

Diretrizes Integradas para Monitoramento de Chaves Seccionadoras em Subestações de Alta Tensão: Teleassistência por Câmeras

Integrated Guidelines for Monitoring Disconnect Switches in High-Voltage Substations: Remote Assistance via Cameras

Jessica Freitas¹

 orcid.org/0009-0006-1409-6797

Nailson Diniz¹

 orcid.org/0000-0002-0788-0069

Eliane Maria Gorga Lago¹

 orcid.org/0000-0003-0987-3492

Ana Rosa Bezerra Martins¹

 orcid.org/0000-0002-3045-9117

Felipe Mendes da Cruz¹

 orcid.org/0000-0002-0163-465X

¹Escola Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil.

E-mail: freittasjms@gmail.com.br;
nailsondiniz@hotmail.com

DOI: 10.25286/rep.v11i2.3883

Esta obra apresenta Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

Como citar este artigo pela NBR 6023/2018: Freitas, J.; Lago, E.M.G.; Martins, A.R.B.; Cruz, F.M.; Diniz, Nailson. Diretrizes Integradas para Monitoramento de Chaves Seccionadoras em Subestações de Alta Tensão: Teleassistência por Câmeras.

Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, Recife, v. 11, n. 2, p. 29-38, agosto, 2026.

RESUMO

O artigo apresenta diretrizes técnicas e operacionais para o monitoramento de chaves seccionadoras em subestações de alta tensão, integrando teleassistência via Circuito Fechado de Televisão (CFTV) e práticas de redução da indisponibilidade na Rede Básica. A teleassistência reforça a supervisão visual em tempo real e a validação segura das manobras, enquanto os procedimentos complementares visam reduzir falhas e agilizar a recuperação dos equipamentos. A proposta considera requisitos das normas NR-10 e NR-35, apoiando-se em dados obtidos durante seis meses de operação no Nordeste. Inclui ainda Análise Preliminar de Perigos, checklists de EPI/EPC e avaliação de riscos típicos de estruturas metálicas. Os resultados mostram queda significativa em atrasos operacionais, eliminação de erros de posicionamento e maior coordenação entre equipes. O monitoramento contínuo também permite detectar precocemente falhas mecânicas e anomalias como pontos quentes e folgas. O estudo oferece recomendações de implantação, define arquitetura mínima e apresenta comparativo entre as abordagens. Conclui-se que a integração entre teleassistência e práticas de manutenção aumenta a confiabilidade, reduz a indisponibilidade e fortalece a cultura de prevenção.

PALAVRAS-CHAVE: Chaves seccionadoras; subestações; teleassistência; CFTV; manutenção preditiva; segurança operacional; ANEEL.

ABSTRACT

The article presents technical and operational guidelines for monitoring disconnect switches in high-voltage substations, Closed-Circuit Television (CCTV) and practices aimed at reducing equipment unavailability in the Basic Grid. Teleassistance enhances real-time visual supervision and the safe validation of switching operations, while complementary procedures aim to reduce failures and speed up equipment recovery. The proposal considers the safety requirements of standards NR-10 and NR-35, supported by data collected over six months of operation in the Northeast region. It also includes Preliminary Hazard Analysis, PPE/EPC checklists, and the assessment of risks typical of metallic structures. The results show a significant decrease in operational delays, elimination of positioning errors, and improved coordination among teams. Continuous monitoring also enables early detection of mechanical failures and anomalies such as hot spots and loosened components. The study provides implementation recommendations, defines minimum system architecture, and presents a comparison of the approaches. It concludes that integrating teleassistance with maintenance practices increases reliability, reduces equipment unavailability, and strengthens a culture of prevention.

KEY-WORDS: Disconnect switches; substations; remote assistance; CCTV; predictive maintenance; operational safety; ANEEL.

1 INTRODUÇÃO

A Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) integra os principais ativos de transmissão de energia elétrica do país, como linhas de transmissão, transformadores, disjuntores, barramentos e chaves seccionadoras operando em tensões iguais ou superiores a 230 kV. Esses equipamentos constituem a espinha dorsal do sistema elétrico brasileiro, sustentando o fluxo de potência, a conectividade entre regiões e a estabilidade eletroenergética em nível nacional [1]. A operação e a medição de sua disponibilidade são regulamentadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), por meio de diretrizes como o Submódulo 2.7 dos Procedimentos de Rede, que assegura padrões mínimos de confiabilidade e continuidade para o SIN [2]. A indisponibilidade desses ativos pode gerar impactos amplos, afetando regiões inteiras, comprometendo a segurança operativa e influenciando diretamente indicadores regulatórios e receitas das transmissoras, conforme critérios estabelecidos no Submódulo 15.6 [3].

Nesse contexto, as manobras realizadas em subestações de alta tensão assumem papel estratégico na manutenção da confiabilidade do sistema, mas continuam a ser executadas em ambientes de risco elevado. Atividades associadas às chaves seccionadoras, por exemplo, envolvem proximidade com partes energizadas, exigindo rigoroso cumprimento das normas NR 10 [4] e NR 35 [5] e treinamento contínuo para prevenir acidentes. Ainda assim, os índices de ocorrências graves e fatais no setor elétrico brasileiro, em 2023, permanecem elevados, especialmente por choques elétricos e quedas [6].

