

Análise da inclusão de operadores na Indústria 4.0 por meio de instalações interativas virtuais: Caso de estudo em um carregamento de vagões na mineração

Paula Cintra Fernandes¹, Flávia P. C. Silvas², Bruno N. Coelho^{1,3}, Saul Delabrida^{1,3}

¹Programa de Pós-Graduação em Instrumentação,
Controle e Automação de Processos de Mineração,
Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale
– Ouro Preto, MG – Brasil

²Instituto Tecnológico Vale – Ouro Preto, MG – Brasil

³Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto, MG – Brasil

paula.cintra@aluno.ufop.edu.br

flavia.silvas@itv.org, {brunonazario, saul.delabrida}@ufop.edu.br

Resumo. *Introdução:* Evoluções industriais pautadas por tecnologias emergentes exigem novas interações em humano-computador. **Objetivo:** Este estudo investiga o uso de Realidade Virtual imersiva na construção de ambientes industriais acessíveis para pessoas com baixa visão. **Metodologia ou Etapas:** A partir de um caso real da indústria de mineração, foi desenvolvida uma simulação em 3D para avaliar a interação de usuários com e sem deficiência. Dezenas de participantes foram envolvidos na análise da carga de trabalho e do comportamento durante as tarefas. **Resultados:** Os resultados demonstram melhoria na carga de trabalho em layouts alternativos ao ambiente real, sugerindo que a customização por meio da virtualização tende a ser uma abordagem viável e inclusiva, contribuindo com reflexões para a área de IHC. **Palavras-Chave** Realidade virtual, Pessoa com deficiência, IHC, Inclusão na indústria, Pessoas com baixa visão.

1. Problema de Pesquisa

A crescente digitalização das operações industriais, impulsionada pelo paradigma da Indústria 4.0, tem transformado profundamente os espaços de trabalho, tornando-os mais automatizados, orientados por dados e tecnologicamente sofisticados [Silvestri et al. 2020]. Essa transformação, embora traga ganhos de eficiência e produtividade, também impõe novos desafios de acessibilidade e inclusão, especialmente para pessoas com deficiência. No Brasil, a legislação trabalhista prevê a obrigatoriedade de contratação de pessoas com deficiência por empresas de médio e grande porte. No entanto, cumprir a legislação não significa, necessariamente, oferecer condições de trabalho que garantam a plena inclusão desses profissionais.

No contexto industrial, muitos sistemas e processos ainda são projetados com base em pressupostos normativos sobre as capacidades humanas, ignorando a diversidade funcional dos trabalhadores [Borges and Longen 2019]. Isso é particularmente crítico para pessoas com deficiência visual, que frequentemente enfrentam barreiras

significativas ao operar interfaces dependentes de estímulos visuais e de interações complexas com múltiplos dispositivos, sendo em torno de 7 milhões de brasileiros de acordo com o IBGE [IBGE 2022].

Este trabalho parte da investigação de um cenário real em que pessoas com deficiência visual atuam na operação de carregamento de vagões. Trata-se de uma atividade crítica que exige tomada de decisão em tempo real, alta acuidade sensorial e interação contínua com diversos artefatos tecnológicos como computadores, sensores, rádios comunicadores e painéis de controle responsáveis pela abertura e fechamento de silos que abastecem os vagões. Essa complexidade técnica intensifica os desafios enfrentados pelos operadores, tornando o ambiente especialmente revelador para a análise de barreiras de acessibilidade e usabilidade em sistemas interativos.

Neste contexto, buscou-se confirmar ou refutar a seguinte hipótese: **a forma de interação contribuirá para uma diminuição na carga de trabalho do operador no processo de carregamento de vagões.** Para tanto, quatro sub-hipóteses foram definidas vislumbrando criar caminhos estratégicos para a hipótese supramencionada. Quais são:

H1: A alteração na distribuição dos equipamentos para mais perto do campo visual do operador resulta em diminuição da carga de trabalho para a realização da tarefa;

H2: A sinalização de comandos e avisos por estímulo da audição resulta em diminuição da carga de trabalho para a realização da tarefa;

H3: A alteração do campo visual e do sentido da audição juntos resulta em diminuição da carga de trabalho para a realização da tarefa;

H4: As alterações no ambiente resultam na redução da disparidade da carga de trabalho entre as PCD e as PsD.

Essa lacuna representa um desafio relevante para a área de Interação Humano-Computador (IHC), tanto do ponto de vista social[Neris et al. 2024] quanto técnico[Zaina et al. 2024]. A ausência de soluções que considerem a diversidade funcional não apenas compromete os princípios de acessibilidade e equidade, mas também limita o potencial das tecnologias digitais como agentes de transformação inclusiva no setor industrial.

1.1. Estudo de Caso Carregamento de Vagões

O estudo de caso foi conduzido em uma operação de carregamento de em Minas Gerais, com transporte realizado pela Estrada de Ferro Vitória a Minas até o Porto de Tubarão. O processo envolve o carregamento manual de composições de 86 vagões, executado por operadores em cabines que controlam silos verticais por meio de joysticks fato que afeta a rotina de trabalhadores na indústria de mineração [Lööw et al. 2019]. O controle do peso bruto dos vagões é feito com o apoio de duas balanças: uma próxima ao silo, para ajustes imediatos, e outra distante, utilizada para emissão de nota fiscal. O material, com granulometria entre 150 μm e 6000 μm , exige controle ambiental via aplicação de polímero protetor após a primeira pesagem, acompanhada por câmeras de vigilância.

A cabine concentra múltiplas tarefas sob responsabilidade de um único operador: controle do carregamento, supervisão de imagens, comunicação via rádio com a ferrovia e a usina, monitoramento de pesagens e níveis dos silos, além de acionamento do

sistema de limpeza de janelas, dificultado por restrições operacionais. A Figura 1 exibe os componentes na cabine de operação e a posição dos operadores. A operação enfrenta desafios como visibilidade limitada, além de uma possível sobrecarga cognitiva e ergonomia inadequada percebida em visita de campo realizada. Ademais, as pessoas operadoras precisam realizar esvaziamento de vagões em casos de excesso de peso ou transbordamento de minério.



Figura 1. Cadeira e componentes do controle de carregamento.

Fonte: Autor (2023).

2. Solução produzida

Para enfrentar os desafios de acessibilidade e inclusão de pessoas com deficiência visual em ambientes industriais complexos, esta pesquisa propôs uma solução composta por três frentes integradas: conceitual, metodológica e técnica.

No **plano conceitual**, a pesquisa fundamenta-se na perspectiva da Interação Humano-Computador centrada na diversidade funcional, defendendo que os sistemas interativos devem ser projetados considerando a pluralidade de capacidades humanas. O trabalho adota o princípio da acessibilidade como valor orientador do design de sistemas industriais, propondo que a inclusão de pessoas com deficiência não seja tratada como adaptação posterior, mas como um elemento central desde as fases iniciais de concepção.

