

Estudo teórico de Design Instrucional para utilização de Realidade Virtual no treinamento de atividades profissionais em linhas energizadas de distribuição

Bruno H. Pontes¹, Romero Toriz, Camila Achutti³

Resumo

Treinamentos baseados em sistemas de Realidade Virtual (RV) imersivos já são empregados em diversas especialidades, como na operação em linhas energizadas na área de Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Apesar disso, a literatura desse tipo de treinamento ainda carece de orientações precisas sobre o Design Instrucional (DI) para utilização de recursos pedagógicos baseados em RV. Desta forma, este trabalho objetiva preencher essa lacuna a partir da integração de conhecimentos adquiridos da literatura sobre DI com os conhecimentos de um contexto real de aplicação da RV em sistemas de treinamento na área de SEP, adquiridos na observação do projeto de uma concessionária brasileira de energia elétrica. Os conhecimentos adquiridos foram cruzados na etapa de análise desse projeto, na qual foi possível concluir que a RV é adequada ao método instrucional utilizado, porém o DI desta aplicação não leva em conta aspectos cognitivos dos aprendizes.

Palavras-chave: Treinamento, Design Instrucional, Realidade Virtual e Sistemas Elétricos de Potência.

1. Introdução

O setor elétrico ou indústria de energia elétrica é composta por uma cadeia que começa pela geração de energia elétrica e termina no seu consumo. Com o advento da corrente alternada por Nikola Tesla, a energia elétrica pode ser gerada a distâncias muito grandes dos consumidores e, por isso, a parte intermediária dessa cadeia é composta por duas infraestruturas de transporte de energia: transmissão e distribuição. A primeira transporta energia elétrica por longas distâncias (entre estados e cidades) e possui uma tensão muito elevada (até 700.000V no Brasil). A segunda transporta energia em distâncias menores (entre cidades e regiões de uma cidade) e tensão menor (superior a 1.000V e inferior a

¹ Pós-graduando em Computação Aplicada à Educação, USP, brunoharllen@usp.br

² Orientador1, USP, tori@usp.br

³ Orientador2, USP, camila@mastertech.com.br

230.000V) em relação a primeira. Essas infraestruturas de transporte são compostas por diversos equipamentos e materiais que precisam estar em pleno funcionamento. Para isso, essas infraestruturas são geridas por empresas especializadas ou pelo próprio governo a partir de diversas atividades.

Uma dessas atividades, relacionada a infraestrutura de distribuição, e a operação e manutenção dos equipamentos em redes elétricas energizadas. Os operadores em eletricidade trabalham com equipamentos defeituosos ou passando por manutenção preventiva conectados à rede elétrica sem que haja o desligamento desta para não haver interrupção no fornecimento de energia aos consumidores. Trata-se de uma atividade delicada e um erro pode ser fatal para o trabalhador. Algumas concessionárias do Brasil adotam esse tipo de atividade como uma estratégia para reduzir o número e o tempo das interrupções do fornecimento de energia aos consumidores de forma a atender as exigências da ANEEL em relação aos índices Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) e Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC).

O treinamento tradicional de segurança dessa atividade é feito, geralmente, em um ambiente dentro da empresa, na qual se recria uma situação muito parecida com a que o trabalhador iria enfrentar na prática, sendo instalada uma pequena rede de distribuição com os mesmos equipamentos, instalações e materiais que estão dispostos e em funcionamento na rua. O treino é praticado com a rede desenergizada para resguardar o trabalhador. Dessa forma, ele pratica somente o passo-a-passo do procedimento operacional para executar a atividade de forma satisfatória e segura.

Com a evolução da Realidade Virtual (RV), diversas atividades profissionais passaram a adotar essa tecnologia como meio de treinamento. A atividade citada anteriormente é uma delas. A RV é ideal para o treinamento de trabalhadores que realizam tarefas em ambientes arriscados ou perigosos e ela pode ser usada em várias situações, como: treinar operadores de equipamentos de alto custo; simular cenários de emergência e situações perigosas em que o treinamento no mundo real não é viável; representar visualmente conteúdos altamente técnicos; criar cenários relevantes que não podem ser experimentados no mundo real; e executar tarefas rotineiras sem pressão (WYK, 2015).

A maioria dessas soluções são convenientes ao treinamento de atividades de operação e manutenção de linhas energizadas. Tanto que, na literatura, encontram-se diversas aplicações de RV no treinamento do setor elétrico, como o uso de um sistema de RV não imersivo¹ para melhorar as habilidades técnicas na manutenção de linha-viva (energizada) em redes de distribuição de energia elétrica (PEREZ-RAMIREZ; ARROYO-FIGUEROA; AYALA, 2019); desenvolvimento de um sistema de RV imersivo para trabalhadores de linha-viva que foca no trabalho de substituição de chave fusível defeituosa em sistema de distribuição elétrica (PARK; JANG; CHAI, 2006); criação de uma Subestação de Energia Elétrica (SE) virtual imersiva para auxiliar o treinamento de eletricitistas de SE (TANAKA et al., 2017); plataforma de treinamento em RV aplicada ao Centro de Educação e Treinamento da Companhia de Energia Elétrica de Xangai, desenvolvida para exercícios de

¹Imersão é uma medida objetiva sobre o grau de estímulos que um sistema de RV envia aos receptores sensoriais de um usuário em relação a representação de origem simulada pelo sistema. Dessa forma, existem diferentes graus de imersão nos sistemas de RV e eles podem ser medidos e comparados em relação a sua qualidade (TORI; HOUNSELL, 2018).

emergência de alto risco, procedimentos incomuns, impraticáveis e de baixo custo para treinar habilidades de energia elétrica em SEs e Linha de Transmissão (LT) (ZHANG et al., 2018).

Todos esses trabalhos abordam a aplicação de RV no treinamento da área de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), mas nenhum deles fornece orientações precisas sobre o processo de *design* instrucional¹ (DI) para utilização de recursos pedagógicos baseados em RV nos seus treinamentos. Isso pode ser justificado pela escassez na própria literatura de DI (SOTO, 2013 apud WYK, 2015).

Dessa forma, este trabalho objetiva integrar as informações sobre os fundamentos de DI para utilização de recursos pedagógicos baseados em RV com informações sobre a aplicação prática de RV no treinamento de segurança nas atividades de Operação e Manutenção (O&M) de linhas elétricas. Com isso, pode-se ter uma compreensão maior (além da literatura) do real contexto de aplicação de RV para esse tipo de treinamento, entender seus pros e contras e buscar, a partir de uma compreensão mais aprofundada sobre DI, melhorar o uso da RV nesse contexto.

2. Metodologia

Para alcançar os objetivos descritos, este trabalho foi construído e apresentado em três etapas principais: fundamentação teórica, observação e análise.

A fundamentação teórica foi escrita a partir da revisão da literatura, em busca da definição e conceitos da RV, e pelo estudo do conteúdo e das referências bibliográficas de um capítulo da tese de Van Wyk (2015) que descreve os fundamentos relacionados ao *Design* instrucional para recursos pedagógicos em RV. A revisão da literatura se deu a partir da busca e estudo de livros de autores especialistas na área de RV, como Jason Jerald e Romero Tori. Já a coleta da tese de Van Wyk (2015) foi fruto da pesquisa exploratória sobre aplicação de RV no treinamento profissional da área de SEP, conduzida para apresentar, na introdução, os trabalhos relacionados a este tema.

