerados por IA podem conter erros, simplificações inadequadas ou respostas inconsistentes, principalmente quando não há base documental controlada.

Há também riscos de segurança, como troca maliciosa de QR Codes, redirecionamento para páginas falsas e coleta indevida de localização ou dados sensíveis. Por isso, projetos institucionais devem usar domínios confiáveis, HTTPS, monitoramento de links, validação periódica dos códigos físicos e comunicação clara sobre quais dados são ou não coletados.

No caso de PWA com RAG e agentes, o cuidado ético deve ser ampliado. A aplicação deve informar quando a resposta é gerada por IA, indicar fontes ou base de referência quando possível, preservar alternativa de conteúdo fixo e registrar apenas dados necessários para melhoria do serviço. O uso de agentes não elimina a necessidade de curadoria humana, revisão editorial e responsabilização institucional.

Do ponto de vista social, a tecnologia deve ampliar autonomia sem substituir direitos, atendimento, infraestrutura acessível ou participação social. A validação com pessoas com deficiência deve ser remunerada ou reconhecida quando couber, realizada com instrumentos acessíveis e incorporada ao ciclo de melhoria do projeto.

13. Considerações finais

O uso de QR Codes em projetos de acessibilidade apresenta alto potencial quando deixa de ser tratado como recurso isolado e passa a integrar uma arquitetura metodológica. No contexto da AIA2, o QR Code atua como ponto de conexão entre mundo físico e ambiente digital inteligente, permitindo que maquetes, placas, mapas, embalagens e objetos educativos ganhem camadas de audiodescrição, texto, Libras, orientação e interação assistida.

A inclusão da seção sobre PWA, RAG e agentes de IA reforça a coerência técnica do artigo ao demonstrar como a experiência acionada pelo QR Code pode evoluir de uma página estática para um serviço acessível, modular, escalável e governável. Essa evolução, entretanto, deve ser conduzida com prudência: hardware avançado, IA generativa e personalização contextual são recursos complementares, não condições obrigatórias para que a solução seja inclusiva.

A principal recomendação deste artigo é que projetos com QR Codes acessíveis sejam concebidos como ecossistemas: design físico encontrável, conteúdo multimodal, interface digital acessível, PWA

leve, base de conhecimento curada, governança de dados, validação com usuários e plano de manutenção. Essa abordagem favorece baixo custo, escalabilidade e atualização contínua, sem abrir mão de segurança, ética e qualidade técnica.

Para a Administração Pública, especialmente em ambientes de formação, museus, escolas, centros de atendimento e espaços de circulação, a combinação entre QR Codes, smartphones, PWA, IA, BLE e RFID/NFC pode transformar sinalizações estáticas em portais de acessibilidade conectada. O resultado esperado é ampliar o direito de ir, vir, aprender, participar e compreender com autonomia.

Quatro eixos se destacam como agenda de pesquisa futura. O primeiro é a validação empírica do Checklist do Apêndice A: aplicar o instrumento em pilotos reais e medir sua capacidade preditiva de qualidade inclusiva. O segundo é a comparação controlada entre QR Code, NFC e BLE em cenários específicos (ambientes escuros, usuários com tremor, ambientes ruidosos), para orientar escolhas de design com base em evidências. O terceiro é o impacto de agentes RAG na autonomia de usuários com deficiência cognitiva: estudos longitudinais que medem compreensão, confiança e uso independente ao longo do tempo. O quarto é a integração da metodologia AIA2 a sistemas de gestão pública (SEI, sistemas de protocolo, plataformas de cidadania digital), avaliando a viabilidade de escalar soluções acessíveis sem dependência de projetos pontuais.

Referências

- APPLE DEVELOPER. Accessibility — Human Interface Guidelines. Disponível em: <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/accessibility>. Acesso em: 13 maio 2026.
- BLUETOOTH SIG. Bluetooth Technology Website. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/>. Acesso em: 13 maio 2026.
- BRASIL. Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/l13709compilado.htm. Acesso em: 13 maio 2026.
- DENSO WAVE. QR Code development story. Disponível em: <https://www.denso-wave.com/en/technology/vol1.html>. Acesso em: 13 maio 2026.
- GOVERNO DIGITAL. Modelo de Acessibilidade em Governo Eletrônico (eMAG). Disponível em: <https://www.gov.br/governodigital/pt-br/acessibilidade-e-usuario/acessibilidade-digital/modelo-de-acessibilidade>. Acesso em: 13 maio 2026.
- GOOGLE. Build accessible apps. Android Developers. Disponível em: <https://developer.android.com/guide/topics/ui/accessibility>. Acesso em: 13 maio 2026.
- IBM. O que é RAG (retrieval-augmented generation)? Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/retrieval-augmented-generation>. Acesso em: 13 maio 2026.
- ISO. ISO/IEC 18004:2024 — Information technology — Automatic identification and data capture techniques — QR code bar code symbology specification. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/83389.html>. Acesso em: 13 maio 2026.
- MDN WEB DOCS. Progressive Web Apps. Disponível em: https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/Progressive_web_apps. Acesso em: 13 maio 2026.
- W3C. Web Application Manifest. Disponível em: <https://www.w3.org/TR/appmanifest/>. Acesso em: 13 maio 2026.