No **plano metodológico**, o projeto adota o uso da Realidade Virtual (RV)[Milgram et al. 1995, Tori and Silva 2020] como ambiente de experimentação para o redesenho e avaliação de formas alternativas de interação. A RV é empregada como uma plataforma controlada e imersiva que permite simular, com fidelidade, um cenário operacional real no caso, o carregamento de minério em vagões em uma planta do setor de

mineração. Essa abordagem metodológica possibilita a prototipação rápida e iterativa de diferentes estratégias de interação, com segurança, sem riscos operacionais e com menor custo em comparação às intervenções diretas no ambiente físico.

No **plano técnico**, foi desenvolvida uma simulação em Realidade Virtual do processo de carregamento de vagões, modelando com alto grau de realismo os principais elementos do ambiente físico e de trabalho. Essa simulação inclui:

- A reprodução de tarefas como a abertura e fechamento de silos sobre os vagões;
- A visualização de câmeras em tempo real por meio de monitores virtuais;
- A consulta a painéis com dados operacionais;
- E o uso de comunicação por rádio com outros setores da operação.

A solução técnica incorporou diferentes canais sensoriais, explorando combinações de pistas auditivas, tátteis e espaciais com o objetivo de investigar alternativas à interação predominantemente visual. Isso permitiu simular como pessoas com deficiência visual poderiam desempenhar a atividade, adaptando a experiência interativa às suas necessidades e capacidades. Ao combinar essas três dimensões, conceitual, metodológica e técnica, a pesquisa oferece uma solução inovadora para repensar a interação humano-computador em contextos industriais, contribuindo para tornar os espaços de trabalho mais acessíveis, inclusivos e eficientes.

2.1. Ambiente Imersivo Construído

Para dar suporte à análise do processo de carregamento de vagões, foi desenvolvido um ambiente imersivo em realidade virtual com o objetivo de simular, de forma fiel, a cabine de operação utilizada no sistema real. Esse ambiente permitiu a experimentação controlada e segura de diferentes hipóteses de interação, sem a necessidade de modificar fisicamente o sistema em uso. A simulação foi criada na plataforma *Unity*, utilizando modelagem 3D de alta precisão no *software Inventor Autodesk* para os objetos não disponíveis nos repositórios gratuitos, como a cadeira de controle, rádios, monitores, vagões e elementos exclusivos da operação. Todo o ambiente foi desenvolvido respeitando proporções reais e características visuais específicas, como cores, texturas e disposição espacial, com foco em realismo e imersão.

A aplicação foi executada no dispositivo *Meta Quest 2*, um *headset* de realidade virtual autônomo, que também foi conectado ao *Unity* via cabo durante os testes para monitoramento de desempenho. A interação do usuário no ambiente virtual envolveu o uso de *joysticks*, botões, monitores virtuais e sistema de comunicação via rádio, reproduzindo os principais elementos do fluxo operacional. Também foram implementados *feedbacks* auditivos baseados em áudio falado, gerados com o *software Balabolka*, a fim de testar a eficácia de sinais sonoros em diferentes cenários de usabilidade.

Além da réplica da cabine real, foram construídos diferentes cenários experimentais, incluindo a visualização do pátio de carregamento, a manipulação dos silos e vagões e o teste de novos layouts de interface. A possibilidade de simular e modificar aspectos do ambiente de forma ágil e com alto grau de fidelidade tornou o uso da realidade virtual uma alternativa eficiente e de baixo custo frente à reconfiguração de ambientes físicos. A Figura 2 ilustra a perspectiva do operador ao ingressar no ambiente

virtual, onde estão dispostos os monitores de informações operacionais, os dois *joysticks* utilizados para controlar a abertura dos silos, o rádio destinado à comunicação sobre objetos contaminantes, além do sistema de carregamento de minério nos vagões.



Figura 2. Cabine de operação ambiente virtual.

Fonte: Autor (2024).

Um vídeo demonstrando a experiência e a usabilidade do sistema está disponível na plataforma *YouTube* por meio do link https://youtu.be/PguZ_ZCFijU?si=P_yPadNluXZSBNzY.

3. Método

A pesquisa foi estruturada em três fases principais, cada uma com objetivos específicos e complementares, visando investigar o impacto da forma de interação humano-computador na carga de trabalho de operadores com deficiência visual em ambientes industriais complexos. Figura 3 ilustra a delimitação realizada em paralelo com a revisão da literatura.

Fase 1 – Análise do caso real: A primeira etapa consistiu na observação e documentação do processo de carregamento de vagões em uma planta industrial de mineração, com foco nas tarefas realizadas por operadores em uma cabine de controle. Essa análise envolveu visitas técnicas, observações e diálogos com operadores e supervisores, coleta de registros audiovisuais e análise dos sistemas interativos utilizados. O objetivo foi mapear as atividades críticas, os artefatos tecnológicos envolvidos (como silos, câmeras, painéis e rádios), bem como os requisitos sensoriais e cognitivos exigidos para o desempenho da função. Essa etapa permitiu identificar os principais desafios de acessibilidade enfrentados por pessoas com deficiência visual nesse contexto específico.

Fase 2 – Desenvolvimento do ambiente virtual: Com base nas informações coletadas, foi desenvolvido um ambiente virtual tridimensional em Realidade Virtual, representando com fidelidade a cabine de operação e os equipamentos associados ao carregamento de vagões. A simulação incluiu modelos interativos dos principais dispositivos e tarefas do processo, organizados em quatro cenários distintos, cada um explorando diferentes estratégias de interação (ex.: com predominância de pistas visuais,