A pesquisa exploratória foi realizada no Portal de Periódicos Capes, busca por assunto, utilizando as seguintes palavras-chaves: “*virtual reality training*” AND “*Power system*”. Além das palavras-chaves, utilizou-se os filtros “periódicos revisado por pares”, publicações do ano de 2010 a 2019 e publicações nas áreas de *Engineering, Education, Virtual Reality, Learning, Computer Simulation* e *Cognition & Reasoning*. A busca resultou em, aproximadamente, 5.600 trabalhos, dos quais optou-se por selecionar trabalhos que o título e resumo indicasse semelhança com a aplicação de RV no treinamento profissional da área de SEP.

Apesar da tese ter sido encontrada nesta pesquisa, ela não foi abordada na introdução por não ser da área de SEP. Trata-se do desenvolvimento de um *Framework* para avaliar os sistemas de treinamento em RV na indústria de mineração. Porém, um dos capítulos realiza a fundamentação teórica de DI aplicado em ambientes *e-learning* (caso

¹Uma das definições da literatura que está alinhada ao processo educacional relatado neste trabalho e “o conjunto de regras ou procedimentos para criação de treinamentos.”. Modo de projetar um treinamento de forma integral, desde o momento da ideia até a sua implementação. (PISKURICH, 2000 apud KENSKI, 2019).

de ambientes de treinamento baseados em RV). Como um dos objetivos desse trabalho e o estudo sobre os fundamentos de DI para utilização de recursos pedagógicos baseados em RV imersiva, optou-se por utilizar essa fonte de informação como base.

A etapa de observação buscou descrever como a RV está sendo incorporada no treinamento de segurança nas atividades de O&M de linhas elétricas energizadas em um contexto prático. Para isso, foi feito um acompanhamento de parte do processo de desenvolvimento do sistema de treinamento baseado em RV da concessionária CELESC. O acompanhamento se deu junto a equipe do Laboratório de Sistemas Integráveis Tecnológico (LSI-TEC) da USP, que desenvolveram o sistema. Assim, foi possível coletar dados através de entrevistas com a equipe, leituras dos documentos de projeto e reuniões com os profissionais responsáveis pelo projeto, inclusive o chefe de treinamento da CE-LESC. Além dos envolvidos, foi realizada entrevistas com técnicos que trabalham no setor elétrico, mais especificamente na área de distribuição de energia elétrica.

A última etapa (Análise) descreve a compreensão das informações coletadas na etapa anterior no que diz respeito aos benefícios e dificuldades da utilização da RV para esse tipo de treinamento, assim como analisa os aspectos de DI a luz do estudo feito na etapa de fundamentação teórica sobre os fundamentos de DI para recursos pedagógicos em RV.

3. Referencial teórico

Este capítulo define a RV e apresenta detalhes sobre a imersão, conceito objetivo que faz parte de uma das características dos sistemas de treinamento baseados em RV. Além disso, o capítulo apresenta os resultados do estudo feito sobre os fundamentos relacionados ao DI para recursos pedagógicos em RV.

3.1. Realidade Virtual

O termo "realidade virtual" é popularmente usado para descrever mundos imaginários, que só existem em computadores e em nossas mentes, e simulações de situações reais. Já as definições na literatura são mais elaboradas e precisas, sendo, por vezes, compreendida como um conceito. Steuer (1992) fala que a RV é a criação de um ambiente real ou simulado onde o usuário experimenta a sensação de tele presença – sensação de presença induzida por uma mídia. Tori, Kirner e Siscoutto (2006), afirmam que a RV "é, antes de tudo, uma interface avançada do usuário' para acessar aplicações executadas no computador, tendo como características a visualização de, e movimentação em, ambientes tridimensionais em tempo real e a interação com elementos desse ambiente. Além da visualização em si, a experiência do usuário de RV pode ser enriquecida pela estimulação dos demais sentidos como tato e audição" (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006). Para este trabalho, usaremos a definição de Jerald (2015) que diz: a realidade virtual é um ambiente digital gerado por computador que pode ser experimentado de forma interativa como se esse ambiente fosse real.

3.1.1. Formas de realidade

Milgram e Kishino (1994), definiu uma representação para as diversas formas de realidade baseando-se na proporção do ambiente real e virtual. Esta representação foi chamada de *continuum* de virtualidade e ilustrada de acordo com a Figura 3.1. Tori e Hounsell (2018) falam que um ambiente real é aquele que “o usuário considera ser pertencente a sua realidade”. Ambientes virtuais são criados artificialmente, sintetizados por mecanismos digitais e que podem ser reproduzidos de forma imaterial. Entre esses dois ambientes, surgem as formas de Realidade Mista (RM), como a Realidade Aumentada (RA) e Virtualidade Aumentada (VA). A primeira agrega artefatos virtuais a um ambiente real existente. Uma solução bastante popular para desenvolvimento de aplicações de RA e o Artoolkit (*Aug-mented Reality Toolkit*), que usa técnicas de computação visual para detectar marcadores reais e posicionar objetos virtuais de acordo com a posição e orientação dos marcadores em relação a câmera. A VA é o resultado da captura de conteúdo do mundo real e sua incorporação a ambientes de realidade virtual. Um exemplo deste tipo de solução é apresentado no trabalho de Regenbrecht et al. (2003) onde uma sala de reunião virtual posiciona as imagens de uma videoconferência na posição dos avatares virtuais sentados a mesa.



Figura 3.1. O *continuum* da virtualidade. Fonte: (MILGRAM; KISHINO, 1994)

3.1.2. Imersão

Imersão é um conceito objetivo que faz parte das características de sistemas de RV. (TORI; HOUNSELL, 2018). É uma medida do grau de estímulos que um sistema de RV envia aos receptores sensoriais de um usuário em relação a representação de origem simulada pelo sistema. Dessa forma, existem diferentes graus de imersão nos sistemas de RV e eles podem ser medidos e comparados em relação a sua qualidade (TORI; HOUNSELL, 2018). Assim, há parâmetros na literatura que podem ser usados para essa comparação, como os definidos por Jerald (2015):

Menos abrangentes e mais focados no sentido da visão, Cummings, Bailenson e Fidler (2012) apontam outros parâmetros importantes para a promoção da imersão. Eles são a qualidade da imagem (fidelidade da imagem sintetizada), campo de visão do ambiente virtual, Estereoscopia (promove a sensação de profundidade e distância de um elemento dentro do ambiente virtual) e rastreamento (tempo de resposta, graus de liberdade e precisão, por exemplo).

