

Systematic Review on Cognitive Engineering Applied to Critical Systems for Proposition of Evaluation Heuristics for Virtual Reality Systems

A. P. Proenca, M. Miranda, E. A. Lamounier Jr., A. Cardoso and P. Notargiacomo

Abstract— This article presents a systematic review on the usability of critical systems with virtual reality, in order to compile the research carried out in the area from the cognitive engineering approach. For this purpose, a survey was carried out in digital databases and, after determining the relevance and organization of the documents, based on the primary and secondary issues established, seven articles were analyzed. The aim was to compile the types of evaluations carried out (heuristic, cognitive, ergonomic), as well as to characterize the present contributions, in order to correlate them with the classical approaches of analysis of human-computer interfaces. As a result, 25 guidelines are suggested to be adopted in critical systems with virtual reality, which can contribute to the user analysis stages, proposal and development of prototypes, as well as to the analysis of systems already elaborated.

Keywords— Cognitive Engineering, Critical Systems, Heuristics, Virtual Reality.

I. INTRODUÇÃO

SISTEMAS críticos têm sido investigados ao longo dos anos, sendo que uma das preocupações diz respeito à determinação da acurácia e à usabilidade. Dentre os resultados de tais estudos destacam-se a preferência por interações multimodais e pelo uso de dispositivos não convencionais [14].

Contudo, a compreensão de como a engenharia cognitiva pode contribuir para o desenvolvimento de sistemas críticos tridimensionais ainda constitui um desafio. Por isso, a realização de uma revisão sistemática pode não só propiciar a compreensão de como estes elementos (engenharia cognitiva, sistemas críticos e realidade virtual) têm sido combinados, bem como permitir a compreensão do contexto envolvido e o levantamento de questões fundamentais em relação à usabilidade.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

A engenharia cognitiva surgiu na década de 80 [22] e atenta para os processos cognitivos envolvidos numa atividade mediada por computadores. Isto envolve desde aspectos pertinentes à atenção do usuário até questões pertinentes à memória, à aprendizagem, ao raciocínio e resolução de problemas, dentre outros [22]. Assim, é possível dizer que a engenharia cognitiva se pauta em aspectos cognitivos para a elaboração de artefatos computacionais, ou seja, se volta aos aspectos pertinentes à utilização de computadores para instituir

um design adequado ao usuário, estabelecendo um fluxo informacional adequado [20].

Isso requer o estabelecimento de modelos cognitivos que possibilitem prever não só os conhecimentos e habilidades requeridas dos usuários, como também as dificuldades que estes podem enfrentar ao usar uma determinada interface [22]. Assim, se pode sintetizar que a engenharia cognitiva tem como objetivo facilitar a navegação e uso de interfaces, tornando a interação fluida.

Essa navegação ocorrer num determinado ambiente, sendo que pode ser conceituado, do ponto de vista etimológico, como circundante ou rodeado. Ou seja, estabelece uma espécie de meio em que as circunstâncias pertinentes às esferas psicológicas, culturais e mesmo as tangíveis podem envolver pessoas ou mesmo grupos. Assim, sua estrutura se pauta em cinco componentes: espaço, forma, luz, cor e tempo, sendo que os mesmos mediam a experiência sensorial e de percepção – abrindo possibilidades de análise diferenciadas e estruturas mutáveis para exploração do espaço [2], incluindo ambientes computacionais interativos tridimensionais.

A realidade virtual (RV) permite, então, a instituição de ambientes computacionais sintéticos tridimensionais por meio de tecnologias de interface e canais multisensoriais, instituindo uma navegação diferenciada. Assim, é possível colocar que os três elementos fundamentais à RV são a imersão, a navegação e a interação [13]; sendo que a imersão busca a integração do usuário com o ambiente e a interação faz uso da capacidade computacional para atualização/reação do ambiente (*feedback*) conforme as ações do usuário [5].

O projeto de interfaces adequadas depende, então, do conhecimento de seus futuros usuários, bem como dos modelos mentais destes e de como estes percebem as mesmas. Se parte da aquisição das informações de um ambiente por meio dos sentidos para se atribuir significado, estruturando a percepção [22]. Então, para visualizar e manipular um determinado ambiente se faz uso de uma interface [17], isto é, de um mecanismo – que no presente artigo é formado por telas de computadores e periféricos para imersão tridimensional – para vincular o mundo real ao de informações digitais que permitem gerenciar sistemas críticos. Desta forma, se pode colocar que a interface funciona como elemento mediador entre o mundo físico e o usuário. Assim se estabelece um ambiente digital para que este último possa interagir e gerenciar os sistemas críticos, sejam estes tridimensionais ou não, por meio de elementos

A. P. Proenca, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, adrianaportodesigner@gmail.com

M. Miranda, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, voidmmn@gmail.com

E. A. Lamounier Jr., Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, lamounier@ufu.br

A. Cardoso, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, alexandre@ufu.br

P. Notargiacomo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brasil, pollyana.notargiacomo@mackenzie.br

gráficos, gestuais, sonoros sem a necessidade de compreender os códigos que se encontram envolvidos.

