



DESENVOLVIMENTO E MATURIDADE TECNOLÓGICA DO ESTÚDIO EM REALIDADE VIRTUAL DA OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DE MÉDIA TENSÃO

Tema: Tecnologias Emergentes

Autores: Eduardo Soldateli

Co-Autores: Lucas Felício Argente, Willian Alano Batista, Carlos Eduardo da Costa, Adilson Yuuji Hira, Edson Aquino dos Santos, Marcelo Knörich Zuffo

Empresa: Celesc Distribuição S.A

Resumo

O Estúdio de Realidade Virtual (RV) da Celesc Distribuição é um projeto inovador de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P&DI) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), atualmente na terceira etapa, intitulada “Sistema de Realidade Virtual para Ensino e Aprendizagem de Atividades de Operação e Manutenção (O&M) em Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica - Consolidação do Produto para o *Technology Readiness Level* (TRL) nº 9, Produção Inicial e Inserção de Mercado”, sob o Código ANEEL nº 05697-0522/2022.

Desenvolvido em parceria com o Laboratório de Sistemas Integráveis Tecnológico (LSITEC) da Universidade de São Paulo (USP), o Estúdio RV Celesc visa prevenir incidentes no Setor de Distribuição de Energia Elétrica. Com características de metaverso, este ambiente inovador de ensino e aprendizagem é de fácil transporte e promove iniciativas de carbono zero e acidente zero, operando em um ambiente totalmente integrado, seguro e controlado.

Imerso na realidade virtual, o Estúdio simula os procedimentos operacionais da “Operação do Sistema Elétrico de Potência (SEP) em Média Tensão (MT)”, promovendo o domínio dos procedimentos e a redução de incidentes que geram lesões ou fatalidades na operação do SEP MT.

1. Introdução

O “Estúdio RV Celesc” é um estúdio completo de realidade virtual que simula as operações do SEP MT para um grupo de pessoas. Ele grava videoaulas, auxilia em campanhas de prevenção, é integrável ao sistema de videoconferência para transmissões online e é de fácil transporte, permitindo sua montagem em diversos locais, como auditórios, salas de centros de treinamento (figura 01), universidades, escolas, congressos, eventos de inovação, entre outros.



Figura 01: Estúdio RV montado em sala de aula.

Concebido para auxiliar na prevenção de incidentes na operação do SEP MT na Celesc, o Estúdio parte da premissa de que, através dos recursos da realidade virtual, é possível programar cenários, analisar riscos, simular procedimentos e entender o funcionamento dos equipamentos, para aprimorar indicadores de qualidade e a operação das redes de distribuição de energia elétrica, reduzindo incidentes e promovendo a prevenção.

O Estúdio simula em 15 cenários urbanos e rurais as operações de chaves fusíveis, chaves facas, religadores e reguladores de tensão. Permite desenergizar e utilizar virtualmente equipamentos como: cones, fitas de sinalização de área de trabalho, cesta aérea, luvas isolantes, luvas de cobertura, vara de manobra, ponteira universal, dispositivo antiqueda de cartucho (DAQC), dispositivo de abertura sob carga (DAC), detector de tensão, dispositivo bloqueador sinalizador (DBS), placas de sinalização, bastão pega tudo e aterramento temporário. Possibilita a substituição de porta-fusíveis e inclui agravantes como dia, noite, nublado, chuva fraca, chuva intensa, tempestade com raios, árvores, enxame de abelhas e explosão de equipamentos. Permite programar defeitos por fase, como defeito permanente, defeito transitório, cartucho travado ou vazamento de corrente. Proporciona ao usuário uma vivência imersiva e realista, apresentando a resposta real do procedimento correto e da manobra indevida. Ao grupo, através da visão dos óculos RV projetado em uma tela, interage e acompanha as simulações dos cenários da operação virtual do SEP MT. O projeto, na sua terceira etapa do P&DI da ANEEL, está na fase de lote pioneiro e inserção no mercado interno para a finalização do produto, onde: cria-se 16º cenário (*TripSaver*), multiplica-se os estúdios virtuais, analisa-se o mercado interno, prospecta-se o mercado externo, monta-se uma estrutura de suporte, implanta-se Estúdios RV na Administração Central e em Agências Regionais e inicia-se a utilização dos simuladores virtuais para instruir, aprimorar a operação do SEP MT, melhorar indicadores de qualidade e promover a prevenção de incidentes em: Cursos, Reciclagens, Eventos de Inovação e Semanas Internas de Prevenção de Acidentes (SIPATs). Também em Congressos, *Summits* (figura 02) e vários outros eventos internos e externos.