Quanto mais imersiva, mais a RV faz um ambiente artificial parecer o original e permite que alguém fique imerso nele e interaja com vários objetos no mundo criado usando dispositivos específicos, como o *Head Mounted Display* (HMD) ou óculos de RV,

luvas rastreadoras, sistema de rastreamento espacial, comando de voz, entre outros. Os aspectos mais importantes da RV imersiva são que ela permite que o usuário aja como deseja e interaja com vários objetos do mundo criado. Além disso, pode fornecer oportunidades para experimentar vários ambientes e situações. Essas características distintas da RV imersiva são particularmente úteis para aplicações educativas e de treinamento (PARK; JANG; CHAI, 2006). Além de exigir que o usuário seja ativo no processo de treinamento, o ambiente virtual possibilita um ambiente seguro, evitando acidentes reais (TORI; HOUNSELL, 2018).

3.2. Design instrucional para recursos pedagógicos em RV

Van Wyk (2015) afirma que há muitas definições restritas para a abordagem *e-learning*, enquadrando-a exclusivamente como o uso da Internet para instrução e aprendizado. Porém, ele afirma que existem outras definições mais amplas. Sangra, Vlachopoulos e Cabrera (2012) definem o *e-learning* como uma abordagem ao ensino e aprendizagem que se baseia no uso de mídias e dispositivos eletrônicos como ferramentas para melhorar o acesso ao treinamento, comunicação e interação e que facilita a adoção de novas maneiras de entender e desenvolver a aprendizagem. A partir desta perspectiva, o autor considera as soluções de treinamento baseados em RV como sendo artefatos de *e-learning* e, portanto, se aprofunda nos fundamentos dessa abordagem para servirem como critérios do *Framework* proposto pelo autor. Esses fundamentos são os princípios das teorias de aprendizagem e o DI.

Lau, Yen, Li e Wah (2014) indicam que os sistemas de RV podem ser projetados para que os alunos vivenciem ativamente situações diferentes e adquiram experiência prática na solução de problemas, em vez de simplesmente compreender informações. Como as tecnologias multimídia se referem amplamente ao desenvolvimento e uso de vários tipos de mídia para aprimorar a visualização de conteúdo e a interação do usuário, os *designers* instrucionais em sistemas de aprendizado de RV devem aplicar os princípios de aprendizado de multimídia (LAU et al., 2014). Embora o uso de multimídia, como ambientes virtuais, possa proporcionar uma experiência de aprendizado mais rica, ele não garante uma aprendizagem efetiva. Clark e Taylor (1994) afirmam que o aprendizado que ocorre devido a exposição a mídia e causado pelo método instrucional incorporado na apresentação, e não pela mídia. Já Kozma (1991) afirma que, além do método, as mídias tem, sim, influencia no aprendizado. Nessa discussão, ainda há uma inconclusão se uma mídia pode melhorar ou não o aprendizado. O que se pode afirmar é que ela pode atrapalhar o processo se não for adequada ao método instrucional utilizado e aos modos cognitivos dos aprendizes.

Brunken et al. (2004) afirmam que muitos experimentos de DI foram conduzidos por pesquisadores de tecnologia educacional para determinar como os alunos podem se beneficiar mais dos ambientes de aprendizado multimídia. Nesses experimentos, os pesquisadores descobriram vários efeitos principais do DI nos resultados de aprendizagem e efeitos diferenciais da apresentação do material de aprendizagem, dependendo das diferentes características dos alunos. Porém, o foco da pesquisa educacional na aprendizagem multimídia mudou da pesquisa sobre os efeitos do DI individual para o desenvolvimento e avaliação de modelos teóricos mais integrados de processamento cognitivo na aprendizagem multimídia, como a teoria da carga cognitiva (SWELLER, 1999) e a teoria cognitiva

da aprendizagem multimídia (MAYER, 2002). Portanto, ambas são detalhadas a seguir.

3.2.1. Teoria da carga cognitiva

A teoria da carga cognitiva (TCC) se fundamenta em uma visão do processamento de informações da cognição, na qual possui uma arquitetura estruturada, principalmente, pela memória de longo prazo e a memória de trabalho. As novas informações incorporadas (aprendizado) são armazenadas na memória de longo prazo, mas, antes disso, as informações precisam ser processadas na memória de trabalho, que tem capacidade muito limitada. Dessa forma, a TCC busca identificar os formatos de instrução que tem mais sucesso em superar essas limitações inerentes a memória de trabalho (SAWICKA, 2008).

A teoria afirma que há um limite para a quantidade de capacidade cognitiva que um(a) aprendiz pode dedicar a uma atividade de aprendizado específica. Essa capacidade é distribuída por vários processos cognitivos necessários para a aprendizagem e é descrita em três formas de carga cognitiva (PAAS; RENKL; SWELLER, 2003):

- **Carga intrínseca:** complexidade inerente ao conteúdo utilizado. Por exemplo, as Equações Diferenciais Ordinárias (EDOs) são mais complexas do que a operação de soma de números inteiros e reais.
- **Carga estranha:** refere-se à capacidade cognitiva necessária para compensar uma estrutura e formato de instrução ruim, ou seja, um processo cognitivo que não contribuem para o processo de aprendizado. Uma instrução de aprendizagem pode ser apresentada de várias maneiras, exigindo quantidades variáveis de capacidade cognitiva. Com isso, essa carga pode ser administrada pelo *designer* instrucional.
- **Carga pertinente:** destinada a construção ativa do conhecimento, como a construção de esquema ou integração de esquema. É considerada o fator chave na compreensão e no armazenamento do material de aprendizagem.

Argumenta-se que a capacidade cognitiva total disponível é limitada e a carga intrínseca é assumida constante. Dessa forma, os recursos cognitivos para atividades pertinentes podem ser liberados minimizando a carga estranha. Portanto, o DI dos materiais de aprendizagem desempenha um papel importante na aquisição efetiva de conhecimento.

O estudo de Brunken et al. (2004) mostra que simplesmente eliminar elementos redundantes diminui a carga estranha, porém alerta que, em alguns casos, isso pode baixar o nível de interesse do material. Com isso, os autores sugerem otimizar a carga estranha levando em consideração a complexa interação entre as demandas do material de aprendizagem, o processo de aprendizagem e o modo de apresentação. Mas falam que mais pesquisas são necessárias para entender melhor essa interação complexa e mostrar como projetar materiais de aprendizagem interessantes sem impor muita carga ao(a) aprendiz.

Sawicka (2008) apresenta uma tabela com o impacto dos três tipos de carga cognitiva para alguns formatos de instrução. Muitos dos formatos influenciam mais de um

tipo de carga cognitiva e com diferenças para aprendizes novatos e experientes. Tarefas que objetivam a apresentação gradual da complexidade dos materiais de aprendizagem para o(a) aprendiz reduzem a carga intrínseca e permitem o envolvimento de mais recursos cognitivos no processamento pertinente desejável. Tarefas com ilustrações completas ou parciais de como o problema específico pode ser resolvido ajudam a reduzir a carga estranha do material, ao mesmo tempo que estimulam a produtividade da carga pertinente. Enquanto estas tarefas parecem ajudar os novatos, para os experientes elas aumentam a carga estranha, assim como apresenta um efeito adverso na carga pertinente. A auto explicação/elaboração cognitiva (exigindo que o(a) aprendiz reflita explicitamente sobre o material aprendido) também parecem ter um efeito inverso na aprendizagem no caso de aprendizes novatos e especialistas. Aumentam a carga pertinente (desejável) para novatos e a carga estranha (indesejável) para especialistas.

