

GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS - GTL

REGISTRO 2D-3D DE IMAGENS DE CAMPO EM AMBIENTES VIRTUAIS DE SUBESTAÇÕES TELEASSISTIDAS

**LEANDRO RESENDE MATTIOLI(1); ALEXANDRE CARDOSO(1); EDGARD AFONSO LAMOUNIER JÚNIOR(1); DANIEL DE SOUSA RAMOS(2); GABRIEL FERNANDES CYRINO(1); VÍCTOR BARBOSA GONÇALVES(1); CIBELLY CRISTINA RODRIGUES COUTO(1).
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA(1); CEMIG GERAÇÃO E TRANSMISSÃO S.A(2)**

RESUMO

Sistemas de inspeção visual remota possibilitam a captura de imagens de campo e a transmissão destas para os Centros de Operação, agregando mais segurança nos procedimentos e reduzindo ou eliminando a necessidade de verificações in loco. Visando uma melhor contextualização das diferentes imagens de campo, este trabalho trata da integração destas imagens em ambientes virtuais de subestações, por meio de registro espacial 2D—3D, permitindo a visualização de uma representação virtual do entorno da região inspecionada e auxiliando no processo de tomada de decisão. A qualidade do registro e o desempenho do sistema são avaliados para uma prova de conceito.

PALAVRAS-CHAVE

inspeção remota; subestações de energia elétrica; realidade virtual; estimativa de pose.

1.0 INTRODUÇÃO

No contexto das subestações teleassistidas, sistemas de inspeção remota visual (RI) são particularmente interessantes por permitir a detecção de situações adversas não contempladas pelos mecanismos de telemetria convencionais. Nesse sentido, aberturas parciais de chaves seccionadoras, por exemplo, podem ser percebidas pela equipe do Centro de Operação do Sistema, que tomará as providências para esse cenário. Ainda, mesmo nos casos em que a manobra via comando remoto é efetuada com sucesso, a inspeção remota agrega mais segurança à operação, propiciando confirmação visual do estado final do equipamento, após a manobra.

Ultimamente, avançadas camadas de visualização baseadas em técnicas de Realidade Virtual (RV) têm sido aplicadas para fins de treinamento e operação [1], como mostrado na Figura 1.

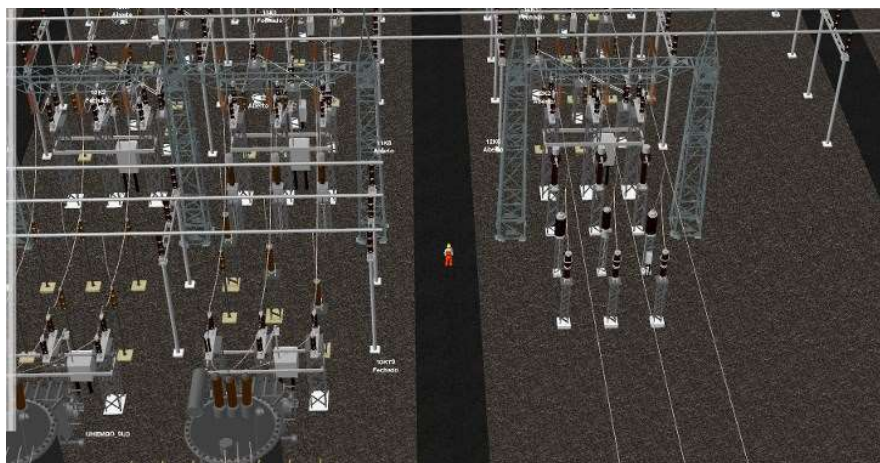


Figura 1 - Ambiente virtual de subestação.
Fonte: [1]

Com uma representação tridimensional fiel à realidade dos arranjos no campo, os ambientes virtuais das subestações facilitam o diagnóstico de certas falhas, não facilmente exploradas unicamente com os diagramas unifilares. Pode-se realizar análises baseadas nas distâncias entre os ativos, demonstrar sequências de manobras para novos

operadores [2] ou então aumentar o escopo de uma imagem capturada por um sistema de inspeção remota, permitindo entender melhor o contexto no qual os ativos monitorados estão inseridos.