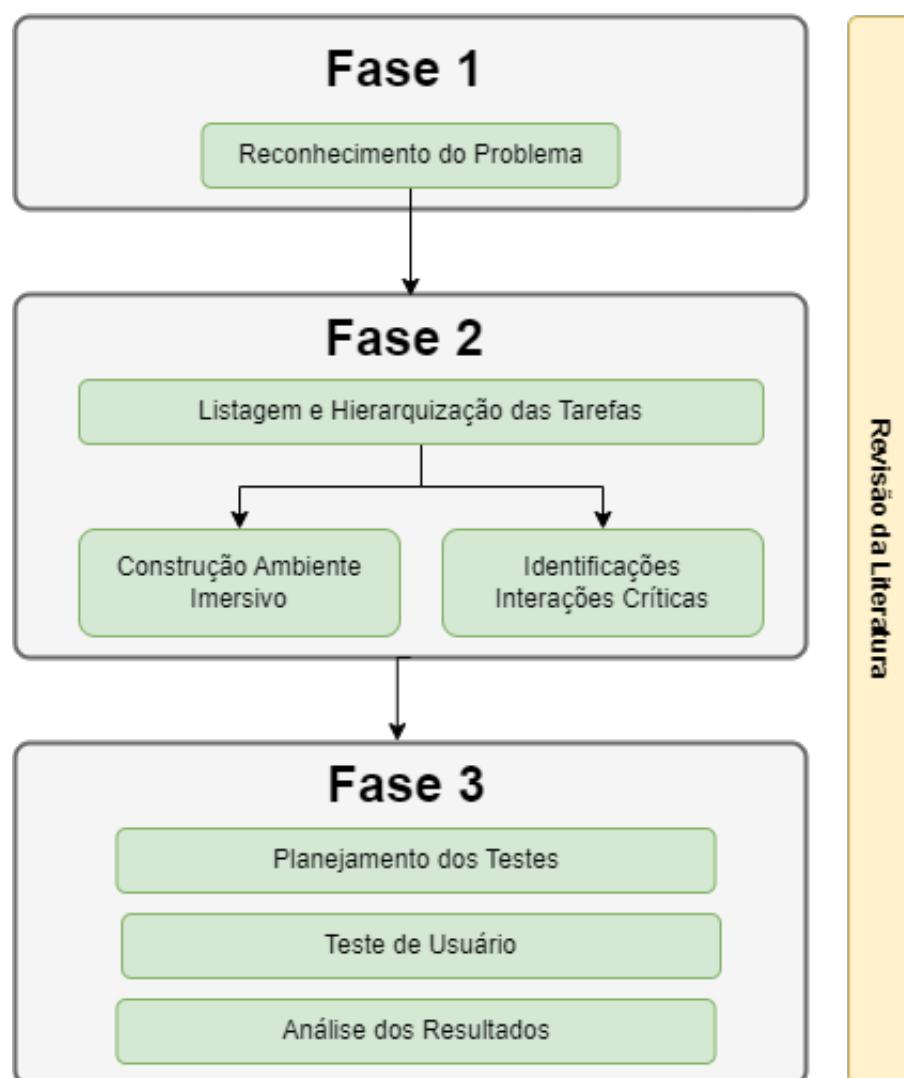


Figura 3. Metodologia do projeto.

Fonte: Autor (2023).

auditivas ou táteis). Essa fase envolveu também o design de interfaces acessíveis e o mapeamento de ações interativas para dispositivos de entrada compatíveis com RV.

Fase 3 – Experimentação com usuários: A etapa final consistiu na realização de experimentos controlados com participantes com e sem deficiência visual em laboratório. Os voluntários interagiram com os diferentes cenários virtuais, executando tarefas inspiradas na operação real. Durante a experimentação, foram coletadas medidas subjetivas e objetivas relacionadas à carga de trabalho (com uso da escala NASA-TLX), desempenho nas tarefas, tempo de execução, usabilidade percebida e experiência do usuário. A análise dos dados permitiu avaliar os efeitos das diferentes formas de interação sobre a acessibilidade, eficácia e esforço cognitivo demandado dos usuários.

A escolha da escala NASA-TLX se deu por sua capacidade de analisar a carga de trabalho de forma multidimensional e individualizada, permitindo capturar nuances na experiência dos participantes. Essa característica é particularmente importante neste estudo, uma vez que as pessoas com deficiência visual não formam um grupo homogêneo suas condições variam em grau e tipo (cegueira total, baixa visão, entre outras). A análise individual das dimensões da carga de trabalho (como esforço mental, físico, frustração e desempenho percebido) forneceu subsídios valiosos para identificar possíveis caminhos de personalização das interações e adaptações mais eficazes conforme o perfil de cada usuário.

Esse método híbrido, que combina investigação em campo, modelagem virtual e experimentação com usuários, está alinhado com abordagens na área de Interação Humano-Computador, promovendo a validação empírica de soluções e gerando evidências relevantes para o redesenho de sistemas interativos acessíveis.

3.1. Planejamento do design experimental

Com base nas hipóteses formuladas e na decomposição das atividades foi estruturado o planejamento do experimento com usuários. Essa etapa teve como objetivo definir as variáveis a serem manipuladas e observadas, de modo a permitir uma análise sistemática dos efeitos das diferentes formas de interação propostas no ambiente virtual. Seguindo a classificação apresentada por Koche [Köche 2016], foram identificadas duas categorias principais de variáveis:

Variáveis independentes: definidas pelo pesquisador e não influenciadas diretamente pelo comportamento dos participantes; **Variáveis dependentes:** resultantes das ações, percepções e experiências dos usuários durante a realização das tarefas. As variáveis independentes adotadas no experimento envolveram modificações nos tipos de *feedback* oferecido pelo sistema, especificamente nas dimensões auditiva e visual, com o objetivo de simular diferentes estratégias de acessibilidade no ambiente virtual. Já as variáveis dependentes contemplaram tanto medidas objetivas quanto subjetivas, incluindo: a identificação de objetos indesejados na linha de carregamento, o preenchimento adequado dos vagões, a operação correta dos silos, além das respostas relacionadas à experiência subjetiva e à carga de trabalho percebida.

Cabe destacar que o desenvolvimento dos cenários em realidade virtual foi realizado de forma iterativa e paralela à estruturação do experimento. Inicialmente, foi modelado apenas o cenário base, com representação fiel da operação real. Os demais cenários com variações de interface e interação foram concebidos posteriormente, com

base nas decisões tomadas durante o delineamento experimental. Esse planejamento integrado permitiu alinhar o design da simulação aos objetivos da pesquisa, garantindo que cada cenário contribuísse de forma controlada para a avaliação das hipóteses propostas.

Assim, foi delineado os cenários para desenvolvimento para trazer respostas quanto as hipóteses, variáveis e métodos. Os quatro cenários distintos estabelecidos foram:

- **Cena 1:** Interagir com o ambiente imersivo, telas sem alteração da disposição e sem sinalização sonora;
- **Cena 2:** Interagir com o ambiente imersivo, telas com alteração da disposição e sem sinalização sonora;
- **Cena 3:** Interagir com o ambiente imersivo, telas sem alteração da disposição e com sinalização sonora;
- **Cena 4:** Interagir com o ambiente imersivo, telas com alteração da disposição e com sinalização sonora.

A Tabela 1 traz a correlação entre as variáveis, métodos, cenários e hipóteses definidos.

Tabela 1. Correlações.

Variáveis Independentes	Valores	Variável Dependente	Método	Cenas	Hipótese
Disposição das Telas	Atual/Com Modificações			1 e 2	H1
Sinalização Sonora	Sem Efeito/Com Efeito			1 e 3	H2
Visão + Audição	Com Modificações / Com Efeito Sonoro			1 e 4	H3
-	-	Ações no Software Carga de Trabalho	Log das Ações NASA-TLX	1/2/3/4	H4

Fonte: Autor (2024).

3.2. Adequações do experimento para pessoas com deficiência visual

Para garantir a inclusão de pessoas com deficiência visual (PcD) no experimento, foram implementadas diversas adaptações ao longo do processo. No formulário inicial, incluiu-se uma pergunta de autoidentificação de deficiência visual e outra sobre o uso de lentes corretivas, respeitando a autonomia dos participantes. O uso do Google Formulários permitiu ajustes visuais individuais, como aumento de fonte e mudança de cores.

Durante o experimento, os participantes responderam a perguntas direcionadas no ambiente virtual sobre a percepção visual de objetos e distâncias. Para assegurar nitidez visual, foi incluído um teste de foco na cena de treinamento com a palavra “FOCO” em destaque. Alguns instrumentos de coleta, como o questionário NASA-TLX, foram adaptados com fontes ampliadas e opções de leitura ou narração. O Termo de Consentimento também foi impresso em fonte ampliada, com opção de leitura assistida. Ao final dos testes, os participantes utilizaram um esquema impresso da Cena 1 para fornecer *feedback* sobre os objetos e sugerir personalizações. Essa etapa, embora complementar, contribuiu com *insights* valiosos para o aprimoramento da acessibilidade e personalização de ambientes virtuais.