3.2.2. Teoria cognitiva da aprendizagem multimídia

Mayer e Moreno (2003) definem a aprendizagem multimídia como aprender a partir de palavras e imagens e instrução multimídia como a apresentação de palavras e imagens que tem como objetivo promover a aprendizagem. As palavras podem ser impressas (por exemplo, texto na tela) ou faladas (por exemplo, narração). As imagens podem ser estáticas (por exemplo, ilustrações, gráficos, fotos ou mapas) ou dinâmicas (por exemplo, animação, vídeo ou ilustrações interativas).

Os autores propõem uma teoria de aprendizagem multimídia com base em três suposições da ciência cognitiva:

- Canal duplo: os humanos possuem sistemas separados para o processamento de material pictórico e verbal;
- Capacidade limitada: Há uma quantidade limitada de capacidade de processamento para cada canal;
- Processamento ativo: A aprendizagem requer processamento cognitivo substancial nos canais verbais e visuais.

A figura 3.2 representa a teoria cognitiva de aprendizagem multimídia proposta por Mayer e Moreno (2003). As duas linhas representam os dois canais de processamento de informações, com o canal auditivo/verbal na parte superior e o canal visual/pictórico na parte inferior. As cinco colunas da figura representam cinco processos cognitivos requeridos pela aprendizagem multimídia, que são: selecionar palavras, selecionar imagens, organizar palavras, organizar imagens e integrar os modelos verbais e pictóricos aos conhecimentos prévios.

Os autores também exploraram maneiras de reduzir a carga cognitiva na aprendizagem multimídia, visto que um sistema cognitivo tem limites baixos de processamento.

A sobrecarga cognitiva ocorre quando o processamento total requerido excede a capacidade cognitiva do(a) aprendiz. Os autores afirmam que a redução dessa carga pode

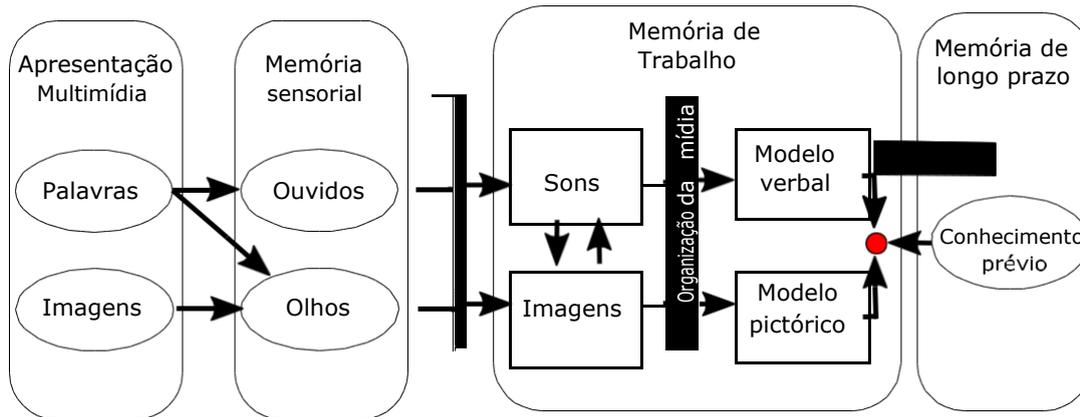


Figura 3.2. Teoria cognitiva da aprendizagem multimídia. Fonte: adaptado de (MAYER; MORENO, 2003)

ser obtida: redistribuindo o processamento essencial (os cinco processos centrais da figura 3.2 responsáveis por darem sentido ao material), reduzindo o processamento incidental (processos que não ajudam a dar sentido ao material) ou reduzindo a retenção representacional (responsável por manter uma representação mental na memória de trabalho durante um período de tempo).

4. Treinamento de operação e manutenção de linhas energizadas baseado em RV: Caso da CELESC

A concessionária CELESC investiu, em 2011, sua receita de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) no projeto *Sistema Computacional com elementos reais e virtuais para treinamento em segurança do trabalho nas atividades de Operação e Manutenção (O&M), considerando a prevenção e controle de riscos em redes aéreas de Distribuição de Energia Elétrica*. Trata-se de um sistema de treinamento em RV imersiva para execução de tarefas de operação e manutenção em linhas energizadas.

Os projetos de P&D deste setor são regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que agrupam estes projetos na seguinte cadeia de inovação: Pesquisa básica dirigida, pesquisa aplicada e desenvolvimento experimental. Esta última etapa é dividida pelas fases “cabeça de série”, “lote pioneiro” e “inserção no mercado” (ANEEL, 2012).

A etapa de observação deste trabalho começou a ser realizada logo após a finalização da etapa de pesquisa aplicada, na qual foi desenvolvido um protótipo do produto e instalado na concessionária para realização de testes. A Figura 4.1 ilustra um operador da empresa utilizando o sistema.

4.1. Atividade de abertura e fechamento de Chave-Fusível: foco do treinamento

Para começar a descrição dos dados coletados na observação, será detalhado, primeiramente, a atividade relativa ao treinamento da CELESC que recebeu a plataforma de RV.

Trata-se da abertura e fechamento de Chave Fusível (CF) de distribuição, feita para instalação, manutenção preventiva e corretiva deste equipamento. Ele é um dispositivo de



Figura 4.1. Operador utilizando o sistema de treinamento em RV. Fonte: Nota técnica - Aspectos técnicos de O&M - CELESC.

proteção de sobrecorrente empregado, de modo geral, em subestações para proteção de transformadores e banco de capacitores.

Na ocorrência de uma sobrecorrente em um ponto do sistema de distribuição, ocasionando o desarme de uma das três CF, uma equipe técnica da concessionária responsável pelo sistema e acionada para reparar o problema e realizar a manutenção no local. Desde a saída até a finalização da manutenção, a equipe precisa cumprir um procedimento padrão com as seguintes etapas: deslocar até local de serviço; estudar e programar o desligamento do trecho de rede; posicionar o cesto aéreo; sinalizar e isolar a área de serviço; e operar o serviço.

A operação do serviço e etapa do procedimento na qual o operador realiza a manobra da CF para substituí-la. Antes do operador trocar o cartucho da CF queimada, ele precisa manobrar as outras duas chaves para desenergizar o local de trabalho, para, então, realizar a manutenção da chave queimada. A Figura 4.2 ilustra esse momento.

A etapa de operação de serviço, assim como as outras etapas, também possuem um procedimento padrão específico para realizá-la de forma a prevenir os riscos inerentes a atividade. Para a ocorrência em questão (CF desarmada devido a queima do elo-fusível provocado por uma sobrecorrente), o procedimento padrão para esta atividade é feito de acordo com os passos seguintes:

1. Receber do operador auxiliar o bastão de manobra¹ com Dispositivo de Abertura com Carga (DAC) ou *Loadbuster*² instalado, caso necessário.
2. Verificar a instalação do DAC do bastão de manobra, caso instalado;
3. Testar com o bastão de manobra as condições físicas dos componentes da estrutura da CF, inclusive as fixações de seus componentes;

¹Bastão que abriga pontas de serviço.