Apesar dos avanços recentes na automação e na digitalização do sistema elétrico, a literatura técnica concentra-se predominantemente em procedimentos operacionais convencionais, capacitação de equipes, métodos de análise de risco já consolidados e tecnologias de supervisão tradicionais. Pouco se discute sobre soluções de monitoramento visual contínuo, como o uso de câmeras instaladas diretamente nas estruturas que abrigam chaves seccionadoras. A utilização desse tipo de tecnologia pode ampliar a percepção situacional dos operadores, reduzir falhas humanas e contribuir para a rastreabilidade e confiabilidade das manobras [7] [8] [9]. Entretanto, não há estudos consolidados que avaliem a implantação de câmeras como ferramenta sistemática de apoio à segurança operacional em subestações de alta tensão, tampouco análises sobre sua viabilidade prática em ambientes energizados.

Mais ainda, verifica-se uma lacuna significativa relacionada não apenas à instalação, mas também à manutenção dessas câmeras quando posicionadas em estruturas de alta tensão, como pórticos, torres e suportes metálicos frequentemente localizados em zonas de risco. A execução de manutenção

preventiva ou corretiva nesse tipo de equipamento exige intervenções em altura, em áreas com campos elétricos intensos e com complexa logística de bloqueio, aterramento ou desligamento. A literatura disponível não apresenta diretrizes, protocolos técnicos ou avaliações sistemáticas sobre como garantir a manutenção segura e contínua desses dispositivos, nem sobre os impactos operacionais de sua eventual falha, remoção ou substituição. Assim, a ausência de referenciais técnicos dificulta a adoção de soluções de monitoramento visual, mesmo quando seu potencial benefício para a segurança operacional é evidente.

Diante desse cenário, surge o problema central que orienta esta pesquisa sobre a forma de como a instalação e, sobretudo, a manutenção de câmeras em estruturas de alta tensão podem contribuir para reduzir riscos, aumentar a segurança dos trabalhadores e aprimorar a confiabilidade das manobras de chaves seccionadoras em subestações. Ao abordar esse problema, o estudo busca preencher uma lacuna relevante na literatura e fornecer subsídios técnicos que orientem futuras práticas de engenharia, manutenção e operação em ambientes de alta tensão.

Assim, este trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade, os desafios e os benefícios da instalação e manutenção de câmeras para o monitoramento de chaves seccionadoras em subestações de alta tensão. Ao fazê-lo, pretende-se contribuir para o aprimoramento das práticas de segurança, para a redução de falhas operacionais e para o desenvolvimento de recomendações técnicas que possam apoiar decisões de engenharia e operação no setor elétrico brasileiro.

2 MONITORAMENTO OPERACIONAL DAS CHAVES SECCIONADORAS EM ALTA TENSÃO

As chaves seccionadoras são dispositivos projetados para estabelecer ou interromper circuitos na ausência de carga, permitindo o isolamento seguro de trechos de linhas ou equipamentos para manutenção, manobras operativas ou atendimento a contingências. Em pátios de subestações de alta tensão, destacam-se configurações como lâmina tipo faca, abertura central, abertura vertical e semipantográfica, cuja seleção depende de fatores como arranjo físico, nível de tensão, requisitos operacionais e limitações estruturais do projeto [10].

Embora possuam construção relativamente simples, a operação inadequada das seccionadoras pode gerar riscos significativos, tais como abertura incompleta, desalinhamento entre fases, esforço excessivo no mecanismo e falhas mecânicas que comprometem a continuidade operativa. Em situações extremas, essas falhas podem impedir o

seccionamento adequado do circuito, expondo trabalhadores e equipamentos a condições perigosas e aumentando a probabilidade de falhas sistêmicas [10].

Com a contínua expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN) e o avanço das subestações teleassistidas, cresce a demanda por soluções que ampliem a visibilidade operativa, reduzam o tempo de resposta a anomalias e reforcem a segurança das manobras [11]. Dada a criticidade das seccionadoras na arquitetura da transmissão, falhas em sua operação têm potencial para impactar a confiabilidade regional do sistema. Nesse contexto, sistemas de monitoramento baseados em imagens emergem como alternativas tecnológicas promissoras para aumentar a confiabilidade das manobras e mitigar riscos operacionais.

Os sistemas de monitoramento considerados neste estudo abrangem quatro categorias tecnológicas, entre as quais se destaca o uso de câmeras fixas e móveis, instaladas de forma a permitir a visualização direta das lâminas, contatos móveis, mecanismos de acionamento e indicadores mecânicos. Suas principais funcionalidades incluem: validação visual da manobra em tempo real, permitindo confirmar a posição final correta das lâminas; detecção remota de anomalias, como vibração, desalinhamento, acúmulo de sujeira, oxidação ou folgas mecânicas; suporte à coordenação entre operadores do centro de operação e equipes de campo, reduzindo ambiguidades e aumentando a segurança durante manobras.

Quando integradas ao sistema responsável pelo processamento de dados históricos, gerenciamento de alarmes e interação com outras plataformas ou sistemas de teleoperação, as soluções do Circuito Fechado de Televisão (CFTV), oferecem supervisão contínua. Essa supervisão possibilita o registro de evidências visuais, o rastreamento de eventos e a análise de ocorrências após as manobras. Esse conjunto de funcionalidades fortalece o diagnóstico precoce de falhas e contribui para a redução de indisponibilidade, alinhando-se às exigências de maior confiabilidade e segurança nas subestações de alta tensão.

Para manter o sistema elétrico seguro e eficaz, a manutenção é importante. O trabalho no Sistema Elétrico de Potência (SEP) envolve riscos típicos que devem ser prevenidos. Além disso, existem técnicas de trabalho sob tensão que devem ser seguidas para garantir a segurança dos trabalhadores.