3.3. Execução do Experimento

O experimento foi conduzido com delineamento *within-subjects*, no qual cada participante realizou todas as quatro condições de teste em ordem randômica.

Participaram 16 voluntários, igualmente divididos entre pessoas com e sem deficiência visual.

O experimento seguiu cinco etapas principais:

1. **Iniciação:** Preenchimento de questionário sociodemográfico (Apêndice C) e explicação das tarefas;
2. **Introdução:** Configuração do equipamento e ambientação ao VR;
3. **Treinamento:** Cena prática sem registro de dados, incluindo simulação dos questionários;
4. **Testes:** Execução dos quatro cenários com coleta de dados, incluindo NASA-TLX ao final de cada um;
5. **Finalização:** Feedback dos participantes e sugestões com base na experiência.

As sessões duraram entre 1h30 e 2h, respeitando os limites de conforto para uso prolongado de realidade virtual.

4. Resultados e discussão

Esta seção apresenta a análise dos dados coletados, buscando validar as hipóteses propostas. A amostra contou com 16 participantes, balanceada entre pessoas com e sem deficiência, e entre gêneros, com média de idade de 29 anos. A análise estatística dos dados do NASA-TLX, via teste de Friedman, não indicou diferenças significativas entre os quatro cenários, embora as demandas temporal e mental tenham se aproximado do nível de significância, sugerindo que uma amostra maior poderia revelar efeitos.

Dada a natureza subjetiva da avaliação, adotou-se uma análise qualitativa complementar por meio de gráficos radiais, para identificar nuances na percepção de carga de trabalho e desempenho entre os cenários. Os resultados preliminares apontam para variações na experiência dos usuários relacionadas à combinação dos estímulos visuais e auditivos, com potencial impacto na usabilidade e acessibilidade dos ambientes de realidade virtual. Esta análise inicial serve de base para a discussão detalhada das hipóteses e suas implicações, que será apresentada nas próximas seções.

4.1. Hipótese 1

H1: A realocação dos equipamentos para mais perto do campo visual do operador, com monitores e TV em posição mais frontal e remoção da pilastra, reduz a carga de trabalho.

A comparação entre a Cena 1 (cenário realista) e a Cena 2 mostrou que a carga de trabalho diminuiu em aspectos físicos, temporais e de esforço, confirmando a hipótese. A demanda física diminuiu possivelmente pela menor necessidade de movimentar a cabeça para visualizar os equipamentos. No entanto, houve aumento nas demandas mental, desempenho e frustração. Analisando separadamente os grupos, pessoas sem deficiência apresentaram redução da carga geral, mas aumento na demanda de desempenho, possivelmente devido à expectativa de melhor performance.

Já pessoas com deficiência visual apresentaram aumento significativo na carga mental e frustração, mesmo com menor demanda física, sugerindo sobrecarga no campo visual devido à proximidade dos equipamentos. Dados adicionais indicam melhor aproveitamento da tarefa de remoção de objetos na Cena 2 (87,5%) em relação à Cena 1

(75%), embora parte das pessoas com deficiência visual tenha dificuldade para identificar objetos na tela, independentemente da posição. Assim, a Hipótese 1 é confirmada em termos de redução da carga física e esforço, mas ressalta-se que o aumento da carga mental e frustração em pessoas com deficiência visual e exige atenção no design para evitar sobrecarga visual.

4.2. Hipótese 2

H2: A sinalização de comandos e avisos por meio de estímulos auditivos resulta em uma diminuição da carga de trabalho para a realização de tarefas, como a identificação de objetos não desejados, a remoção de objetos, a avaliação da posição do vagão em relação à meta (abaixo, acima ou dentro da meta) e a detecção de quando o vagão entra e sai do silo.

A continuar com a análise da comparação das cenas da diferenciação da cena 1, com o objetivo de redução da demandas. As representações gráficas encontram-se no eixo com o maior valor em 168,13 e o menor valor em 10,31 conforme mostra a Figura 4. Apresentam-se os resultados que corroboram com a hipótese para as demandas mental, frustração, esforço, desempenho e temporal. A demanda física aumentou 12,19 pontos em relação à cena 1. Estimava-se que o físico não aumentasse, devido à substituição do monitoramento do objeto pela TV por sinalização sonora, evitando o giro da cabeça para observação. Porém, nos testes observou-se que os voluntários olhavam para a TV para confirmar a sinalização do áudio através da visão, o que pode ter afetado.

Ao observar o formato do gráfico da Figura 4 percebe-se que os valores das demandas da cena 3, embora com diminuição entre 10 e 20 pontos, manteve um equilíbrio entre as dimensões. A comparação entre os grupos apresenta que a demanda física elevada encontra-se no grupo PsD, correlacionando-se à investigação anterior e à necessidade de confirmar ações através da visão. No grupo PCD, as preferências de desempenho, temporal, físico e frustração não se alteraram entre as cenas, enquanto o esforço diminuiu 68 pontos e a demanda mental diminuiu 39 pontos. Esperava-se que a diminuição da carga ocorresse por parte do grupo PsD, devido ao estímulo por outros sentidos, corroborando com esta hipótese. O grupo PsD apresentou uma diminuição de 44,44 pontos em frustração e 20 pontos de melhoria no desempenho, enquanto as outras demandas permaneceram com a mesma preferência. A sinalização por áudios trouxe ganhos também como uma forma de retomar a atenção nas atividades, observado através de feedback dos voluntários.

A hipótese 2 corroborou-se com a diminuição das demandas no cenário 3. Observa-se que a demanda física, embora tenha apresentado um aumento, foi de um valor pequeno (18,33 pontos) comparado à escala de 0 a 500 pontos. Outro dado notável refere-se aos dados coletados na aplicação: na cena 3, os 30 objetos destinados à remoção e ao acionamento do rádio foram manipulados com sucesso. Assim, entende-se que isso não afeta significativamente a carga de trabalho do grupo. Considera-se o cenário 3 uma opção de cenário ideal, visto que as preferências das demandas estão equilibradas entre os grupos.

4.3. Hipótese 3

H3: A alteração na distribuição dos equipamentos para mais perto do campo visual e da sinalização de comandos e avisos por meio de estímulos auditivos resulta em diminuição

da carga de trabalho para a realização da tarefa

Para ilustrar as diferenças entre os cenários, começa-se com a comparação entre a Cena 1, que representa o cenário atual da operação, e a Cena 4. O objetivo principal é destacar a redução das demandas interativas. As representações gráficas encontram-se no eixo com o maior valor em 168,13 e o menor valor em 5,00, conforme 5. Observa-se que a cena 4 apresenta diminuição em todas as demandas, exceto no desempenho, em comparação com a Cena 1. Representou um aumento de 19,07 pontos. Em ressalva, as outras demandas tiveram diminuições entre valores de 61,88 a 14,69 pontos. Observa-se que a cena 4 foi a que obteve menor diminuição entre as demandas. Ao perceber a demanda de desempenho, investigou-se os outros dados coletados em relação aos logs das ações realizadas no ambiente virtual, presente na metodologia. A produtividade relaciona-se com a demanda de desempenho, pois era a atividade principal dos voluntários: carregar os vagões com minério, atingir o nível ideal de preenchimento e não desperdiçar minério no trilho ao carregar. Foram estabelecidas métricas baseadas em proporções reais, como carregar 295.000 partículas de simulação do minério, em vista da meta de carregamento de aproximadamente 88 toneladas por vagão.