No entanto, esta última funcionalidade, referente à visualização da representação virtual do entorno de um certo ativo monitorado por uma ou mais câmeras de inspeção, requer um certo esforço cognitivo para a localização e a correta integração das duas fontes de informação. Para o caso de múltiplas subestações com múltiplas câmeras instaladas, o tempo gasto nessas análises pode comprometer significativamente o restabelecimento do sistema. De fato, quando os operadores devem combinar diversas fontes de informação para compreender melhor um problema, o nível de atenção difusa necessário é muito alto [3].

Assim, há uma clara oportunidade de avaliar uma solução mais automática para a integração dos sistemas RI e RV. Nesse sentido, este trabalho trata da aplicação de técnicas de Registro Espacial 2D–3D de Imagens (Figura 2) para permitir uma visualização híbrida contendo a imagem capturada pela câmera devidamente posicionada e orientada no ambiente virtual para as condições estimadas de captura da foto.

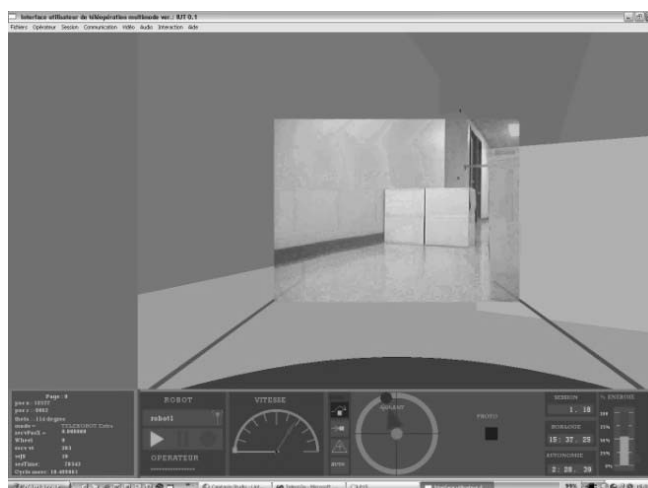


Figura 2 – Exemplo de registro espacial de imagens 2D–3D para fins de teleoperação indoor.
Fonte: [4]

Ainda, visando facilitar a integração com vários modelos distintos de câmeras, sem necessariamente precisar gerenciar as diferentes especificações de lentes, o sistema conta com rotinas para a otimização de parâmetros associados à distância focal.

Como prova de conceito, a solução foi testada para a subestação de Nova Ponte - MG, que conta com um par de câmeras (térmica e RGB), dotadas de mobilidade *pan-tilt-zoom* (PTZ) e responsáveis pelo monitoramento de três chaves seccionadoras. O sistema foi avaliado em termos de qualidade do registro e desempenho na execução em tempo real. Finalmente, um novo sistema de alarmes, capaz de prover automaticamente atalhos para a visualização híbrida RI+RV, foi concebido.

2.0 PROJEÇÃO PERSPECTIVA E ESTIMATIVA DE POSE

As imagens de campo devem ser inseridas no ambiente virtual por meio de uma região retangular (*overlay*) com certa posição e orientação que, combinadas com uma determinada pose da câmera virtual, reflitam as condições de captura da foto e façam o mapeamento correto entre pontos correspondentes na imagem e no modelo virtual.