²Ponta utilizada para abertura de CF na rede.



Figura 4.2. Manobra de CF queimada. Fonte: Nota técnica - Aspectos técnicos de O&M - CELESC

4. Manobrar a CF com o DAC para desligar o Transformador ("abrir CF);
5. Testar ausência de tensão nos terminais primários do Transformador;
6. Testar ausência de Tensão no trecho de nos terminais secundários do Transformador;
7. Desconectar os grampos¹ de linha energizada da rede elétrica;
8. Reposicionar o cesto aéreo para instalação do conjunto aterramento temporário² nos terminais primários do transformador;
9. Retirar os cartuchos da CF;
10. Reposicionar novamente o cesto aéreo para instalação da placa de advertência³ "Não Ligue - em Manutenção";
11. Retornar o cesto aéreo para a caminhonete
12. Reposicionar novamente o cesto aéreo para retirada da placa de advertência "Não Ligue - em Manutenção";
13. Reposicionar o Cesto Aéreo para retirada do conjunto aterramento temporário dos terminais primários do transformador;
14. Reinstalar os cartuchos nas Chaves Fusíveis;

¹Peca utilizada para fazer conexões entre os cabos da rede elétrica e os cabos de ligação da CF

²Procedimento de prevenção de risco para proteger o operador em casos de tensão residual na CF

³Placa para sinalizar que a rede está em manutenção.

15. Conectar os grampos de linha energizada;
16. Manobrar a CF para ligar o circuito elétrico (" fechar chave Fusível).

4.2. Treinamento na plataforma virtual

O treinamento através da plataforma de RV consiste em um ambiente interativo com elementos reais e virtuais. Os elementos reais são recriações cenográficas de equipamentos e ferramentas presentes na operação sendo treinada (cesto aéreo, bastão de manobra, luvas isolantes, Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e Talabarte¹ - ver Figura 4.1). Os elementos virtuais são modelos tridimensionais animados de equipamentos, ferramentas e ambiente onde a operação simulada ocorre. E através do HMD que o aprendiz (funcionário em treinamento) tem acesso ao ambiente, equipamentos virtuais. Durante o treinamento, o funcionário permanece dentro de uma cesta aérea cenográfica, que é posicionada em um ambiente cercado por um conjunto de sensores rastreadores. Estes sensores rastreadores identificam a posição do usuário e também dos instrumentos utilizados pelo mesmo.

Personagens: O sistema desenvolvido foi projetado para a utilização de dois personagens, o instrutor e o aprendiz. O primeiro deve ser uma pessoa que tenha conhecimento de todos os procedimentos que precisam ser seguidos para a manipulação de abertura e fechamento de CF na rede elétrica, além de conhecer todos os riscos envolvidos em cada caso de simulação. O instrutor é treinado a utilizar o *Software* de Realidade Virtual para Operação e Manutenção (SRVOM²) para criar cenários e inserir agravantes do treinamento. Ao assistir o processo de treinamento completo pelo seu computador, ele avaliara a utilização correta de todos os equipamentos necessários ao exercício, bem como o comportamento do aprendiz em todo o processo. O aprendiz, por sua vez, é o electricista da empresa que será treinado para intervenção na rede elétrica de distribuição através de manobras em CF. Ele será orientado pelo instrutor a utilizar os equipamentos de simulação e deverá realizar os passos das tarefas definidas para a sua avaliação.

Criação de cenários: Um cenário e o ambiente que o instrutor pode preparar para a imersão do aprendiz. Nele, são selecionados todos os componentes para a realização da simulação, como seleção da estrutura de rede elétrica onde será realizado o treinamento, agravantes desejados pelo instrutor, luminosidade, condições climáticas e direção do vento.

Ao iniciar o SRVOM, um cenário padrão é apresentado. O instrutor pode utilizar este cenário para a simulação, criar outro cenário ou utilizar cenários criados em outras simulações. A Figura 4.3 representa o cenário padrão iniciado automaticamente quando o programa SRVOM é executado.

Seleção dos agravantes, acessórios e ferramentas para treinamento: Os agravantes nas chaves, transformadores, condições climáticas e de iluminação podem ser aplicados e

¹Utilizado para proteção contra quedas em movimentações por torres, andaimes, estruturas metálicas, escadas marinheiras, etc. Utilize-se em conjunto com os cintos de segurança;

²Desenvolvido para a simulação de treinamento de segurança nos serviços de manobra de abertura e fechamento de CF da rede elétrica de distribuição.

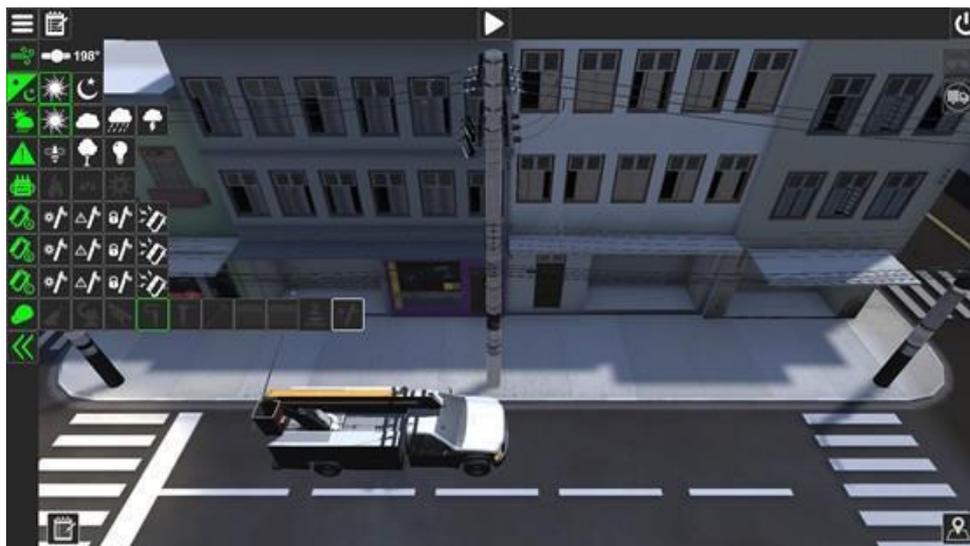


Figura 4.3. Cena rio padrão (perspectiva do instrutor). Fonte: Manual do usuário de RV - CELESC.

algumas ferramentas para o bastão de manobras podem ser selecionadas pelo instrutor de acordo com a soletração do aprendiz. Os agravantes, comandos, acessórios e ferramentas disponíveis na plataforma são: seleção da direção do vento; condições de luminosidade (define se a simulação ocorre durante o dia ou noite); condições do tempo (sol, nublado, chuva ou trovoadas); inserção de obstáculos como abelhas e árvore próxima ao poste; agravantes no transformador (fogo baixo, fogo alto e explosão); agravantes nas Cafés (fase A, B ou C): defeito na rede elétrica permanente, defeito na rede elétrica transitório, cartucho preso na chave fusível ou CF com vazamento de corrente pelo isolador (porcelana); seleção de dispositivos, como pontas para o bastão de manobras (DAC, DAQ1, “Pega Tudo”² e Testador³; de ausência de tensão; Placas de advertência “Não ligue/não opere” e Aterramento.