Apresentam-se os resultados de produtividade em cada uma das cenas para o total de 16 usuários. Para tanto, calculou-se a meta total de carregamento para essa análise: 472 ($\times 10000$) partículas. Verificou-se que a cena 4 foi a que apresentou maior produtividade e, consequentemente, um melhor desempenho. Considerando que valores acima da meta representam massa de MFe desperdiçada no trilho e excedida no carregamento, percebe-se que a cena 1 em questão de desempenho fica defasada. A cena 2 e cena 3 apresentaram desperdício similar. A escala começa em 400 para facilitar a visualização dos valores aproximados.

Para a Cena 4, esperava-se a diminuição das demandas com a adição de dois sentidos na análise da carga de trabalho, como visualizado na maioria delas. Porém, ao analisar os resultados pelo NASA-TLX e pelo log do sistema para a relação de desempenho nas atividades da simulação, não sabe-se explicar por que a percepção do usuário diferiu-se do seu real desempenho e seu desempenho na aplicação. Com isso, analisou-se a comparação entre os grupos. A comparação mostra que os grupos PsD e PCD apresentam diminuição em todas as demandas, menos na demanda de desempenho, que aumentou para ambos, mais intensamente para o grupo PCD. A demanda de desempenho aumentou em torno de 10 pontos para uma escala entre 0 a 500 pontos, não impactando na carga como um todo.

A hipótese 3 foi corroborada pela diminuição das demandas no cenário 4, que é considerado um cenário ideal, observando-se a redução da carga de trabalho, bem como das atividades registradas neste cenário. Outros dados notáveis indicam que, na Cena 4, foram removidos os 30 objetos indesejáveis alocados na aplicação, e o acionamento do rádio seguiu a mesma proporção. Levantam-se perguntas sobre as expectativas de quantificar o próprio desempenho, que poderiam ter influenciado no resultado.

4.4. Hipótese 4

H4: As alterações no ambiente resultam na redução da disparidade da carga de trabalho entre as PCD e as PsD.

O grupo das pessoas com deficiência (PCD), conforme caracterizado na amostra,

é heterogêneo, abrangendo desde indivíduos com baixa visão até monoculares. Esta hipótese buscou evidenciar a redução da disparidade da carga de trabalho entre os grupos PCD e PsD (pessoas sem deficiência). Para isso, foram elaborados dois gráficos radar, cada um representando a sobreposição de todas as cenas com suas respectivas dimensões e grupos. Vale lembrar que, quanto maior o valor, maior é a demanda correspondente. A Figura 4 apresenta esses gráficos.

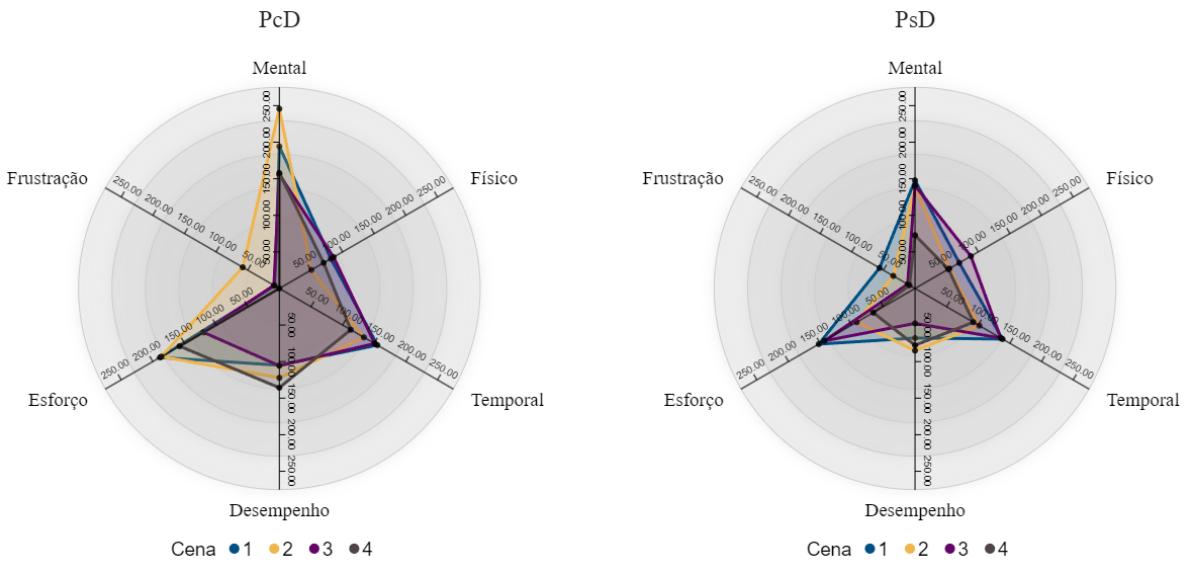


Figura 4. Gráfico da carga mental por demanda para PCD e PsD.

Fonte: Autor (2024).

A comparação indica que a percepção de carga de trabalho das PCD é superior à das PsD na operação estudada. Para ambos os grupos, a mudança na forma de interação resulta na redução da carga de trabalho, conforme apontado na Hipótese 1. Contudo, ao analisar lado a lado, observa-se que as percepções das cargas são distintas, sendo mais elevadas para as PCD, o que evidencia a necessidade de adaptações no ambiente operacional para torná-lo mais acessível e diminuir essas diferenças perceptivas. Na Cena 1, que representa o cenário atual da operação, foi realizada uma análise separada para entender melhor a condição operacional dos dois grupos. A Figura 5 ilustra essa comparação.

O formato do polígono na Figura 5 evidencia as diferentes percepções de demanda entre os grupos, sendo a carga para PCD consistentemente maior. Isso reforça a necessidade de um ambiente que minimize essa disparidade. Considerando as análises das três primeiras hipóteses, as Cenas 3 e 4 mostraram-se mais favoráveis quando comparadas à Cena base (Cena 1). Assim, foi feita uma comparação entre os grupos focando apenas nessas duas cenas, conforme ilustrado na Figura 6.

Ao analisar essas duas cenas, observa-se que a Cena 3 se destaca por apresentar a menor disparidade entre PCD e PsD, aproximando as percepções de carga entre os grupos. Já a Cena 4 também promove redução da carga para ambos, porém com uma disparidade maior. Apesar disso, a Cena 4 pode ser considerada para decisões de alteração na infraestrutura operacional, desde que se trabalhe em estratégias futuras para diminuir essa disparidade, especialmente considerando a percepção de desempenho das PCD. Portanto,

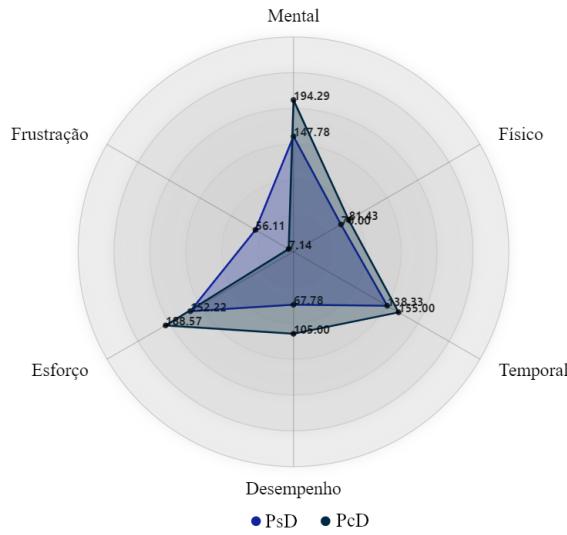


Figura 5. Gráfico da Cena 1 para os grupos PCD e PsD.