Neste contexto, também se faz necessário discutir o conceito de usabilidade. Este foi estabelecido na década de 80, sendo que em 1991 surgiu uma norma específica para tratar desta questão (ISO/IEC 9126), consolidada na ISO 9241-11:1998. Esta define a usabilidade como a faculdade que um produto apresenta para que certos usuários possam alcançar uma finalidade particular numa circunstância determinada de maneira a eficaz, eficiente e que promova satisfação. A partir disso, o desenvolvimento de diretrizes para o uso de interface pode centrar-se no usuário (*User Centered Design, UCD*) [25] de tal forma que este não precise se adaptar ao sistema apresentado. Para isso é feita uma análise prévia das tarefas realizadas pelos usuários, seguida de uma aferição de como é utilizado o sistema e, finalmente, o design para projeto, modificação e testes, focando na usabilidade do resultado. Cybis [8] ressalta que a usabilidade colabora com a produtividade, reduzindo o esforço e ampliando a satisfação. No caso de sistemas críticos isso se torna ainda mais relevante, dado que o uso inadequado pode resultar em desdobramentos não esperados em escala elevada.

Dentre as pesquisas na área de recomendação de usabilidade destacam-se os trabalhos de Smith e Mousier [29], Bastien e Scapin [3], Nielsen [19] e Shneiderman [27].

Smith e Mosier [29] organizam as diretrizes em seis grupos: entrada de dados, visualização de dados, controle de sequência, orientação do usuário, transmissão de dados e proteção de dados. Já Bastien e Scapin [3] estruturaram oito conjuntos de critérios: condução, carga de trabalho, controle explícito, adaptabilidade, gestão de erros, consistência, significado dos códigos, compatibilidade. Nielsen [19] aborda dez princípios: visibilidade do status do sistema, compatibilidade do sistema com o mundo real, liberdade e controle do usuário, consistência e padronização, prevenção de erros, reconhecimento ao invés de memorização, flexibilidade e eficiência de uso, estética e design minimalista, identificação e resolução de erros, ajuda e documentação. Finalmente, Shneiderman [27] estabelece oito princípios, denominadas de regras de ouro: consistência (esforço por coerência), usabilidade universal, *feedback* informativo, diálogos de término da ação, prevenção/tratamento de erros, reversão de ações acessível, controle interno, carga de memorização reduzida.

Smith e Mosier [28], inclusive, propõem uma abordagem de avaliação pautada nos objetivos de avaliação, que podem ser trabalhados a partir de três critérios: análise e modelagem, teste de performance e design de diretrizes. Estes critérios podem ser agrupados em subconjuntos e classificados a partir de escalas de Likert ou escalas numéricas para medição da relevância. Da mesma forma, também é possível estabelecer um peso e apresentar comentários.

A partir da exploração dos conceitos envolvidos na engenharia cognitiva, bem como na área de usabilidade para sistemas críticos e sistema de realidade virtual se passou, então, à estruturação da revisão sistemática.

III. DA REVISÃO SISTEMÁTICA

A. Revisão Sistemática

A revisão sistemática consiste numa revisão de literatura pautada em parâmetros estipulados. Estes, juntamente com a definição de questões primárias e secundárias, formam o panorama que possibilita o levantamento/análise de estudos com a finalidade de sintetizar os conhecimentos já existentes numa determinada área específica [9], bem como a definição de lacunas a serem trabalhadas em investigações posteriores [15].

B. Estrutura para Realização da Revisão Sistemática

A estruturação da revisão sistemática é organizada em três conjuntos de procedimentos [9] e [15]. O primeiro deles diz respeito ao planejamento, que parte da delimitação do escopo e definição de questões primárias (QPs) e secundárias (Qs) e, também, inclui a elaboração/validação do protocolo de revisão dos artigos que comporão a revisão sistemática. O segundo, denominado de realização, engloba não só a seleção das investigações que atendem aos requisitos definidos anteriormente, como também a organização, análise e síntese das informações mais significativas. Finalmente, o último conjunto de procedimentos refere-se à documentação, ou seja, à composição do relatório que sumariza os resultados obtidos. Tal estrutura pode ser visualizada conforme Fig. 1, a seguir:

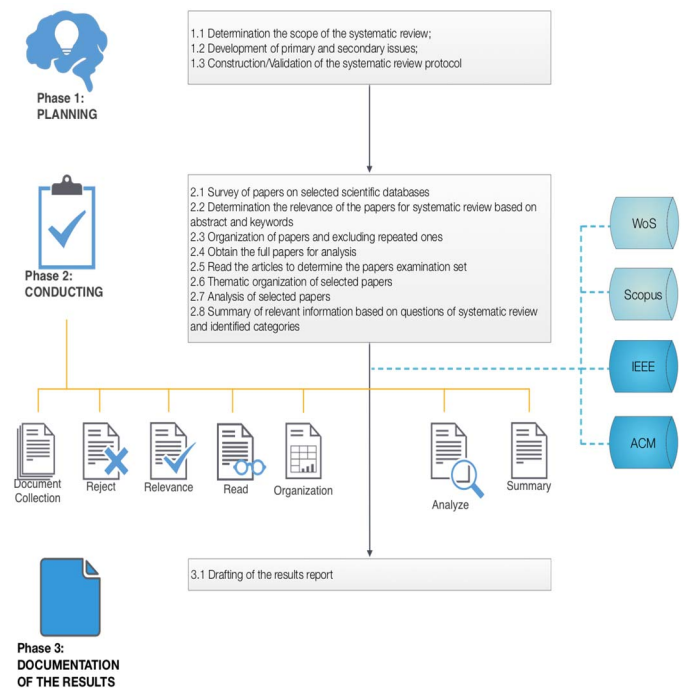


Figura 1. Representação gráfica das etapas da revisão sistemática.

A partir desta configuração, se realizou a revisão sistemática, sendo que os materiais e métodos são detalhados a seguir.

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da presente revisão sistemática sobre engenharia cognitiva aplicada aos sistemas críticos foi preciso realizar um estudo teórico para o estabelecimento dos conceitos fundamentais de tais áreas, detalhados anteriormente (em Trabalhos Relacionados), bem como estabelecer as

questões primárias (QPs) e secundárias (QSs) para nortear o estudo dos artigos encontrados.

- QP1: Existem trabalhos que estudam ou propõem diretrizes de usabilidade para sistemas críticos com ambientes 3D?
- QP2: Como a engenharia cognitiva pode ser usada/aplicada em ambientes 3D?
- QS1: Há trabalhos que destacam aspectos de engenharia cognitiva para sistemas críticos?
- QS2: Como a usabilidade é trabalhada em relação à engenharia cognitiva?
- QS3: Há artigos que trabalham com diretrizes de usabilidade voltada a sistemas de informação complexa?
- QS4: É possível mapear um histórico em relação aos avanços propostos nas investigações empreendidas e também verificar períodos de maior interesse na comunidade científica?

A partir disso, definiu-se que seriam exploradas bases científicas gerais, como *Web of Science* (WoS) – que possui mais de 12.000 periódicos e mais de 120.000 anais de eventos [WoS] – e Scopus – que abarca quase 22 mil títulos de mais de 5 mil editores – [26], e bases específicas de engenharia e computação, respectivamente, como IEEE – que conta com quase 4 milhões de documentos [11] – e ACM – que possui quase 2,4 milhões de artigos [1]. O período de realização da revisão sistemática englobou novembro e dezembro de 2014, sendo que não foi definido um período temporal nas bases, dado que se buscou também realizar uma análise que considerava um panorama histórico.

Para tanto, foi feito um levantamento de termos pertinentes, o que permitiu o estabelecimento de conjunto de palavras-chave em inglês para serem combinadas à palavra-chave primária (*cognitive engineering*). As *strings* foram tratadas nas buscas em relação aos títulos, resumos, palavras-chave, bem como ao texto completo presente nas quatro bases de artigos científicos. O conjunto das dez *strings* definido e aplicado na revisão sistemática encontra-se listado abaixo:

- *String 1: cognitive engineering AND critical system;*
- *String 2: cognitive engineering AND electric energy sector;*
- *String 3: cognitive engineering AND control power substation;*
- *String 4: cognitive engineering AND operate power substation;*
- *String 5: cognitive engineering AND power substation;*
- *String 6: cognitive engineering AND virtual substation;*
- *String 7: cognitive engineering AND usability guidelines;*
- *String 8: cognitive engineering AND electric power substation;*
- *String 9: cognitive engineering AND complex human-information system;*
- *String 10: cognitive engineering AND 3D environments.*

Contudo, as *strings* 2, 3, 4, 5, 6 e 8 não obtiveram resultados em nenhuma das quatro bases consultadas no período em questão. Isso indica que tais áreas relacionadas à engenharia cognitiva ainda precisam ser exploradas por pesquisas acadêmicas. As quatro *strings* restantes encontram-se distribuídas conforme o Quadro I, a seguir:

QUADRO I

CONSOLAÇÃO DOS RESULTADOS DAS BUSCAS DAS QUATRO *STRINGS* NAS QUATRO BASES CIENTÍFICAS

<i>Strings de Busca</i>	<i>WoS</i>		<i>ACM</i>		<i>IEEE</i>		<i>Scopus</i>		<i>Re.</i>
	E	J	E	J	E	J	E	J	
"cognitive engineering" AND "critical system"	0	0	2	1	0	0	3	3	0
"cognitive engineering" AND "usability guidelines"	0	1	8	1	0	0	1	1	3
"cognitive engineering" AND "complex human-information system"	0	0	0	0	1	0	1	0	1
"cognitive engineering" AND "3D environment"	0	0	4	0	0	0	0	0	0
Totais separados	0	1	14	2	1	0	5	4	4
Totais por base		1		16		2		9	
Total geral							28		4
Total sem repetições							24		

Legenda: E – Anais de Eventos; J – Periódicos; Re. – Repetidos.

Percebe-se que a base da ACM possui maior número de artigos relacionados às *strings* de busca, contudo o maior mapeamento pertinente a periódicos surgiu nas buscas realizadas no Scopus. Em relação à maior ocorrência numérica, esta possivelmente ocorre porque a ACM possui eventos específicos relacionados à Interação Humano Computador (IHC), bem como se dedica a estudos que fazem uso de abordagens cognitivas. Outro aspecto a ser destacado é que dos 28 resultados obtidos, apenas nove foram publicações em periódicos, sendo quatro repetições, resultando em cinco artigos. Assim, das demais publicações válidas, há 19 artigos em anais de eventos. Tais elementos totalizam 24 publicações sem repetições, sendo que foram analisadas 22, pois não foi possível obter dois dos artigos. Após a análise destes foram ainda excluídos mais 15 artigos, sendo que foram analisados integralmente sete artigos, detalhados no próximo item.

V. RESULTADOS

A partir dos parâmetros estabelecidos para a presente revisão sistemática, abaixo são apresentadas as análises dos artigos selecionados.

Neerincx [18] descreve uma metodologia cognitiva para apoiar uma tripulação no espaço. Está se pauta no estabelecimento da usabilidade voltada aos sistemas de tecnologia da informação com a finalidade de auxiliar a realização de tarefas cognitivas complexas no espaço. O autor busca estabelecer uma estrutura para ampliar a resiliência da equipe para que a mesma possa apresentar as respostas adequadas em situações em que ocorram falhas no sistema ou mesmo imprevisto. Com base nisso, o autor propôs tipos avançados de assistência, o que envolveu um processo iterativo de desenvolvimento que integrou o design da interface do projeto com o usuário, fornecendo uma estrutura de software para implementar o suporte cognitivo. Para isso o método proposto trabalhou com três aspectos: 1) diretrizes de usabilidade, medidas e métodos; 2) guia do processo geral de

design de interface do usuário (configurado a partir da tríade projeto-procedimento-tarefa) associado a uma estrutura de software para implementar esse apoio; e, 3) teorias, métodos e ferramentas para analisar, modelar e realizar testes futuros no espaço.

Em relação à avaliação heurística, Neerincx [18] buscou medir a eficácia, eficiência, satisfação, bem como a capacidade de aprendizagem, percepção da situação, confiança e emoção. Foi empreendida, também, uma avaliação cognitiva que buscou levantar questões para melhoria e novas investigações foram conduzidas para tratar da carga mental da tripulação, bem como percepção das emoções. Cabe ressaltar que o suporte se integra à execução da tarefa e pode ser acessado por meio de interfaces multimodais intuitivas (aplicação de estímulos visuais, auditivos e táteis). Além disso, a consistência da situação é reforçada por uma visão geral dos conhecimentos relevantes para o plano atual e a disponibilização de mecanismos de notificação sensíveis ao contexto.

Boy e Schmitt [6] estabelecem uma proposta de abordagem analítica de design de segurança pautada em 30 anos de experiência em design centrado no ser humano. Assim, eles propuseram um estudo de ferramentas conceituais e modelos de controle para projetar a usabilidade de sistemas de automação. Para isso os autores propõem uma abordagem que integra fatores de segurança (dentre os quais se destacam: complexidade, flexibilidade, estabilidade, redundância, suporte, treinamento, experiência e testes contínuos centrados no usuário) a níveis apropriados de automação.

Dentre as conclusões dos autores destacam-se a complexidade da energia nuclear, sendo que esta deve ser compreendida para que seja estabelecido um projeto para a segurança. Também se ressalta que os procedimentos constituem uma automação humana, de forma análoga à automação das máquinas; sendo que a automação *per se* leva à complexidade, exigindo sua compreensão para o estabelecimento de equilíbrio entre os procedimentos, softwares e competências dos operadores humanos, assim como em relação ao conhecimento. Ainda, destaca-se que simulações contribuem para a compreensão de comportamentos emergentes, o que permite melhorar a concepção de um sistema.