3 PRINCIPAIS RISCOS

A instalação de sistemas de CFTV em áreas de alta tensão envolve uma série de riscos que devem ser avaliados de forma criteriosa antes da execução. Entre os principais perigos, destaca-se a exposição a campos elétricos intensos, capazes de induzir tensões perigosas em suportes metálicos e carcaças

dos dispositivos de câmera, aumentando significativamente o risco de choque elétrico durante as etapas de instalação e manutenção [4]. A aproximação de trabalhadores a zonas energizadas para fixação de suportes, passagem de cabos ou ajustes de foco e alinhamento óptico também representa risco crítico de arco elétrico, especialmente em subestações com arranjos compactos ou com seccionadoras não blindadas. Há ainda perigos relacionados ao acoplamento eletromagnético e às descargas atmosféricas, que podem comprometer o funcionamento eletrônico dos equipamentos, gerar falhas intempestivas e afetar a integridade global do sistema de monitoramento [10].

Outro aspecto relevante é o risco mecânico, decorrente de atividades em altura, frequentemente necessárias em estruturas metálicas, pórticos e suportes elevados, o que exige conformidade estrita [5]. Além disso, cabeamentos e eletrodutos instalados de forma inadequada podem criar novos caminhos de circulação de corrente de curto-circuito, aumentando a probabilidade de pontos quentes, correntes induzidas ou trajetórias não previstas de retorno de energia. Tais fatores reforçam a necessidade de uma análise prévia de riscos, procedimentos operacionais específicos e práticas rigorosas de segurança para a instalação segura de sistemas de CFTV em ambientes de alta tensão.

A coordenação dessas atividades demanda conhecimento consolidado sobre gestão de riscos em estruturas metálicas e em ambientes energizados, considerando que os trabalhadores ficam expostos não apenas aos perigos inerentes ao processo de instalação, mas também aos riscos associados ao desempenho funcional e à segurança dos equipamentos. Em alinhamento com esta perspectiva, dados da [12] indicam que, somente em 2020, foram registrados 1502 acidentes de origem elétrica, sendo o choque elétrico o principal responsável pela maioria dos casos — evidenciando a magnitude e a relevância do risco elétrico nas atividades de campo. Esse panorama reforça a necessidade de adotar tecnologias de monitoramento aliadas a práticas rigorosas de segurança, de modo a reduzir a exposição dos trabalhadores e aumentar a confiabilidade das operações em subestações de alta tensão.

4 NORMAS E SEGURANÇA

Os princípios básicos de segurança aplicados às atividades executadas em subestações de alta tensão fundamentam-se na análise criteriosa dos riscos envolvidos e na implementação de medidas preventivas capazes de eliminar ou mitigar perigos iminentes. A relevância desse cuidado é reforçada por estatísticas nacionais: segundo [6], no período de 2012 a 2018, milhões de Comunicações de Acidente de Trabalho (CAT) foram registradas no

país, sendo 21,03% relativas a cortes e lacerações, 17,50% a fraturas, 15,74% a contusões ou esmagamentos e 1,12% a amputações ou enucleações [ARM5.1]. Esse cenário torna-se ainda mais crítico diante da estimativa de que apenas cerca de 50% dos acidentes são oficialmente notificados, devido à subnotificação recorrente em setores como construção civil, eletricidade e serviços terceirizados.

Nesse ambiente técnico, a análise antecipada do cenário laboral desempenha papel central para a proteção dos trabalhadores. A análise permite identificar os riscos mais críticos, selecionar ferramentas adequadas, definir procedimentos e garantir que toda a equipe compreenda a melhor forma de execução das atividades. No caso específico da instalação de sistemas de CFTV em estruturas metálicas de subestações de alta tensão, os riscos mais relevantes incluem choque elétrico, arco elétrico, quedas em altura, indução eletromagnética, descargas atmosféricas, falhas estruturais e condições climáticas adversas.

Para completar o panorama de segurança, atividades de instalação em altura — frequentemente necessárias para posicionamento de câmeras em pórticos, torres ou plataformas técnicas — devem atender aos requisitos da NR-35, contemplando análise de riscos, sistemas de ancoragem adequados, certificação dos EPIs, implantação de linhas de vida temporárias e procedimentos formais de resgate. A fiscalização em campo também deve considerar condições meteorológicas adversas, que aumentam significativamente os riscos de acidentes.

Dessa forma, os projetos de instalação de sistemas de CFTV devem integrar:

- Diretrizes de segurança ocupacional (NR-10, NR-35, NR-06, NR-09);
- Normas técnicas aplicáveis (ABNT NBR IEC 62271-102, ABNT NBR 7571, ABNT NBR 5410);
- Boas práticas de documentação, rastreabilidade e qualificação técnica;
- Registros de inspeção, autorização de serviços (PT), diagramação de intervenções;
- Supervisão remota conforme diretrizes do PRODIST e práticas estabelecidas pelo ONS.