Figura 2: Estúdio RV montado em eventos externos. Demonstração ao público externo pelos especialistas do projeto de P&DI.

2. Desenvolvimento

O Estúdio RV Celesc é implementado utilizando óculos de RV e uma combinação de cenário real que se integra perfeitamente ao seu equivalente virtual. O cenário real inclui uma cesta aérea, seus comandos, luvas de MT e uma vara de manobra. As luvas e a vara de manobra são rastreadas por um sistema de câmeras infravermelhas de alta precisão (*base station*), proporcionando um alto grau de imersão e realismo. Esse rastreamento permite uma simulação precisa dos movimentos do usuário.

O cenário virtual é cuidadosamente projetado para reproduzir com exatidão todas as características espaciais, arquitetônicas e naturais relevantes, típicas do ambiente enfrentado em campo, refletindo a variedade de desafios que o ambiente impõe à atividade. O sistema é composto por dois módulos: a “interface do instrutor”, que permite programar e controlar diversos cenários desafiadores, acompanhar as reações e comportamentos dos alunos; e o simulador propriamente dito, apresentado ao aluno através dos óculos de RV. A simulação também pode ser visualizada em uma tela projetada para outros alunos, possibilitando o aprendizado por meio da observação dos erros e acertos de seus colegas.

Inicialmente, o projeto tinha objetivos educacionais, focados no treinamento de eletricitistas em procedimentos operacionais. A simulação permitia erros dos alunos, sinalizando-os de forma clara, sem necessidade de modelar a propagação desses erros na rede elétrica virtual. O sistema representava os erros mais comuns e graves, definidos por especialistas, com foco no benefício educacional. A partir de 2020, na 2ª etapa do P&DI, o sistema foi amplamente testado e recebeu *feedback* de diversos usuários. Instrutores começaram a usar a simulação para ilustrar o funcionamento da rede e dos equipamentos, realizando ações indevidas para ver a resposta do sistema. Identificando essa demanda, a lógica do sistema foi reformulada, especialmente nos equipamentos de religador automático e regulador de tensão (Figura 03), para considerar mais variáveis e combinações possíveis, retornando todos os resultados possíveis.