W3C. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.2. Disponível em: <https://www.w3.org/TR/WCAG22/>. Acesso em: 13 maio 2026.

W3C BRASIL. Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo Web (WCAG) 2.2 — tradução em português. Disponível em: <https://www.w3c.br/traducoes/wcag/wcag22-pt-BR/>. Acesso em: 13 maio 2026.

W3C WAI. Mobile Accessibility at W3C. Disponível em: <https://www.w3.org/WAI/standards-guidelines/mobile/>. Acesso em: 13 maio 2026.

ABNT. NBR 9050:2020 — Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

KANE, Shaun K. et al. Usable gestures for blind people: understanding preference and performance. In: ACM CHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS, 2011, Vancouver. Proceedings... New York: ACM, 2011. p. 413–422. DOI: 10.1145/1978942.1979004.

KUBER, Ravi; YU, Wai. Towards developing assistive haptic feedback for visually impaired internet users. In: ACM CHI CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTING SYSTEMS, 2010, Atlanta. Proceedings... New York: ACM, 2010. p. 3409–3414. DOI: 10.1145/1753326.1753836.

LIU, Nien-Lin et al. QRator: using mobile phones and QR codes for interactive museum experiences. In: ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERACTIVE TABLETOPS AND SURFACES, 2011, Kobe. Proceedings... New York: ACM, 2011. p. 1–2. DOI: 10.1145/2076354.2076440.

NOH, Kwang-Sung; SHIN, Seung-Chul; LEE, Won-Joo. Development of QR code based mobile guide system for museum. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONVERGENCE AND HYBRID INFORMATION TECHNOLOGY, 2009. Proceedings... IEEE, 2009. p. 904–909. DOI: 10.1109/ICCIT.2009.255.

GARAVELLO, Luiz Francisco; FLEXMODULAR. Quiosque universal acessível AIA2: desenvolvimento de protótipo com touchscreen, Libras, mapa tátil e audiodescrição na ULEG-FT. Brasília: Metodologia AIA2; Universidade de Brasília — Faculdade de Tecnologia, 2026. Projeto em desenvolvimento.

Apêndice A — Checklist de qualidade para pilotos AIA2 com QR Codes

Item de verificação	Responsável	Critério de aceite	Status
O QR Code possui contraste adequado, área silenciosa preservada e tamanho compatível com a distância de leitura.	Equipe de design/TI	QR legível a distância padrão em ≥ 3 dispositivos testados	☐
Há marca tátil ou indicação física que permita localizar o QR sem depender da visão.	Equipe de acessibilidade	Confirmado por usuário com deficiência visual em teste	☐

Item de verificação	Responsável	Critério de aceite	Status
O conteúdo inicial apresenta resumo curto antes do detalhamento.	Editor de conteúdo	Resumo ≤ 3 frases antes de opções de aprofundamento	☐
A PWA funciona em navegador móvel, possui botões acessíveis e carrega rapidamente em conexão limitada.	Desenvolvimento/TI	Carregamento ≤ 5 s em 3G; botões ≥ 44×44 px	☐
A página funciona com leitor de tela e botões possuem nomes acessíveis.	Desenvolvimento/QA	Zero erros críticos em Axe ou NVDA; todos botões com aria-label	☐
Há alternativa em texto para todo conteúdo em áudio e alternativa em Libras quando pertinente.	Editor de conteúdo	100% dos áudios com transcrição; Libras para conteúdo informativo relevante	☐
A linguagem foi revisada para clareza, objetividade e linguagem simples.	Editor de conteúdo	Revisão concluída; nível de leitura adequado ao público-alvo	☐
A experiência foi testada com usuários reais, incluindo pessoas com deficiência.	Equipe de acessibilidade	Teste com ≥ 3 usuários com deficiência; achados documentados	☐
O destino do QR usa domínio institucional confiável e conexão segura.	TI/Segurança	URL com HTTPS; domínio institucional verificado	☐
A solução informa se coleta dados, quais dados coleta e para qual finalidade.	Privacidade/Jurídico	Aviso de privacidade visível; conformidade LGPD verificada	☐

Item de verificação	Responsável	Critério de aceite	Status
A base RAG possui fontes autorizadas, data de revisão e responsável editorial.	Gestão de conteúdo	Base versionada; revisor designado; data da última revisão registrada	☐
Existe plano de manutenção do conteúdo, do QR físico e de eventuais beacons ou tags.	Operação/TI	Plano documentado com responsáveis e periodicidade definida	☐
Há fallback quando o usuário está sem internet, sem câmera funcional ou sem aparelho compatível.	Os resultados do piloto são documentados com métricas de leitura, compreensão, satisfação e falhas.	Gestão do projeto	Relatório de piloto com dados quantitativos e qualitativos ☐