A soma dessas exigências compõe uma base robusta para a execução de atividades críticas em subestações de alta tensão, garantindo maior segurança ao trabalhador, maior confiabilidade ao sistema elétrico e plena aderência às exigências regulatórias e técnicas do setor.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta de forma detalhada os procedimentos metodológicos adotados para o estudo, incluindo as estratégias de observação em

campo, os instrumentos de coleta de dados utilizados, os critérios de análise dos resultados e a justificativa para o período e as atividades escolhidas. O objetivo é assegurar transparência, rigor técnico e rastreabilidade das etapas que sustentaram a investigação. Neste capítulo, foram inicialmente identificados os principais perigos associados às atividades, por meio da análise do local e do tipo de tarefa a ser executada, bem como dos EPIs e EPCs necessários para sua realização. Também foram considerados os treinamentos indispensáveis para a execução adequada de cada etapa, desde o início até o término das ações, além dos cuidados adicionais voltados à proteção de terceiros em situações de proximidade.

Com base nessas informações e nas recorrências observadas, elaborou-se uma matriz qualitativa, apresentada no capítulo seguinte, dedicado aos resultados, que possibilita correlacionar as probabilidades e os riscos envolvidos, bem como identificar as medidas de mitigação aplicáveis nos pontos de maior incidência de acidentes durante a execução das atividades de implantação das câmeras de monitoramento.

5.1 PROCEDIMENTOS DE OBSERVAÇÃO EM CAMPO

As observações foram conduzidas diretamente em 15 subestações de alta tensão, durante a execução das atividades de instalação de câmeras integrantes de um projeto-piloto implantado na região Nordeste. A abordagem adotada foi visual, participativa e sistemática, permitindo acompanhar as atividades em tempo real e registrar comportamentos, condições de trabalho, práticas operacionais e fatores ambientais que poderiam influenciar a segurança e a eficiência das operações.

A presença do pesquisador no campo possibilitou identificar situações que normalmente não aparecem em registros formais, como improvisações operacionais, variações nas condutas das equipes e adaptações frente a limitações estruturais. Além disso, a observação contínua permitiu acompanhar o ciclo completo das montagens, desde o planejamento até a finalização.

5.2 EQUIPES ACOMPANHADAS

Foram monitoradas três frentes de serviço, cada uma formada por equipes terceirizadas especializadas em montagem eletromecânica e em serviços de manutenção em alta tensão.

A escolha por três equipes teve como propósito:

- comparar diferentes práticas operacionais;
- observar níveis distintos de experiência e organização;

- identificar padrões e divergências de comportamento;
- ampliar a representatividade dos dados coletados.

Esse acompanhamento simultâneo proporcionou uma visão abrangente das práticas observadas em diferentes contextos operacionais.

5.3 INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta foi estruturada com múltiplos instrumentos complementares, de modo a garantir robustez, coerência e profundidade analítica.

5.3.1 Análise Preliminar de Perigos (APP)

A APP foi elaborada segundo os requisitos da NR-10 e da NR-35, contemplando:

- identificação dos riscos elétricos, ergonômicos, mecânicos e ambientais;
- definição de medidas de controle e de mitigação;
- indicação dos EPIs e EPCs obrigatórios para cada fase;
- atribuição das responsabilidades de execução e supervisão.

A Figura 1 apresenta a APP utilizada como referência para orientar as atividades no campo, funcionando como base estruturante para a prevenção de acidentes.

Figura 1 – Análise Preliminar de Perigos (APP).

ANÁLISE PRELIMINAR DE PERIGO - APP				
Intervenção: [REDACTED]		Data: [REDACTED]		
Resumo dos Trabalhos: Instalação e configuração de equipamentos de videomonitoramento em áreas internas.		Órgão(s) Responsável(eis):		
ETAPA	DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE	PERIGOS	EFEITOS	MEDIDAS PREVENTIVAS
1	DELIMITAR E SINALIZAR A ÁREA DE TRABALHO	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
2	MONTAGEM DE BASTIDOR DE TELECOMUNICAÇÕES (RACK DE 4RU)	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
3	INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS (SERVIDOR, CPE, ROTEIRO, PATCH PANEL ETC.) EM BASTIDOR DE TELECOMUNICAÇÕES	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
4	INSTALAÇÃO E MONTAGEM DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
5	LANÇAMENTO DE CABEAMENTO ELÉTRICO E DE DADOS PARA ATENDIMENTO AOS EQUIPAMENTOS INTERNOS	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
6	INSTALAÇÃO E ALIMENTAÇÃO DE DISJUNTOR (VIA NO PAINEL DE CARGAS (C-EXISTENTE QUANDO NA DESENERGIZAÇÃO DO RESUMO VERIFICAR ANTES A AUSÊNCIA DE TENSÃO))	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
7	INTERLIGAÇÃO DE NOVO CABO AO BARRAMENTO EXISTENTE (ALIMENTADOR)	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
8	PASSAGEM DE CABO ALIMENTADOR ATRÁS DO NOSSO PAINEL DE DISJUNTORES INSTALADO NO NOVO BASTIDOR	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
9	PARA O CASO DE INVERSORES EXISTENTES E DISPONIBILIDADE DE REDE 220VCA, SERÁ REALIZADA CONECTORIZAÇÃO E INTERLIGAÇÃO DE NOVO CABO ALIMENTADOR AO BARRAMENTO EXISTENTE	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
10	VERIFICAÇÃO FINAL DE CONDIÇÕES REALIZADAS	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
11	RELAZAMENTO DO SISTEMA	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
12	CONFIGURAÇÃO DE SISTEMA DE VIDEOMONITORAMENTO	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados
13	DESCONEXÃO DA ÁREA DE TRABALHO	Choque Elétrico e Queda	Danos corporais	Usar EPIs e EPCs adequados

Fonte: Autores.