Uma possível solução para este problema é usar as especificações das lentes e informações geométricas precisas acerca das instalações das câmeras nas subestações. O gerenciamento e a manutenção da integridade desses dados, no entanto, podem acabar demandando esforços demasiados, considerando os trabalhos de coleta de informações sobre a infraestrutura já existente e as etapas de determinação da posição e orientação das câmeras para instalações futuras. Ademais, câmeras com mobilidade precisam de dados complementares referentes ao seu estado, em tempo real, que são independentes das especificações do fabricante e das condições da instalação. A imprecisão conjunta de todas essas medidas pode impactar na qualidade final do registro espacial.

Por causa de tais limitações, a solução desenvolvida trabalha com outra abordagem, dispondo de técnicas de visão computacional e algoritmos de otimização para a determinação dos parâmetros ótimos para a visualização. A transformação de reconstrução 3D intenta realizar o mapeamento de coordenadas homogêneas de pixels de uma foto em coordenadas do espaço \mathbb{R}^3 referente ao mundo virtual. Trata-se da operação inversa à projeção perspectiva, cujo modelo simplificado [5, p. 154–157] é apresentado a seguir:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ \lambda \end{bmatrix} = C[R|t] \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix},$$

onde:

- $Q = (q_x, q_y, \lambda)$ são as coordenadas homogêneas do pixel na imagem;
- $P = (p_x, p_y, p_z)$ são as coordenadas resultantes no espaço do mundo virtual;
- C é a matriz de parâmetros intrínsecos da câmera, discutida a seguir e
- $[R|t]$ é a matriz de junta rotação-translação referente à pose da câmera.

A matriz C é dada por:

$$C = \begin{bmatrix} f_x & \tau & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

onde:

- f_x e f_y são as distâncias focais;
- c_x e c_y são as coordenadas do ponto principal e
- τ é um fator de *skew* entre os eixos horizontal e vertical.

Em situações em que não há distorção significativa e que o sistema de coordenadas na imagem foi fixado no centro, temos $\tau = 0$ e as coordenadas do ponto principal, c_x e c_y extraídas diretamente pelas dimensões da imagem. Se os pixels são quadrados, temos ainda $f_x = f_y$.

Para o problema inverso, ou seja, a determinação de P a partir das coordenadas de um pixel Q , existem infinitas soluções, que configuram uma reta denominada linha de projeção. No entanto, combinando um conjunto de correspondências de pontos na imagem e no modelo virtual (*keypoints*), associados aos valores dos parâmetros intrínsecos (matriz C), é possível estimar a matriz de junta rotação-translação, que representa as condições de captura da foto. Este problema é conhecido na literatura como *Perspective'n'Point* (PNP) [6]. Considerando a existência de tais algoritmos e as simplificações supracitadas para os elementos de C , o problema de determinar a pose da câmera virtual para que ela coincida com a câmera real, nos casos de baixa distorção, acaba se resumindo à determinação dos valores ótimos de f_x e f_y .

3.0 MÉTODO PARA O REGISTRO 2D–3D DE CHAVES SECCIONADORAS

De forma simplificada, para realizar o registro 2D–3D, é necessário determinar (i) a posição da câmera virtual, (ii) a orientação da câmera virtual, (iii) a posição espacial da região retangular – overlay – onde a imagem será renderizada e (iv) a orientação do overlay.

O sistema desenvolvido aplica um algoritmo de busca ternária para a determinação do valor ótimo de $f_{x,y} = f_x = f_y$. Para tanto, pode-se usar como métrica de erro a média das distâncias euclidianas entre as coordenadas dos pontos de correspondência da imagem e nas projeções dos pontos associados do modelo virtual. Esses desvios são chamados de erros de reprojeção. Uma outra métrica importante refere-se aos desvios medidos na imagem final renderizada. A Figura 3 ilustra esse caso para um teste envolvendo uma chave seccionadora virtual e uma captura de tela do modelo virtual como se fosse uma foto de campo, sem a aplicação do algoritmo de otimização para $f_{x,y}$. Foram definidos 12 pontos de correspondência nos isoladores da chave.