Broy e Schmidt [7] ao estudarem a estereoscopia na área automobilística se voltaram avaliação cognitiva, mais especialmente para a carga cognitiva e carga de trabalho visual envolvidas em recursos que afetam a percepção visual. Neste sentido, os autores se preocuparam com a quantidade de recursos que são necessários para resolver uma tarefa particular do sistema. Mais especificamente em relação à avaliação tridimensional, Broy e Schmidt [7] propõem diretrizes de projeto para a redução da fadiga e desconforto visual quando se tem estereoscopia em sistemas de assistência ao condutor e dispositivos de informação e entretenimento em interfaces de usuário no contexto automotivo. Com isso eles buscaram compreender o grau de esforço requerido em interfaces espaciais com saída estereoscópica, bem como as mudanças necessárias na implementação gráfica e na seleção e integração de uma tecnologia de exibição em 3D. Finalmente, uma das contribuições mais relevantes do artigo é discutir a questão da eficácia de monitores estereoscópicos em situações em que os

usuários não são capazes de dedicar toda a sua para a saída estereoscópica.

Velagapudi et al. [30] enfocaram a avaliação cognitiva de operadores em relação ao controle de quatro robôs, buscando verificar se as ações estavam circunscritas às capacidades cognitivas. Propuseram que o controle de vários robôs aumenta substancialmente a complexidade da tarefa do operador, dado que a atenção deve ser constantemente deslocada entre os robôs para que o controle e a consciência da situação sejam mantidas. Com isso, buscaram verificar se o tamanho da equipe de robôs exerce impacto na navegação das tarefas do operador e nas tarefas de percepção dos envolvidos na investigação.

O'Connell e Choong [21] fizeram uma avaliação cognitiva de jovens analistas de informação. Segundo os autores, o perfil destes difere de seus antecessores por apresentarem habilidades específicas (destreza para a manipulação de computadores e propensão à colaboração em processos). Esta foi seguida de uma avaliação ergonômica que tinha o intuito de avaliar o espaço e as condições ergonômicas do local da própria avaliação. Para completar o panorama, os autores desenvolveram uma avaliação heurística por meio do levantamento de métricas e heurísticas clássicas para comparação com as novas propostas. Assim, puderam verificar que as implicações das limitações humanas (perceptual cognitiva) constituem questões relevantes para o desenvolvimento de heurísticas que possam minimizar a carga mental de trabalho em visualizações interativas usadas pelos analistas.

O'Connell e Choong [21], com base nas avaliações empreendidas, desenvolveram novas métricas envolvendo a comparação de trabalhos realizados entre equipes. Se trabalhou a observação da diferença entre o número de questões respondidas corretamente por um determinado analista e pela equipe; a coleta dos próprios índices de satisfação dos analistas em experiências colaborativas (observando a capacidade destes em seguir seu próprio estilo de trabalho durante a colaboração); a contagem do número de adições, modificações e exclusões de um produto de trabalho após ele ser passado de uma analista para outro; e, a avaliação da facilidade de execução de tarefas analíticas específicas (exploração de dados, descoberta de relações entre eventos, medição do tempo dispendido para manipular ícones, mapas, gráficos, fotos, anotações, caixas contendo notas e grupos de notas) produzindo métricas de manipulação destes elementos. A isso se adicionou a relevância do *feedback* imediato, já que os jovens analistas transportam do contexto dos videogames a expectativa do imediatismo de resposta para as ações realizadas, sendo que os autores concluem que o tempo adicional requerido pode ocasionar insatisfação ao analista. Os autores ainda elencam questões em aberto, como se é possível perceber os níveis de abstração e quais são os limites superiores de densidade informacional, destacando a necessidade de estudo da interação do analista com um conjunto cada vez maior de dados e tarefas mais complexas (elemento típico em sistemas críticos no geral), bem como a medição das interações humanas em diferentes ambientes, inclusive os tridimensionais.

Law e Hvannberg [16] trabalharam com análise heurística para comparar os princípios da engenharia cognitiva de Gerhardt-Powals versus heurísticas de Nielsen. Com isso, eles buscaram determinar qual seria a heurística mais eficaz para a

localização de problemas num sistema crítico e verificar se essas avaliações poderiam ser mensuradas.

Por último, mas não menos importante, Herrero e Antônio [10] tratam de modelos 3D, enfocando o modelo sinestésico de percepção auditiva semelhante à humana para agentes virtuais inteligentes incorporados em um ambiente virtual interativo, geralmente, em 3D. Com isso eles queriam averiguar se seria possível relacionar o modelo espacial de interação com o objetivo de analisar os fatores que tornam o modelo perceptivo-auditivo mais realista com o intuito de tornar os agentes do sistema mais conscientes de seu retorno. Portanto, a contribuição do estudo é pertinente ao conjunto de ferramentas para dotar os agentes virtuais interativos de percepção auditiva semelhante à humana a partir das informações relacionadas com a posição física desses objetos no ambiente sintético 3D.