5.3.2 Checklists de Segurança

Foram desenvolvidos checklists destinados à verificação do uso adequado de EPIs e EPCs, além da conformidade com distâncias de segurança e práticas operativas. Os itens avaliados incluíram:

- correta utilização de vestimenta antiestática, cinturão para trabalho em altura, luvas isolantes e capacete com jugular;
- presença e posicionamento adequado de EPCs;
- arranjo e estabilidade dos acessos às estruturas;
- observância das distâncias mínimas em zonas energizadas.

Os checklists, Figura 2, permitiram quantificar níveis de conformidade e comparar o desempenho das equipes.

Figura 2 – Exemplo do checklist.

Fonte: Autores.

5.3.3 Entrevistas Informais com Trabalhadores

As entrevistas ocorreram de forma espontânea e não estruturada, aproveitando momentos de intervalo ou transição entre atividades. Elas visaram identificar:

- percepções sobre os riscos reais e percebidos;
- dificuldades operacionais nas subestações;
- comportamentos e decisões frente a situações imprevistas;
- sugestões de melhorias nas práticas de segurança.

O método empregado, conduzido de forma verbal no formato de Diálogo Diário de Segurança (DDS), favoreceu a obtenção de respostas espontâneas e alinhadas à vivência cotidiana dos trabalhadores.

5.3.4 Registros Fotográficos

Os registros fotográficos documentaram:

- o posicionamento das equipes nas estruturas;
- métodos de acesso e deslocamento;
- proximidade com zonas energizadas;
- condições ambientais no momento da atividade;
- situações críticas ou não conformidades observadas.

As imagens serviram como evidência visual para complementar a análise técnica.

5.4 CRITÉRIOS DE ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A coleta foi estruturada com múltiplos instrumentos complementares, de modo a garantir robustez, coerência e profundidade analítica.

A análise dos resultados considerou quatro dimensões principais:

1. Conformidade normativa: Comparação das práticas observadas com os requisitos das normas aplicáveis e dos procedimentos internos da empresa.
2. Efetividade das medidas preventivas: Avaliação da aderência das equipes aos controles previstos na APP e nos checklists.
3. Identificação e priorização de riscos críticos: Classificação baseada na gravidade do possível dano, probabilidade de ocorrência e interação com o ambiente em alta tensão.
4. Viabilidade técnica, operacional e ergonômica: Incluiu análise das condições de trabalho, exigências físicas, adequação do ferramental e percepção das equipes.

Esses critérios permitiram compreender o nível real de segurança operacional durante o processo.

5.5 JUSTIFICATIVA DO PERÍODO DE ACOMPANHAMENTO

O período de seis meses foi definido de forma estratégica pelas seguintes razões:

- possibilitou acompanhar integralmente todas as etapas da instalação das câmeras, desde o planejamento até a finalização;
- incluiu variações climáticas e operacionais relevantes;
- permitiu observar o desempenho de diferentes equipes;
- favoreceu a detecção de eventos críticos não rotineiros, como a indisponibilidade das chaves seccionadoras, condição com potencial impacto operacional e econômico significativo.

A duração estendida aumentou a confiabilidade e a profundidade dos achados.

5.6 JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DAS ATIVIDADES OBSERVADAS

As atividades de instalação de câmeras foram selecionadas por envolverem:

- trabalho em altura e proximidade com zonas energizadas;
- relevância para a modernização e monitoramento das subestações;
- impacto direto na confiabilidade operacional do sistema;
- múltiplas etapas críticas (mecânica, elétrica e logística).

Por integrarem um projeto-piloto estratégico, essas atividades exigem avaliação rigorosa de segurança e eficiência, justificando plenamente sua escolha como objeto de estudo.

6 RESULTADOS

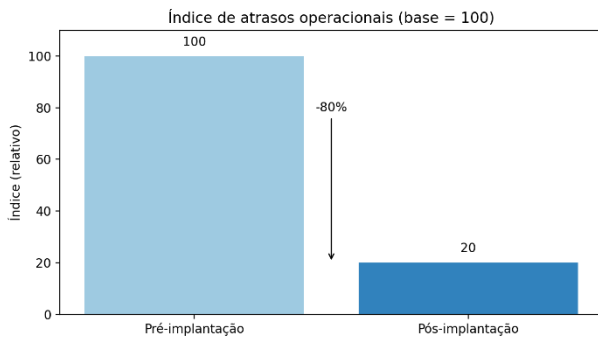
Ao longo de seis meses de monitoramento contínuo em 15 subestações de alta tensão, consolidou-se um conjunto consistente de dados que evidenciam os impactos da implantação do sistema de câmeras nas dimensões operacional, preventiva e organizacional. Durante esse período, foram identificados riscos relevantes relacionados às atividades em campo, tais como choque elétrico por proximidade com partes energizadas, quedas em estruturas metálicas com acesso em altura, indução eletromagnética em componentes metálicos, além de falhas associadas ao uso inadequado de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs). Também foram mapeados pontos críticos, incluindo áreas com grande concentração de chaves seccionadoras instaladas em torres metálicas, setores com acesso restrito e regiões com visibilidade limitada — locais frequentemente associados a erros operacionais, necessidade de inspeções presenciais adicionais e maior exposição dos trabalhadores a riscos.

