



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE

VICTOR RODRIGO LEITE MAGALHÃES DE ALMEIDA

**REALIDADE AUMENTADA APLICADA A POSICIONAMENTO DE INVERSORES
FOTOVOLTAICOS**

Recife
2023

VICTOR RODRIGO LEITE MAGALHÃES DE ALMEIDA

**REALIDADE AUMENTADA APLICADA A POSICIONAMENTO DE INVERSORES
FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Automação e Controle da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação e Controle.

Orientador(a): Prof. Dra. Andrea Maria Nogueira Cavalcanti Ribeiro

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Almeida, Victor Rodrigo Leite Magalhães de.
Realidade Aumentada Aplicada ao Posicionamento de Inversores
Fotovoltaicos / Victor Rodrigo Leite Magalhães de Almeida. - Recife, 2023.
54

Orientador(a): Andrea Maria Nogueira Cavalcanti Ribeiro
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Controle e
Automação - Bacharelado, 2023.

1. Inversores Fotovoltaicos. 2. Energia Solar. 3. BIM. 4. Realidade
Aumentada. 5. Revit. I. Ribeiro, Andrea Maria Nogueira Cavalcanti.
(Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

VICTOR RODRIGO LEITE MAGALHÃES DE ALMEIDA

**REALIDADE AUMENTADA APLICADA A POSICIONAMENTO DE INVERSORES
FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Automação e Controle da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação e Controle.

Aprovado em: 26/04/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Andrea Maria Nogueira Cavalcanti Ribeiro (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Me. Eduardo Augusto Oliveira Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Este trabalho é dedicado à minha mãe. Mulher forte, inteligente, humilde e sábia. Sei que minha vitória é a sua, e hoje vencemos mais uma batalha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sua misericórdia em minha vida, por me dar saúde, forças e discernimento diariamente.

Agradeço a minha mãe, Nita, por ser meu braço forte, meu amparo e meu exemplo. Obrigado pelos valores e princípios que me entregastes, pois são os maiores tesouros que tenho nessa vida, de certo. Amo você.

Agradeço a minha família, por ser minha base e por sempre me receber bem no meu retorno para casa.

Agradeço aos meus professores da graduação, e em especial minha orientadora Andrea Maria, pela troca de experiências, estímulos, orientações e direcionamentos durante toda a caminhada profissional e pessoal.

Agradeço a minha namorada, Melyna, por todo suporte, compreensão e auxílio no desenvolvimento deste trabalho, fazendo da minha batalha a sua.

A todos meus amigos da graduação, Denis, Augusto, Henrique, Filipe, Arthur, Mabelle, por todos os momentos compartilhados, pelos dias de sorrisos e de batalhas. Com vocês, essa caminhada ficou mais leve.

Finalmente, deixo um abraço de carinho a todos que contribuíram e contribuem na minha caminhada. Meus sinceros agradecimentos!

Aquele que não sabe, e não sabe que não sabe, é um tolo, evitem-no. Aquele que não sabe, e sabe que não sabe, é uma criança, ensine-o. Aquele que sabe, e não sabe que sabe, é um dormente, desperte-o. Aquele que sabe, e sabe que sabe, é um sábio, siga-o (Provérbio persa).

RESUMO

No setor de energia solar, as atividades de instalação de sistemas fotovoltaicos passam por diversas etapas de planejamento e análise até a implementação final do projeto. Nesse contexto, qualquer erro no início da cadeia de planejamento pode ocasionar retrabalhos durante o processo, gerando custos extras. Assim o objetivo geral desse trabalho consiste em desenvolver uma aplicação de realidade aumentada como meio de orientação para locais de instalação de inversores fotovoltaicos, garantindo condições ideais de espaçamento para operação em condições ótimas. Para tanto, inicialmente, foi modelado uma família com informações paramétricas, contendo o inversor fotovoltaico, quadros de proteção e eletrocalhas, mediante *software* Revit e metodologia BIM. A família modelada foi utilizada como elemento 3D para o desenvolvimento de um protótipo de realidade aumentada usando a Unity e o Vuforia para plataforma Android. O aplicativo desenvolvido permite realizar a leitura de código QR Code e pré-visualizar os equipamentos modelados no local indicado, podendo validar ou não o local de instalação para os equipamentos reais futuros. Para avaliação do protótipo, sete usuários com experiência no setor solar foram selecionados, utilizaram aplicativo seguindo um roteiro de uso e responderam dois formulários, pré e pós-uso do aplicativo. O protótipo de aplicativo teve uma avaliação geral classificada como ótima, tanto para qualidade das informações apresentadas quanto para usabilidade, de acordo com escala Likert. Além disso, o tempo de médio para conclusão das atividades de inspeção com o protótipo de aplicativo foi 4 minutos e 19 segundos, evidenciando a baixa curva de aprendizado.

Palavras-chave: Inversores fotovoltaicos; Energia solar; BIM; Realidade Aumentada; Revit.

ABSTRACT

In the solar energy sector, installation activities of photovoltaic systems go through several stages of planning and analysis until the final implementation of the project. In this context, any error at the beginning of the planning chain can cause rework during the process, generating extra costs. Thus, the general objective of this work is to develop an application of augmented reality as a means of orientation for installation sites of photovoltaic inverters, guaranteeing ideal spacing conditions for operation in optimal conditions. To do so, initially, a family was modeled with parametric information, containing the photovoltaic inverter, protection panels and cable trays, using Revit software and BIM methodology. The modeled family was used as a 3D element for the development of an augmented reality prototype using Unity and Vuforia for the Android platform. The developed application allows you to read the QR code and preview the modeled equipment in the indicated location, being able to validate or not the installation location for future real equipment. To evaluate the prototype, seven users with experience in the solar sector were selected, used the application following a usage script and answered two forms, pre and post-use of the application. The application project had an overall evaluation classified as excellent, both for quality of information and for usability, according to the Likert scale. In addition, the average time to complete the control activities with the prototype application was 4 minutes and 19 seconds, evidencing the low learning curve.

Keywords: Photovoltaic Systems; Solar Energy; BIM; Augmented Reality; Revit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes da radiação solar.	19
Figura 2 - Sistema fotovoltaico conectado à rede.	20
Figura 3 - Sistema de conversão de corrente.....	22
Figura 4 - Ciclo de vida um projeto BIM.	23
Figura 5 - Etapas de desenvolvimento.	26
Figura 6 - Registro do vistoriador.	28
Figura 7 - Requisitos do protótipo de aplicativo.....	29
Figura 8 - Samsung Galaxy S10e.	30
Figura 9 - GD Solar no Brasil por Classe de Consumo.	31
Figura 10 - Inversor fotovoltaico CanadianSolar 5kWp	32
Figura 11 - Desenvolvimento de família paramétrica.	32
Figura 12 - Testes da família dentro de um projeto 3D.	33
Figura 13 - Usina fotovoltaica e visualização 3D.....	33
Figura 14 - Equipamentos elétricos importados na Unity.	35
Figura 15 - Primeiro teste de RA.....	35
Figura 16 - Validação das distâncias dos equipamentos.	36
Figura 17 - Experiência dos usuários no setor solar.	40
Figura 18 - Perfil acadêmico dos usuários do protótipo.	40
Figura 19 - Teste em área comum de condomínio e residências.....	41
Figura 20 - Área de garagem condominial e detalhes do inversor.	42
Figura 21 - Validação dos distanciamentos por meio de trena de medição.	42
Figura 22 - Processo de validação de todas as cotas do objeto virtual.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos individuais dos usuários de teste.....	44
Tabela 2 - Médias do PSSUQ	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
GB	Gigabyte
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IHM	Interface homem-máquina
InfoQual	<i>Information Quality</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>
mAh	Miliampere hora
PSSUQ	<i>Post-Study System Usability Questionnaire</i>
QDCA	Quadro de distribuição de corrente alternada
QDCC	Quadro de distribuição de corrente contínua
RA	Realidade Aumentada
TUSD	Tarifa de Uso de Sistema de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso de Sistema de Transmissão
SDK	<i>Software Development Kit</i>
SFVC	Sistema Fotovoltaico Conectado
SysUse	<i>System Usage</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Geral.....	17
1.1.2	Específicos	17
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	19
2.2	METODOLOGIA BIM.....	22
2.3	REALIDADE AUMENTADA.....	24
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	26
3.1	APLICABILIDADE NO MERCADO	27
3.2	DEFINIÇÃO DO PROTÓTIPO DE APLICATIVO, SOFTWARES E HARDWARE	28
3.3	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DE APLICATIVO	31
3.4	VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO DE APLICATIVO.....	36
3.4.1	Materiais e Usuários.....	37
3.4.2	Questionário Pré-uso.....	37
3.4.3	Roteiro de Uso.....	38
3.4.4	Questionário Pós-uso	39
3.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	39
3.5.1	Discussão de Resultados	46
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento de energia elétrica no Brasil, entre as décadas de 50 a 70, começou a se tornar majoritariamente proveniente de usinas hidrelétricas, que eram construídas de maneira descentralizada e distantes dos centros econômicos e de consumo de energia elétrica. Logo, no início do século XXI, a geração por meio de hidrelétricas representava valores superiores a 90% de toda a matriz elétrica nacional [1]. Essa dependência hidráulica no setor elétrico acarretou, no ano de 2001, um racionamento de energia no país, decorrente dos reservatórios apresentarem disponibilidade muito inferior em relação aos anos anteriores, sendo insuficientes para atender à crescente demanda. Devido a isto, a busca por alternativas e soluções que atendessem a demanda de energia elétrica de forma eficaz, segura e sustentável tornou-se incessante.

A partir de então, a diversificação da matriz elétrica com a inserção de fontes renováveis, como a solar e eólica, é cada vez mais evidente, permitindo uma maior segurança energética em tempos de variações climáticas; além de serem fontes que causam menor impacto social e ambiental quando comparadas à hídrica. Esse aumento do percentual de fontes renováveis na matriz elétrica é uma tendência mundial, onde diversos países vêm criando regulamentações e estímulos financeiros para que essa porcentagem aumente [2] [3].

No Brasil, desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade [4]. Além disso, em 2015, o governo estabeleceu a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) sobre a energia elétrica gerada a partir de sistema fotovoltaico para a mini ou microgeração, mediante as diretrizes do Convênio ICMS 16/2015, de autoria do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ). Outros benefícios também foram direcionados para esta modalidade de geração de energia elétrica, como descontos na Tarifa de Uso dos Sistemas de Transmissão (TUST) e na Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição (TUSD), venda direta a consumidores, condições diferenciadas de financiamento, dentre outros [5]. Como resultado, a geração solar apresentou um crescimento expressivo no cenário nacional. No ano de 2022, a

geração distribuída saltou de 8,4 GW para 14 GW de potência instalada, resultado em um crescimento de 66,7% em comparação a 2021 [6].

Além disso, atrelada a necessidade da inserção de novas fontes alternativas de energia e ao desenvolvimento da arquitetura e construção civil, novas ferramentas de projetos que pudessem trazer confiabilidade, celeridade e agilidade na projeção e construção civil, e conseqüentemente das usinas, vêm sendo evoluídas e transformadas nos últimos anos.