Lista de Diretrizes de Usabilidade

Tendo em vista que a avaliação heurística permite a elaboração de um relatório com uma lista de problemas de usabilidade que indicam quais princípios foram violados [23]. Neste estudo, este procedimento, teve a finalidade de propor uma interface apropriada a Ambientes 3D em Sistemas Críticos, por meio de uma lista de diretrizes.

Das métricas analisadas e obtidas por meio dos trabalhos da revisão sistemática, 25 métricas (Quadro II) constituem a lista de heurísticas de usabilidade para os Sistemas críticos, objeto do estudo:

QUADRO II

Heurísticas para Ambientes Virtuais Tridimensionais em Sistemas Críticos.

ID	Diretrizes
1	Há aplicação de modalidades de interfaces intuitivas com estímulos visuais, auditivos e táteis que se integram à execução de tarefas do sistema de forma natural.
2	Há mecanismos de notificação sensíveis ao contexto do sistema que reforçam a consciência da situação por meio do conhecimento da visão geral.
3	Os usuários mostram confiabilidade para usar o sistema atual, porque este compartilha conhecimento via modelos situados que o usuário pode facilmente acessar e compreender (neste caso o SRV também).
4	O sistema acomoda respostas emocionais de forma adequada em situações críticas.
5	Existem condições para o entendimento da complexidade do sistema para projetar as tarefas com segurança.
6	É possível criar procedimentos para a ação humana, assim como o software é criado para a automação de máquinas.
7	O sistema permite estabelecer o nível das funções a serem realizadas pelos seres humanos e pelas máquinas (com o intuito de reduzir o problema de acúmulo de procedimentos).
8	Estão presentes processos de simulações que ajudam a entender comportamentos emergentes com o intuito de melhorar a concepção do sistema.
9	O sistema propicia a criação de processos de experiência e regulação por <i>feedback</i> contínuo projetado por meio de todo o ciclo de vida implementado.
10	Existe a possibilidade de resolução de problemas de interface ao pedir <i>feedback</i> de especialistas do sistema (A falta de experiência do usuário pode ser decorrente da ausência de um perfil de usuário ou pela falta de disponibilidade de usuários reais ou pela falta de acesso ao sistema).
11	O sistema apresenta padrões de ações adequados para percepção da situação e tomada de decisão (Isso requer dois requisitos: atenção adequada pela vigilância do operador humano e <i>affordance</i> – qualidade do ambiente que permite ao usuário a realização de uma ação, ou seja, a forma determina a utilidade – apropriada do agente de software).

12	É possível mensurar o grau de esforço (muito baixo, baixo, médio, alto, muito alto) em interfaces espaciais com saída estereoscópica.
13	É possível determinar o tempo máximo de uso da interface de maneira a não resultar em sobrecarga informacional para o usuário (5, 10, 15, 20, 25, 30 minutos).
14	As mudanças na implementação gráfica e na seleção e integração de uma tecnologia de exibição em 3D encontram-se claras no sistema.
15	Os monitores estereoscópicos apresentam eficiência em situações em que os usuários não são capazes de dedicar toda a sua atenção para a saída estereoscópica.
16	A realização de tarefas específicas (como exploração de dados, medição do tempo gasto para manipulação de elementos de informação – ícones, mapas, gráficos, fotos, anotações) é facilitada e pode ser mensurada por métricas de manipulação.
17	É possível relacionar o modelo espacial de interação de forma a analisar os fatores que fazem o modelo perceptivo-auditivo mais realista com a finalidade de tornar os agentes do sistema mais conscientes de seu entorno.
18	O sistema apresenta <i>feedback</i> imediato para as ações do usuário (reconhecimento por rastreamento) sem requerer tempo adicional (evitando a expectativa e insatisfação do usuário).
19	O sistema permite que o usuário tenha a sensação (sentimento) de que controla o sistema e que este responderá adequadamente às ações feitas (evitando ansiedade e insatisfação).
20	O sistema apresenta mecanismos de gestão de erro de forma ágil, simples e contextualizada.
21	As ações virtuais apresentam correlação com as ações reais.
22	As cores, escalas, forças táteis e áudios tridimensionais são consistentes.
23	Os objetos apresentados no ambiente virtual possuem correspondência com os existentes no mundo real.
24	A interação propiciada pelo sistema é natural.
25	É apresentada uma representação bidimensional para complementar a tridimensional.