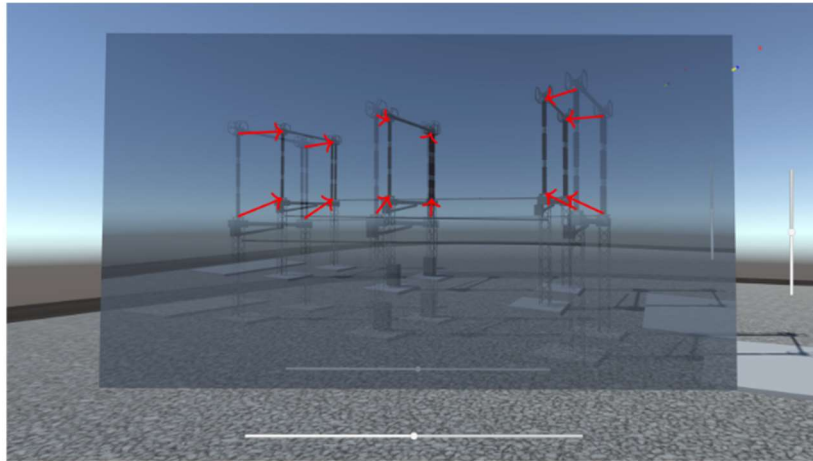


Figura 3 - Erros de registro medidos pelos pontos de correspondências
Fonte: [7]

A orientação do *overlay* é determinada pela direção do eixo ótico. Para a posição, usa-se as equações de reta referentes às linhas de projeção dos cantos da imagem, que definem uma bipirâmide regular de base retangular cujo vértice representa a posição estimada da câmera e a direção do eixo é determinada pela rotação estimada da câmera (Figura 4).

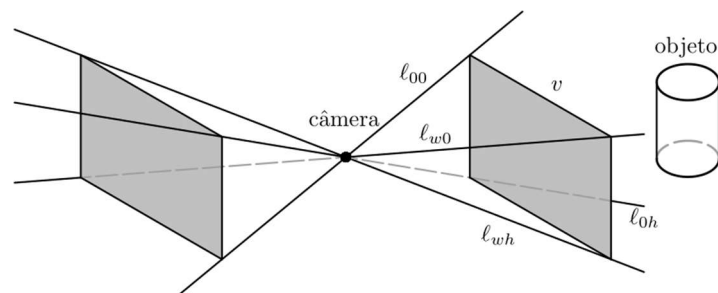


Figura 4 - Linhas de projeção, região de overlay e bipirâmide
Fonte: Adaptado de [7]

Uma das pirâmides aponta para a direção contrária àquela usada no processo de renderização e, portanto, é ignorada. Para a outra pirâmide, define-se a altura de acordo com a proporção desejada na mistura real-virtual e com as dimensões da foto. Isso possibilita o cálculo analítico da posição do overlay. Maiores detalhes sobre o processo podem ser encontrados em [7].

4.0 INTEGRAÇÃO COM SISTEMA DE ALARMES

Além da inspeção visual manual pelos usuários, os sistemas de inspeção remota podem usar de rotinas de processamento de imagens e máquinas de inferência de estados para avaliar automaticamente o estado dos equipamentos a partir de imagens. Tais métodos já foram aplicados em tempo real em fotos de chaves seccionadoras classificá-las como abertas, fechadas ou parcialmente abertas [8].

Uma importante consequência dessa possibilidade está na integração entre os dados provenientes dos sensores de telemetria convencionais e aqueles inferidos por imagens. Assim, pode-se comparar continuamente os estados da base SCADA e do sistema RI, detectando discrepâncias e, nessas ocasiões, emitindo alarmes. A Figura 5 mostra o diálogo padrão de alarmes, contendo, além das tradicionais ações “Reconhecer” e “Eliminar”, um atalho para realizar o registro 2D–3D, teletransportando a câmera virtual automaticamente para a posição e a rotação que fornecem as melhores condições de visualização da condição de alarme (botão “Ir para...”).