A implementação dos softwares CAD (*Computer Aided Design*), em substituição ao lápis e papel, trouxe uma melhor metodologia de trabalho e eficiência no tratamento dos projetos, seja no que diz respeito à criação do desenho ou na sua edição [7]. Porém, mesmo que o CAD tenha representado uma evolução relevante, é necessário que os desenhos em formato 2D gerados pela plataforma sejam sobrepostos para que seja possível entender o projeto como um todo, o que causa uma certa dificuldade para projetos mais complexos. É nesse cenário que a Modelagem da Informação da Construção ou *Building Information Modeling* (BIM) vem ganhando espaço e tornando-se o novo padrão para implementação de projetos.

A metodologia BIM é um modelo de tecnologia 3D que tem sido cada vez mais utilizado nos setores de arquitetura, engenharia e construção por ser considerado um mecanismo eficaz para projetos complexos em razão da possibilidade de corrigir erros desde o início da fase de projeto e planejar a construção com precisão. O BIM é uma plataforma de armazenamento, compartilhamento, troca e gerenciamento de informações multidisciplinares, como por exemplo as fases de trabalho e suas quantificações, orçamento e custo da obra, operação e manutenção, que podem ser alteradas e ajustadas de maneira a refletir o que se pretende construir na prática. Assim, o BIM, além de um modelo tridimensional, é um modelo com capacidade de alinhar as informações existentes em cada elemento modelado produzido por profissionais de diferentes áreas e que usam ferramentas digitais diversas. Dessa maneira, é possibilitado ao projetista "construir" o empreendimento em um ambiente virtual, antes da sua execução, por meio da utilização de componentes virtuais inteligentes, cada um dos quais sendo exatamente equivalente a um componente construtivo real, permitindo, assim, a visualização da construção sob diferentes ângulos e de diversas formas [8].

Dada as diversas vantagens de controle de dados e informações geradas em toda fase dos projetos, a metodologia BIM vem sendo cada vez mais disseminada e tornando-se premissa no setor público e em leis de licitações. Em 2021, a nova Lei de Licitações (Lei 14.133/21) estabeleceu, em seu artigo 19, parágrafo 3º, a preferência pela utilização do BIM ou tecnologias e processos integrados similares ou mais avançados que venham a substituí-la nas licitações de obras e serviços de engenharia e arquitetura [9].

Paralelo ao crescimento do setor solar e evolução de projetos seguindo a metodologia BIM, atualmente presencia-se a quarta revolução industrial, conhecida também como “Indústria 4.0”. Esta acontece após três revoluções que foram transformadoras, a primeira (1760-1830) marcada pela substituição da produção manual à produção mecânica. A segunda (1850) trouxe a energia elétrica e permitiu a manufatura em massa. E a terceira por volta do século XX com a chegada da eletrônica, da tecnologia da informação e das telecomunicações.

Agora a quarta revolução chega marcada pela automatização, nanotecnologia, robôs, inteligência artificial, realidade virtual, realidade aumentada (RA), sistemas de armazenamento de energia, drones e impressoras 3D, tornando as indústrias inteligentes. Por exemplo, sistemas que cooperam em tempo real, trazendo a interação homem-máquina para o chão de fábrica e, tudo isso acontece graças à internet das coisas [10].

Dentre todos estes campos de estudo citados acima, as contribuições que as aplicações de RA podem trazer para o setor de energia solar podem ser significativas. A RA é uma versão aprimorada e interativa de um ambiente real obtido através de elementos visuais, sonoros e outros estímulos sensoriais digitais, por meio de tecnologia holográfica. A RA incorpora três recursos: uma combinação de mundos digitais e físicos, as interações feitas em tempo real e a identificação 3D exata de objetos virtuais e reais [11].

Dentre as aplicações possíveis da RA, pode-se destacar o crescente uso dessa tecnologia nas áreas de manutenção e monitoramento. No contexto de setor elétrico, podemos citar o projeto piloto orientado pela Neoenergia, que vem utilizando uma aplicação de RA para atividades de manutenção e inspeção de subestações e redes das concessionárias da empresa. Durante o projeto, foi observado que o uso de

tecnologia garante mais eficiência nas atividades de manutenção dos ativos, proporcionando interações e orientações, em tempo real, da equipe de especialistas com os técnicos em campo, evitando assim deslocamentos desnecessários nas áreas de atuação [12].

Na engenharia, a realização de vistorias em locais ao qual deseja-se executar um projeto é de suma importância. Elas têm por objetivo avaliar a situação do ambiente de forma antecipada e preventiva, averiguando com métodos e processos específicos, todo ou parte do ambiente [13]. Para a elaboração de projetos executivos de sistemas fotovoltaicos não é diferente. As condições e as dimensões do ambiente, são algumas das inúmeras informações que devem ser apuradas de forma assertiva e realística. No entanto, devido às dificuldades de campo, materiais ou métodos utilizados, estas podem ser apuradas erroneamente, acarretando problemas de engenharia, como retrabalhos, atrasos na implantação ou construção, e maiores custos. Foi nesse contexto que o autor deste presente trabalho, enquanto analista de dados em uma empresa de energia solar, notou um retrabalho de 4% nos projetos de usinas fotovoltaicas para a equipe de engenharia devido a erros de medição em campo ou solicitações de cliente em momento de instalação, predominantemente no local de instalação de inversores fotovoltaicos. As situações vivenciadas podem ser resumidas em:

- i. Não realização da medição do local de instalação por parte da equipe de vistoria técnica, na busca de realizarem um maior quantitativo de visitas durante a jornada de trabalho, visto que as equipes eram pagas pela quantidade de locais visitados;
- ii. Solicitação de alteração do local de instalação do inversor pelo cliente no momento da implantação, por não ter uma noção prévia das dimensões dos equipamentos e no impacto estético do ambiente.

Sendo assim, com a expansão da metodologia BIM para a realização de projetos multisetoriais e a nova Lei das Licitações, o desenvolvimento de aplicações em RA vem apresentando uma forte contribuição para a assertividade, redução de custos e otimização de serviços no setor elétrico nacional. Dessa forma, o presente trabalho propõe uma solução de RA para vistoria técnica em projetos fotovoltaicos, garantindo que o local de instalação dos inversores fotovoltaicos obedeça a critérios mínimos de

espaçamento, condições de ventilação suficientes e que sejam evitados erros de medição no espaço alocado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Desenvolver um protótipo de aplicativo para garantir um local ótimo de instalação de inversores fotovoltaicos, que faz o uso de técnicas de Realidade Aumentada e pode ser utilizado em dispositivos móveis.

1.1.2 Específicos

- Auxiliar a equipe técnica na escolha do local apropriado a instalação do inversor fotovoltaico, garantindo a vida útil e a instalação segura;
- Proporcionar uma visualização prévia do ambiente de instalação ao cliente;
- Reduzir erros de inspeção técnica em projetos civis e elétricos;
- Reduzir ou eliminar custos extras de implantação de projetos fotovoltaicos.

1.2 Organização do Trabalho

O texto foi organizado em quatro capítulos, incluindo este introdutório, conforme a seguir:

- Capítulo 1: Introdução. Apresenta a contextualização do trabalho, a problemática observada em vivência profissional no mercado de energia solar e a proposta de solução por meio de um protótipo de aplicativo que utiliza técnicas de RA.

- Capítulo 2: Fundamentação Teórica. Neste capítulo se destacam os principais temas pesquisados para o desenvolvimento do trabalho. Passando por sistemas fotovoltaicos, metodologia BIM e realidade aumentada.
- Capítulo 3: Desenvolvimento do Trabalho. Apresentação da aplicabilidade de mercado, desenvolvimento do protótipo, metodologia de avaliação e análise dos resultados.
- Capítulo 4: Conclusão e Propostas de Continuidade. Apresentação de conclusões e sugestões para trabalhos futuros, a partir dos dados colhidos no capítulo 3.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se a seguir, o embasamento teórico dos temas mais relevantes para o desenvolvimento e entendimento do trabalho proposto, com conceitos básicos de geração fotovoltaica, etapas de projeto solar, equipamentos de uma usina fotovoltaica, pontos relevantes em vistorias técnicas, uso da metodologia BIM no desenvolvimento de projetos e aplicações de RA no sistema elétrico.

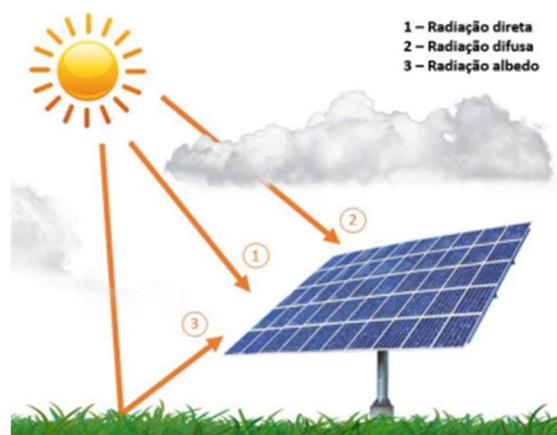
2.1 Sistemas Fotovoltaicos

A energia proveniente da luz e do calor do Sol, e que pode ser transformada em energia térmica e/ou elétrica é denominada de energia solar [14].

A irradiância solar é a taxa na qual a energia solar incide em uma superfície, por unidade de área desta superfície, sendo a unidade mais utilizada watt por metro quadrado (W/m^2). Esta pode ser dividida em três tipos, conforme Figura 1:

- i) irradiância direta: refere-se à radiação que atinge os painéis solares sem sofrer mudança em sua trajetória;
- ii) irradiância difusa: aquela que chega aos painéis após sofrer variação causada por fatores como nuvens e chuva;
- iii) irradiância refletida: aquela que é refletida no solo.

Figura 1 - Componentes da radiação solar.



Fonte: [14].

Vale ressaltar que é comum encontrar na literatura o termo de radiação solar para irradiância [15].

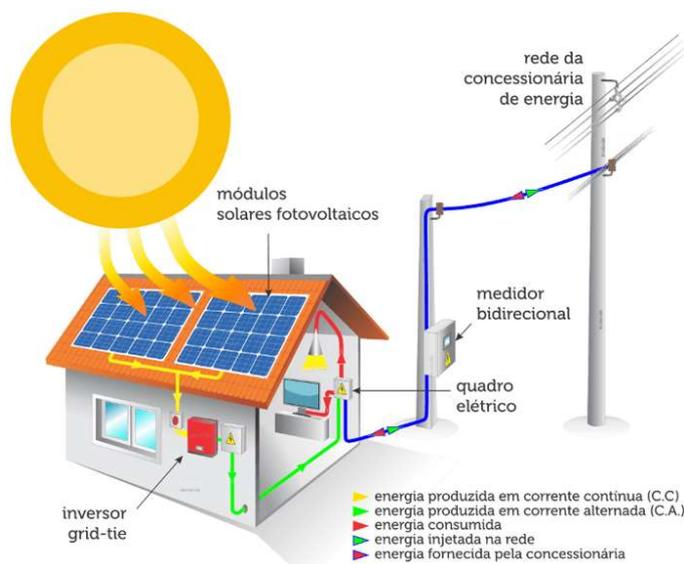
Entre as tecnologias de aproveitamento da energia solar, a mais utilizada atualmente é a geração fotovoltaica, a qual refere-se a um sistema de conversão direta da energia solar em energia elétrica mediante o uso de células fotovoltaicas. Esta conversão ocorre devido ao efeito fotovoltaico, onde os fótons provenientes da radiação solar incidem sobre as células fotovoltaicas, em geral de silício previamente purificado e dopado, fornecendo energia aos elétrons do material, podendo lançá-los para a banda de condução, liberando energia [16].