Fonte: Autor (2024).

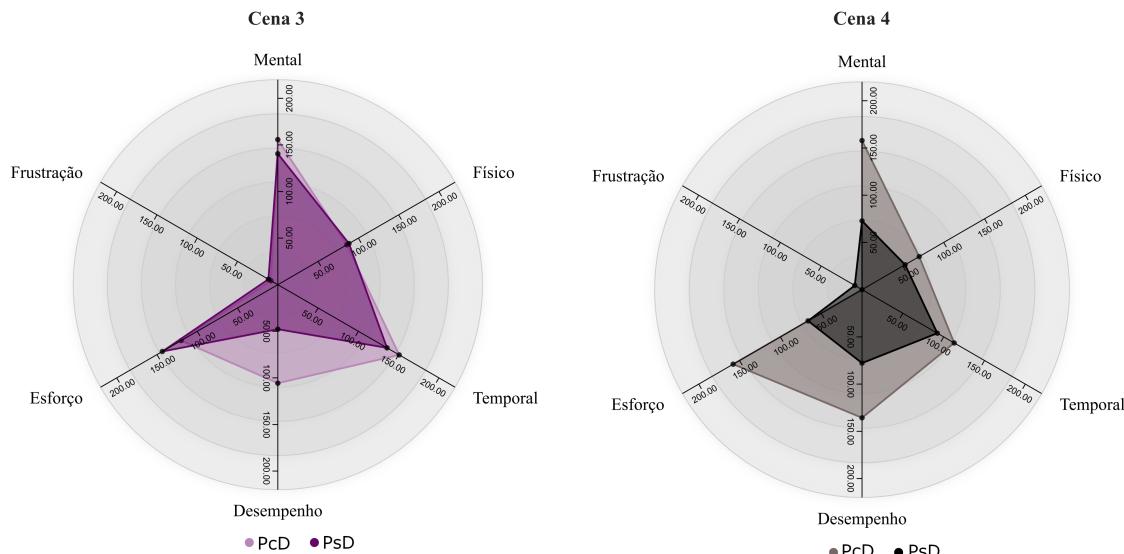


Figura 6. Gráficos das Cenas 3 e 4 para os grupos PCD e PsD.

Fonte: Autor (2024).

a Hipótese 4 foi confirmada ao encontrar um cenário especificamente a Cena 3, que prioriza sinalização sonora e alertas que reduz a disparidade da carga de trabalho entre os grupos. Destaca-se a importância do tipo de áudio empregado; neste estudo, utilizou-se áudio falado, mas outros formatos sonoros podem influenciar as percepções e resultados. Os ganhos obtidos com o uso do áudio foram relevantes para ambos os grupos, auxiliando na orientação, na retomada da atenção e na redução da dispersão durante as atividades.

4.5. Hipótese Principal

Observa-se, portanto, que as alterações na forma de interação no ambiente contribuem para a redução da carga de trabalho, conforme evidenciado pelas hipóteses testadas. A

Figura 7 apresenta um gráfico geral que reúne todas as cenas avaliadas por todos os voluntários, destacando as dimensões das demandas.

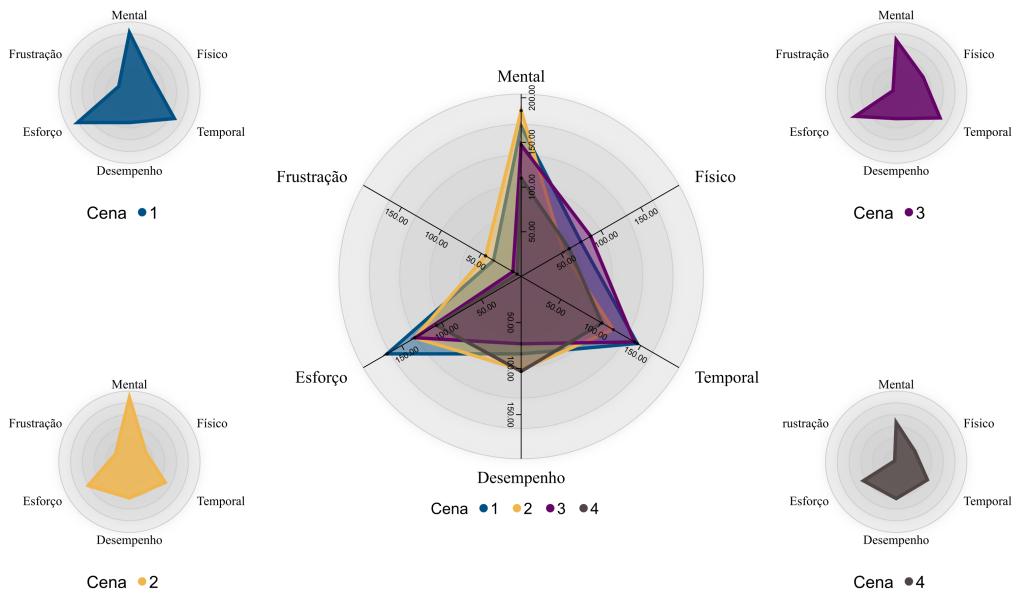


Figura 7. Gráfico das cargas de trabalho das diferentes cenas para todos os voluntários.

Fonte: Autor (2024).

A observação desse gráfico confirma as diferenças perceptivas entre as cenas, reforçando as análises apresentadas nas hipóteses anteriores. Assim, conclui-se que intervenções e alterações no ambiente operacional têm potencial para melhorar a experiência e reduzir a carga de trabalho tanto para PCD quanto para PsD.

4.6. Resultados Adicionais

Nesta seção, apresentam-se resultados complementares que, apesar de não estarem diretamente ligados às hipóteses, fornecem insights importantes para o estudo. A amostra contou com 16 voluntários de perfis diversos e equilibrados em termos de faixa etária, gênero e nível de instrução, o que sugere ausência de vieses nos resultados. Surpreendentemente, 62,5% dos participantes já possuíam conhecimento prévio em realidade virtual, e metade tinha experiência na área de mineração, provavelmente em função da localidade do recrutamento. Ambos os grupos (PCD e PsD) apresentaram desempenho semelhante durante os testes.

Um questionário aplicado antes dos testes avaliou o reconhecimento visual dos objetos no ambiente virtual. Cerca de 75% dos voluntários identificaram corretamente as cores e objetos apresentados. Dificuldades observadas incluíram problemas de contraste e limitações no campo visual para participantes com deficiência visual, que precisaram ajustar a postura para melhor visualização. Quanto à percepção de distância, 18,8% relataram dificuldades em avaliar profundidade e altura, o que impactou suas interações, como ao tentar localizar o rádio no ambiente. Na legibilidade dos monitores, 75% conseguiram ler os textos, mas foi ressaltada a necessidade de fontes maiores e maior contraste para garantir a acessibilidade.