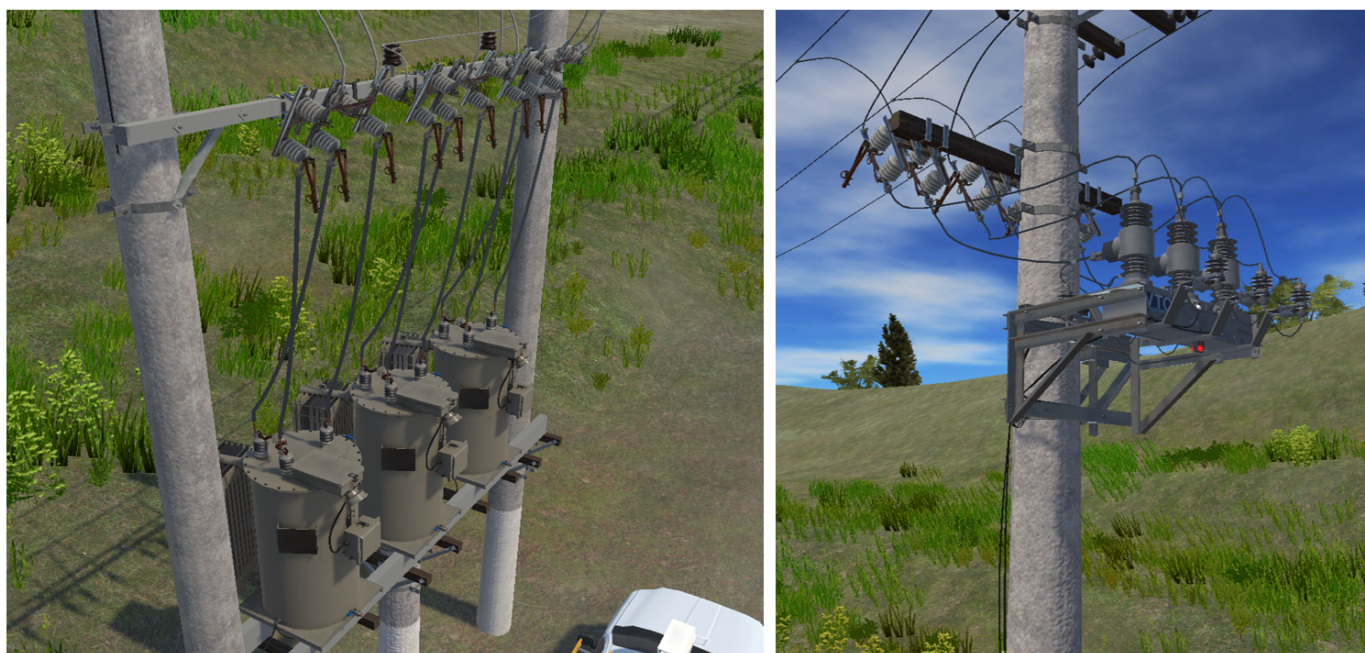


Figura 03: Banco de regulador de tensão e religador automático.

A tabela 1 apresenta um recorte do sistema e serve como referência para as grandezas envolvidas na programação e nos testes do simulador virtual. Foi necessário desenvolver um sistema de testes e diagnóstico que, de forma automática, realiza todas as combinações possíveis de estados do sistema e ações de abertura e fechamento de chaves, registrando os resultados e outras variáveis. Esses dados são exportados e comparados com uma tabela referencial atualizada, identificando rapidamente desvios e discrepâncias, o que acelera o diagnóstico e correção de erros. O software reproduz de 92% a 99,9% dos cenários simulados, conforme a revisão 09 da planilha de controle, em comparação com o modelo elétrico idealizado pela Celesc.

Tabela 1: Grandezas dos cenários do regulador e do religador.

REGULADOR		Sem Neutro	Com Neutro
Estados Possíveis do Sistema		4096	8192
Ações de abertura de chave...		24576	49152
	...que causam arco elétrico	7080	14160
	Fonte-Carga	160	320
	Fonte	440	880
	Carga	440	880
	Bypass	1320	2640
Ações de fechamento de chave...		24576	49152
	...que causam curto no bypass	1536	3072

RELIGADOR (sem considerar alterações via painel)		
Estados Possíveis do Sistema		512
Ações de abertura de chave...		2304
	...que disparam ciclo de religamento	774
	...que causam arco elétrico	825
	Fonte	55
	Carga	55
	Bypass	165
Ações de fechamento de chave...		2304
	...que disparam ciclo de religamento	1224

A metodologia da 3ª etapa deste projeto, lote pioneiro e inserção do mercado interno, visa consolidar o produto para alcançar o nível máximo de preparação tecnológica em um projeto de P&DI ANEEL. As etapas desta fase do projeto são:

1. Revisão detalhada dos cenários;
2. Revisão do hardware de controle da cesta, visando maior confiabilidade e robustez;
3. Desenvolvimento do 16º cenário de treinamento: *Trip Saver*;
4. Desenvolvimento da “Inserção de Mercado Interno” para consolidar e sustentar o negócio, além de estruturar procedimentos e responsabilidades para permitir a evolução da solução;
5. Desenvolvimento de um pacote instalador do sistema para viabilizar a instalação e distribuição em escala da solução de software;
6. Criação do processo de montagem, entrega e implantação de 10 unidades;
7. Integração do Estúdio de RV Celesc com os recursos mais recentes de captação de mídias, edição de videoaulas e geração de conteúdos digitais, permitindo maior acessibilidade e disseminação da solução.

Para a revisão do hardware de controle da cesta (figura 04) e inclusão no Processo Produtivo Básico (PPB), foram testados e avaliados os processos da cadeia de suprimentos, especificação de componentes, conjuntos, peças, compras, recebimento, inspeção, organização, gestão de equipamentos, peças dos componentes dos protótipos, fabricação da placa de circuito impresso de conexão entre as alavancas/joysticks e o workstation/sistema operacional da plataforma, montagem do conjunto de alavancas/joysticks e caixa de controle, fabricação de peças de suporte e proteção/acabamento do conjunto, fabricação de peça de fixação do conjunto e, por fim, inspeção e testes de funcionamento do conjunto com o Estúdio RV completo.