Para aumentar os níveis de tensão e corrente, várias células fotovoltaicas são conectadas em associações série-paralelo, constituindo assim o conjunto denominado de módulo fotovoltaico. A associação de vários módulos resulta no painel fotovoltaico que constitui a unidade fundamental de um sistema fotovoltaico [17].

Além dos painéis fotovoltaicos, os sistemas fotovoltaicos geralmente são compostos por diversos outros itens, que podem variar a depender do porte do sistema ou tipo de conexão.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFVC), denominados de sistemas *on-grid* ou *grid-tie*, operam em conjunto com a rede elétrica da distribuidora de energia, substituindo ou complementando a energia elétrica convencional disponível na rede. Seu porte varia de acordo com a potência instalada, que vai desde poucos kW em instalações residenciais até MW em grandes usinas. Em geral, o seu objetivo é gerar eletricidade para o consumo local ou a compensação de unidades consumidoras, reduzindo ou até mesmo eliminando o consumo de energia da rede elétrica [17]. Nesse tipo de conexão, destacam-se os painéis solares e o sistema conversor CC-CA (inversor *on-grid*), responsáveis pela geração de energia e conversão da corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), respectivamente. Além desses equipamentos, podemos mencionar o medidor de energia bidirecional, responsável pelo registro de quanto de energia é consumida e injetada na rede de distribuição. A composição do sistema fotovoltaico conectado à rede e seus equipamentos é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Sistema fotovoltaico conectado à rede.

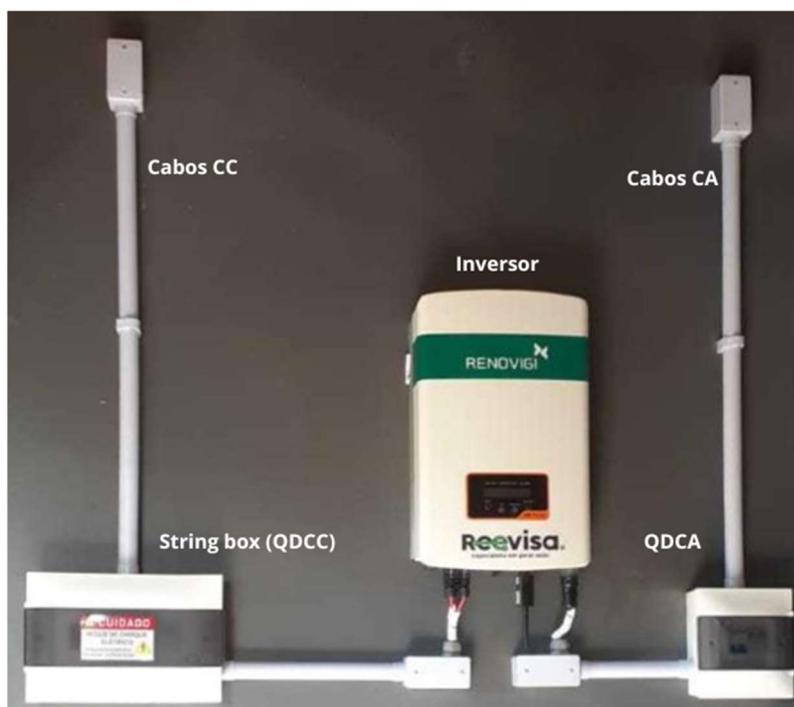


Fonte: Adaptado [18].

Conforme Figura 2, tendo como referência o inversor *on-grid*, tem-se do lado esquerdo, os itens básicos de corrente contínua: conjunto de módulos fotovoltaicos, cabeamento CC e *string box*, também conhecida por quadro de distribuição de corrente contínua (QDCC). Do lado direito, tem-se o conjunto de itens de corrente CA: quadro de distribuição de corrente alternada (QDCA), cabos CA e medidor bidirecional. O inversor *on-grid*, tem a função de receber a energia que foi gerada pelos módulos solares, na chamada corrente contínua (CC), e faz a transformação em energia elétrica de chamada corrente alternada (CA), com uma forma de onda que é igual à energia elétrica fornecida pela própria distribuidora local.

Dada sua importante função, o inversor *on-grid* é o item principal do sistema fotovoltaico. Logo, em vista das inúmeras configurações e ambientes de instalação possíveis do inversor, a sua instalação requer cuidados e as exigências técnicas do fabricante, para sua maior eficiência e vida útil, devem ser atendidas [19]. Um exemplo real de instalação do inversor é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Sistema de conversão de corrente.



Fonte: Adaptado [20].

Dentre as exigências e cuidados técnicos, destaca-se a importância de o local de instalação do inversor fotovoltaico ser propício, possuindo espaço suficiente e adequado para alojar o equipamento, de forma a respeitar as condições de temperatura, distanciamento de paredes e objetos, e que proporcione proteções de sol e chuva. Assim, asseguramos que o equipamento esteja em ambiente capaz de garantir a sua produção energética otimizada. Estas premissas são indicadas de acordo com manual de instalação de cada inversor fotovoltaico, podendo sofrer alterações conforme modelo e fabricante.

2.2 Metodologia BIM

O BIM, ou Modelagem da Informação da Construção, não consiste em apenas um *software* ou programa, e sim em uma modelagem criada para gerenciar informações de um projeto em todo seu ciclo de vida. Resultando, principalmente, no modelo de informações de construção, ou seja, na descrição digital de cada aspecto do ativo construído [21]. Para tanto, há um conjunto de programas que fazem parte

do modelo BIM. Quando usados em conjunto, os diversos *softwares* ajudam projetistas a criar um modelo 3D digital de um objeto, ao mesmo tempo em que fornece informações 4D (coordenando programações e resolvendo questões de tempo) e informações 5D (incorporando a estimativa de custos).

Utilizando os *softwares* que aplicam o BIM, a partir do momento em que se desenha um elemento de projeto, toda a informação necessária para sua representação, análise construtiva, quantificação, execução, determinação dos tempos de mão de obra, desde a fase inicial do projeto até a conclusão da obra, encontra-se associada a cada um dos elementos de projeto. Logo, o BIM está associado a todas as etapas do projeto, desde a concepção até o uso e disposição final. Um ciclo de produção com todas as etapas que podem ser envolvidas com o uso do BIM é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Ciclo de vida um projeto BIM.



Fonte: [22].

O ciclo de produção com o uso do BIM, é possível em razão da modelagem paramétrica, que permite incorporar propriedades não geométricas e características próprias aos objetos representados, como por exemplo, informações de tensão, corrente e potência de um inversor. Além disso, abrange informações espaciais, quantitativas, detalhes dos materiais construtivos, bem como dados do planejamento e orçamento da obra, sendo possível, com estas informações, simular o planejamento, o projeto, a construção e a operação de uma obra ao longo do tempo. Tornando o BIM uma metodologia de gerenciamento 5D, já que além da representação tridimensional do projeto, engloba a quantificação de todo o processo e seus respectivos planejamento e orçamento.

Desta forma, fica claro que os elementos do modelo 3D não mais se caracterizam apenas por sua geometria, mas por suas características técnicas, compondo uma estrutura relacional significativa, que simula as verdadeiras performances técnicas de construção. A conexão dos modelos com seus bancos de dados relacionados abre o caminho para uma série de potencialidades na gestão de projetos, porque torna possível a construção de um sistema de informação integrado, capaz de organizar a troca de informações tão presente e necessária no processo da construção [23].

2.3 Realidade Aumentada

A realidade aumentada (RA) é uma experiência imersiva, capaz de gerar uma sensação de conexão entre os usuários, as pessoas e os objetos ao seu redor. A qual possibilita a visualização de forma integrada de um elemento virtual no mundo real, em que o usuário se encontra, estendendo a percepção para um verdadeiro “mundo aumentado” [24]. Em outras palavras, a RA traz consigo um novo conceito de visualização de informações e imagens geradas por computador, complementando os ambientes reais com elementos e informações.

Diversas tecnologias de RA estão disponíveis no mercado e vão desde uma simples câmera de dispositivo móvel, a opções mais caras, como os óculos de RA, os quais possuem visores semitransparentes, acoplados a uma câmera 3D para a projeção da imagem virtual [25].

Além disso, considerada um dos pilares da 4ª Revolução Industrial (mais conhecida como Indústria 4.0, caracterizada principalmente pelo desenvolvimento tecnológico de ponta, ligado à internet), a RA pode contribuir no aumento da produtividade, redução de custos, diminuição do tempo de manutenção e inspeção, aprimoramento da segurança e ajuda no controle e tomada de decisões rápidas, eficientes e bem qualificadas. Sistemas baseados em RA podem suportar uma variedade de serviços, como, por exemplo, enviar instruções de reparos através de dispositivos móveis ou selecionar peças em um armazém, reduzindo gastos com deslocamentos e evitando que retrabalhos de manutenção precisem ser feitos por interpretações erradas [26]. Portanto, na última década, diversos setores foram beneficiados com o desenvolvimento de suas aplicações, tais como o industrial, o educacional [27], o arquitetônico [28], o médico [29] e o civil [30].

No setor industrial, novas interfaces homem-máquina (IHM) podem ser criadas a partir de RA, na supervisão da fabricação de ativos, exibindo KPIs (*Key Performance Indicator*) e informações sobre os processos de fabricação em tempo real, de forma a melhorar a tomada de decisões [31]. Essa aplicabilidade permite a disponibilização de novas informações sobre o processo de fabricação, sem a necessidade da instalação de uma nova tela física de IHM.

No contexto de sistemas fotovoltaicos, identificando a potencial utilização das fachadas laterais de prédios urbanos, uma solução de RA móvel foi desenvolvida para simular e observar a incidência solar por meio de inspeção direta no local de possível instalação. Tal aplicação permitiu o auxílio no planejamento da instalação dos painéis, ajudando a esclarecer a viabilidade técnica e o retorno financeiro no projeto [32]. Além disso, [33] aplicou RA como solução para manutenção remota de sistema de bombeamento, abastecido por uma usina fotovoltaica, minimizando custos de manutenção, riscos de acidente e tempos de manutenção. Essa aplicação tinha por objetivo guiar remotamente trabalhadores locais, durante uma necessidade de intervenção no sistema. O sistema de colaboração desenvolvido permitia a colaboração direta de especialistas remotamente alocados, em conjunto com a transferência de informações via objetos virtuais.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Neste capítulo são apresentadas as etapas adotadas para a construção de um protótipo de aplicativo de realidade aumentada para o posicionamento de inversores fotovoltaicos.

O desenvolvimento do protótipo de aplicativo baseia-se na verificação de aplicabilidade real no mercado de projetos de engenharia, no setor de energia solar. Para tanto, é necessário definir os requisitos mínimos de funcionalidades, realizar modelagem paramétrica dos equipamentos elétricos, integrar os objetos modelados com *softwares* de realidade aumentada e realizar com usuários reais a validação do protótipo de aplicativo (Figura 5).