Mensagens de *feedback*: Durante a simulação o instrutor pode criar mensagens que indicam algum erro do aprendiz durante a simulação. Estas mensagens são salvas no sistema após a simulação e podem ser usadas para avaliação. Além das mensagens do instrutor, mensagens automáticas do sistema são também geradas, complementando a avaliação.

4.2.1. Exemplo de um exercício de treinamento simulado

Aqui é apresentado uma parte de um exercício de treinamento simulado, dentro de um conjunto de possibilidades que o sistema oferece. O objetivo é mostrar o ambiente virtual na perspectiva do instrutor e do aprendiz a partir de imagens adquiridas em documentos de projeto da CELESC.

¹Ponta utilizada para retirar da CF os cartuchos com elo fusível queimado e inserir novos cartuchos.

²Ponta do bastão utilizada para inserir e retirar grampos de linha energizada e colocar e retirar aterramento temporário.

³Ponta utilizado para verificar se a rede está energizada

O exercício do treinamento em questão é relativo a atividade de substituição de uma CF desarmada devido a ocorrência de uma sobrecorrente em uma das fases da rede elétrica. Trata-se de um caso típico de manutenção em CF que foi detalhado na seção 4.1.

Antes do aprendiz emergir no ambiente virtual, o mesmo realiza todos os procedimentos de segurança para manobrar a CF dentro do cesto aéreo, iniciando o exercício de treinamento no ambiente físico. Já o instrutor configura, através do SRVOM, a atividade específica a ser treinada, os cenários e estrutura da rede elétrica. Com a finalização da configuração do ambiente virtual e a finalização do passo-a-passo do ambiente real, a simulação do ambiente virtual é iniciada.

1. O aprendiz solicita ao instrutor a ponta do bastão correta para a abertura das demais chaves do posto. Instrutor deve selecionar o acessório DAC na interface, de acordo com a Figura 4.4.

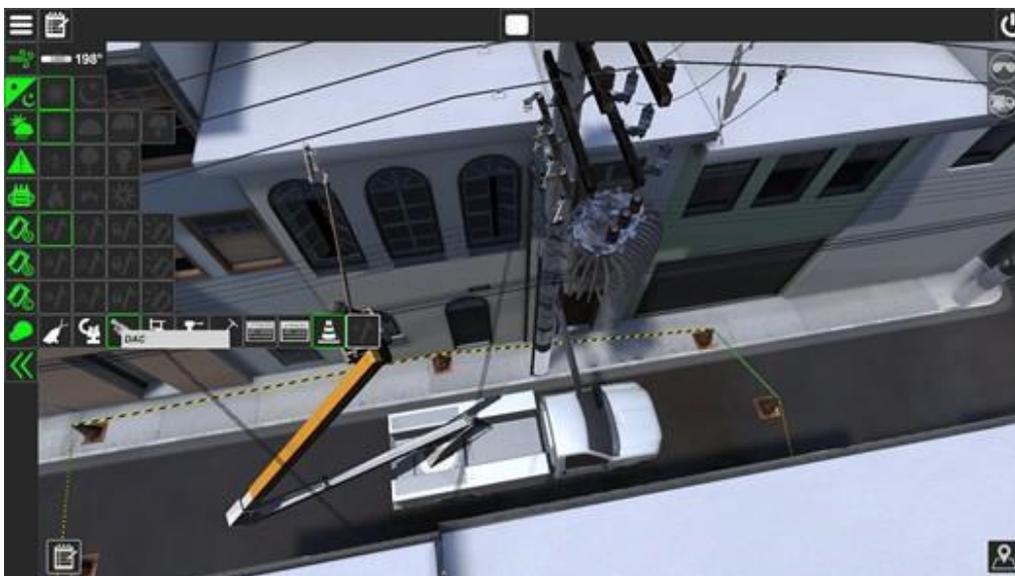


Figura 4.4. Seleção da ponta DAC (perspectiva do instrutor). Fonte: Manual do usuário de RV - CELESC.

2. Manobrar as CF com o DAC para desligar o Transformador ("abrirá CF, de acordo com a Figura 4.5)
3. Testar ausência de tensão nos terminais primários e secundários do Transformador (o Testador de tensão⁴ fica vermelho na presença de tensão e verde na ausência). Para esta etapa, o aprendiz solicita ao instrutor o acessório "testador de tensão";
4. Desconectar os grampos de linha energizada da rede elétrica (Figura 4.6). Para esta etapa, o aprendiz solicita ao instrutor o acessório "pega tudo";
5. Aterramento temporário nos terminais primários do transformador. Aqui, o aprendiz solicita ao instrutor o acessório "aterramento". Ao acionar o modo de instalação do aterramento, o aprendiz deve aproximar o bastão da circunferência verde nas 3 fases, de acordo com a Figura 4.7;

⁴Ponta utilizado para verificar se a rede está energizada



Figura 4.5. Abertura das Cafés (perspectiva do aprendiz). Fonte: Manual do usual rio de RV - CELESC.



Figura 4.6. Retirada dos grampos de linha energizada (perspectiva do aprendiz). Fonte: Manual do usual rio de RV - CELESC.

Os resultados dessa fase foram aprovados pela CELESC, considerando a aplicação como uma ferramenta potencial para a realização de treinamentos rotineiros na empresa, tanto para capacitação, como para a reciclagem do conhecimento, além de identificar diversos pontos de melhoria e possibilidades de expansão, o que levou a articulação da nova fase do projeto ("Cabeça de Serie").

5. Analise

O capítulo anterior mostrou a implementação do que tinha sido planejado sobre a atividade, dispositivos utilizados, método instrucional e interface em RV do novo sistema de treinamento da CELESC em desenvolvimento. Este capítulo faz uma análise sobre

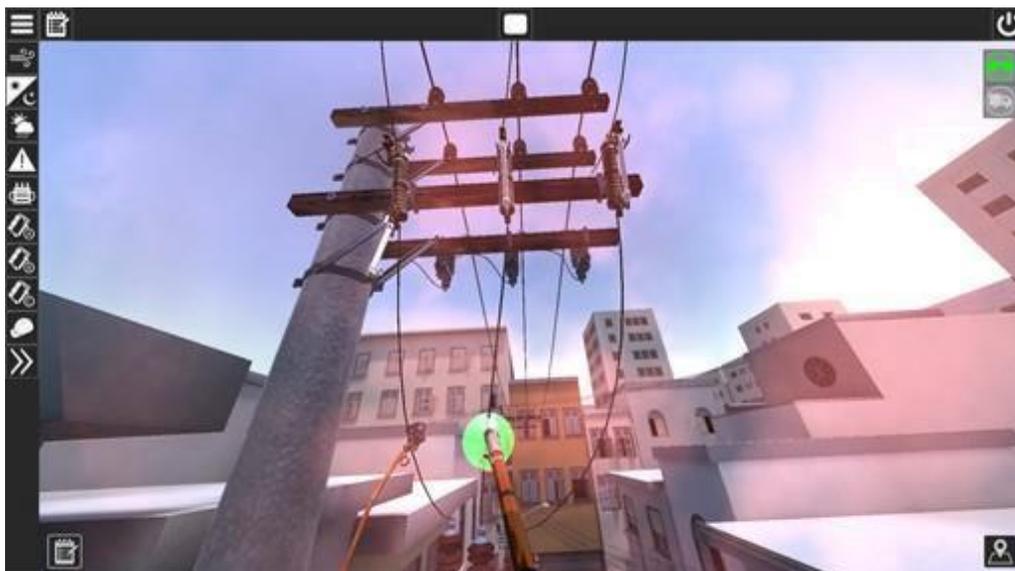


Figura 4.7. Inserção do aterramento na nos terminais prima rio do transformador (perspectiva do aprendiz). Fonte: Manual do usual rio de RV - CELESC.

essa implementação no que diz respeito, principalmente, aos benefícios e dificuldades da utilização da RV para esse tipo de treinamento, assim como os aspectos de DI.