VI. CONCLUSÕES

A partir da revisão sistemática realizada se constatou que existem pesquisas que estudam diretrizes de usabilidade para sistemas críticos com ambientes 3D (QP1). Também foi possível identificar, por meio dos artigos selecionados (QS1), que a engenharia cognitiva constitui um elemento relevante no projeto de ambientes tridimensionais (QP2), pois permite compreender o modelo mental dos usuários, além de seus comportamentos, expectativas e as emoções envolvidas no uso dos sistemas críticos estudados. Além disso, o estudo dos artigos resultantes da seleção e organização pertinentes à revisão sistemática permitiu constatar que a engenharia cognitiva é associada não só à avaliação cognitiva, como também à avaliação heurística e ergonômica (QS2). Destaca-se também que foi encontrado um trabalho que aborda estes três tipos de avaliações num contexto de informação complexa (QS3), o que denota que esta é uma área que requer novos estudos. Ainda, a revisão sistemática possibilitou o mapeamento histórico (QS4), a qual se traduz num período de 2003 a 2013 (dez anos), sendo que se percebe duas lacunas temporais (2005 a 2007 e 2009 a 2010) sem trabalhos que enfoquem os pré-requisitos determinados na presente investigação. Cabe ressaltar que a investigação também propiciou a comparação de abordagens de usabilidade para sistemas críticos tridimensionais e verificação das melhores práticas adotadas pelos pesquisadores.

Finalmente, a presente pesquisa expõe 25 diretrizes de usabilidade que foram obtidas por meio dos trabalhos da revisão sistemática. Destaca também, que outras áreas que fazem uso de sistemas críticos tridimensionais podem se

beneficiar dos conhecimentos agregados sobre engenharia cognitiva, como é o caso da área de energia elétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o MackPesquisa, o Programa CEMIG GT411 de Pesquisa e Desenvolvimento, à CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1]. ACM. ACM Digital Library. [internet]. 2015. URL: <http://dl.acm.org>
- [2]. M. A. P. Andrade, "Contribuição ao estudo de uma arte ambiental na década de 1960", *Anais do III Encontro de História da Arte*, IFCH/UNICAMP, 55-65, 2007.
- [3]. C. Bastien e D. Scapin, *Ergonomic Criteria for the Evaluation of Human Computer Interfaces*, INRIA, 1993.
- [4]. R. Bernhaupt, D. Navarre, P. Palanque e M. Winckler, "Model-Based Evaluation: A New Way to Support Usability Evaluation of Multimodal Interactive Applications". In: Law E. L.-C., Hvannberg E. T. & Cockton G. Quality in Software, Interaction and Value. pp. 96-119, London: Springer-Verlag London, 2008.
- [5]. D. Bowman, D. Raja, J. Lucas e A. Datey, "Exploring the Benefits of Immersion for Information Visualization", *Proceedings of HCI International*, 2005.
- [6]. D. A. Boy e K. A. Schmitt, "Design for safety: A cognitive engineering approach to the control and management of nuclear power plants", *Annals of Nuclear Energy*, 52, 125-136, 2013.
- [7]. N. Broy, A. André e A. Schmidt, "Is Stereoscopic 3D a Better Choice for Information Representation in the Car?", *Proceedings of the 4th Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications (AutomotiveUI'12)*, October 17-19, Portsmouth, NH, USA, 93-100, 2012.
- [8]. W. Cybis, *Ergonomia e usabilidade: conhecimentos, métodos e aplicações*, São Paulo, Novatec Editora, 2007.
- [9]. D. Gough, S. Oliver e J. Thomas, *An introduction to Systematic Reviews*, SAGE Publications, 2012.
- [10]. P. Herrero e A. Antonio, "Introducing human-like hearing perception in intelligent virtual agents", *Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS '03)*, ACM, New York, NY, USA, 733-740, 2003.
- [11]. IEEE. IEEE Xplore Digital Library [internet]. 2015. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>
- [12]. INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION (ISO). *Ergonomic requirements for office work with display terminals (VDTs). Part 11: Guidance on usability*. Genève, 1998x.
- [13]. R. Kalawsky, *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1993.
- [14]. T. Kaster, M. Pfeiffer e C. Bauckhage, "Combining speech and haptics for intuitive and efficient navigation through image database", In: S. Oviatt (Ed.), *ACM International Conference on Multimodal interfaces (ICMI'2003)* (pp. 180-187). New York: ACM Press, 2003.
- [15]. B. Kitchenham, "Procedures for Performing Systematic Reviews", *Technical Report TR/SE0401*, Keele University, and Technical Report 0400011T.1, National ICT Australia, 2004.
- [16]. E. L.-C., Law e E. T., Hvannberg, "Analysis of strategies for improving and estimating the effectiveness of heuristic evaluation", *Proceedings of the third Nordic conference on Human-computer interaction (NordCHI '04)*, ACM, New York, NY, USA, 241-250, 2004.
- [17]. P. Lévy, *Cyberculture*, Minneapolis, MN, University of Minnesota Press, 2001.
- [18]. M. A. Neerinx, "Situating cognitive engineering for crew support in space", *Pers Ubiquit Comput.*, 15:445-456, 2011.
- [19]. J. Nielsen, *Usability Engineering*, San Francisco, Morgan Kaufman, 1994.
- [20]. D. A. Norman e S. W. Draper, *User Centered System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction*, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 1986.
- [21]. T. A. O'Connell e Y.-Y. Choong, "Metrics for measuring human interaction with interactive visualizations for information analysis", *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '08)*. ACM, New York, NY, USA, 1493-1496, 2008.
- [22]. J. Preece, Y. Rogers e H. Sharp, *Interaction Design: beyond human-computer interaction*, 3rd. Ed, England, John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- [23]. D. Quinones et al., "Developing Usability Heuristics: A Formal or Informal Process?", *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 7, p. 3400-3409, 2016.
- [24]. H. V. Rocha e M. C. C. Baranauskas, *Design e Avaliação de Interfaces Humano-Computador*, Campinas, NIED/UNICAMP, 2003.
- [25]. J. Rubin, *Handbook Of Usability Testing: How to plan, design, and conduct effective tests*, EUA, New York, John Wiley & Sons Inc., 1994.
- [26]. Scopus, An eye on global research. Elsevier. 2014. URL: http://www.elsevier.com/data/assets/pdf_file/0007/148714/scopus_facts_and_figures.pdf
- [27]. B. Shneiderman e C. Plaisant, *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction*, 4th, USA, Pearson Education, Inc./Addison Wesley, 2005.
- [28]. S. L. Smith e J. N. Mosier, *A design evaluation checklist for user-system interface software*, ESD-TR-84-358, MTR-9480, AD-A158 599, Hanscom Air Force Base, Massachusetts, October 1984.
- [29]. S. L. Smith, e J. N. Mosier, Guidelines For Designing User Interface Software. August 1986. URL: <http://www.hcibib.org/sam/>
- [30]. P. Velagapudi, P. Scerri, K. Sycara, H. Wang e M. Lewis, "Potential scaling effects for asynchronous video in multirobot search", *Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS '08)*, ACM, New York, NY, USA, 35-42, 2008.
- [31]. Web of Science. Thomson Reuters [internet]. 2013. URL: <http://thomsonreuters.com/web-of-science-core-collection/>