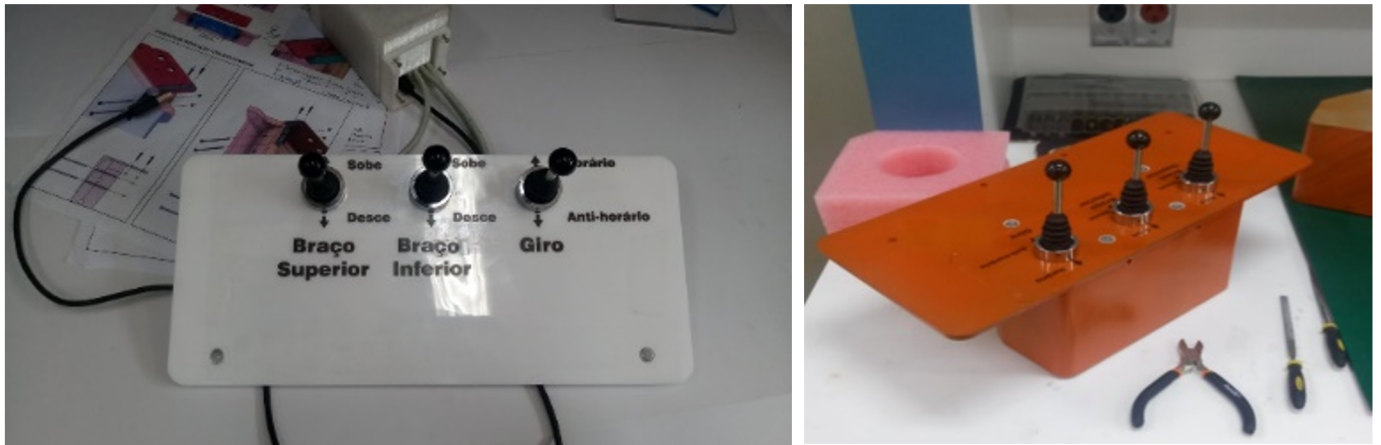


Figura 04: Comandos da cesta aérea.

O 16º cenário está sendo desenvolvido: o cenário do *Trip Saver* (figura 05). Trata-se de um religador montado em chave fusível, caracterizado por ser um modelo de religador monofásico autoalimentado, controlado eletronicamente, com interruptor de falta a vácuo. Funciona com uma sequência de operação de ciclo abre-fecha-abre-bloqueia, similar ao religador trifásico. Quando o equipamento chega ao final do ciclo, abre internamente, no interruptor a vácuo, e também externamente, girando na base, tal como ocorreria com um cartucho fusível queimado, permitindo a visualização de sua abertura. O cenário em RV abrange os procedimentos de operação do equipamento, incluindo: operação pelo manípulo, abertura, fechamento, retirada do equipamento e substituição por um porta-fusível. Também possui agravantes e simula defeitos por fase: defeito permanente na rede, defeito provisório na rede e defeito no próprio *Trip Saver*.



Figura 05: Cenário do *Trip Saver*.

Juntamente com a revisão de todos os cenários, estão sendo aprimorados os cenários para incluir a desenergização das redes de energia elétrica virtuais em baixa tensão (BT) com: a realização do autoteste do detector de BT no solo; autoteste do detector de BT em plano elevado; teste de tensão nas fases e no neutro do circuito elétrico de BT (figura 06); sinalização e instalação do aterramento temporário.



Figura 06: Teste virtual de tensão nas fases do circuito elétrico de baixa tensão.

O PPB das 10 unidades dos Estúdios RV Celesc visa atender ao nível máximo da escala TRL, sendo que 6 unidades já foram entregues à Celesc. Considerando 2 unidades Beta da etapa anterior do P&DI, Cabeça de Série, e 6 unidades entregues na etapa atual, Lote Piloto, atualmente são 8 unidades no total, com a seguinte distribuição de uso:

1. Divisão de Capacitação/Sala Ribeirão, Equipamento Beta 01;
2. Agência Regional de Criciúma, Equipamento: Beta 02;
3. Agência Regional de Lages, Equipamento: Lote Pioneiro 01;
4. Estúdio Itinerante no baú da F4000: Lote Pioneiro 02 (em fase de montagem);
5. Laboratório de Realidade Virtual Lote Pioneiro 03;
6. Agência Regional de Rio do Sul: Lote Pioneiro 04;
7. Agência Regional de São Miguel do Oeste: Lote Pioneiro 05;
8. Novo Centro de Capacitação/Sala 03: Lote Pioneiro 06 (em fase de montagem).