Figura 5 - Diálogo de alarme
Fonte: [7]

Com a possibilidade de visualizar rapidamente a imagem de campo e a representação virtual do entorno na circunstância de um alarme, pode-se fortalecer e acelerar o processo de tomada de decisão e, por conseguinte, o restabelecimento do sistema elétrico.

5.0 TESTES E RESULTADOS

A solução de inspeção remota suportada por RV foi testada com uma base de 438 imagens históricas da subestação de Nova Ponte – MG, apresentadas na Figura 6.



Figura 6 - Imagens térmicas e RGB de ativos em Nova Ponte – MG
Fonte: [7]

As fotos foram agrupadas de acordo com a pose da câmera e o tipo de imagem, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados dos grupos de fotos

Código	Tipo de Imagem	Equipamento	Detalhe	Pontos de Correspondência
T1	Térmica	7U8	Completo	12
T2	Térmica	10U8	Completo	12
T3	Térmica	13U8	Completo	12
C1A	RGB	7U8	Fases A e B	4
C1B	RGB	7U8	Fases B e C	4
C2A	RGB	10U8	Fases A e B	4
C2B	RGB	10U8	Fases B e C	4
C3	RGB	13U8	Completo	6

Fonte: Adaptado de [7]

Para cada um dos grupos, as coordenadas dos pontos de correspondência foram extraídas e usadas para a aplicação do algoritmo PNP. Nesse processo, os erros de reprojeção eram continuamente medidos e usados para refinar o valor de $f_{x,y}$, dentro de uma faixa inicial previamente estabelecida. A Figura 7 mostra o comportamento do algoritmo na determinação do parâmetro para o grupo T1.

Vale destacar que, uma vez que a solução lida com câmeras fixas, com pouca ou nenhuma variação na pose de captura, não é necessário executar nenhum dos algoritmos periodicamente: os resultados da otimização de $f_{x,y}$ e do algoritmo PNP são salvos como parâmetros daquele grupo, de forma que para realizar o registro de novas imagens basta substituir a textura da região retangular de *overlay*.

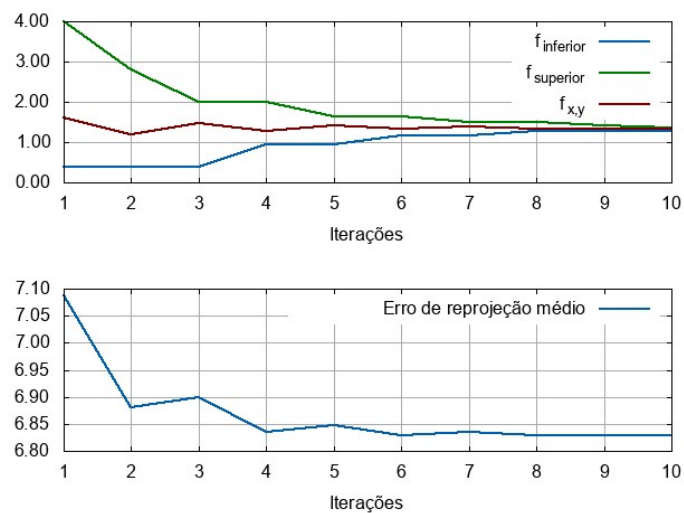


Figura 7 - Otimização de $f_{x,y}$ para o grupo T1

Fonte: Adaptado de [7]

A Figura 8 mostra o resultado do registro 2D–3D para um representante do grupo T1. Na imagem da esquerda, os pontos de correspondência da foto e do modelo virtual foram destacados e na região ocupada pela foto o modelo virtual também é renderizado, para fins de avaliação. À direita, temos o registro 2D–3D conforme a proposta para inspeção remota, com a região retangular sendo exclusivamente usada pela informação visual capturada do campo e o ambiente virtual ao redor.