Após as sessões de teste, os participantes indicaram suas preferências para a personalização do ambiente, evidenciando uma clara preferência por posicionar a TV e o monitor à frente da cadeira de operação, com 93,75% e 75% dos voluntários optando por essas posições, respectivamente. O rádio foi preferencialmente posicionado próximo à cadeira, especialmente por voluntários destros. A presença da pilastra no ambiente teve pouco impacto, sendo percebida por poucos voluntários. Entre as sugestões recebidas destacam-se a adaptação do monitor para uso de áudio, melhorias no campo visual para pessoas com visão monocular, substituição do rádio por um botão ou microfone, e o uso de feedback por áudio, além de ajustes na nitidez e contraste das telas. Esses resultados reforçam a importância da personalização do ambiente para aumentar a acessibilidade, reduzir a fadiga visual e melhorar a precisão das interações. Além disso, indicam caminhos importantes para futuras adaptações e melhorias do sistema, considerando as necessidades individuais dos usuários.

5. Limitações da Pesquisa

Limitações deste estudo abrange possíveis diferenças entre o ambiente no mundo real e o ambiente desenvolvido virtualmente, influenciados em como foi desenvolvida a aplicação quanto pelas configurações visuais adotadas. Esse aspecto merece investigações futuras para compreender como tais variações afetam o desempenho e a experiência do usuário. O número reduzido de participantes limitou a possibilidade de análises quantitativas, embora tenha permitido uma exploração qualitativa mais aprofundada. A dificuldade em recrutar voluntários, especialmente pessoas com deficiência visual parcial, também representou um desafio significativo. Além disso, o desenvolvimento da aplicação exigiu um período maior que o previsto para reproduzir com fidelidade o carregamento de minério e ajustar continuamente o protótipo, e o equipamento utilizado apresentou limitações como desconforto físico — que levou alguns participantes a interromper temporariamente o experimento —, necessidade de ajustes frequentes e discrepâncias de escala e posicionamento entre o ambiente real e o virtual.

6. Contribuições para a área de IHC

A presente pesquisa traz contribuições originais e relevantes para a área de IHC, especialmente no contexto de ambientes virtuais aplicados à indústria, com foco na acessibilidade e na personalização de interfaces para usuários com deficiência (PcD).

Originalidade: Este trabalho é pioneiro ao integrar metodologias centradas no usuário e técnicas de realidade virtual para criar um ambiente operacional adaptável a diferentes perfis de usuários, incluindo pessoas com deficiência. A abordagem adotada vai além da simples implementação técnica, incorporando avaliações empíricas detalhadas que consideram as necessidades visuais, espaciais e cognitivas dos participantes. A combinação de personalização do ambiente, análise de percepção visual e ajustes adaptativos para acessibilidade representa uma contribuição única no cenário nacional e internacional de IHC aplicada à indústria.

Impacto e contribuições metodológicas: Metodologicamente, a pesquisa promoveu a aplicação de métodos mistos, combinando análises qualitativas e quantitativas para avaliar a experiência do usuário em realidade virtual. A utilização de questionários pré e pós-teste, aliada à observação direta e coleta de feedback para adaptação do

ambiente, representa uma inovação na avaliação da usabilidade e acessibilidade em sistemas complexos de VR para operações industriais. Além disso, a inclusão de participantes com diferentes níveis de experiência e perfis sociodemográficos reforça a validade externa dos resultados e o potencial de generalização da abordagem.

Avanços científicos: A pesquisa avança no conhecimento ao demonstrar a importância da personalização dinâmica em ambientes virtuais industriais para usuários com deficiências visuais e motoras, mostrando como ajustes simples em elementos visuais e auditivos podem impactar diretamente a eficácia e conforto na interação. Também destaca limitações comuns em ambientes VR, como percepção de profundidade e contraste, sugerindo melhorias que podem ser adotadas em outras aplicações de IHC.

Contribuições teóricas e técnicas: Teoricamente, o estudo enriquece o entendimento das barreiras e facilitadores na interação de PCD com ambientes virtuais complexos, propondo modelos adaptativos baseados em feedback direto do usuário. Tecnicamente, desenvolveu-se um protótipo funcional e personalizável, validado por meio de testes com usuários reais, que servirá como base para futuras aplicações e pesquisas na área. O ambiente virtual criado pode ser utilizado como plataforma para treinamento e simulação industrial, com potencial de expansão para outras áreas.

Contribuições para os Grande Desafios de Pesquisa em IHC: Este trabalho possui relação direta com alguns dos Grandes desafios de IHC. Com o GC7 [Zaina et al. 2024] no que tange o uso de tecnologias emergentes, em especial para interações emergentes com a tecnologia. GC4 [Neris et al. 2024] e GC3 [de Oliveira et al. 2024] ao considerar aspectos socioculturais para interação humana, inclusiva e equitativa, em ambientes industriais. Por fim, com GC2 [Rodrigues et al. 2024] quando além de lidar com aspectos éticos em pesquisa com pessoas, apresenta como contribuição um relato de experiência, desafios e sugestões sobre a condução de testes utilizando equipamentos de realidade virtual para pessoas com deficiência visual (baixa visão) [Fernandes et al. 2024].

Produtos e subprodutos da pesquisa:

Artigos Científicos

- Publicação do artigo “**Exploring Human Interaction in Virtual Reality: An Experience Report on Users with and without Visual Impairment**” no IHC 2024, que relata experiências, aprendizados e recomendações para a aplicação de testes de realidade virtual com pessoas de baixa visão. Este trabalho contribui para a comunidade de IHC ao ampliar o entendimento sobre acessibilidade em ambientes virtuais e serve como referência para futuros estudos e projetos na área. <https://doi.org/10.1145/3702038.3702047>
- A aluna participou do WTD do IHC em 2023 com o projeto intitulado “**Avaliação da inclusão de operadores na Indústria 4.0 por meio de instalações interativas virtuais: Caso de estudo de carregamento de vagões na mineração**”, quando recebeu valiosos feedbacks sobre o projeto que estava ainda na entre as fases 2 e 3. https://doi.org/10.5753/ihc_estendido.2023.233517
- Um artigo com os principais resultados desta pesquisa está em revisão no International

Journal of Human–Computer Interaction

A aluna também participou do desenvolvimento de outras pesquisas em colaboração com outros estudantes ajudando no desenvolvimento do background do sistema em VR utilizado neste projeto e em outros projetos.

- Artigo no IHC 23 de uma plataforma para coleta de dados. <http://dx.doi.org/10.1145/3638067.3638131>
- Versão estendida do artigo anterior publicada na revista JIS. <http://dx.doi.org/10.5753/jis.2025.4276>
- Artigo IHC 23 sobre estudos de AR em livros. <http://dx.doi.org/10.1145/3638067.3638124>

Prototipagem e Artefatos Tecnológicos

Desenvolvimento de protótipos funcionais de ambientes virtuais customizáveis para treinamento de operadores na indústria de mineração, com foco na inclusão de pessoas com deficiência visual e motora. Este artefato já tem sido utilizado em outras pesquisas envolvendo outros estudantes. Além disso, há potencial para que ele se torne uma ferramenta de treinamento na indústria.