6.1 ANÁLISE DOS DADOS OPERACIONAIS E DE SEGURANÇA APÓS A IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO POR CÂMERAS

No período analisado, foram registrados cinco desvios operacionais por falta de sinalização e dois incidentes leves por escorregamento em estruturas metálicas, todos sem afastamento, reforçando a importância das ações preventivas e da supervisão contínua implementada com o novo sistema. A comparação direta entre o cenário anterior e posterior à implantação das câmeras evidencia avanços substanciais: a redução de 80% nos atrasos operacionais (com índice relativo passando de 100 para 20), a eliminação dos erros de posicionamento de chaves — antes recorrentes —, e a melhoria significativa na coordenação entre equipes, possibilitada pela supervisão remota em tempo real. Além disso, observou-se redução expressiva da exposição de trabalhadores a áreas críticas, uma vez que diversas validações passaram a ser realizadas remotamente.

A seguir, os gráficos consolidados com os indicadores mais relevantes observados no período:

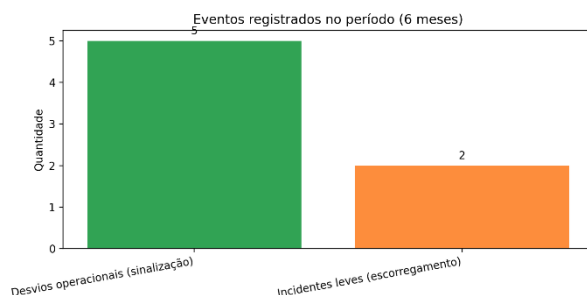
Gráfico 1 – Índice Relativo de Atrasos Operacionais (Base = 100)



Fonte: Autores.

O gráfico demonstra a queda expressiva de 80% nos atrasos operacionais após a implantação das câmeras, evidenciando maior eficiência e menor dependência de inspeções presenciais.

Gráfico 2 – Eventos Registrados no Período de 6 Meses



Fonte: Autores.

Os dados mostram 5 desvios operacionais relacionados à sinalização e 2 incidentes leves por escorregamento, todos sem afastamento, auxiliando no direcionamento de ações preventivas prioritárias.

6.2 MATRIZ DE RISCO – AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS PRINCIPAIS PERIGOS IDENTIFICADOS

A matriz abaixo apresenta a avaliação qualitativa dos principais riscos antes e após a implantação do sistema de monitoramento por câmeras, considerando alterações na probabilidade de ocorrência, uma vez que a severidade permanece inerente ao perigo, não sendo reduzida pela tecnologia, mas sim mitigada por controles mais robustos.

Tabela 1– Matriz de Risco (Probabilidade × Severidade)

Perigo	Probabilidade Antes	Probabilidade Depois	Severidade	Nível de Risco (Antes)	Nível de Risco (Depois)	Tendência
Choque elétrico por proximidade com partes energizadas	Média	Baixa	Crítica	Alto	Médio	Redução
Queda em altura em estruturas metálicas	Média	Baixa	Alta	Alto	Médio	Redução
Indução eletromagnética em estruturas metálicas	Baixa/Média	Baixa	Alta	Médio	Baixo/Médio	Redução moderada
Erro de posicionamento de chave seccionadora	Média/Alta	Muito Baixa (eliminado)	Alta	Alto	Baixo	Redução acentuada
Falha de uso de EPI	Média	Baixa	Média	Médio	Baixo	Redução
Falha de sinalização em área de manobra	Média	Baixa	Média	Médio	Baixo	Redução

Fonte: Autores.

Análise técnica da matriz de risco:

- A maior redução observada ocorreu no risco de erro de posicionamento de chaves, que passou de uma probabilidade média/alta para muito baixa, apoiada pela dupla verificação visual remota e pelo acompanhamento em tempo real.
- Riscos de choque elétrico e queda em altura, embora mantenham severidade elevada, apresentaram queda significativa na probabilidade, pois muitas das verificações passaram a ser realizadas remotamente, reduzindo a exposição física.
- Os riscos relacionados a sinalização, EPI e indução eletromagnética apresentaram queda consistente, alinhada ao aumento da padronização visual, validação prévia das

etapas e maior conformidade nas rotinas operacionais.

- De forma geral, o sistema de câmeras funcionou como uma barreira preventiva adicional, atuando diretamente na probabilidade e fortalecendo o processo de tomada de decisão.

Os dados consolidados ao longo dos seis meses, aliados à análise da matriz de risco, demonstram que a implantação das câmeras proporcionou ganhos evidentes de segurança e eficiência operacional nas subestações de alta tensão. A redução de atrasos, a eliminação de erros críticos e a menor exposição dos trabalhadores a riscos significativos evidenciam que o monitoramento remoto se consolidou como uma ferramenta estratégica e de alto impacto para a operação. Os indicadores, gráficos e análises de risco reforçam que o novo modelo de supervisão permite decisões mais rápidas, maior disciplina operacional e maior confiabilidade técnica, promovendo um ambiente mais seguro, eficiente e alinhado às melhores práticas do setor elétrico.

7 DISCUSSÃO

Os resultados consolidados — redução de 80% nos atrasos operacionais, eliminação de erros de posicionamento de chaves e menor exposição de trabalhadores a zonas críticas — convergem com princípios internacionais de segurança como os da NFPA 70E (2024), que prioriza a redução da exposição humana a choques e arco elétrico por meio de operações/validações remotas e da hierarquia de controles (engenharia, administrativos, EPI). Evidências aplicadas sobre remote racking/switching mostram que o distanciamento operacional diminui a permanência em zonas de risco de arco e reforça a disciplina de manobra — o que explica, em parte, a melhora de coordenação entre centro de operação e equipes de campo observada no seu piloto de teleassistência por CFTV.