O novo Centro de Capacitação da Celesc está sendo inaugurado (Figura 07), e nele será instalada uma sala de referência em realidade virtual no Setor Elétrico Brasileiro. Neste ambiente, a proposta é unir elementos reais aos virtuais, trazendo todos os equipamentos reais utilizados na operação do SEP MT, como vestimenta, botinas, botas, luvas isolantes de MT e BT, luvas de cobertura, vara de manobra, bastão pegatudo, detectores de tensão de MT e BT, todos os tipos de aterramentos temporários de MT e BT, mangas isolantes, lençóis isolantes, capacete, protetor facial, balaclava, óculos de proteção, linha de vida, cinto tipo paraquedista, talabarte, dispositivo trava-quedas, todas as ponteiras, DAQC, DAC, DBS, placas de sinalização, degrau de fibra, chave fusível, chave faca, *trip saver*, painéis de regulador e religador de tensão, cones, fitas de sinalização, entre outros. A integração dos elementos reais da operação do Sistema Elétrico de Potência com os elementos virtuais do Estúdio RV aprimorará o processo de ensino e aprendizagem dos procedimentos operacionais. Isso facilitará o entendimento e contribuirá para o aprimoramento da operação do SEP MT, dos indicadores de qualidade e da prevenção de acidentes.



Figura 07: Novo Centro de Capacitação com sala referência em realidade virtual no Setor Elétrico.

Um Estúdio RV itinerante está sendo testado e preparado dentro do baú de um caminhão utilitário, uma F-4000 (Figura 08). A proposta é criar uma unidade móvel de capacitação e treinamento para atender locais pouco visitados e levar essa inovação a todos os empregados da Empresa, garantindo que tenham acesso às novas tecnologias e métodos de treinamento, independentemente de sua localização.



Figura 08: Caminhão utilitário sendo preparado inicialmente com o testes iniciais. Após será todo preparado, revestido internamente e plotado externamente.

Durante a Semana da Inovação da Celesc, no início de novembro de 2024, foi criado no Sistema de Gestão de Aprendizagem da CELESC, o Celesc Capacita, um curso chamado “SEP Virtual” (Figura 09) destinado a todos os empregados, especialmente os administrativos. A proposta, inicialmente voltada para os empregados da Administração Central e posteriormente expandida para os regionais, é utilizar recursos de realidade virtual para apresentar o Sistema Elétrico de Potência, seus equipamentos e as formas de operação. Isso visa proporcionar uma melhor compreensão do negócio da empresa, que é a distribuição de energia elétrica, além de apresentar os riscos aos quais os profissionais estão expostos e as medidas de proteção adotadas pela Empresa. Na plataforma de capacitação, desde 12/11/2024, foram criadas 8 turmas, com carga horária de 4 horas, e aproximadamente 80 pessoas participaram até 06/12/2024.



Figura 10: Apresentação do Estúdio RV na EDP ES. Link do vídeo https://youtu.be/Nu_R4WN6hFM

3. Conclusão

O Projeto de RV da Celesc está em sua fase evolutiva, entrando na 3ª etapa do P&DI ANEEL, na categoria “Lote Piloto e Inserção de Mercado Interno”. Este projeto enfrenta os desafios de coletar seus resultados iniciais para aprimorar indicadores de qualidade, prevenir incidentes e aplicar a realidade virtual (RV) efetivamente na formação e treinamento da força de trabalho, com a simulação dos procedimentos operacionais da operação de redes aéreas de distribuição de energia elétrica de média tensão.

Considera-se que não há inovação sem que os resultados da pesquisa e desenvolvimento cheguem ao mercado. Por isso, há um esforço significativo para viabilizar que o “Estúdio RV Celesc” se torne um produto comercial, com a criação de uma *startup* e/ou uma Empresa de Sociedade Específica para sua comercialização, permitindo sua disseminação para outras concessionárias no Brasil. A equipe do projeto agradece à Celesc pelo incentivo, ao LSITEC pela parceria, à ANEEL pelo estímulo e ao Setor Elétrico pela enorme aceitação deste recurso.

4. Referências bibliográficas

- G. Chen, Z. Gan, J. Sheng, X. Lu, Equipment Simulation Training System Based on Virtual Reality, International Conference on Computer and Electrical Engineering, Dec., 2008
- B. Arendarski, W. Termath, P. Mecking, Maintenance of Complex Machines in Electric Power Systems Using Virtual Reality Techniques, Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2008

D. M. Oliveira, S. C. Cao, X. F. Hermida, F. M. Rodriguez, Virtual Reality System for Industrial Training, International Symposium on Industrial Electronics, 2007

E. Zilles Borba and M.K. Zuffo, Natural to the Human Interactions with Digital Interfaces: a new perspective to understand the virtual experiences, IAMCR Conference Proceedings, pp.312-317, 2015.

E. Blmel, G. Mller, W. Salem, M. Schenk, Technology Enhanced Training at Workplace: a virtual reality based training system for the technical domain, International Conference on E-Business and ELearning, 2005

NFPA 70E. "Standard for electrical safety requirement for employee workplace", 2012.