Adriana Porto Proença é doutoranda em Computação Gráfica na Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Possui Graduação em Decoração (1999) e Mestrado e Artes Visuais (2013) pela mesma instituição. Atua principalmente na área de usabilidade em RVA com ênfase em Ambientes Interativos Tridimensionais voltados à educação.



Milton Miranda Neto é analista de Sistemas, Pesquisador, Professor Universitário, Doutorando em Computação Gráfica pela Faculdade de Engenharia Elétrica da Univ. Federal de Uberlândia, instituição em que se graduou em Ciência da Computação e obteve Mestrado. Atua na área Engenharia de Software, automação de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARPs), Computação Gráfica e Inteligência Artificial.



Edgard Lamounier possui Licenciatura Plena em Matemática (1986) e Mestrado em Engenharia Elétrica (1989) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Obteve o título de PhD (1996) pela Escola de Computação da Universidade de Leeds, Inglaterra. Atualmente, é professor Titular da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU. Tem experiência na área de Engenharia e Ciência da Computação, com ênfase em Arquitetura de Sistemas de Computação e Computação Gráfica. Atua, principalmente em: aplicações de Realidade Virtual e Aumentada em Educação à Distância, Reabilitação Motora e Sistemas de Engenharia.



Alexandre Cardoso possui graduação (1987) e Mestrado em Engenharia Elétrica (1991) pela Universidade Federal de Uberlândia e Doutorado em Engenharia Elétrica (Engenharia de Sistemas Digitais) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2002). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica e Engenharia da Computação, com ênfase em Engenharia de Software e Computação Gráfica, atuando principalmente nos seguintes temas: Realidade Virtual e Aumentada, Educação, Ambientes Virtuais, Interfaces Humano Computador e Visualização da Informação.



Pollyana Notargiacomo possui graduação em Pedagogia (1992), Mestrado (1999) e Doutorado (2003) em Educação pela Universidade de São Paulo e Pós-Doutorado em Engenharia Elétrica (2015) pela Universidade Federal de Uberlândia. Atua principalmente nos seguintes temas: Game Design, Game Mechanics, Serious Games, Arquitetura Informacional, Usabilidade, Objetos de Aprendizagem, Recursos Educacionais Abertos, Design Instrucional, Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDICs), EAD.