Figura 5 - Etapas de desenvolvimento.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Aplicabilidade no mercado

Durante experiência profissional como analista de dados em uma empresa de energia solar da capital do Recife/PE, que utiliza metodologia BIM para elaboração dos seus projetos, pôde-se observar na prática a problemática de retrabalhos e atrasos na implantação ou elaboração de projetos de sistemas fotovoltaicos, devido às solicitações de mudanças de local de instalação do inversor fotovoltaico. Com base em mapeamento de informações de retrabalhos de projetos executivos fotovoltaicos, destaca-se que dentre 12% de retrabalhos de projetos, 4% têm como causa raiz o erro de informações advindas da vistoria ou solicitações do cliente, para o local de instalação de inversores.

Logo, percebe-se que com exceção da mudança devido à solicitação do cliente, erros de vistoria, como informações advindas de croqui e/ou medições *in loco*, podem ser previamente eliminados com a utilização de métodos mais assertivos, além de reduzir retrabalhos e, principalmente, gerar economia de custos. Visto que, qualquer alteração do local pré-definido em vistoria técnica inicial, acarretará material adicional, deslocamento de equipe, paralisação das atividades em campo, fretagem para nova compra e envio de materiais, atualização do projeto e outros, que resultam em custos adicionais.

Nesta empresa, as informações captadas pelo vistoriador são direcionadas ao setor de projetos de engenharia, mediante croqui, formulário, vídeos e fotografias, os quais por vezes não possuíam informações coerentes e não mostravam o ambiente de forma clara para o projetista, dificultando o reconhecimento das informações e dando margem à más interpretações. Para facilitar este processo, um dos vistoriadores realiza edições de imagens, de forma amadora, em seu dispositivo móvel, a fim de auxiliar a equipe de projetos de engenharia e ilustrar o local do inversor e seus demais equipamentos de forma assertiva, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Registro do vistoriador.



Fonte: Acervo da empresa de energia solar.

Dada às edições e registros do vistoriador, percebe-se a possibilidade de otimizar o processo e minimizar erros aplicando técnicas RA. Juntamente com a expertise na modelagem de equipamentos paramétricos e utilização do 3D dos elementos, uma ferramenta de RA pode ser utilizada já na etapa inicial de vistoria técnica, possibilitando um registro fidedigno das dimensões do local a ser instalado o inversor fotovoltaico, e respeitando as especificações técnicas do equipamento.

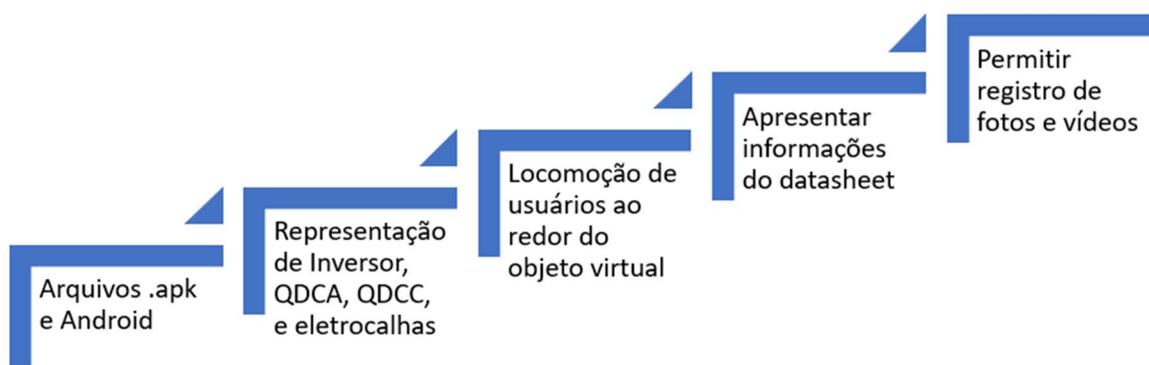
3.2 Definição do Protótipo de Aplicativo, Softwares e Hardware

Dada a oportunidade da construção de uma ferramenta de RA para aplicação no contexto solar, prevê-se um protótipo de aplicativo capaz de:

1. Ser simulado e executado em celulares Android, a partir de arquivo no formato *.apk*;

2. Representar de forma fiel o arranjo físico do sistema de conversão de corrente, composto por inversor, QDCA, QDCC e eletrocalhas;
3. Permitir a locomoção do usuário ao redor do local onde os objetos virtuais estarão posicionados, utilizando uma perspectiva de câmera em primeira pessoa;
4. Fornecer informações de cotas de distanciamento dos equipamentos em relação ao inversor, garantindo orientações do manual do usuário;
5. Permitir registros de fotos e vídeos a serem utilizados como evidências no desenvolvimento do projeto.

Figura 7 - Requisitos do protótipo de aplicativo.



Fonte: Autoria própria.

Com os requisitos definidos, conforme itens citados e Figura 7, segue-se para a etapa da definição dos *softwares* utilizados no desenvolvimento do protótipo.

Para o desenvolvimento dos equipamentos elétricos, seguindo todos os conceitos já apresentados da metodologia BIM, opta-se pelo uso do Revit 2023. O Revit é um *software* de projeto BIM, utilizado para o desenvolvimento de projetos de arquitetura e engenharia. Dentro de seu ambiente é possível criar objetos baseados em modelagem paramétrica, carregando seus modelos de informações [34].

Como plataforma de criação para a aplicação de RA, utilizar-se-á a Unity. Ela é uma plataforma líder mundial para criar e operar conteúdo 3D interativo em tempo

real. Desenvolvedores de jogos, artistas, arquitetos, designers automotivos, cineastas e outros usam o Unity para construir soluções inovadoras [35]. Essa plataforma permite, de forma nativa, a exportação de arquivos de modelos do Revit para ser utilizados nos desenvolvimentos de suas aplicações gráficas, facilitando o processo de integração entre os dois sistemas.

O *hardware* contará com um dispositivo móvel para o uso da aplicação, utilizando-se de um *Galaxy S10e*, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Samsung Galaxy S10e.



Fonte: Autoria própria.

O Galaxy S10e possui as seguintes configurações básicas:

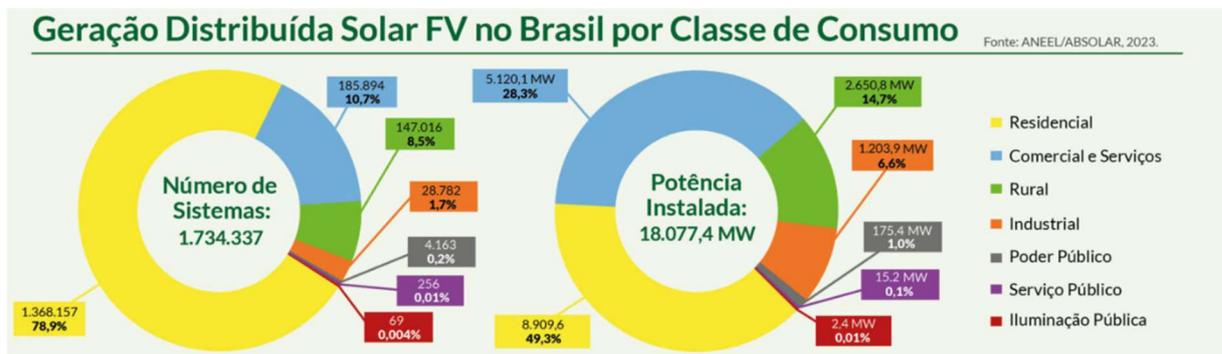
1. Android versão 12;
2. Capacidade da bateria 3100 mAh;
3. Armazenamento 128 GB;
4. Memória RAM 6 GB.

3.3 Desenvolvimento do Protótipo de Aplicativo

Considerando as funcionalidades descritas na seção 3.2, a primeira etapa consiste em definir o inversor e o *layout* de instalação que será utilizado como base para modelagens dos equipamentos.

O *layout* de instalação deverá considerar clientes residenciais, por representarem uma parcela suficientemente significativa na matriz de Geração Distribuída Solar do Brasil, sendo aproximadamente de 80% do número de sistemas instalados, como pode ser evidenciado na Figura 9.

Figura 9 - GD Solar no Brasil por Classe de Consumo.



Fonte: [36].

O modelo de inversor fotovoltaico selecionado é o CSI-(4-5) KTL1P-GI, apresentado na Figura 10, da CanadianSolar, devido ao fácil acesso a suas informações em datasheet, disponíveis no site do fabricante [37], além de ser utilizado em *layouts* residenciais.

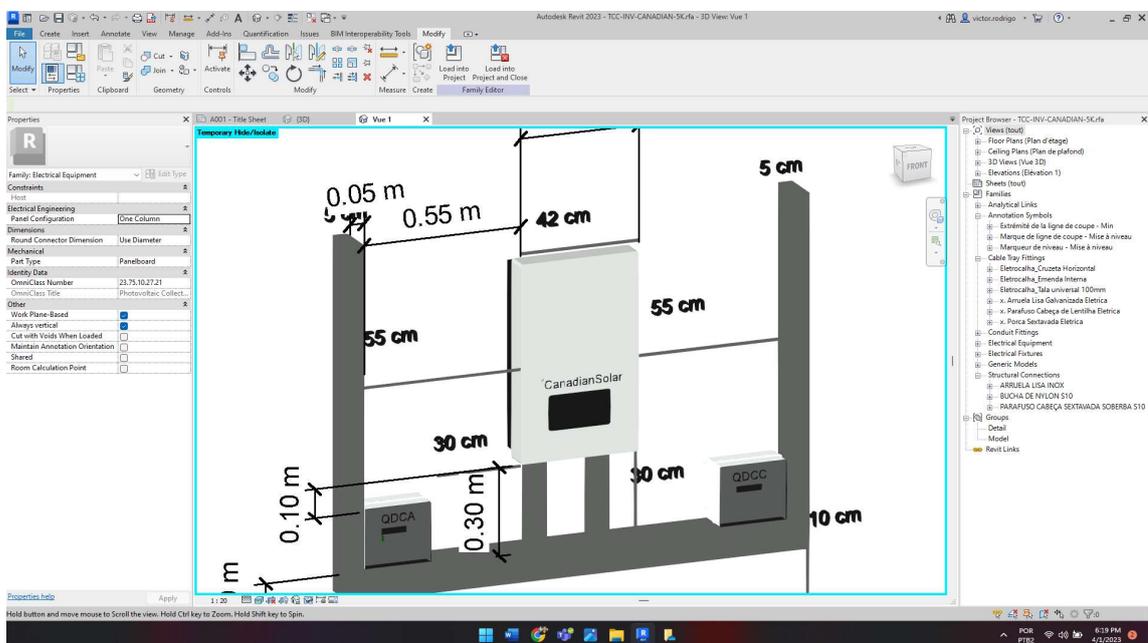
Figura 10 - Inversor fotovoltaico CanadianSolar 5kWp



Fonte: [37]