Disseminação e Impacto na Comunidade Acadêmica e Industrial

As pessoas envolvidas neste projeto tem realizado participação em eventos, palestras e workshops para compartilhar os avanços e promover o intercâmbio entre academia e indústria, além da formação de alunos de graduação e pós-graduação.

7. Cuidados Éticos

A condução desta pesquisa seguiu rigorosamente os princípios éticos aplicáveis a estudos com seres humanos. O projeto foi submetido e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), sob o parecer consubstanciado do CAAE n.º 71241123.2.0000.5150, garantindo que todos os procedimentos estivessem em conformidade com as diretrizes da Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde.

Os participantes foram previamente informados sobre os objetivos, riscos e benefícios da pesquisa e assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). Para assegurar a acessibilidade, o TCLE foi oferecido em versão com fonte ampliada e, quando necessário, lido em voz alta, de acordo com as preferências dos participantes com deficiência visual. Todos os dados coletados foram tratados de forma anônima e armazenados com segurança, respeitando os princípios de confidencialidade e privacidade.

Além disso, foram adotadas medidas para garantir o bem-estar dos voluntários durante os testes em realidade virtual, incluindo pausas entre as simulações, suporte técnico constante e a adaptação dos dispositivos para maior conforto. Em casos de baixa escolaridade ou dificuldades de leitura, os instrumentos de avaliação foram adaptados com símbolos visuais e leitura assistida. A pesquisa demonstrou sensibilidade aos aspectos de inclusão e acessibilidade, garantindo não apenas a participação ética, mas também significativa dos voluntários, respeitando suas limitações e valorizando suas contribuições no processo de construção do conhecimento.

8. Conclusão

Esta pesquisa apresentou uma abordagem inovadora para a personalização de ambientes virtuais de operação industrial, com foco na acessibilidade para pessoas com deficiência (PcD). Os resultados demonstram que a adaptação do ambiente, considerando perfis visuais e funcionais distintos, melhora a experiência do usuário, reduz a fadiga visual e aumenta a precisão das interações. Além disso, o estudo contribuiu metodologicamente ao combinar testes empíricos com questionários detalhados, garantindo um entendimento aprofundado das necessidades dos usuários e identificando pontos de melhoria no design e na usabilidade do sistema. A pesquisa também evidenciou a importância de interfaces customizáveis, incluindo ajustes de contraste, tamanho de fonte e feedback multimodal (visual e auditivo), aspectos que potencializam a acessibilidade e podem ser estendidos para outras aplicações de Realidade Virtual (RV) e Realidade Estendida (XR). Os produtos gerados protótipos funcionais, artigos científicos, patentes e relatórios técnicos fortalecem o estado da arte em Interação Humano-Computador (IHC) e oferecem base para futuras inovações na indústria 4.0, especialmente na formação e qualificação de operadores.

Entretanto, a pesquisa apresenta limitações, como a amostra relativamente restrita em termos de número e diversidade geográfica, além de depender de hardware específico que pode influenciar a experiência do usuário. A percepção de profundidade e dificuldades visuais em alguns voluntários indicam que melhorias adicionais no design e no equipamento são necessárias para maximizar a inclusão. Quanto às ameaças à validade, destaca-se a possível influência do conhecimento prévio dos participantes sobre realidade virtual e ambientes de mineração, que pode ter impactado suas interações e respostas. Futuras investigações podem expandir a amostra, testar outras configurações de hardware e explorar modelos adaptativos automáticos baseados em inteligência artificial para personalizar ainda mais as interfaces. Os desdobramentos futuros incluem o desenvolvimento de versões do sistema para outras deficiências e setores industriais, a integração com dispositivos vestíveis para coleta de dados fisiológicos em tempo real, e o aprofundamento na avaliação longitudinal dos impactos na formação profissional. Essa linha de pesquisa demonstra grande potencial para fortalecer a inclusão e a eficiência operacional por meio de tecnologias emergentes em IHC.

9. Agradecimentos

Os autores escreveram este artigo utilizando ferramentas de IA para aprimorar a gramática. Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - código de financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - código de financiamento 306101/2021-1 e 30115/2025-7, FAPEMIG - código de financiamento APQ-00890-23, Instituto Tecnológico Vale (ITV) e Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Referências

Borges, A. V. and Longen, W. C. (2019). Inclusão de pessoas com deficiência no mercado de trabalho e as perspectivas de acessibilidade. *Brazilian Journal of Health Review*, 2(6):5520–5531.

de Oliveira, L. C., Amaral, M. A. a., Bim, S. A., Valença, G., Almeida, L. D. A., Salgado, L. C. d. C., Gasparini, I., and da Silva, C. B. R. (2024). Grandihc-br 2025-2035 - gc3: Plurality and decoloniality in hci. In *Proceedings of the XXIII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, IHC '24, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

Fernandes, P. C., Rocha, G. H. M., Adachi, B. H., Silvas, F. P. C., Coelho, B. N., and Delabrida, S. (2024). Exploring human interaction in virtual reality: An experience report on users with and without visual impairment. In *Proceedings of the XXIII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, IHC '24, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

IBGE (2022). Pessoas com deficiência e as desigualdades sociais no brasil. *Coordenação de População e Indicadores Sociais*.

Köche, J. C. (2016). *Fundamentos de metodologia científica*. Editora Vozes, Caxias do Sul.

Lööw, J., Abrahamsson, L., and Johansson, J. (2019). Mining 4.0—the impact of new technology from a work place perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36:701–707.

Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A., and Kishino, F. (1995). Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In Das, H., editor, *Telemanipulator and Telepresence Technologies*, volume 2351, pages 282 – 292. International Society for Optics and Photonics, SPIE.

Neris, V. P. A., Rosa, J. C. S., Maciel, C., Pereira, V. C., Galvão, V. F., and Arruda, I. L. (2024). Grandihc-br 2025-2035 - gc4: Sociocultural aspects in human-computer interaction. In *Proceedings of the XXIII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, IHC '24, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

Rodrigues, K. R. d. H., Carvalho, L. P., Freire, A. P., and Pimentel, M. d. G. C. (2024). Grandihc-br 2025-2035 - gc2: Ethics and responsibility: Principles regulations and societal implications of human participation in hci research. In *Proceedings of the XXIII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, IHC '24, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.

Silvestri, L., Forcina, A., Intronà, V., Santolamazza, A., and Cesarotti, V. (2020). Maintenance transformation through industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 123:103335.

Tori, R. and Silva, M. (2020). Introdução a realidade virtual e aumentada. *Sociedade Brasileira de Computação*.

Zaina, L., Prates, R. O., Delabrida Silva, S. E., Choma, J., Valentim, N. M. C., Frigo, L. B., and Bicho, A. d. L. (2024). Grandihc-br 2025-2035 - gc7: Interaction with emerging technologies: An ecosystem integrating humans technologies and contexts. In *Proceedings of the XXIII Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems*, IHC '24, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.