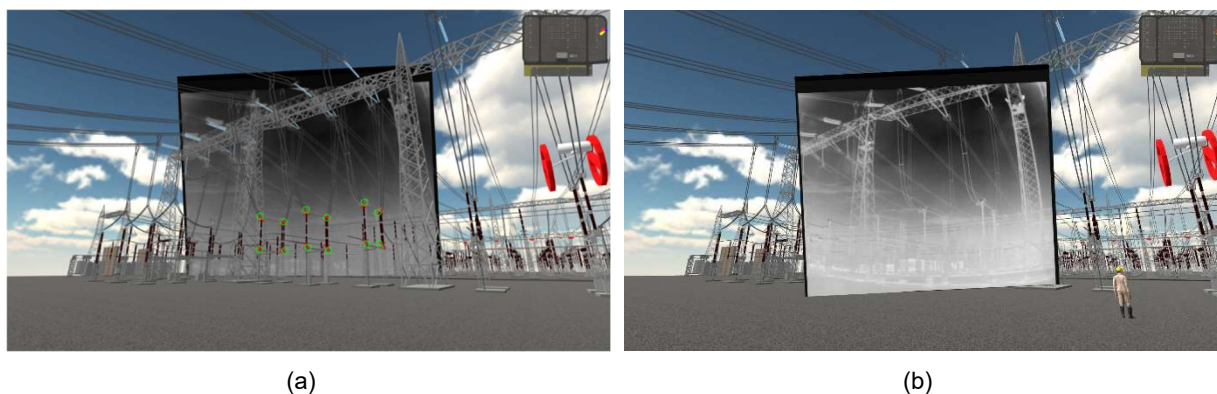


Figura 8 - Registro 2D-3D para imagens do grupo T1: (a) modo de depuração; (b) modo final
Fonte: [7]

Resultados para outros grupos são apresentados na Figura 9.



Figura 9 - Registro 2D-3D para outros grupos: (a) C2; (b) T3
Fonte: Adaptado de [7]

As medidas de erro feitas nas imagens renderizadas pela aplicação a partir dos pontos de correspondência servem para avaliar quantitativamente a qualidade do registro. Os erros relativos, que são independentes das dimensões das imagens, são apresentados na Tabela 2, para todos os grupos de fotos e para os dois eixos coordenados.

Tabela 2 - Erros percentuais de registro

Grupo	$\overline{\delta_{x\%}}$	$\overline{\delta_{y\%}}$
T1	0.226 %	0.509 %
T2	0.370 %	0.657 %
T3	0.254 %	0.735 %
C1A	0.130 %	0.200 %
C1B	0.050 %	0.132 %
C2A	0.045 %	0.137 %
C2B	0.092 %	0.153 %
C3	0.318 %	0.143 %
Média	0.231 %	0.451 %
Desvio Padrão	0.224 %	0.418 %

Fonte: [7]

Finalmente, acerca do desempenho do sistema para o registro espacial de vídeos no ambiente virtual, passadas as fases de calibração e estimativa de pose, foi implementado um mecanismo para tratar várias imagens históricas como se fossem um vídeo. A taxa de renderização em frames por segundo (FPS) foi coletada na aplicação RV e a taxa de entrega dos quadros do vídeo foi medida na aplicação que serve o vídeo via HTTP por meio do protocolo MJPEG. O teste resultou em uma taxa de 31.92 FPS para o envio do vídeo e 58.69 FPS na aplicação RV, que renderiza os modelos virtuais e as imagens de campo.

6.0 CONCLUSÃO

O método desenvolvido para o registro 2D–3D de imagens de campo capturados por câmeras fixas ou com posições pré-definidas mostrou-se adequado para a finalidade de inspeção remota de subestações. Além de resultar em níveis satisfatórios de qualidade, em termos das discrepâncias entre os pontos de correspondência, a solução proposta é facilmente escalável, uma vez que não depende de dados de fabricantes de câmeras ou da especificação detalhada e precisa da instalação destas nas subestações. O modelo de câmera inferido pelo algoritmo de otimização é ajustado justamente para maximizar a qualidade do registro para aquela determinada pose da câmera física.