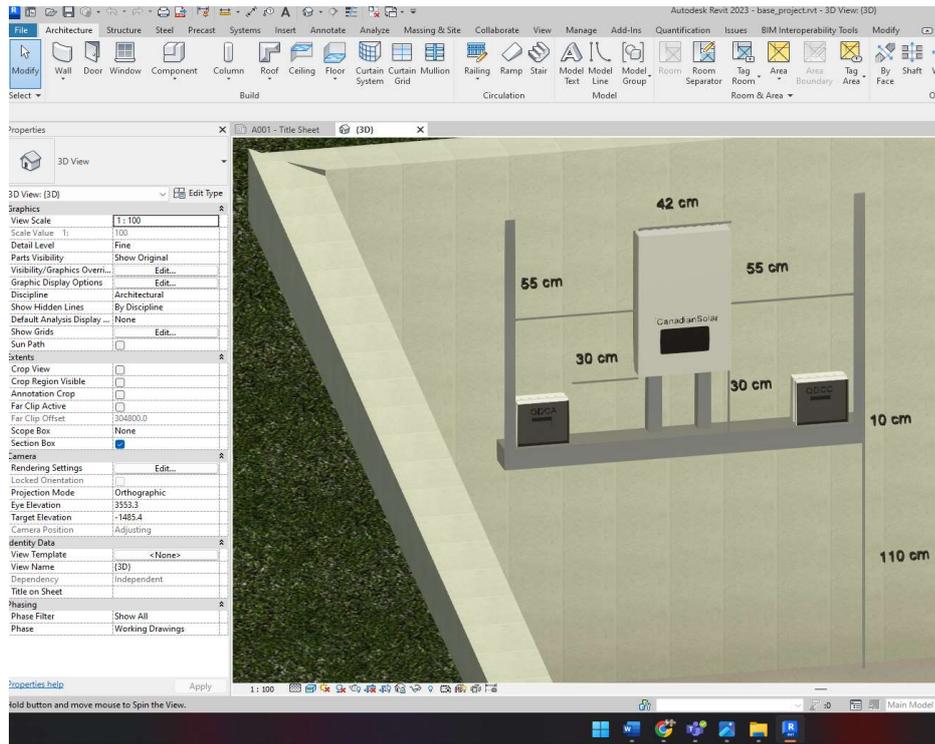
A partir do *software* Revit realiza-se o desenvolvimento da família paramétrica e os testes em um projeto de exemplo, observando a responsividade do objeto modelado. As Figura 11, 12 e 13 apresentam as etapas de desenvolvimento e testes em projetos de exemplo, respectivamente.

Figura 11 - Desenvolvimento de família paramétrica.



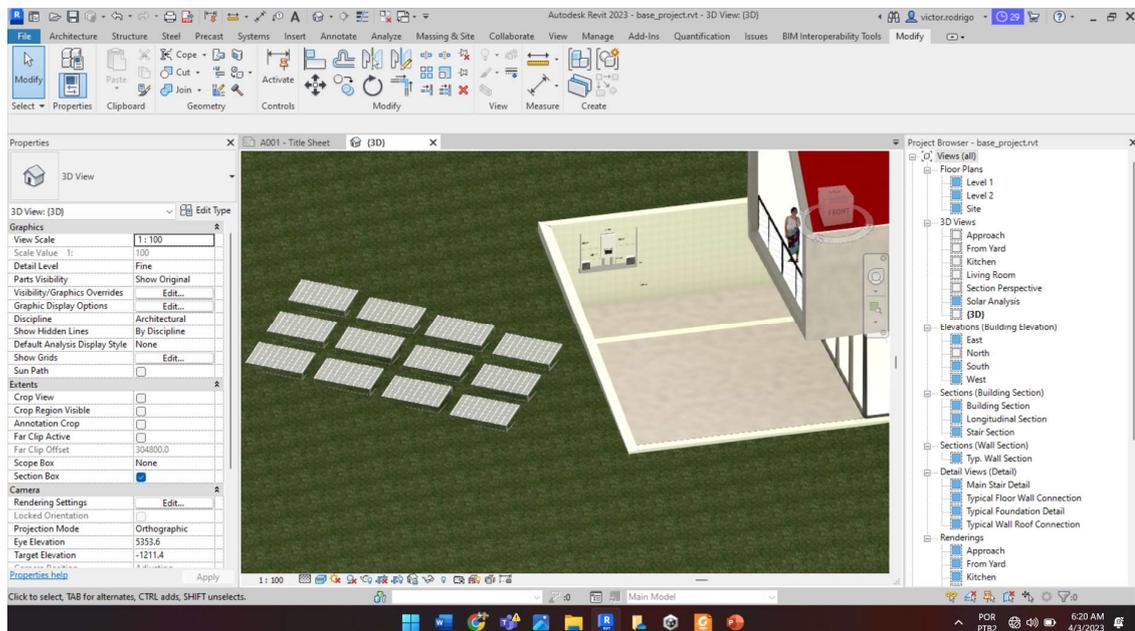
Fonte: Autoria própria.

Figura 12 - Testes da família dentro de um projeto 3D.



Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Usina fotovoltaica e visualização 3D.



Fonte: Autoria própria.

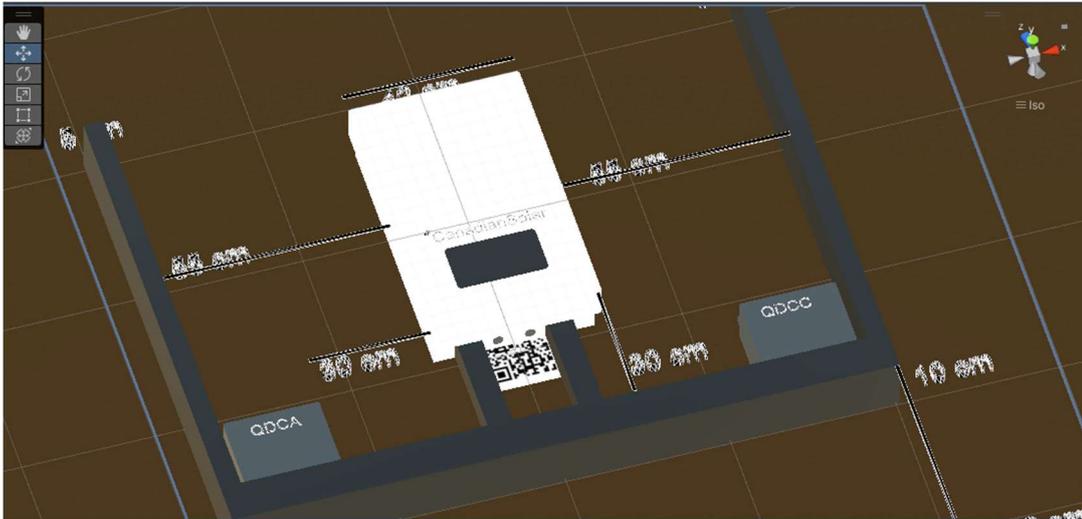
Com os equipamentos modelados, a próxima etapa consiste na configuração do ambiente de RA na Unity. As aplicações de RA podem ser classificadas em duas categorias: '*marker based*' e '*markerless*'. A primeira usa um *target*, um objeto de referência, e a segunda utiliza métodos e técnicas de localização para criar um elo do mundo virtual com o real [38].

No desenvolvimento do protótipo de estudo, o uso do *marker based* torna-se uma boa opção, por sua simplicidade na manipulação do *target* e fácil manipulação de escalas dos objetos utilizados, permitindo boa precisão de medidas.

Para a construção do aplicativo de realidade aumentada utiliza-se a plataforma Vuforia integrada ao Unity 3D. O Vuforia é um conjunto de desenvolvimento de *software* (SDK) que quando associado ao Unity se torna uma ferramenta eficaz para o desenvolvimento de RA. Essa integração resulta em diversas vantagens, dentre elas a possibilidade de um único desenvolvimento para o uso do protótipo em diversas plataformas, como Windows, MacOS, Linux, Android e IOS, com preservação da qualidade visual e performance [39]. Além disso, possui uma rede de suporte a desenvolvimento ampla, difundida, ao qual pode-se tirar dúvidas de itens específicos com outros programadores e entusiastas, contribuindo de maneira significativa no desenvolvimento desse estudo.

Dentro da Unity, o primeiro passo para o desenvolvimento da aplicação em RA é a definição de qual tipo de *target* seria utilizado como referência do objeto criado. Por questões de simplicidade e devido ao amplo uso nos mais diversos contextos, um código de *QR* é utilizado como objeto de referência. O código *QR* é armazenado no banco de dados de imagens do Vuforia e integrado na plataforma da Unity. Com estes passos realizados, os equipamentos modelados no Revit poderão ser importados para dentro do ambiente da Unity e vinculados ao *target*, conforme Figura 14.

Figura 14 - Equipamentos elétricos importados na Unity.



Fonte: Autoria própria

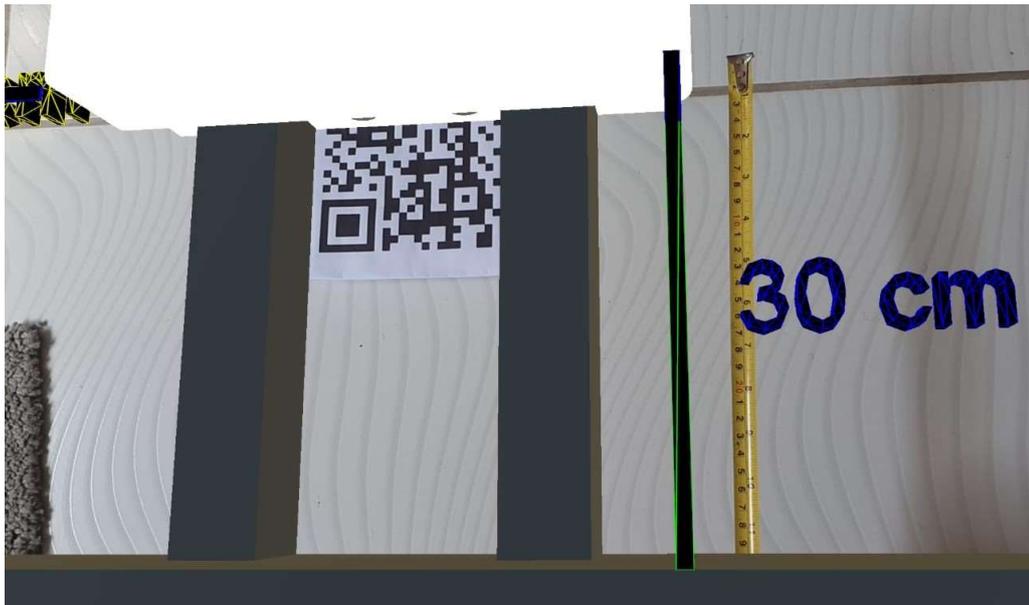
Com o equipamento já no novo ambiente, é realizado o ajuste do modelo com alterações de cores e de escala, buscando uma validação em representação no espaço real dos objetos virtuais. Os primeiros testes são realizados pelo próprio autor do trabalho, por meio de medições das distâncias apresentadas na cena e fazendo a verificação dos critérios levantados na seção 3.2, validando uma aplicação com as funcionalidades mínimas para serem realizados testes com outros usuários, como observado nas Figura 15 e Figura 16.

Figura 15 - Primeiro teste de RA.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Validação das distâncias dos equipamentos.



Fonte: Autoria própria.

Confirmado que o protótipo atende aos requisitos mínimos, avança-se para a definição de quais métricas de usabilidade serão avaliadas pelos usuários que testem a aplicação.