No panorama brasileiro, os dados da Abracopel (ano base 2020) reiteram o choque elétrico como principal causa de fatalidades, sustentando intervenções que retiram pessoas da “linha de fogo” e padronizam a verificação de estado de equipamentos. Tais medidas são coerentes com a sua dupla checagem visual remota do posicionamento de seccionadoras, reduzindo erros humanos associados a atenção, clima e visibilidade.

7.1 COMPARAÇÃO COM ESTUDOS E CASOS DE MONITORAMENTO REMOTO

A literatura e casos industriais recentes reforçam os efeitos que você mediu:

- CTEEP (SP): implantação de CFTV PTZ com gravação inviolável e integração à rede corporativa, permitindo checagens visuais de manobras e do estado do pátio em tempo real; o relato aponta redução de deslocamentos e suporte efetivo à operação remota, em linha com sua queda de atrasos e melhor coordenação entre times.
- Evergy (EUA): uso combinado de vídeo, termografia fixa e analítica para inspeções remotas, com diminuição substancial da frequência de inspeções presenciais e alertas automáticos para anomalias térmicas; paralelos diretos ao seu diagnóstico precoce (pontos quentes, folgas) e às validações remotas que reduziram atrasos.
- Visão computacional em seccionadoras: pesquisas demonstram reconhecimento automático do estado (aberta/fechada) com câmeras PTZ e técnicas robustas a variação de iluminação e “clutter” — compatível com a sua eliminação de erros de posicionamento após a teleassistência; estudos mais recentes estendem a robustez com IA em edge e até LiDAR para condições adversas (fumaça).

7.2 NORMAS TÉCNICAS X REQUISITOS REGULATÓRIOS

No plano técnico, a IEC 62271 102 (2018 + A1:2022) define requisitos de distância de isolamento, intertravamentos e indicação de posição para seccionadoras e chaves de terra. Sua diretriz operacional de verificação visual remota do estado final reforça a aderência ao que a IEC exige quanto à indicação/ sinalização de posição e mitigação de falhas por desalinhamento/força de operação — isto é, você agregou uma barreira procedimental/tecnológica que complementa os requisitos de produto.

No âmbito ONS/ANEEL, o Submódulo 2.7 estabelece requisitos mínimos de supervisão e controle (incluindo instalações teleassistidas), visando rastreabilidade e resposta a ocorrências — convergente com sua integração CFTV–SCADA para confirmação em tempo real. Já o Submódulo 15.6 e a REN ANEEL 864/2019 (depois consolidada pela REN 1005 REN 1005/2022) vinculam indisponibilidades/restrições a métricas e penalidades (PVI/PVRO) e trazem regra específica

para instalações assistidas remotamente quando energizadas, o que torna a redução de atrasos e de erros de manobra material para a performance regulatória das transmissoras.

7.3 BENEFÍCIOS, LIMITES E IMPLICAÇÕES PRÁTICAS

- Cobertura visual e multissensor — A verificação por imagem depende de linha de visada e da legibilidade de indicadores mecânicos; arranjos compactos, clima e oclusões podem exigir múltiplas câmeras/ópticas e sensores complementares (IR/UV/LiDAR). Guias e artigos de termografia/UV em AT destacam benefícios e limites, úteis para seu design de arquitetura mínima e para procedimentos de inspeção/validação.
- Conectividade e cibersegurança — Casos CTEEP/Evergy mostram que latência, disponibilidade e gravação inviolável são cruciais para teleassistência confiável; indisponibilidades de rede podem impactar PVI/PVRO, reforçando a necessidade de resiliência TI/OT e de trilhas de auditoria (vídeo + logs) integradas ao processo de operação e manutenção.
- Integração organizacional — A NFPA 70E e as NRs demandam treinamento, qualificação e cultura de segurança; sua evidência de ganhos depende da coreografia de tarefas (roteiros de manobra com hold points visuais, responsabilidades remotas/locais claras e contingências para perda de visada/telemetria).

7.4 CONTRIBUIÇÕES E LACUNAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Sua contribuição integra segurança ocupacional e disponibilidade regulatória em um framework operacional com evidências de campo (6 meses; múltiplas equipes), quantificando ganhos e propondo arquitetura mínima CFTV. Lacunas relevantes:

- Modelos quantitativos que vinculem indicadores visuais (vibração, folga aparente, tempo/velocidade de manobra) à probabilidade de falha em seccionadoras sob a IEC 62271-102;
- Ensaios multimodais (RGB/IR/UV/LiDAR) em clima adverso típico de pátios de AT;
- Análise custo-benefício regulatória que conecte capex/opex de teleassistência a PVI/PVRO esperados;

- Cibersegurança e certificação de fluxos de vídeo operacionais em operações teleassistidas.