Na detecção de discrepâncias entre as duas fontes de dados (SCADA e RI), há a expectativa de que a opção de efetuar o registro nos diálogos dos alarmes possa contribuir para embasar mais o operador no processo de tomada de decisão. Se o sistema de fotomonitoramento detecta uma condição crítica em um equipamento, com o registro 2D–3D é possível saber rapidamente o impacto na vizinhança, sem a necessidade de consultar plantas baixas e vistas de corte para compreender melhor o contexto.

Finalmente, em um cenário onde as subestações teleassistidas possuam redes de dados móveis de alta velocidade, como a iminente rede 5G, pode-se usar o registro espacial para integrar sistemas de videomonitoramento com ambientes virtuais representativos das subestações, sem nenhuma perda considerável na taxa de renderização do vídeo ou do ambiente virtual.

Trabalhos futuros incluem a detecção automática de pontos de correspondência, por métodos de visão computacional, testes com outros equipamentos e outras subestações e a investigação da usabilidade geral do sistema, após sua implantação no Centro de Operação do Sistema (COS) da CEMIG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, A. C. **Uma solução para integração de sistemas de realidade virtual e tradicionais de operação de subestações de energia elétrica**. 2020. Tese — Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, 22 dez. 2020a.
- [2] MATTIOLI, L. R. et al. **Ferramenta para Treinamento e Visualização de Ocorrências em Ambientes Virtuais de Subestações**. XVI Encontro para Debates de Assuntos de Operação (XVI EDAO). *Anais...* 9 jun. 2021b
- [3] SEBE, I. O. et al. **3D Video Surveillance with Augmented Virtual Environments**. First ACM SIGMM International Workshop on Video Surveillance. *Anais...*: IWVS '03. New York, NY, USA: ACM, 2003c
- [4] LABONTE, D.; BOISSY, P.; MICHAUD, F. Comparative Analysis of 3-D Robot Teleoperation Interfaces With Novice Users. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, v. 40, n. 5, p. 1331–1342, out. 2010d.
- [5] HARTLEY, R. **Multiple view geometry in computer vision**. Cambridge, UK New York: Cambridge University Press, 2004e.
- [6] KAEHLER, A.; BRADSKI, G. **Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library**. 1st. ed. [s.l.] O'Reilly Media, Inc., 2016f.
- [7] MATTIOLI, L. R. **2D–3D spatial registration for remote inspection of power substations**. 2021. Tese — Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, 30 mar. 2021g.
- [8] PEREIRA, R. F. L. E. C. et al. **Sistema para Videomonitoramento Operacional de Chaves Seccionadoras de Subestações de Energia [A System for Operational Videomonitoring of Power**

Substations Disconnect Switches]. XVI Encontro para Debates de Assuntos de Operação (XIV EDAO).
Anais...nov. 2016h

DADOS BIOGRÁFICOS

(1) LEANDRO RESENDE MATTIOLI



Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em 2012, 2015 e 2021, respectivamente. Tem experiência em projetos de desenvolvimento de software e ambientes de realidade virtual. Atualmente é professor efetivo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Campus Araxá, atuando no Curso Técnico em Eletrônica e nos cursos de graduação em Engenharia de Automação Industrial e Engenharia de Minas, lecionando as disciplinas Sistemas Microprocessados, Sistemas Nebulosos, Periféricos e Interfaces, Robótica, Sistemas de Banco de Dados e Programação.