3.4 Validação do Protótipo de Aplicativo

A etapa de validação tem como objetivo mapear a familiaridade dos usuários com *softwares* de RA, verificar usabilidade e a qualidade das informações apresentadas dentro do protótipo do aplicativo.

Para a avaliação do protótipo desenvolvido são utilizados:

- i. Questionário de pré-uso;
- ii. Documento com roteiro de uso;
- iii. Questionário de pós-uso.

A etapa de validação inicia com o preenchimento do questionário pré-uso, disponibilização do roteiro de uso pelo orientador do trabalho e preenchimento do questionário de pós-uso, avaliando a usabilidade do aplicativo.

As métricas de validação utilizadas são:

- i. Tempo para finalização das etapas no documento de roteiro de uso;
- ii. O nível da qualidade da informação dos objetos virtuais, coletado pelo formulário de pós-uso;
- iii. A simplicidade de usabilidade do protótipo de aplicativo, também coletado pelo formulário de pós-uso.

3.4.1 Materiais e Usuários

O material utilizado para realização da validação é:

- i. Celular Android com as configurações descritas na seção de Definição do Protótipo de Aplicativo, Softwares e Hardware;
- ii. *QR Code* com dimensões 14 cm x 14 cm;
- iii. Local com paredes lisas e ambientes bem iluminados.

Em relação ao usuário, o pré-requisito para a seleção é que estes devam ser estudante ou profissionais da área de energia solar, com experiência no dimensionamento e elaboração de projetos e/ou vivência de instalação em campo. Para tanto, foram selecionados sete usuários que se encaixavam nas apresentadas.

3.4.2 Questionário Pré-uso

Desenvolvido por meio da plataforma da *google forms*, nessa primeira coleta de informações, os usuários informarão dados pessoais, como:

- i. Nome completo;
- ii. Data de nascimento;
- iii. Email;
- iv. Formação;
- v. Tempo de experiência no setor solar em anos.

Além das informações pessoais, faz-se necessário responder três perguntas subjetivas, sendo elas:

- i. “Sabendo que o trabalho é uma aplicação de realidade aumentada focado em vistorias técnicas no setor solar, você teria alguma sugestão para solução deste tipo de problemática? Alguma metodologia ou ideia de aplicação que pudesse auxiliar?”;
- ii. “Qual a metodologia que você utiliza para o planejamento de posicionamento do inversor e o sistema de proteção?”;
- iii. “Você já interagiu com algum *software* que auxiliasse nesse tipo de inspeção? Se sim, qual?”.

Na primeira pergunta dentre as subjetivas, o usuário ainda não estará ciente de qual era protótipo a ser testado, nem quais elementos foram virtualizados. A informação disponível é apenas o contexto da própria pergunta, falando de uma aplicação de RA aplicada a vistorias técnicas.

As questões subjetivas têm como objetivo, instigar e perceber se a possibilidade de aplicação e objetivo da ferramenta de RA, objeto desse trabalho, já é perceptível aos usuários, assim como, entender quais as principais orientações para o planejamento de instalação do inversor e sistema de proteção, e rastrear alguma interação prévia com outro software de RA.

3.4.3 Roteiro de Uso

Este documento será disponibilizado em formato de PDF para todos os usuários que realizarão os testes, explicando objetivamente qual o problema a ser resolvido, bem como a solução proposta, a utilização de técnicas de RA. Além da contextualização, é explicado o passo a passo da utilização do protótipo, a fim de que o usuário experimente todas as funcionalidades disponíveis.

Em sumo, o passo a passo consiste em:

- i. Posicionar o *QR Code* no local de instalação do inversor fotovoltaico;
- ii. Com o celular em mãos, posicionar-se em frente ao target;

- iii. Abrir o aplicativo e apontar a câmera para o target;
- iv. Inspecionar o inversor fotovoltaico;
- v. Inspecionar as eletrocalhas;
- vi. Inspecionar as proteções CA e CC;
- vii. Validar as distâncias entre os equipamentos com o auxílio do orientador da pesquisa, que utilizará uma fita métrica.

3.4.4 Questionário Pós-uso

Para avaliação do protótipo pós realização do teste é utilizado o *Post-Study System Usability Questionnaire* (PSSUQ), ou Questionário de Usabilidade de Sistemas Pós-Estudo. Esse instrumento avalia a satisfação percebida pelo usuário, quantificando, qualificando e justificando os dados coletados [40]. Assim, o questionário possuirá 12 questões sobre a usabilidade da aplicação, onde cada pergunta utiliza uma escala de 1 a 7, onde 1 e 7 correspondem a “concordo totalmente” e “discordo totalmente”, respectivamente. Esse tipo de escala é conhecido como *Likert*, sendo utilizada para medir percepções e opiniões de usuários, combinando conceitos de estatística e psicologia [41], sendo comumente aplicada nas avaliações de satisfação de *softwares*.

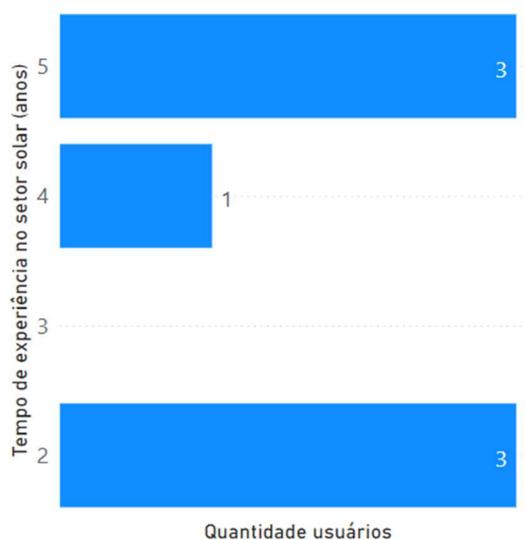
Além das 12 questões apresentadas, o questionário pós-uso terá de uma última pergunta em aberto, descrita como “Que sugestões ou aplicações adicionais você consegue enxergar após o uso da aplicação?”, onde tenta-se capturar as novas visões alcançadas pelos usuários, observadas as potencialidades das aplicações de RA.

Com isso, foi possível analisar as respostas e sugestões dos participantes, para identificação de melhorias no protótipo e novas aplicabilidades.

3.5 Análise dos resultados

Aplicando-se a metodologia de avaliação nos usuários selecionados, percebe-se que todos atenderam os pré-requisitos estabelecidos, conforme observado nas Figura 17 e Figura 18.

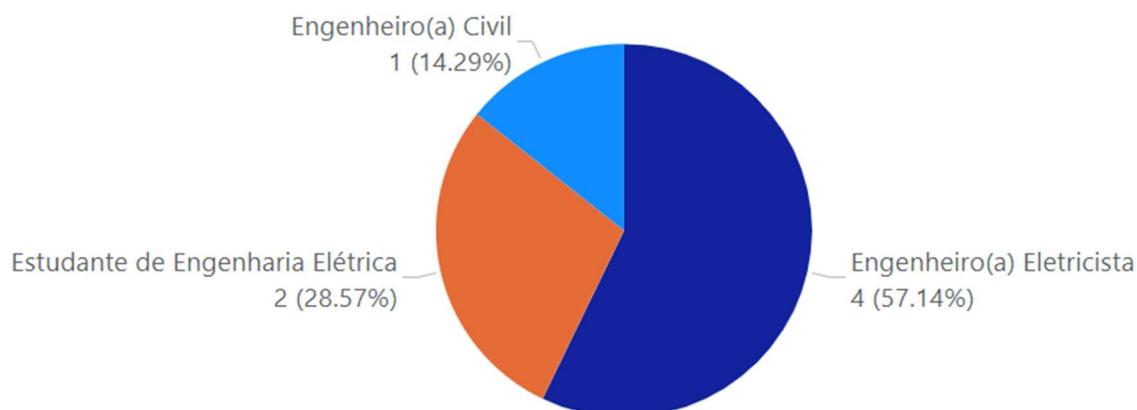
Figura 17 - Experiência dos usuários no setor solar.



Fonte: Autoria própria.

A amostra de usuários do protótipo foi composta por sete pessoas, sendo quatro do sexo masculino e três do sexo feminino. Dentre os selecionados, o tempo médio de experiência no setor solar foi de 3,57 anos (desvio padrão = 1,51). Referente ao perfil acadêmico, quatro são engenheiros eletricitas, dois são estudantes de engenharia elétrica e um é engenheiro civil, de acordo com a Figura 18. Os participantes tinham entre 24 e 32 anos, com uma idade média de aproximadamente 27 anos (desvio padrão = 2,77).

Figura 18 - Perfil acadêmico dos usuários do protótipo.



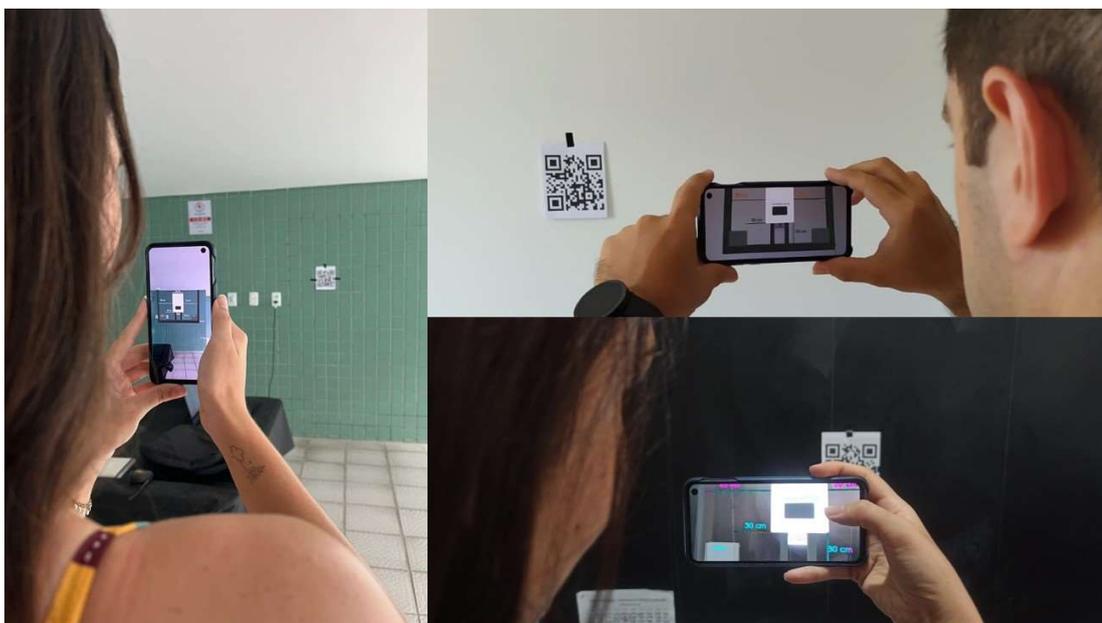
Fonte: Autoria própria.

Quanto as perguntas subjetivas do formulário de pré-uso, tem-se que:

- i. Três dos sete usuários responderam a possibilidade de utilização de RA na verificação do espaçamento real disponibilizado para inversores e módulos;
- ii. Majoritariamente, informaram que fazem uso do croqui e manuais de instalação do fabricante, como metodologia de posicionamento dos equipamentos;
- iii. Nenhum dos participantes apontou outra ferramenta auxiliar para esse tipo de inspeção, como o uso de algum software.