5.1. Aspectos positivos e negativos da utilização de RV no treinamento da CELESC

Conforme foi dito na introdução, o treinamento tradicional relativo à atividade de abertura e fechamento de Chave-fusível e feito em um ambiente dentro da concessionária, na qual se recria toda a infraestrutura física que o trabalhador encontra na prática para treinar o passo-a-passo do procedimento da atividade. Neste caso, o meio desse treinamento é uma grande vantagem no que diz respeito a aprendizagem.

Porém, obter esse meio é uma tarefa difícil devido sua complexidade de implementação: precisa-se reproduzir a infraestrutura completa do ambiente de trabalho e o centro de treinamento de uma concessionária e localizado, normalmente, em apenas uma das unidades da empresa. Assim, os funcionários das outras unidades espalhadas pelos municípios do estado (uma concessionária de energia elétrica gere a rede de distribuição a nível estadual) precisam se programar e se realocar até o centro de treinamento. As condições climáticas também são outro problema quando não são favoráveis, como chuva, sol, muito vento, inviabilizando o treinamento prático que é feito ao ar livre.

A utilização da RV no contexto da CELESC acaba sendo uma solução para a complexidade desse meio. Devido ao fato de o sistema ser imersivo, o usuário consegue visualizar e interagir com um ambiente que, visualmente, é muito fiel à infraestrutura de um bairro comum de uma cidade, inclusive a infraestrutura de linhas, postes, dispositivos e equipamentos de energia elétrica. As ações do usuário e alguns objetos do mundo físico, como luvas e bastão de manobras, são capturadas por câmeras e representados no ambiente simulado. Isso aproxima o usuário da sensação de estar, de fato, presente naquele ambiente. Tem-se, então, uma reprodução muito próxima do ambiente físico de trabalho na forma virtual.

Os equipamentos, dispositivos e infraestrutura de construção que são mais caros, difíceis de transportar, construir e montar são substituídos por um HMD (Oculus Rift DK2), sistema de rastreamento ótico composto por um conjunto de câmeras infravermelhas e um sistema computacional formado por dois computadores (uma máquina e dedicada a aplicação do aprendiz e outra a aplicação do instrutor). Isso possibilita mudar a logística de treinamento, permitindo que outras unidades da empresa realizem o treinamento de maneira segura, confortável e livre das condições climáticas.

Outra característica positiva do recurso em RV, que foi uma das motivações principais para sua utilização pela CELESC, e a possibilidade de simular condições, situações e problemas práticos da atividade que não são treinandos e nem possíveis no formato tradicional, como treinar com a linha energizada e se deparar com o transformador entrando em chamas no momento de serviço, por exemplo. Isso possibilita ao aprendiz viverem- ciar as consequências de um erro na sua execução e o surgimento de agravantes externos. Com isso, e possível adicionar programas ou procedimentos de treinamento de tomadas de decisão para essas situações.

Para usufruir desses benefícios de maneira satisfatória, a CELESC junto com a LSI-TEC precisa enfrentar dificuldades encontradas durante os testes da fase “Pesquisa aplicada” (etapa do projeto que foi observada). Em reunião com os responsáveis do projeto, o instrutor responsável pela equipe de treinamento da CELESC relatou dificuldades com a reprodução de som, tontura por parte dos usuários que utilizaram o HMD e falhas de *software*. A dificuldade que foi mais destacada era o de colocar o sistema para funcionar, configurar e resolver problemas. Percebeu-se, com isso, que há uma lacuna muito grande entre o usuário e a manipulação do sistema.

5.2. Design instrucional

Sobre as questões de DI, verificou-se que o passo-a-passo do programa de treinamento tradicional foi reutilizado, na íntegra, nesse novo programa baseado em RV. A diferença foi a mudança do meio de interação do aprendiz com os equipamentos, instalações, materiais e ferramentas, que parte deles são físicos e outra parte virtuais. De acordo com o que foi discutido na seção 3.2, a mídia pode atrapalhar o processo de aprendizagem se não for adequada ao método instrucional utilizado e aos modos cognitivos dos aprendizes.

O método instrucional do treinamento da atividade se trata da pratica de simular e repetir o passo-a-passo do procedimento padrão da atividade (sequência de passos específicos para realizar a atividade de maneira correta e segura). Com isso, a visualização, sonorização e interação com o ambiente, materiais, equipamentos, instalações e ferramentais são importantes para este método. No caso do novo formato de treinamento da CELESC baseado em uma simulação híbrida, a RV complementa, de forma adequada e significativa, a parte do treino realizada no ambiente virtual devido suas características de emissividade, interatividade e multimídia.

No que diz respeito aos aspectos cognitivos, não foi identificado um *design* específico para alavancar a utilização da RV.

Como foi estudado na seção 3.2.1, Sawicka (2008) apresenta a influência dos formatos de instrução nas cargas cognitivas, com diferenças entre aprendizes novatos e

experientes. No que diz respeito a parte do treino realizado no ambiente virtual, qualquer tipo de aprendiz irá passar pela mesma experiência de treino. Conclui-se, então, que a experiência de aprendizagem pode ser melhor para um tipo de aprendiz do que para o outro.

Outra estratégia de *design* importante que não foi considerada no projeto e a familiarização com os comandos e usabilidade do sistema. Isso leva ao aumento da carga estranha que, junto com a carga pertinente (importante para a aprendizagem da atividade fim), aumentara a possibilidade de sobrecarga cognitiva do aprendiz. Como solução, poderia haver seções de aprendizagem gradual: as primeiras seções seriam destinadas ao aprendizado dos comandos e interação com o ambiente virtual (como acionar chave, como soltar, como adquirir uma ponta, por exemplo). A última seção seria o treino do passo-a-passo completo da atividade fim.

Assim, diferente do aspecto relativo ao método instrucional aproveitado do treinamento tradicional, a forma como implementaram o ambiente virtual, no que diz respeito aos aspectos cognitivos, não foi adequada, deixando uma lacuna no desenvolvimento do projeto da CELESC. Isso confirma o problema relatado na introdução deste trabalho.