Tabela 2- Mapeamento normativo-evidência-implicações (síntese)

Norma/Procedimento	Exigência/Enfoque relevante (resumo)	Evidência do estudo (seu piloto)	Implicação operacional/regulatória
IEC 62271-102 (2018+A1:2022)	Requisitos de indicação de posição, intertravamentos e comprovação de distância de isolamento para seccionadoras/AT; ajustes em procedimentos de ensaio e validação de indicação de posição	Eliminação de erros de posicionamento por dupla verificação visual remota; identificação precoce de desalinhamentos/folgas	Fortalece a conformidade operacional (além do produto), reduz eventos de manobra incompleta e retrabalho
ONS – Submódulo 2.7	Requisitos de supervisão/controle para instalações teleassistidas; critérios de operação e manutenção dos recursos de supervisão/controle	Supervisão contínua por CFTV integrado ao SCADA, com evidência visual e rastreabilidade de eventos	Aumenta rastreabilidade e capacidade de resposta; suporta auditorias e post-mortem operacionais
ONS – Submódulo 15.6	Apuração de indisponibilidades/restrições/sobrecargas; critérios e responsabilidades de agentes e ONS	-80% em atrasos e eliminação de erros de manobra, reduzindo eventos que poderiam gerar PVI/PVRO	Impacto direto sobre descontos por indisponibilidade/restrição; melhora o desempenho regulatório
ANEEL – REN 864/2019	Ajustes nos Submódulos 2.7/15.6/15.12; regra sobre instalações assistidas remotamente quando energizadas e impossibilitadas para manobra; obrigações de disponibilização de dados/indicadores	Teleassistência como barreira adicional: validações remotas diminuem cancelamentos/reprogramações e atrasos	Mitiga penalidades (PVI/PVRO) e melhora transparência de dados; reforça governança da operação
NFPA 70E (2024)	Redução da exposição a choque/arco por operações remotas, planejamento e qualificação; integração a LOTO e análise de risco	Menor permanência em área energizada e melhor coordenação CO-campo por teleassistência	Reduz risco ocupacional (choque/arco); suporta estratégias de ALARP e compatibiliza-se com NRs
Evidência setorial (CTEEP/Evergy)	CFTV/PTZ + gravação inviolável + termografia/análise → menos inspeções presenciais, melhor situational awareness e alertas precoces	Resultados compatíveis: redução de atrasos, diagnóstico preciso (pontos quentes/folgas) e exposição reduzida	Justifica escala e padronização; embasa business case (capex/opex vs. indisponibilidade)

Fonte: Autores.

Observação: recomenda-se registrar evidências visuais (vídeo/imagens), logs e condições climáticas associadas a cada manobra crítica para reforçar rastreabilidade regulatória e a confiabilidade dos indicadores de desempenho (ligação direta com 15.6/15.12).

8 CONCLUSÕES

A análise realizada evidencia que o cumprimento rigoroso das normas de segurança, tanto por empresas contratantes quanto contratadas, é fundamental para preservar a integridade física dos trabalhadores, proteger os ativos e assegurar a continuidade operacional. As experiências compartilhadas ao longo do estudo reforçam que investimentos em capacitação, treinamentos específicos e mudanças de comportamento — especialmente o fortalecimento da comunicação entre equipes — desempenham papel decisivo na mitigação de riscos e no aumento da maturidade em segurança nas organizações envolvidas em atividades de alta tensão elétrica.

Além disso, o monitoramento de chaves seccionadoras de alta tensão emerge como um avanço tecnológico estratégico para o setor elétrico.

A integração de sistemas de teleassistência demonstra potencial para reduzir falhas operativas, elevar a confiabilidade das manobras e apoiar o atendimento às exigências regulatórias, agregando maior precisão, rastreabilidade e resposta operacional às subestações.

Dessa forma, soluções de monitoramento avançado tornam-se indispensáveis para aprimorar a segurança operativa, reduzir indisponibilidades e contribuir para o crescimento sustentável e seguro da Rede Básica do SIN. O conjunto de práticas analisadas — aliado às inovações tecnológicas adotadas — consolida uma cultura organizacional orientada à prevenção, à eficiência e à excelência em engenharia e operação, fortalecendo a resiliência e a confiabilidade do sistema elétrico como um todo.

REFERÊNCIAS

- [1] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE). Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cmse>>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- [2] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 2.7 – Indicadores de Desempenho para Acompanhamento da Manutenção.
- [3] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Submódulo 15.6 – Apuração das indisponibilidades, restrições da capacidade operativa e sobrecargas.
- [4] BRASIL. Ministério do Trabalho. NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Portaria nº 3.214, 1978.
- [5] BRASIL. Ministério do Trabalho. NR-35 – Trabalho em Altura. Portaria nº 3.214, 1978.
- [6] OBSERVATÓRIO DIGITAL DE SAÚDE E SEGURANÇA NO TRABALHO. Estatísticas de acidentes elétricos e acidentes de trabalho. SmartLab/MPT/OIT.
- [7] CHEN, X. et al. Computer vision based detection and state recognition for disconnecting switch in substation automation. ActaPress, 2017. Disponível em: <<https://actapress.com>>.
- [8] NASSU, B. T. et al. Image Based State Recognition for Disconnect Switches in Electric Power Distribution Substations. In: SIBGRAPI – Conference on Graphics, Patterns and Images.
- [9] TONG, X. et al. Intelligent system for substation surveillance video analysis with edge/IoT. 2025. Disponível em: <<https://link.springer.com>>.
- [10] IEC. IEC 62271-102: High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: AC disconnectors and earthing switches. 2018. A1:2022. Disponível em: [cdn.standards.iteh.ai], [sis.se].
- [11] CTEEP. Visual, real-time monitoring system for remote operation of electrical substations – Technical Report (SIM). Disponível em: <<https://researchgate.net>>.
- [12] ABRACOPEL. Número de acidentes em 2020 dão um salto. Disponível em: <https://abracopel.org/wp-content/uploads/2020/02/Anuario_2020-Site.pdf>. Acesso em: 12 set. 2022.