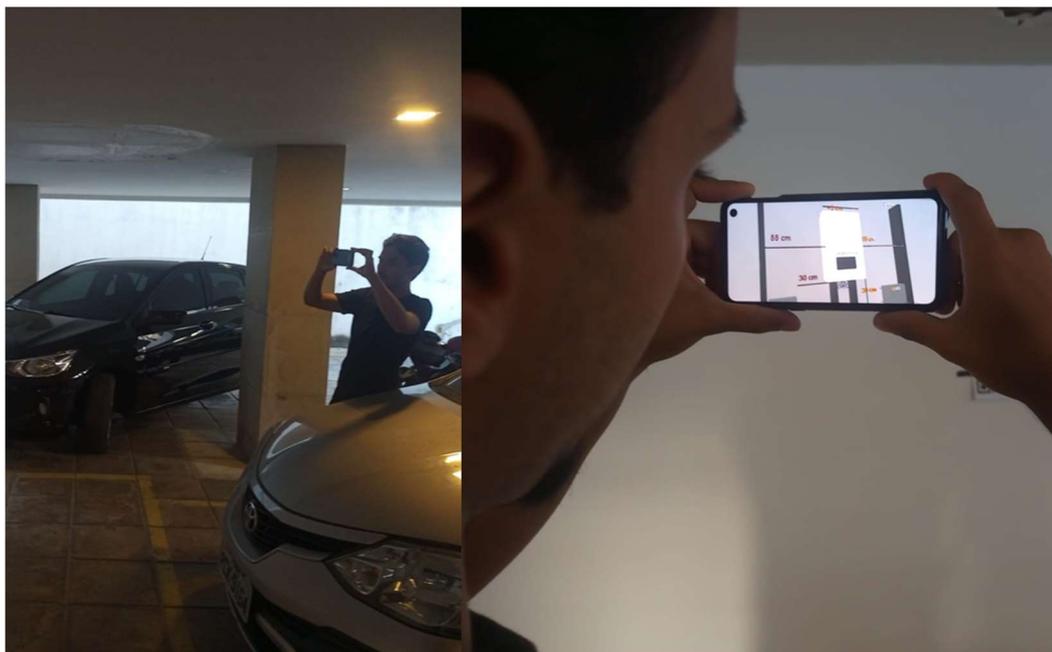
As sessões de testes com o roteiro de uso foram realizadas em residências e áreas comuns de condomínios, de acordo com a disponibilidade de supostos locais de instalação nas moradias dos usuários. Desta forma, foi possível reproduzir cenários e situações reais de avaliação dos espaços disponíveis, possibilitando uma pré-visualização do sistema a ser instalado, conforme Figura 19 e Figura 20.

Figura 19 - Teste em área comum de condomínio e residências.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - Área de garagem condominial e detalhes do inversor.



Fonte: Autoria própria.

Conforme última etapa indicada no roteiro de uso, foi realizada auditoria das medidas apresentadas virtualmente com as reais, por meio de uma trena de medição, trazendo confiabilidade aos usuários do protótipo, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 - Validação dos distanciamentos por meio de trena de medição.



Fonte: Autoria própria

Os objetos virtuais apresentam oito cotas virtuais, e para cada usuário do teste, cada cota foi verificada com o auxílio da trena. Com o conjunto de sete usuários, realizando 8 medições por participante, a amostra total foi de 56 medições realizadas ao fim do processo. De acordo com inspeção visual das fotos obtidas, foi observado um erro de aproximadamente 0,5 cm. A Figura 22 reforça o processo comentado.

Figura 22 - Processo de validação de todas as cotas do objeto virtual



Fonte: Autoria própria

Durante o uso do aplicativo, acompanhou-se o tempo de finalização dos passos descritos no roteiro de uso. O tempo dos testes variou entre 4 e 5 minutos, aproximadamente, com uma duração média de 4 minutos e 19 segundos (desvio padrão de 14,89 segundos) por usuário. O registro foi realizado logo após a leitura do roteiro de uso, explicado na seção 3.4.3. Os tempos individuais podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempos individuais dos usuários de teste

Código	Tempo de uso da aplicação (min:seg)
Usuário 1	04:28
Usuário 2	04:36
Usuário 3	04:12
Usuário 4	04:40
Usuário 5	03:57
Usuário 6	04:17
Usuário 7	04:05

Fonte: Autoria própria.

Destaca-se que, conforme os tempos de uso, o protótipo de aplicativo além de trazer assertividade no processo de escolha do local do inversor, é um produto simples, por não requerer do usuário domínio técnico avançado ou treinamento intensivo, ou seja, a curva de aprendizado é baixa. É usual, visto que para sua utilização faz-se necessário materiais de fácil acesso e baixo custo. Possui um alto benefício, visto que o tempo dispendido para implantação e utilização do protótipo de aplicativo não impacta no tempo de inspeção, trazendo até mesmo celeridade ao trabalho.

Para o questionário de pós-uso do protótipo, a Tabela 2 apresenta o resumo dos dados coletados. Recordando, a escala de *Likert* comentada anteriormente, tem-se o valor 1 como “concordo totalmente” e 7 como “discordo totalmente”.

Tabela 2 - Médias do PSSUQ

Item	Descrição	Média	DP
1	Em geral, eu estou satisfeito em quão fácil foi utilizar o aplicativo.	1,00	0,00
2	Foi simples utilizar este aplicativo.	1,00	0,00
3	Consegui concluir as tarefas e cenários rapidamente usando este aplicativo.	1,00	0,00
4	Eu me senti confortável utilizando este aplicativo.	1,28	0,48
5	Foi fácil aprender a utilizar este aplicativo.	1,00	0,00
6	Acredito que poderia me tornar produtivo rapidamente usando este aplicativo.	1,28	0,48
7	O aplicativo deu mensagens de erro que me disseram claramente como resolver problemas.	5,00	2,38
8	Sempre que cometi um erro usando o aplicativo, consegui recuperar facilmente e rapidamente.	3,00	2,08
9	Os elementos 3D representam modelos de equipamentos reais de forma satisfatória.	1,00	0,00
10	As distâncias apresentadas no aplicativo são fiéis as representações reais.	1,14	0,37
11	Este aplicativo tem todas as funções e capacidades que eu esperava.	2,00	0,81
12	No geral, estou satisfeito com o aplicativo.	1,28	0,48
Classificações	Descrição	Média	DP
<i>SysUse</i>	Média dos itens 1-6	1,09	0,14
<i>InfoQual</i>	Média dos itens 7-11	2,42	1,64
Geral	Média dos itens 1-12	1,66	1,20

Fonte: Autoria própria.

O valor médio de Usabilidade do Sistema (*System Usage* ou *SysUse*) foi de 1,09, demonstrando que os usuários afirmaram que é fácil de utilizar o protótipo. Os participantes não tiveram dificuldade em entender como utilizar a ferramenta, por se tratar de uma integração simples de um aplicativo de dispositivo móvel com base em código QR.

Em um dos locais de área aberta, onde ocorreu a situação de forte ventania, foi necessário fixar o *target* nas quatro bordas, visto que a tremulação do papel causava alguns *bugs* de posicionamento dos equipamentos.

Dentre os itens de Qualidade da Informação (*Information Quality* ou *InfoQual*), pode-se observar que o item 7, avaliação de mensagens de erro, teve uma má avaliação pelos participantes, visto que, mesmo implementada uma mensagem de erro para quando o aplicativo perdesse a referência do objeto, orientando o usuário a se aproximar do *target* novamente, nos testes em campo, essa implementação

funcionou de forma parcial, aparecendo apenas para alguns usuários. Mesmo assim, os itens desta categoria tiveram uma boa avaliação no geral, principalmente na confirmação da qualidade da fidelidade dos equipamentos 3D e a validação das distâncias apresentadas em ambiente virtual.

Os dados coletados na pergunta em aberto do questionário de pós-uso, serão apresentados no tópico a seguir. propostas de continuidade a seguir.

3.5.1 Discussão de Resultados

Com base nas respostas da última pergunta do questionário de pós-uso, várias sugestões de melhoria e aplicabilidade em outros setores foram observadas e comentadas pelos participantes.

Dentro do contexto de vistorias técnicas iniciais em projetos solares, comentou-se sobre adicionar distâncias para cobertas nos casos em que existem indicações no *datasheet* dos equipamentos, uso de eletrodutos ao invés de eletrocalhas para subidas CA e CC, disponibilizar a escolha de diversos tipos de inversores, visto que os distanciamentos mudam de fabricante para fabricante, e adicionar opção de *layout* com telhado de proteção para instalação em áreas que ainda não possuem cobertura.

Na área de projetos arquitetônicos, o profissional poderá apresentar ou disponibilizar o projeto 3D ao seu cliente, permitindo que ele realize uma visualização prévia do seu projeto final na palma de sua mão, via dispositivo móvel. Ainda na arquitetura, na área de móveis planejados, o profissional de vendas pode apresentar diversas opções de instalação de móveis, permitindo ao cliente uma experiência mais imersiva sobre a sua instalação final e ornamentação com o ambiente disponível.

Para prefeituras, a implementação de aplicativos de RA pode ser de grande contribuição em projetos hidrossanitários. A identificação de encaminhamento de tubulações de esgoto, águas pluviais e sistemas de drenagem de via de acesso, são cenários de potencial uso, pois permitirá uma visão espacial poderosa para avaliações de manutenção e planejamento em ações de intervenção.

Por fim, em projetos residências simples, as técnicas de RA permitem ter em mãos todo o projeto 3D do sistema elétrico e hidrossanitário, podendo evitar canos

estourados devido ao uso de furadeiras em locais inadequados, ou obstrução dos fios elétricos pelo mesmo motivo.

No geral, a aplicação teve uma ótima avaliação de uso pelos participantes da pesquisa, tendo valor médio global em 1,66, conforme Tabela 2, confirmando a viabilidade de seu uso para a resolução de um problema real. Sendo assim, esta pesquisa construiu o protótipo proposto com sucesso, alcançando os objetivos desejados no cenário inicial.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de bacharelado apresentou os resultados do desenvolvimento de um protótipo de aplicativo de realidade aumentada, aplicado ao contexto de inspeção de locais de instalações de inversores fotovoltaicos.

O estudo foi motivado pela troca de experiência profissional do autor deste trabalho com equipes de vistoria técnicas de sistemas fotovoltaicos. A partir do registro enviado por uma equipe de campo, observou-se a oportunidade de implementar conceitos de modelagem paramétrica, seguindo metodologia BIM, em um contexto além do *software* de projeto, Revit. A partir disso, analisou-se os dados de retrabalho para a equipe de projetos de engenharia, onde foi evidenciado que 4% dentre os 12% de retrabalho era advindo de erros de medições *in loco* ou solicitações de cliente no momento da implantação do projeto. Tais erros, além de gerar a necessidade de atualização de projetos para a equipe de engenharia, acaba paralisando equipes de implantação, gerando atrasos e maiores custos, devido à necessidade de materiais extras para o novo local instalação do inversor.

Baseado nesta problemática o protótipo de aplicativo foi criado utilizando técnicas de realidade aumentada. Este teve como objetivo geral garantir um local apropriado e seguro para instalação de inversores fotovoltaicos, evitando condições de retrabalho e custos extras. Além disso, auxiliar a equipe técnica na escolha do local apropriado, proporcionar uma visualização prévia do ambiente de instalação ao cliente e reduzir os erros de inspeção técnica em projetos civis e elétricos, os quais foram alcançados, a partir de validação realizada com usuários de testes que possuíam experiência na área de energia solar.