(2) EDGARD AFONSO LAMOUNIER JÚNIOR

Concluiu o ciclo básico de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no período de 1982 a 1984. Possui graduação em Matemática (1986) e mestrado em Engenharia Elétrica (1989) pela UFU. Em 1996, obteve o título de PhD pela Universidade de Leeds, Inglaterra, sendo reconhecido no Brasil com o título de Doutor em Engenharia Elétrica. 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 com Realidade Virtual e Aumentada em Reabilitação e Sistemas de Engenharia.

(3) DANIEL DE SOUSA RAMOS

Graduado em Engenharia Elétrica pela Faculdade Pitágoras, Especialista Energia pela Unyleya e em Sistemas Elétricos de Potência pela UFMG e graduado em Análise de Sistemas pela UNIPAC. Atuou como técnico no COD da Energisa por 4 anos e atua por 19 anos na Operação CEMIG, onde atualmente é Engenheiro no Centro de Operação do Sistema - COS com experiências na Operação do Sistema Elétrico nas áreas de normatização, tempo real, pós operação e na Gestão de P&D ANEEL com o tema Realidade Virtual na Operação de Sistemas Elétricos.

(4) GABRIEL FERNANDES CYRINO

Gabriel Fernandes Cyrino é doutorando em Engenharia Elétrica com ênfase em Computação Gráfica e Realidade Virtual e Aumentada pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), onde recebeu o título de Mestre em Ciências em 2019. Bacharel em Sistemas de Informação pelo Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), em 2015. Atua no Grupo de Pesquisas em Realidade Virtual e Aumentada (GRVA - UFU) e no Laboratório de Engenharia Biomédica (BioLab - UFU). Tem experiência nas áreas de Tecnologia da Informação e Computação Gráfica, atuando principalmente nos seguintes temas: Engenharia de Software, Game Design, Modelagem 3D, Ambientes Virtuais, Realidade Virtual e Aumentada, Tecnologias Assistivas.

(5) VICTOR BARBOSA GONÇALVES

Victor Barbosa Gonçalves é graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), com previsão de formação em 2022. Foi Integrante do Grupo de Pesquisa em Realidade Virtual e Aumentada (GRVA - UFU) de jan 2019- fev 2021. Atualmente é estagiário do Instituto de Ciência e Tecnologia BRAIN desde fev 2021. Tem experiência nas áreas de Engenharia Elétrica, Computação Gráfica, Fatores Humanos e Gestão Empresarial, atuando principalmente nos seguintes temas: Engenharia de Software, Game Design, Modelagem 3D, Ambientes Virtuais, Realidade Virtual e Aumentada, Serious Games, Virtual Simulations, Value Management Office (VMO), CAPEX, OPEX e Agile Methodologies.

(6) CIBELLY CRISTINA RODRIGUES COUTO

Cibelly Cristina é técnica em computação gráfica pelo Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) e estudante do curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), onde participa como membro do Grupo de Pesquisa em Realidade Virtual e Aumentada (GRVA - UFU). Atualmente, atua como estagiária em gerenciamento de projetos na empresa Siemens. Possui interesse em temas relacionados a tecnologia e inovação e experiência profissional nas áreas de design thinking, gerenciamento de projetos e riscos, metodologias ágeis e técnicas de otimização de processos.

(7) ALEXANDRE CARDOSO

Engenheiro Eletricista, Mestre em Engenharia Elétrica: Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Doutor em Engenharia Elétrica pela USP. Professor Titular da UFU, foi Coordenador do Programa de Pós Graduação e da Graduação em Engenharia Elétrica. Atua em áreas de Engenharia da Computação nos temas: Realidade Virtual, Realidade Aumentada, Educação, Ambientes Virtuais, Interfaces Humano Computador e Visualização da

Informação. Foi Coordenador da Comissão Especial de Realidade Virtual - SBC. Coordena projetos internacionais: BRAFITEC (Polytech Paris/Lille/Marseille/Grenoble/Lyon/Orleans) e o desenvolvimento do Sistema de Realidade Virtual da Cemig GT, além do projeto de BIM/GIS/SAP associado à Subestações de Furnas.