6. Conclusão

A partir da identificação da ausência de informações sobre DI nos trabalhos relacionados ao treinamento de segurança nas atividades da área de SEP baseados em RV, buscou-se preencher essa lacuna ao integrar informações de DI com informações de uma aplicação prática desse tipo de treinamento, facilitando o acesso dessas informações aos *designers* instrucionais que trabalham com esse tipo de treinamento.

Aqui é fornecido um estudo inicial sobre os fundamentos de DI para utilização de recursos pedagógicos baseados em RV. A partir dele, foi descoberto que as soluções de treinamento baseados em RV são artefatos de *e-learning*, que há limites na capacidade cognitiva para se dedicar a uma atividade de aprendizado, havendo diferentes tipos de processos cognitivos, como carga intrínseca, carga estranha e carga pertinente (Teoria da carga cognitiva). Estas cargas, por sua vez, são influenciadas pelos formatos de instrução, havendo diferenças para aprendizes novatos e experientes. No estudo sobre a Teoria cognitiva da aprendizagem multimídia (caso da RV), foi descoberto que os humanos possuem sistemas separados de processamento de material pictórico e verbal, com capacidade de processamento limitada por cada canal e que precisa haver um processamento cognitivo substancial nos dois canais para se aprender.

A observação do projeto de P&D da CELESC forneceu informações importantes sobre a forma como a RV está sendo implementada em um tipo de programa de treinamento da concessionária brasileira, no que diz respeito a atividade, dispositivos utilizados, método instrucional e interface de RV. Verificou-se uma série de benefícios do uso dessa mídia para o treinamento de segurança nas atividades de O&M em linhas elétricas, como a possibilidade de outras unidades da empresa realizarem o treinamento de maneira segura, confortável e livre das condições climáticas, além de simular condições, situações e problemas práticos da atividade que não são treinados no formato tradicional.

Com as informações sobre os fundamentos de DI para utilização de recursos pé-

dialógicos baseados em RV e as informações sobre a implementação do treinamento da CELESC, foi possível integra-las a partir da análise do projeto da CELESC. A conclusão desta é que a RV é adequada ao método instrucional utilizado no projeto. Porém, o DI da mídia não levou em conta aspectos cognitivos dos aprendizes, no qual não se preocupou com as diferenças entre aprendizes novatos e experientes. Assim como não considerou o aprendizado gradual do sistema e da atividade, como comandos e usabilidade, para reduzir a carga estranha e liberar espaço de processamento cognitivo no momento da aprendizagem da atividade profissional.

Através dos estudos e análise deste trabalho, verificou-se que há mais informações a serem estudadas sobre o DI relacionado a aplicação de recursos pedagógicos baseados em RV no treinamento profissional e lacunas de DI em uma aplicação real de treinamento baseado em RV no Brasil, principalmente no que diz respeito aos aspectos cognitivos. Com isso, pretende-se, como trabalhos futuros, continuar e aprofundar os estudos sobre este tema e começar a construir esquemas e sugestões de DI voltados para o treinamento de segurança na área de SEP baseado em RV.

Referencias

ANEEL. *Manual do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica*. 2012. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>.

..

BRUNKEN, R.; PLASS, J. L.; LEUTNER, D. Assessment of cognitive load in multimedia learning with dual-task methodology: Auditory load and modality effects. *Instructional Science*, Springer, v. 32, n. 1-2, p. 115–132, 2004.

CLARK, R. C.; TAYLOR, D. The causes and cures of learner overload. *Training*, ERIC, v. 31, n. 7, p. 40–43, 1994.

CUMMINGS, J. J.; BAILENSON, J. N.; FIDLER, M. J. How immersive is enough. *A foundation for a meta-analysis of the effect of immersive technology on measured presence*, 2012.

JERALD, J. *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. [S.l.]: Morgan & Claypool, 2015.

KENSKI, V. Design instrucional: conceitos e competências. In: *Design instrucional para cursos online*. 2. ed. [S.l.]: Artesanato Educacional, 2019. cap. 2, p. 15–41.

KOZMA, R. B. Learning with media. *Review of educational research*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 61, n. 2, p. 179–211, 1991.

LAU, R. W. et al. Recent development in multimedia e-learning technologies. *World Wide Web*, Springer, v. 17, n. 2, p. 189–198, 2014.

MAYER, R. E. Multimedia learning. In: *Psychology of learning and motivation*. [S.l.]: Elsevier, 2002. v. 41, p. 85–139.

MAYER, R. E.; MORENO, R. Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational psychologist*, Taylor & Francis, v. 38, n. 1, p. 43–52, 2003.

- MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 77, n. 12, p. 1321–1329, 1994.
- PAAS, F.; RENKL, A.; SWELLER, J. Cognitive load theory and instructional design: Recent developments. *Educational psychologist*, Taylor & Francis, v. 38, n. 1, p. 1–4, 2003.
- PARK, C.-H.; JANG, G.; CHAI, Y.-H. Development of a virtual reality training system for live-line workers. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Taylor & Francis, v. 20, n. 3, p. 285–303, 2006.
- PEREZ-RAMIREZ, M.; ARROYO-FIGUEROA, G.; AYALA, A. The use of a virtual reality training system to improve technical skill in the maintenance of live-line power distribution networks. *Interactive Learning Environments*, Taylor & Francis, p. 1–18, 2019.
- PISKURICH, G. M. Rapid instructional design: Learning id fast and right (essential knowledge resource (paperback)). In: . [S.l.: s.n.], 2000.
- REGENBRECHT, H. et al. An augmented virtuality approach to 3d videoconferencing. In: IEEE. *The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings*. [S.l.], 2003. p. 290–291.
- SANGRA, A.; VLACHOPOULOS, D.; CABRERA, N. Building an inclusive definition of e-learning: An approach to the conceptual framework. *International Review of Research in Open and Distributed Learning*, Athabasca University Press (AU Press), v. 13, n. 2, p. 145–159, 2012.
- SAWICKA, A. Dynamics of cognitive load theory: A model-based approach. *Computers in human behavior*, Elsevier, v. 24, n. 3, p. 1041–1066, 2008.
- SOTO, V. J. Which instructional design models are educators using to design virtual world instruction. *MERLOT Journal of Online Learning and Teaching*, v. 9, n. 3, p. 364–375, 2013.
- STEUER, J. Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence. *Journal of communication*, Wiley Online Library, v. 42, n. 4, p. 73–93, 1992.
- SWELLER, J. Instructional design in technical areas. camberwell. *Victoria: ACER Press*, 1999.
- TANAKA, E. H. et al. Immersive virtual training for substation electricians. In: IEEE. *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*. [S.l.], 2017. p. 451–452.
- TORI, R.; HOUNSELL, M. d. S. *Introducao a Realidade Virtual e Aumentada*. [S.l.]: Editora SBC, 2018.
- TORI, R.; KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. A. *Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada*. [S.l.]: Editora SBC, 2006.

WYK, E. A. V. *An evaluation framework for virtual reality safety training systems in the South African Mining Industry*. Tese (Doutorado) — University of South Africa, 2015.

ZHANG, S. et al. Design and application of electric power skill training platform based on virtual reality technology. In: IEEE. *2018 Chinese Automation Congress (CAC)*. [S.l.], 2018. p. 1548–1551.