Contudo, durante o processo de desenvolvimento da aplicação foram observadas algumas dificuldades que valem ser mencionadas, como:

- i. Dificuldade em encontrar artigos e trabalhos nacionais que envolvessem as temáticas destacadas. Aqui destaco a importância da familiaridade com a língua inglesa para melhor embasamento da pesquisa;
- ii. Processo de exportação de arquivos FBX do Revit para Unity. Poucos blogs e fóruns comentam sobre o tema, sendo necessário alto empenho

e autodidatismo para o processo de exploração da integração entre os dois softwares;

- iii. Ajustes de escala entre Revit e Unity. Apesar dos equipamentos modelados estarem em escala 1:1 no Revit, quando importados para Unity e realizado os testes em ambiente real, verificou-se que o objeto estava muito pequeno em relação ao ambiente. Para correção, foi necessário ampliar o objeto, utilizando escala 5:1 no ambiente da Unity;
- iv. Validação do protótipo. O questionário PSSUQ mostrou-se uma ferramenta poderosa para avaliação de usabilidade e qualidade das informações percebidas pelos usuários, todavia, foi necessário realizar algumas adaptações do questionário padrão, que originalmente possui 16 itens. As alterações foram realizadas de acordo com as funcionalidades disponibilizadas no protótipo de aplicativo.

Na etapa final, a validação dos resultados foi realizada por meio do uso do Questionário de Usabilidade de Sistema Pós-Estudo (PSSUQ), onde foi possível extrair dados sobre a qualidade das informações apresentadas pelos objetos virtuais e a usabilidade percebida pelos usuários durante o uso do protótipo de aplicativo, o qual evidenciou a viabilidade real do protótipo. Além disso, os materiais necessários e o tempo médio para realização do roteiro comprovam a aplicabilidade do protótipo, já que para sua utilização, os usuários precisaram de ferramentas de fácil acesso e realizaram o roteiro com uma média de 4 minutos e 19 segundos, apresentando uma baixa curva de aprendizado para usuários não treinados.

Com a eliminação de erros de medição advindos de vistorias técnicas prévias, consequentemente, subte-se que haverá uma redução dos custos extras que seriam necessários para posicionamento correto do inversor em outro local de instalação. No entanto, para se ter uma validação quantitativa dessas reduções faz-se necessário análises mais aprofundadas, que poderiam ser resultado da implantação do protótipo em campo. Contudo, tem-se como sugestões para trabalhos futuros:

- i. Aprimorar o protótipo, possibilitando a inserção de mais modelos de inversores para visualização de seus *layouts*;

- ii. Aplicar o protótipo em campo para aquisição de dados em maior escala, a fim de se obter informações de redução de custos extras;
- iii. Avaliar possibilidade de aplicar o protótipo em outras vertentes do setor elétrico, como na área de operação e manutenção dos sistemas fotovoltaicos;
- iv. Atrelado a evolução de projetos utilizando metodologia BIM, realizar inspeções da situação elétrica de empreendimentos, acompanhando a situação 3D em tempo real.

REFERÊNCIAS

1. ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Governo Federal, Ministério de Minas e Energia, 2002. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 15 Março 2022.
2. EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 16 Abril 2023.
3. PWC. Incentivos fiscais para energias renováveis na América do Sul. **PwC Brasil**, 2023. Disponível em: <<https://www.pwc.com.br/pt/estudos/servicos/assessoria-tributaria-societaria/2021/incentivos-fiscais-para-energias-renovaveis-na-america-do-sul.html>>. Acesso em: 16 Abril 2023.
4. ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa N 482. Governo Federal, Ministério de Minas e Energia**, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 15 Março 2023.
5. SILVA, R. M. Energia Solar no Brasil. **dos incentivos aos desafios**, 2015. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td166>>. Acesso em: 15 Março 2023.
6. TEGON, G. Canal Solar, 2022. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/energia-solar-cresce-para-ser-a-segunda-maior-fonte-do-brasil/>>. Acesso em: 15 Março 2023.
7. UFRGS. SAEPRO. **Diferenças entre CAD e BIM**, 2023. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/saepro/saepro-2/conheca-o-projeto/diferencas-entre-o-cad-tradicional-e-o-conceito-bim/>>. Acesso em: 18 Março 2023.
8. CHEBATT, T. F. **BIM: Evolução em projetos de construção e infraestrutura**, 2021. Disponível em: <<https://www.migalhas.com.br/depeso/345600/building-information-modeling--bim>>. Acesso em: 18 Março 2023.
9. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Lei de Licitações e Contratos Administrativos, 2021. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14133.htm>. Acesso em: 18 Março 2023.
10. PERASSO, V. BBC NEWS Brasil. **BBC NEWS Brasil**, 2016. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-37658309>>. Acesso em: 18 mar. 2023.
11. MICROSOFT. Dynamics. **Dynamics 365 Guides**, 2023. Disponível em: <<https://dynamics.microsoft.com/pt-br/mixed-reality/guides/what-is-augmented-reality-ar/>>. Acesso em: 18 mar. 2023.
12. NEOENERGIA. Neoenergia. **USO DE REALIDADE AUMENTADA PARA MANUTENÇÃO DE ATIVOS DE DISTRIBUIÇÃO**, 2020. Acesso em: 19 Março 2023.
13. MORATO, A. S. **A IMPORTÂNCIA DA VISTORIA CAUTELAR NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. UFMG. Belo Horizonte. 2015.
14. SIMÕES, M. C. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para alimentar um sistema de produção de hidrogênio eletrolítico**. UFCG. Campina Grande. 2017.
15. ABNT. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10899 - Energia solar fotovoltaica**. ABNT. Rio de Janeiro. 2013.

16. ESPOSITO, A. S.; FUCHS, P. G. **Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil**. BNDES. [S.l.], p. 113. 2013.
17. CRESESB-CEPEL. **Manual da Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL. Rio de Janeiro, p. 530. 2014.
18. LONGO SOLAR. Sistema Conectado à Rede, 2023. Disponível em: <<https://longosolar.com.br/como-funicona.php>>. Acesso em: 19 Março 2023.
19. SOLIS. **Inversor on-grid: Manual de Instalação e Operação**. Ningbo Ginlong Technologies. Zhejiang, p. 28. 2023.
20. REEVISA. Reevisa. **Energia Solar**, 2021. Disponível em: <<https://reevisa.com.br/post/string-box/#:~:text=String%20box%20%C3%A9%20uma%20caixa,contra%20descargas%20e%20surtos%20el%C3%A9tricos.>>. Acesso em: 25 Março 2023.
21. DNIT. Conceito BIM. **Ministério da Infraestrutura**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/bim-no-dnit/o-que-e-o-bim#:~:text=O%20BIM%20ou%20Modelagem%20da,cada%20aspecto%20do%20ativo%20constru%C3%ADdo.>>. Acesso em: 25 Março 2023.
22. PLANEJE ENGENHARIA E CONSULTORIA. Antecipar riscos e melhorar a produtividade na obra através da tecnologia BIM. **Clico de vida BIM**, 2023. Disponível em: <<http://planejeeng.com.br/como-antecipar-riscos-e-melhorar-a-produtividade-na-obra-atraves-da-utilizacao-da-tecnologia-bim/>>. Acesso em: 16 Abril 2023.
23. BIAGINI, C. **BIM STRATEGIES IN ARCHITECTURAL PROJECT MANAGEMENT**. DICeA - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze (I). Florença, p. 10. 2007.
24. AZUMA, R. T. A Survey of Augmented Reality. **Presence: Teleoperators and Virtual Environments**, Cambridge, 1 Agosto 1997. v. 6, n. 4, p. 355-385.
25. TECHTUDO. Quatro tecnologias de realidade aumentada mais curiosas do AT&T Shape. **TECHTUDO Realidade Virtual**, 2019. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/2019/06/quatro-tecnologias-de-realidade-aumentada-mais-curiosas-do-atandt-shape.ghtml>>. Acesso em: 16 Abril 2023.
26. BAHRIN, K. M. A. et al. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. **Jurnal teknologi**, v. 78, p. 6-13, 2016.
27. AKÇAYIR, M. et al. Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories. **Computer in Human Behavior**, 31 Dezembro 2015. 334-342.
28. ZHANG, X. et al. **Research on 3D architectural scenes**. University of Architecture and Technology. Shaanxi, China, p. 17. 2020.
29. LOPES, A. et al. A Natural Interaction VR Environment for Surgical Instrumentation Training. **Lecture Notes in Computer Science**, Recife, 11 Agosto 2017.
30. SCHIAVI, B. et al. BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in. **Automation in Construction**, 12 Novembro 2021. 21.

31. GORECKY, D. et al. **Human-machine-interaction in the industry 4.0 era**. 2014 12th IEEE international conference on industrial informatics (INDIN). [S.l.]: IEEE. 2014. p. 289-294.
32. CARMO, M. B. et al. **Augmented reality for support decision on solar radiation harnessing**. 2016 23rd Portuguese Meeting on Computer Graphics and Interaction (EPCGI). [S.l.]: IEEE. 2016. p. 1-8.
33. ZENATI, N. et al. **E-maintenance for photovoltaic power system in Algeria**. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). [S.l.]: IEEE. 2015. p. 2594-2599.
34. AMARAL, L. Arquiteto Leandro Amaral. **Revit: Tudo o que precisa saber**, 2021. Disponível em: <<https://arquitetoleandroamaral.com/revit/>>. Acesso em: 01 Abril 2023.
35. UNITY TECHNOLOGIES. Unity para Iniciantes. **CONCEITOS BÁSICOS DO UNITY**, 2023. Disponível em: <<https://unity.com/pt/learn/get-started>>. Acesso em: 01 Abril 2023.
36. ABSOLAR. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. **ABSOLAR**, 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 01 Abril 2023.
37. CANADIANSOLAR. Manual de Instalação. **CSI-(4-5)KTL1P-GI**, 2023. Disponível em: <<https://support.csisolar.com/hc/pt-br/articles/7115454657165-CSI-4-5-KTL1P-GI-Manual-de-Instala%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 01 Abril 2023.
38. HAJJIA, R. et al. INTEGRATION OF BIM AND MOBILE AUGMENTED. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Marrocos, 6 Outubro 2021. 131-138.
39. BERGAMASCHI, M. P. O Ensino Básico com o apoio das ferramentas Vuforia e Unity para incentivar os estudos e melhorar o aprendizado. **Revista Informática Aplicada**, 61-73 Junho 2020.
40. SAURO, J.; LEWIS, J. R. **Quantifying the User Experience**. 2ª. ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2016.
41. FRANKENTHAL, R. Mindminers. **Entenda a escala Likert e saiba como aplicá-la em sua pesquisa**, 2022. Disponível em: <<https://mindminers.com/blog/entenda-o-que-e-escala-likert/>>. Acesso em: 05 Abril 2023.
42. BIMDA. What is BIM. **Life cycle of a Interprise**, 2023. Disponível em: <<https://bimmda.com/en/what-is-bim>>. Acesso em: 25 Março 2023.